

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

MAPEAMENTO DAS ÁREAS EM RISCO DE
ALAGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE PASSO FUNDO
COM BASE EM DIFERENTES PROJEÇÕES CLIMÁTICAS

Débora Comin Dal Pozzo

Passo Fundo

2023



DÉBORA COMIN DAL POZZO

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS EM RISCO DE ALAGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE
PASSO FUNDO COM BASE EM DIFERENTES PROJEÇÕES CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação da Prof.^a Dr.^a Luciana Londero Brandli.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa
Universidade de Passo Fundo (UPF-RS)

Dr.^a. Amanda Lange Salvia
Universidade de Passo Fundo (UPF-RS)

Prof.^a. Dr.^a. Simone Queiroz da Silveira Hirashima
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

PASSO FUNDO - RS

2023

D149m Dal Pozzo, Débora Comin
Mapeamento das áreas em risco de alagamentos no município de Passo Fundo com base em diferentes projeções climáticas [recurso eletrônico] / Débora Comin Dal Pozzo. – 2023.
6.9 MB ; PDF.

Orientadora: Luciana Londero Brandli.
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2023.

1. Drenagem urbana - Passo Fundo (RS). 2. Hidrologia urbana. 3. Precipitação (Meteorologia). 4. Precipitação pluvial. I. Brandli, Luciana Londero, orientadora. II. Título.

CDU: 628.221

AGRADECIMENTOS

A Universidade de Passo Fundo, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e a todos os meus professores de Mestrado, por todos os momentos de aprendizado e de crescimento profissional.

A minha orientadora Professora Dra. Luciana Londero Brandli, pelo apoio, incentivo e puxões de orelha e pela orientação nesse trabalho.

Aos meus pais e a minha irmã, pela confiança, carinho e apoio incondicional.

A minha prima Daniela por todos os momentos em que passamos estudando juntas.

Para todas as minhas amigas por entenderem minhas recusas aos seus convites para sair para ficar em casa estudando.

As minhas colegas Virginia, Pietra por termos realizado uma parceria incrível, mesmo não sendo do mesmo período.

A CAPES pelo financiamento da bolsa durante o período de mestrado.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

“O limite é aquilo que a mente cria com medo do desconhecido.”

(Diário de um Samurai)

RESUMO

O processo de urbanização causa efeitos negativos no ciclo hidrológico, diminuindo a infiltração do solo, fazendo com que o escoamento superficial ocorra de forma mais rápida e intensa, causando os alagamentos. Além disso, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) considera que as precipitações terão um aumento de 5% a 10%, para aumentos de temperatura de 0,5°C a 1°C e de 25% a 30% para aumentos de temperaturas entre 2,5°C a 3°C. A combinação do aumento das precipitações, ambientes muito impermeabilizados e projetos inadequados de infraestrutura, tornarão as cidades mais vulneráveis aos alagamentos. Para combater esses impactos negativos, faz-se necessária a utilização de estruturas de drenagem e o mapeamento das áreas em risco de alagamentos. O município de Passo Fundo, no dimensionamento de seu sistema de drenagem, utilizou a Equação de intensidade-duração e frequência proposta por Denardin e Freitas em 1982. A utilização dessa equação se tornou obsoleta, visto que o regime de precipitações não é estacionário e sua utilização pode favorecer o subdimensionamento de novas estruturas de drenagem. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi mapear as áreas suscetíveis aos alagamentos do município de Passo Fundo com base em diferentes projeções climáticas. Esse estudo propôs uma nova Equação IDF para o município, e propôs equações com base em diferentes projeções climáticas. Após, o município de Passo Fundo, foi dividido em sub-bacias menores para possibilitar a modelagem da rede e analisar seu comportamento, demonstrando quais pontos que sofrem com alagamentos e como esses alagamentos irão se comportar com o aumento das temperaturas. Após a modelagem e obtenção dos pontos que sofrem com o desastre hidrológico supracitado, foram elaborados quatro mapas, com os volumes inundados. E, frente a análise dos pontos que sofrem com os alagamentos, foram propostas medidas estruturais e não estruturais para servirem de subsídio a tomada de decisão do município, em relação a ocorrência desses alagamentos. A modelagem através do software SWMM demonstrou que a Equação de Denardin e Freitas já se tornou obsoleta, já que para a Equação da Projeção Atual as intensidades de chuva são maiores e os pontos que sofrem com os alagamentos aumentam. O mapeamento foi realizado, demonstrando em quais pontos há alagamentos, e quais são as suas áreas de concentração, possibilitando ao poder público analisar quais áreas necessitam de intervenções mais severas. Além disso, foi proposto o dimensionamento de uma bacia

de retenção que diminuiu em 64% a vazão de pico de um trecho analisado, demonstrando que esse pode ser um bom complemento para a estrutura já existente.

Palavras-chave: drenagem; alagamento; precipitação.

ABSTRACT

The increase in population in urban areas causes negative effects on the hydrological cycle, increasing soil infiltration, causing surface runoff to occur more quickly and intensely, causing flooding. In addition, the Brazilian Panel on Climate Change (PBMC) considers that precipitation will increase by 5% to 10% for temperature increases of 0.5°C to 1°C and from 25% to 30% for temperature increases between 2, 5°C to 3°C. The combination of increased rainfall, very impermeable environments and inadequate infrastructure projects will make cities more vulnerable to flooding. To combat these negative impacts, it is necessary to use drainage structures and map areas at risk of flooding. The municipality of Passo Fundo, when designing its drainage system, used the intensity-duration and frequency equation proposed by Denardin and Freitas in 1982. The use of this equation has become obsolete, since the rainfall regime is not stationary and its use may favor the undersizing of new drainage structures. Therefore, the objective of this work was to map the areas susceptible to flooding in the municipality of Passo Fundo based on different climate projections. This study proposed a new IDF Equation for the municipality, and proposed equations based on different precipitation increments proposed by the PBMC. Afterwards, the municipality of Passo was divided into smaller sub-basins to enable the modeling of the network and analyze its behavior, demonstrating which points suffer from flooding and how these flooding will behave with the increase in temperatures. After modeling and obtaining the points that suffer from the aforementioned hydrological disaster, four maps were prepared, with the flooded volumes. And, in view of the analysis of the points that suffer from flooding, structural and non-structural measures were proposed to serve as a subsidy for the decision-making of the municipality, in relation to the occurrence of these floods. Modeling using the SWMM software demonstrated that the Denardin and Freitas Equation has already become obsolete, since for the Current Projection Equation the rainfall intensities are greater and the points that suffer from flooding increase. Mapping was carried out, demonstrating which points are left with flooding, and which are their areas of concentration, allowing the public power to analyze which areas need more severe interventions. In addition, the design of a detention basin was proposed, which reduced the peak flow of an analyzed section by 64%, demonstrating that this can be a good complement to the existing structure.

Keywords: drainage; flooding; precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais eventos sobre mudanças climáticas ocorridos no mundo.....	23
Figura 2 - Principais eventos sobre mudanças climáticas ocorridos no mundo.....	24
Figura 3 - Objetivos do desenvolvimento sustentável propostos pela Agenda 2030 da ONU.....	26
Figura 4 - Projeção de precipitação: variação da precipitação anual (%) em relação ao período de referência (1981-2010) de acordo com o Global Warming Level 1,5 °C - GWL1,5, GWL2 e GWL4 de cada modelo.....	27
Figura 5 - Projeções de extremos climáticos: variação da precipitação máxima acumulada em 5 dias - RX5day (%) em relação ao período de referência (1981-2010) para o GWL1,5, GWL2 e GWL4 no verão (a) e inverno (b) para cada experimento realizado.....	28
Figura 6 - Esquema do ciclo hidrológico.....	29
Figura 7 - Elementos de uma bacia hidrográfica.....	30
Figura 8 - Esquema de um hidrograma de projeto.....	32
Figura 9 - Diferença entre enchentes, inundações e alagamentos.....	34
Figura 10 - Esquema do comportamento das cidades após a urbanização acelerada.....	35
Figura 11 - Efeitos da urbanização.....	36
Figura 12 - Comparação entre o hidrograma de uma bacia antes e depois da urbanização.....	37
Figura 13 - Esquema ilustrativo do método de Santa Bárbara.....	40
Figura 14 - Principais elementos da drenagem urbana convencional.....	43
Figura 15 - Localização geográfica do município de Passo Fundo.....	51
Figura 16 - Obstrução das bocas de lobo no município.....	52
Figura 17 - Ocorrência de alagamentos em Passo Fundo em 28/05/2022.....	53
Figura 18 - Localização dos pontos suscetíveis a alagamentos no município de Passo Fundo.....	54
Figura 19 - Fluxograma de trabalho.....	56
Figura 20 – Precipitações máximas para os anos de 1950 a 1970.....	70
Figura 21 – Precipitações máximas para os anos de 1971 e 1992.....	71
Figura 22 – Precipitações máximas para os anos de 1993 a 2019.....	71
Figura 23 – Curva IDF para a Projeção Atual	75

Figura 24 - Curva IDF para a Projeção de Aumento de 5% nas precipitações..	76
Figura 25 - Curva IDF para a Projeção de Aumento de 10% nas precipitações.....	76
Figura 26 - Curva IDF para a Projeção de Aumento de 25% nas precipitações.....	77
Figura 27 - Curva IDF para a Projeção de Aumento de 30% nas precipitações.....	77
Figura 28 – Modelo digital de elevação do município de Passo Fundo.....	79
Figura 29 – Mapa hipsométrico e hidrografia do município de Passo Fundo.....	80
Figura 30 – Localização das sub-bacias utilizadas na modelagem do Software SWMM.....	81
Figura 31 - Precipitações acumuladas por Equação IDF.....	83
Figura 32 – Total de pontos levantados pelo software.....	85
Figura 33 - Volumes de alagamento nos pontos para a Equação de Denardin.....	86
Figura 34 - Volumes de alagamento nos pontos para a Projeção Atual.....	86
Figura 35 - Volumes de alagamento nos pontos para um aumento de 10% nas precipitações.....	87
Figura 36 - Volumes de alagamento nos pontos para um aumento de 30% nas precipitações.....	87
Figura 37 - Gráfico Box-Plot demonstrando o comportamento das vazões.....	88
Figura 38 - Gráfico Box Plot demonstrando o comportamento do volume de alagamentos.....	89
Figura 39 - Zoneamento das sub-bacias (Denardin).....	91
Figura 40 - Zoneamento das sub-bacias (Projeção atual).....	92
Figura 41 - Zoneamento das sub-bacias (Projeção de aumento de 10% nas precipitações).....	92
Figura 42 - Zoneamento das sub-bacias (Proeção de aumento de 30% nas precipitações).....	93
Figura 43 -Proposta para a localização da Bacia de Detenção.....	94
Figura 44 - Hidrograma para alguns dos trechos analisados, antes da utilização das bacias de detenção.....	95
Figura 45 - Hidrograma para alguns trechos analisados, após a utilização da bacia de detenção.....	96
Figura 46 - Comportamento da tubulação antes da utilização da bacia de detenção.....	97
Figura 47 – Comportamento da tubulação após a utilização da bacia de detenção..	97
Figura 48 - Proposta de soluções para os alagamentos para cada zoneamento...	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de escoamento superficial por características de ocupação da bacia	38
Tabela 2 - Valores de escoamento superficial conforme o tipo de superfície utilizada	39
Tabela 3 - Coeficientes de desagregação de chuvas diárias	59
Tabela 5 - Valores para os parâmetros de infiltração Green-Ampt conforme o tipo de solo da região	61
Tabela 4 - Coeficiente n de Manning - escoamento à superfície livre	63
Tabela 6 - Precipitações máximas diárias entre 1950 e 2019.	68
Tabela 7 - Coeficientes das equações de intensidade, duração e frequência	72
Tabela 8 – Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do Erro Padrão de Estimativa	72
Tabela 9 – Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Denardin	73
Tabela 10 - Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção Atual (PA) ..	73
Tabela 11 - Intensidades de chuva (mm) para Equação de Projeção para um aumento de 5% nas precipitações	74
Tabela 12 - Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção para um aumento de 10% nas precipitações.	74
Tabela 13 Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção para um aumento de 25% nas precipitações.	74
Tabela 14 Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção para um aumento de 30% nas precipitações.	75
Tabela 15 - Intensidades de chuva para diferentes tempos de retorno para uma duração de chuva de 5 minutos.	78
Tabela 16 - Sub-bacias da bacia do Uruguai	81
Tabela 17 - Dados de entrada das sub-bacias no software SWMM,	82
Tabela 18 - Total de pontos alagados na rede.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferença entre os conceitos relacionados ao aquecimento global.....	22
Quadro 2 - Valores usuais de tempo de retorno para obras de microdrenagem e macrodrenagem.....	31
Quadro 3 - Diferentes tipos de medidas estruturais extensivas e intensivas	44
Quadro 4 - Alguns exemplos de medidas não estruturais utilizadas.....	45
Quadro 5 - Medidas estruturais utilizadas na drenagem urbana sustentável.....	48
Quadro 6 - Proposta de medidas não estruturais para adaptação e mitigação dos alagamentos	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BMPs	Best Management Practices
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CO ₂	Gás carbônico
COP-26	26ª Conferência das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas
EM-DAT	Emergency Events Database
GEEs	Gases do efeito estufa
IDF	Intensidade, duração e frequência
INPE	Instituto nacional de pesquisas espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LID	Low Impact Development
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PDDrU	Plano de drenagem urbana
PNAD	Pesquisa nacional por amostra de domicílios
SWMM	Storm Water Management Model
TVA	Trama Verde Azul
WSDU	Water Sensitive Urban Design

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	<i>Objetivo Principal</i>	19
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	21
2.2	COP 26	25
2.3	OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	25
2.4	RELATÓRIO DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO PAÍS	26
2.5	CICLO HIDROLÓGICO	29
2.6	DESASTRES HIDROLÓGICOS	34
2.7	MODELOS HIDROLÓGICOS	37
2.7.1	<i>Método racional para estimativa de vazões máximas</i>	38
2.7.2	<i>Método de Chicago</i>	39
2.7.3	<i>Método de Santa Bárbara</i>	40
2.7.4	<i>Storm Water management model</i>	40
2.8	ZONEAMENTO DE ÁREAS INUNDAÇÕES	41
2.9	DRENAGEM URBANA CONVENCIONAL	42
2.9.1	<i>Medidas Estruturais</i>	44
2.9.2	<i>Medidas não estruturais</i>	45
2.10	DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL	46
3	METODOLOGIA	51
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	51
3.2	DELINEAMENTO DA PESQUISA	55
3.2.1	<i>Determinação das equações IDF</i>	57
3.2.2	<i>Verificação da rede de drenagem no software SWMM</i>	61
3.2.3	<i>Propostas de soluções para os problemas no sistema de drenagem</i> ...	65
4	RESULTADOS	68
4.1	EQUAÇÕES IDF	68

4.2	RESULTADOS DA MODELAGEM DOS SISTEMAS DE DRENAGEM.....	78
4.3	PROPOSTAS PARA SOLUÇÃO DOS EVENTOS DE ALAGAMENTOS.....	89
4.3.1	<i>Proposta de soluções para os alagamentos – Medidas nãoestruturais</i>	89
4.3.2	<i>Soluções para os alagamentos – Medidas estruturais</i>	93
5	CONCLUSÕES	101
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

Segundo o relatório Perspectivas Mundiais de População 2019: Destaques, publicado pela Divisão de População do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais da Organização das Nações Unidas - ONU, a população mundial deve crescer em 2 bilhões nos próximos 30 anos, passando de 7,7 bilhões de pessoas para 9,7 bilhões em 2050. O aumento exacerbado da população é uma das principais causas dos problemas em infraestrutura (FREITAS et al., 2014).

A urbanização afeta o ciclo hidrológico através da impermeabilização do solo, o que faz com que o escoamento superficial ocorra de forma mais rápida e intensa, dessa forma ocorrendo alagamentos nos sistemas de drenagem (WARD et al., 2020). Estima-se, em todo o mundo, que esse desastre hidrológico tenha afetado 2 bilhões e 1,1 bilhão de pessoas, respectivamente no período de 1995 a 2015 (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). Além disso, estudos propõem que as mudanças climáticas previstas alterarão significativamente o ciclo hidrológico, fazendo com que determinadas regiões tenham secas mais áridas e outras sofram com a precipitação mais intensa. A combinação de mudanças futuras nas chuvas, uso da terra e projetos de drenagem inadequados farão com que os grandes centros urbanos se tornem cada vez mais vulneráveis às chuvas intensas e aos alagamentos (MILLER; HUTCHINS, 2017).

Estudos de modelagem mostram que a urbanização e o aumento da intensidade das chuvas aumentarão os volumes de transbordamento de drenagem, resultando em uma elevação significativa, entre 10% e 20% (MILLER; HUTCHINS, 2017). Para combater os impactos negativos causados pela alteração do ciclo hidrológico são necessárias as estruturas de drenagem. O sistema de drenagem urbana tradicional é aquele composto pela microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem é responsável pela remoção rápida do escoamento superficial, transferindo as águas pluviais das sarjetas às tubulações de concreto da rede de galerias (THOMAZ, 2002). Já a macrodrenagem é a composta por canais naturais e artificiais, galerias de grandes dimensões e estruturas auxiliares que objetivam melhorar o escoamento da água de forma a diminuir os problemas com erosão, assoreamento e inundações ao longo dos talwegues (THOMAZ, 2002).

Geralmente, os desastres hidrológicos estão associados às falhas na infraestrutura de drenagem, desde um projeto inadequado, subdimensionamento do

sistema ou até mesmo ausências na manutenção (SILVA JUNIOR et al., 2020). Para o dimensionamento dos sistemas de drenagem de uma cidade, ainda não são considerados os efeitos das mudanças climáticas, esses sistemas têm sido tradicionalmente concebidos utilizando-se observações históricas e assumindo-se condições climáticas estacionárias, o que favorece o subdimensionamento (RAMOS, 2010). Outrossim, é necessário que se avaliem medidas para reduzir os impactos desse desastre recorrente, que traz reflexos negativos para as condições de vida da população e, também, degradação do meio ambiente.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os alagamentos e as inundações se destacam por ser a catástrofe mais frequente e devastadora do mundo (SANYAL; LU, 2004). Segundo dados da ONU, esses desastres hidrológicos afetaram negativamente 2,3 bilhões de pessoas nos últimos 20 anos, o que representa 56% de todos os afetados negativamente pelos desastres relacionados ao clima (ANDRIKOPOULOU et al., 2021). O número de pessoas, no mundo, que serão afetadas por essas catástrofes pode aumentar de 39 milhões de pessoas afetadas por ano para 134 milhões até 2050 e mais da metade do desse aumento se deve às alterações causadas pelas mudanças climáticas como também, pelo crescimento populacional (WARD; WINSEMIUS, 2018).

Na América do Sul, no período de 1995 e 2004, por exemplo, 560.000 pessoas foram afetadas por inundações e alagamentos, na década seguinte (2005-2014) esse número aumentou para 2,2 milhões de pessoas (JENNINGS et al., 2015). Segundo o banco de dados de eventos de emergência (EM-DAT sigla em inglês para Emergency Events Database) esses desastres hidrológicos são o segundo desastre relacionado ao clima mais custoso em termos de ativos registrados (US\$ 662 milhões) (JENNINGS et al., 2015).

Quando se trata do Rio Grande do Sul, os alagamentos representam um dos principais problemas ambientais (SAITO et al., 2011, WOLLMANN, 2014), sendo que nas últimas décadas houve um aumento expressivo (TUCCI, 2003, GUASSELLI et al., 2016). As mudanças climáticas e o aumento da urbanização causarão impactos ao ciclo hidrológico, o que ocasionará um aumento dos desastres hidrológicos. O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) considera que a região Sul do Brasil terá um aumento relativamente baixo na sua temperatura, ficando entre 0,5 °C e 1°C até

2040, mas mesmo com esse pequeno incremento poderá sofrer com um aumento de 5% a 10% no volume das precipitações e com clima entre 2,5°C e 3°C mais quentes um ambiente 25% a 30% mais chuvoso (PBMC, 2016) O crescimento desordenado e a consequente ocupação de áreas irregulares ocasionaram uma série de impactos na cidade de Passo Fundo (BARBISAN et al., 2009).

O mapeamento das áreas suscetíveis aos alagamentos pode minimizar ou até mesmo evitar os danos causados pelo desastre hidrológico supracitado (MENGUE et al., 2016). Para as projeções de áreas alagáveis em modelos hidrológicos são necessários cálculos que utilizam a equação de intensidade, duração e frequência (IDF). A equação IDF constantemente utilizada em estudos hidrológicos em Passo Fundo foi proposta por Denardin e Freitas em 1982. A utilização dessa equação pode ter se tornado obsoleta já que o regime de chuvas considerado na sua concepção segue o intervalo de precipitações de 1943 a 1982, o que não considera os efeitos na precipitação oriundos das mudanças climáticas.

Visando a concepção de novas equações IDF com base nas futuras projeções climáticas, o presente projeto de pesquisa visa responder a seguinte questão: **Quais são as áreas do município de Passo Fundo que poderão sofrer com alagamentos frequentes e de que forma se pode tornar a estrutura de drenagem dessas áreas mais resiliente a esses impactos?**

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o aumento das áreas impermeáveis a infiltração nas águas pluviais se torna mais difícil e o sistema hidrológico fica desequilibrado. Esse desequilíbrio, aliado a falta de planejamento, causa impactos como enchentes, inundações, enxurradas, alagamentos e erosões no solo. As cheias urbanas são desastres hidrológicos que são um grande desafio às cidades, já que impactam diversos setores urbanos, como saúde pública, saneamento, transporte e habitação (FREITAS et al., 2014). De tal maneira, os sistemas de drenagem são soluções para esses desastres.

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, a drenagem urbana é um grande problema, isto porque nesses países a urbanização ainda está ocorrendo de maneira forte e rápida (HOLTZ, 2011). Devido as mudanças climáticas que vem trazendo impactos significativos no planeta, existe uma preocupação cada vez maior com o desenvolvimento sustentável e medidas de mitigação dos impactos provocados

pelas ações antrópicas. Dessa forma, buscar soluções inovadoras para manter o equilíbrio e reduzir as agressões ao meio ambiente é extremamente necessário (HOLTZ, 2011).

Um exemplo da utilização de dispositivos de drenagem urbana sustentável para aumento da resiliência das estruturas foi proposto em um estudo realizado por Suárez-Inclán et al. (2022). No estudo, os autores analisaram a necessidade de implantação da Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SUDS) na cidade de Gijón, na Espanha. Os resultados do estudo demonstraram que a introdução da prática reduz o volume do escoamento superficial e aumenta sua qualidade, além de proporcionar benefícios funcionais, ambientais e sociais. No caso do estudo proposto por Guptha et al. (2022), para a cidade de Gurugram na Índia, através de uma modelagem realizada através do software SWMM, foi exposto que as mudanças climáticas são uma ameaça severa aos sistemas de drenagem, mas com a utilização dos SUDS, foi possível tornar a cidade mais resiliente, já que esse tipo de estrutura atrasa o tempo para o pico de vazão e armazena volumes adicionais de água em bacias hidrográficas e teve resultados satisfatórios para implementação das SUDS para reduzir a frequência de inundações urbanas.

O município de Passo Fundo, segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico (2013), possui 9 pontos com ocorrência de alagamentos. Os alagamentos podem piorar conforme a ocorrência das mudanças climática. Esse desastre hidrológico é relatado como o problema em escopos de projetos realizados pelo município (PREFEITURA MUNICIPAL DE PASSO FUNDO, 2013). A equação de intensidade, duração e frequência utilizada no dimensionamento dos seus sistemas de drenagem se torna obsoleta, visto que o regime de precipitações tem alterações durante o tempo, o que corrobora com o dimensionamento inadequado das estruturas municipais. O ODS número 11, da Agenda 2030, traz metas relacionadas às cidades e comunidades sustentáveis. A meta 11.3 propõem até 2030 aumentar a urbanização inclusiva e sustentável e a 11.5 estabelece a redução do número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas (NAÇÕES UNIDAS, 2015). E, em relação às mudanças climáticas o ODS 13 traz metas de combate às alterações climáticas e sua principal meta é de reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países.

O município, hoje, não possui estudos que embasem tomadas de decisão relacionadas às áreas de risco aos alagamentos, como medidas de controle e também possui deficiências na sua estrutura de macrodrenagem (DIDÓ, 2013), a escassez desses dados faz com que o município esteja atrasado em relação às ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas e não contemple os ODS 11 e 13. Assim, o presente estudo visa preencher essa lacuna, fornecendo informações para tomada de medidas no contexto atual e nos contextos futuros. Essas informações, proporcionarão dados para elaborar planos, programas, estudo de medidas e alternativas para combate ao desastre hidrológico recorrente.

Diante disso, esse estudo se baseia na concepção de elementos necessários para o dimensionamento de projetos hidráulicos com variáveis adequadas aos aumentos de precipitação e a análise da rede de drenagem para essas futuras projeções. Dessa forma, propõe-se a criação do mapeamento das áreas suscetíveis aos alagamentos no município de Passo Fundo. Assim, a cidade poderá se adequar a essas alterações com políticas e diretrizes que permitam com que seu sistema de drenagem se torne mais resiliente na adaptação aos efeitos adversos ocasionados pelas mudanças climáticas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Principal

Mapear as áreas suscetíveis a alagamentos, em uma sub-bacia do município de Passo Fundo com base em diferentes projeções climáticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Obter a equação de intensidade, duração e frequência com os dados de precipitação atuais para o município de Passo Fundo;
- b) Obter a equação de intensidade, duração e frequência para um aumento de 5%, 10%, 25% e 30% no regime de chuvas;
- c) Modelar a rede de drenagem do município no Storm Water Management Model (SWMM) para verificar suas condições atuais;

- d) Modelar a rede de drenagem no SWMM para as condições futuras;
- e) Elaborar o mapeamento das áreas suscetíveis aos alagamentos com base nas projeções climáticas futuras;
- f) Propor combinações de drenagem urbana sustentável para servir de complemento ao sistema atual tornando-o mais resiliente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Estima-se que as atividades humanas tenham causado cerca de 1°C de aquecimento global acima dos níveis pré-industriais e que é provável que o aquecimento global atinja 1,5°C entre 2030 e 2050 (IPCC, 2014). O aquecimento do globo terrestre persistirá por séculos e milênios e causará mudanças climáticas, como o aumento do nível dos oceanos, aumento de precipitações ou das secas, sendo que algumas dessas alterações serão duradouras ou até mesmo irreversíveis. Segundo o relatório intergovernamental sobre mudanças climáticas – (IPCC sigla em inglês para Intergovernmental Panel on Climate Change), (2014), alguns modelos climáticos projetam, com alto nível de confiança, mudanças entre o clima atual e o clima aquecido em 1,5°C. Tais diferenças incluem aumentos na temperatura média na maioria das regiões terrestres e oceânicas, acidificação dos oceanos, extremos de calor na maioria das regiões habitadas, na ocorrência de chuvas intensas em diversas regiões e na probabilidade de seca e déficits de chuva em algumas regiões (IPCC, 2014).

Para que se entenda como as mudanças climáticas ocorrem, é necessário que se entenda a cadeia de eventos: o efeito estufa leva ao aquecimento global que leva as mudanças climáticas, a diferenciação dos conceitos pode ser encontrada no Quadro 1. O sistema climático da Terra é composto por componentes extremamente complexos, a atmosfera, hidrosfera, criosfera, a superfície terrestre e a biosfera (TILIO NETO, 2010). A radiação solar é interceptada pela Terra, uma parte dela é refletida de volta para o espaço e o restante é absorvido pelos cinco componentes do sistema climático. A Terra também emite alguma radiação para o espaço o que ajuda a compensar a radiação recebida mantendo a temperatura do planeta dentro de intervalos limites. Quando esse equilíbrio não é atingido pode-se esperar alterações climáticas. Mas, alguns outros fatores também podem causar desequilíbrio entre a radiação emitida e recebida, como fenômenos naturais ou antropogênicos como a queima de combustíveis fósseis, desmatamentos, queimadas e atividades industriais (TILIO NETO, 2010).

Quadro 1 - Diferença entre os conceitos relacionados ao aquecimento global

Efeito Estufa	Se refere ao aumento da concentração de determinados gases nas atmosferas – os chamados gases do efeito estufa (GEEs). Altas concentrações de GEEs fazem com que a temperatura global se eleve.
Aquecimento global	Elevação da temperatura média da Terra. Alguma de suas causas possíveis são o efeito estufa e aumento da atividade solar.
Mudanças climáticas	São alterações no sistema climático terrestre, devido ao aquecimento global, alterações na circulação oceânica, entre outros.

Fonte: (TILIO NETO, 2010), adaptado pela autora

Cada vez mais pesquisas científicas corroboram com a hipóteses de que o sistema climático vem sofrendo mudanças causadas pelo aquecimento global, variações climáticas tem sido debate a mais de 40 anos. No século passado já surgiam as primeiras evidências sobre as consequências do aumento de gás carbônico na atmosfera. O cientista Jean-Baptiste Fourier, em 1827, foi um dos primeiros a identificar os efeitos decorrentes dos gases do efeito estufa (GEE). Ele demonstrou que os efeitos ocorridos dentro de uma caixa de vidro, chamada de estufa, era similar ao que acontecia na atmosfera. Mais tarde, em 1860, John Tyndall mediu a absorção da radiação infravermelha pelo CO₂ e pelo vapor d'água e sugeriu que as eras de gelo poderiam estar associadas a um declínio dos GEE.

Baseados nos estudos de Tyndall e Samuel P. Langley, o químico Svante August Arrhenius utilizou um modelo de balanço de energia para calcular a mudança de temperatura quando houvesse um aumento de gás carbônico na atmosfera. A partir desse estudo, ele demonstrou que o dobro de CO₂ elevaria a temperatura global em 3 ou 3,5°C e a redução do mesmo valor causaria uma diminuição de mesma magnitude (CORTESE; NATALINI, 2014).

O trabalho de Arrhenius, embora com todas as limitações que existiam na época de estudo, proporcionou informações que são utilizadas até hoje. A conclusão do trabalho do químico foi: “se a quantidade de ácido carbônico aumentar em uma progressão geométrica, o aumento da temperatura crescerá próximo a uma progressão aritmética” (ARRHENIUS, 1896), essa conclusão corresponde ao que se

é observado nos dias atuais (CORTESE; NATALINI, 2014). Ainda segundo os autores, as primeiras preocupações com as mudanças climáticas foi em torno de 1957, que indicou que o aumento de CO₂ na atmosfera está relacionada a atividades antropogênicas e que pode acarretar em consequências gerais no clima. Após isso, em 1980, através do Relatório Brundtland – Nosso Futuro Comum (1987), começaram a surgir os primeiros estudos de impacto. Os principais eventos que sucederam são descritos na Figura 1 e Figura 2

Figura 1 - Principais eventos sobre mudanças climáticas ocorridos no mundo



Fonte: elaborado pela autora (2021).

Figura 2 - Principais eventos sobre mudanças climáticas ocorridos no mundo



Fonte: elaborado pela autora (2021).

2.2 COP 26 E COP 27

A 26ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, também chamada de COP-26 foi realizada no ano de 2021 em Glasgow, Escócia. No evento, cerca de 200 países participaram com o intuito de adotar o Pacto Climático com a finalidade de reduzir as emissões de carbono (ARORA; MISHRA, 2021).

O acordo assinado inclui, pela primeira vez na história, uma referência aos combustíveis fósseis e seu papel na crise do clima. A COP 26 concentrou seus esforços em atividades relacionadas à transição para uma energia limpa e a necessidade de financiamento para mitigação e adaptação em países em desenvolvimento (SARPONG *et al.*, 2023). Porém, segundo a avaliação de especialistas e organizações da sociedade civil, o acordo fechado é pouco ambicioso diante da urgência de conter o aquecimento global e adia, mais uma vez, a solução para o clima.

Já a 27ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas foi realizada no ano de 2022, na cidade de Sharm El-Sheikh, no Egito. Dentre os objetivos estava a implementação do Pacto Climático de Glasgow, que tem como exigência revisão das metas de redução das emissões de carbono que devem ser cumpridas até 2030 (PINTO, 2022). O evento resultou na criação de um fundo para ajudar os países pobres que sofrem com os desastres causados pelas mudanças climáticas, que tem como objetivo fornecer assistência aos países em desenvolvimento, já que estes estão mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas (PINTO, 2022).

2.3 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Composta por 17 objetivos do desenvolvimento sustentável e 169 metas a serem alcançadas até o ano de 2030 a Agenda 2030 foi acordada pela Assembleia Geral da ONU em setembro de 2015 (AHLERT; CAPPONI, 2019). Os objetivos do desenvolvimento sustentável das Nações Unidas (ODS) são um plano para um futuro próspero, sustentável e equitativo para a humanidade (Nações Unidas, 2015). Os ODS consistem em um plano de ação para o planeta, as pessoas e a prosperidade formulado para mudar o mundo para um mundo mais sustentável e resiliente,

integrando as dimensões econômica, social e ambiental (Nações Unidas, 2015). Os objetivos da Agenda 2030 estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Objetivos do desenvolvimento sustentável propostos pela Agenda 2030 da ONU



Fonte: Nações Unidas (2015).

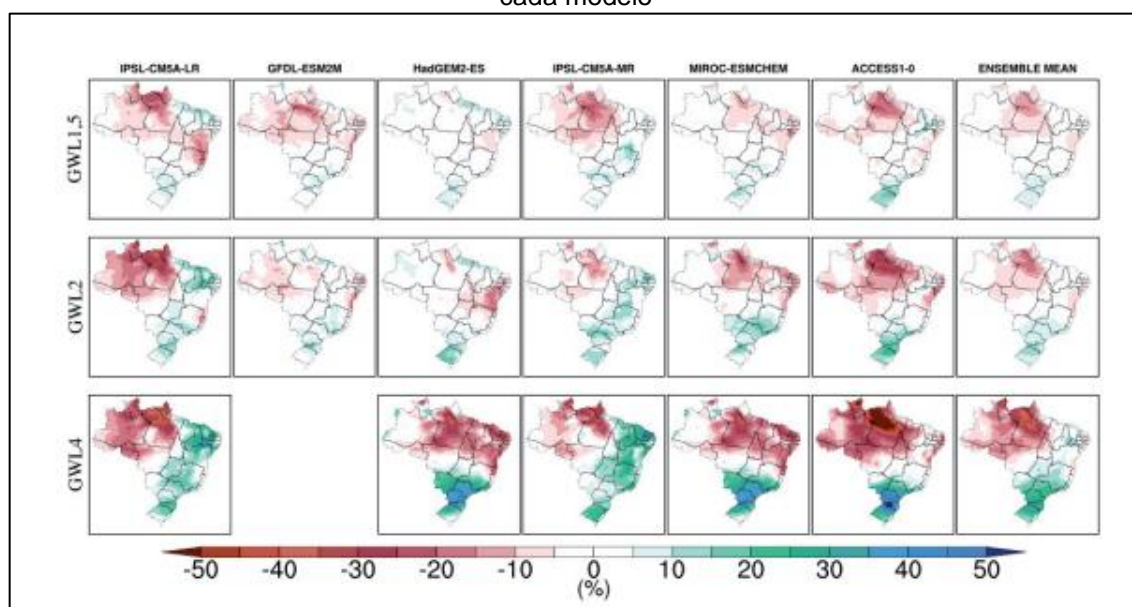
O presente projeto de pesquisa contempla o ODS 11 - Cidades e comunidades sustentáveis, indo ao encontro da meta 11.3 de até 2030 aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, a meta 11.5 de até 2030, reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas. E também, com o ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima, com a meta 13.1 de reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países.

2.4 RELATÓRIO DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO PAÍS

Um estudo foi realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para analisar como as mudanças climáticas estão ocorrendo no Brasil para um aumento de 1,5°C, 2°C e 4°C na temperatura em relação à média do período de 1981 a 2010 (clima atual). Foram demonstrados valores de aumento de precipitação, média da temperatura mínima anual, média anual de temperatura máxima, projeções de dias secos consecutivos, variação da precipitação máxima acumulada em 5 dias e aumento de dias quentes, comparando os valores de 7 modelos diferentes.

Segundo o INPE (2020), tratando-se da precipitação, o estudo identificou que os padrões de mudanças são similares, conforme Figura 4, divergindo somente em magnitude à medida que se aumenta o nível de aquecimento. Os modelos previram uma redução entre 15% a 30% em grande parte da Amazônia. Na região Sul e no sul do Sudeste todos os modelos previram aumentos, sendo que para um aumento de temperatura de 4,5 °C, haveria um incremento de 25% na precipitação anual.

Figura 4 - Projeção de precipitação: variação da precipitação anual (%) em relação ao período de referência (1981-2010) de acordo com o Global Warming Level 1,5 °C - GWL1,5, GWL2 e GWL4 de cada modelo

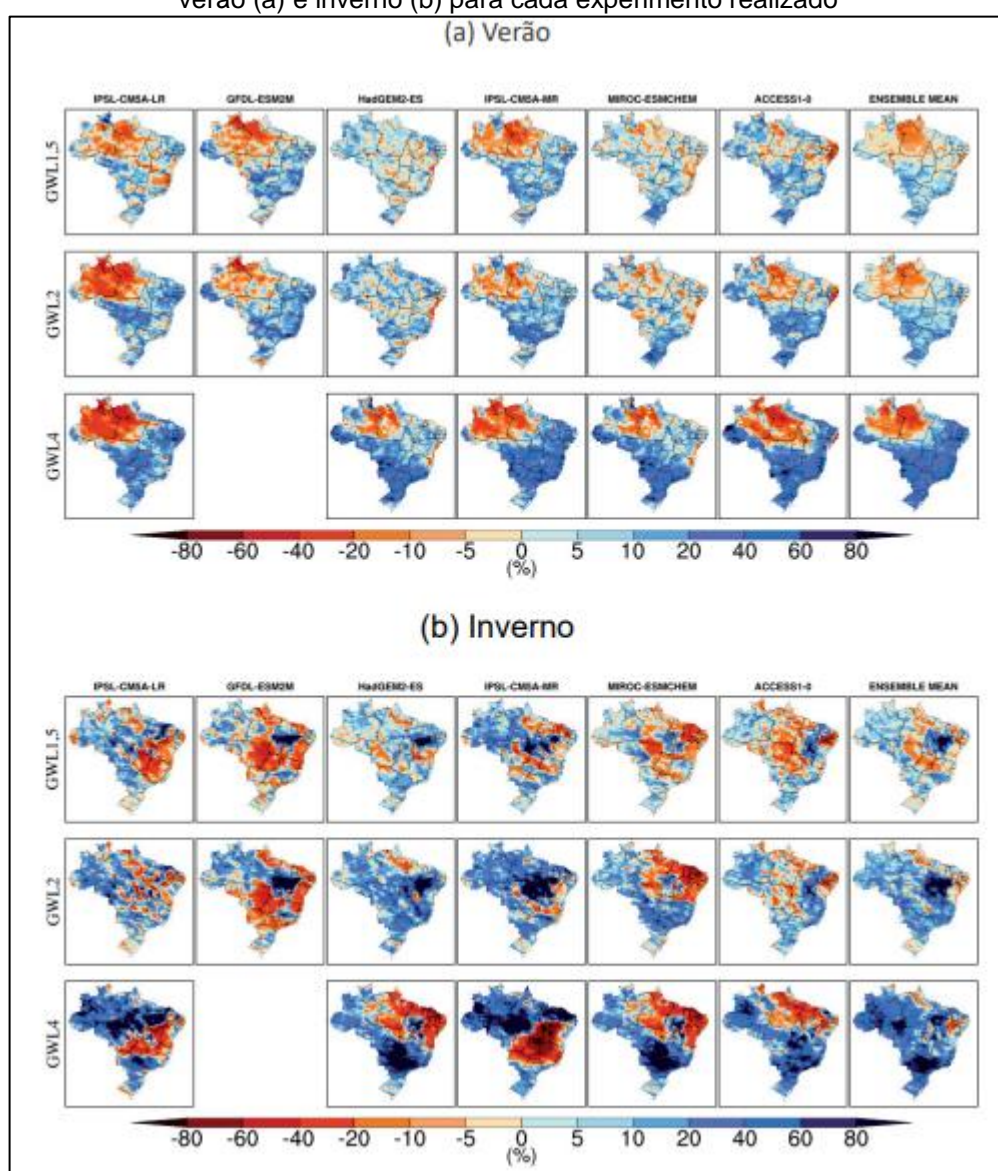


Fonte: INPE (2020).

Na Figura 5, o Instituto demonstra como os máximos das precipitações serão distribuídas. Enquanto o Amazonas e o Pará demonstram uma relativa redução no percentual de precipitação acumulado durante o verão, os demais estados indicam aumentos significativos. Já no inverno, as Regiões Sudeste e Sul tem predominância de um aumento no percentual na maioria dos modelos analisados, indicando que

essas regiões podem apresentar maior suscetibilidade em sofrer com enchentes, inundações e alagamentos (DOS SANTOS et al., 2020).

Figura 5 - Projeções de extremos climáticos: variação da precipitação máxima acumulada em 5 dias - RX5day (%) em relação ao período de referência (1981-2010) para o GWL1,5, GWL2 e GWL4 no verão (a) e inverno (b) para cada experimento realizado



Fonte: INPE (2020).

2.5 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada entre a Terra e a atmosfera com a participação essencial da radiação solar. Uma parte do ciclo é constituída pela circulação da água na própria superfície terrestre. O ciclo hidrológico se inicia a partir do vapor d'água que se condensa formando micro gotículas de água, que se mantêm no ar formando as nuvens, e, que posteriormente precipitam para a superfície terrestre (SILVEIRA, 2001). O esquema do ciclo hidrológico pode ser analisado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema do ciclo hidrológico



Fonte: Braga et al. (2010).

Na fase terrestre, o elemento mais importante a ser estudado no ciclo hidrológico são as bacias hidrográficas. Uma bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água precipitada que converge para o exutório. Ela é formada por vertentes e uma rede de drenagem composta por cursos d'água que confluem até o exutório (SILVEIRA, 2001). O esquema das bacias hidrográficas pode ser encontrado na

Figura 7. Estudar o comportamento da bacia é muito importante porque evita problemas ambientais. A presença de vegetação nas bacias permite que o ciclo hidrológico

ocorra de forma adequada e completa e nos centros urbanos, por falta de vegetação, o ciclo não se completa de forma perfeita.

Figura 7 - Elementos de uma bacia hidrográfica



Fonte: França (2019)

Relacionando o ciclo hidrológico, bacia hidrográfica e sistemas de drenagem existem quatro elementos essenciais a serem estudados: a precipitação, a infiltração,

a evapotranspiração e o escoamento superficial. Toda a água que provem da atmosfera e atinge a terra é entendida como precipitação, ela pode ser encontrada em diferentes formas: neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve. O controle da intensidade de precipitação é importante para o controle de inundação e a erosão do solo, sendo que a chuva é o tipo de precipitação mais importante, já que pode gerar escoamento (BERTONI; TUCCI, 2001).

As precipitações máximas são a ocorrência extrema, com duração e distribuição críticas para uma bacia. Essas precipitações são retratadas pontualmente pelas curvas intensidade, duração e frequência (IDF). As curvas IDF relacionam a intensidade e a duração das chuvas, segundo o Plano de drenagem urbana do município de Porto Alegre (PDDrU) (PORTO ALEGRE, 2002):

“As precipitações de projeto são normalmente determinadas a partir de relações intensidade-duração-frequência (curvas IDF) da bacia contribuinte. Expressas sob formas de tabelas ou equações, as curvas IDF fornecem a intensidade da precipitação para qualquer duração e período de retorno. Pode-se obter uma lâmina ou altura de precipitação, multiplicando-se a intensidade dada pela IDP para sua correspondente duração”.

Quanto mais intensa a precipitação, menor será a duração de chuva. Em se tratando de projetos de obras hidráulicas é essencial o conhecimento da intensidade, duração e frequência das precipitações máximas (BERTONI; TUCCI, 2001), já que, “a precipitação é o principal dado hidrológico de entrada utilizado para o cálculo das vazões de projeto das obras de drenagem pluvial (PORTO ALEGRE, 2002)”.

Como um complemento para o dimensionamento de projetos de drenagem, existe o período de retorno. O período de retorno, recorrência, ou tempo de retorno identifica qual será o risco adotado no projeto, sendo que esse tempo, é o inverso da probabilidade de um evento hidrológico ser igualado ou ultrapassado. Exemplificando, quando se utiliza um tempo de retorno de 10 anos, está se admitindo para critérios de projetos, que esses eventos geradores de prejuízo irão ocorrer uma vez a cada 10 anos (ROMEIRO, 2012). Alguns valores utilizados em obras de hidráulicos estão dispostos no Quadro 2.

Quadro 2 - Valores usuais de tempo de retorno para obras de microdrenagem e macrodrenagem

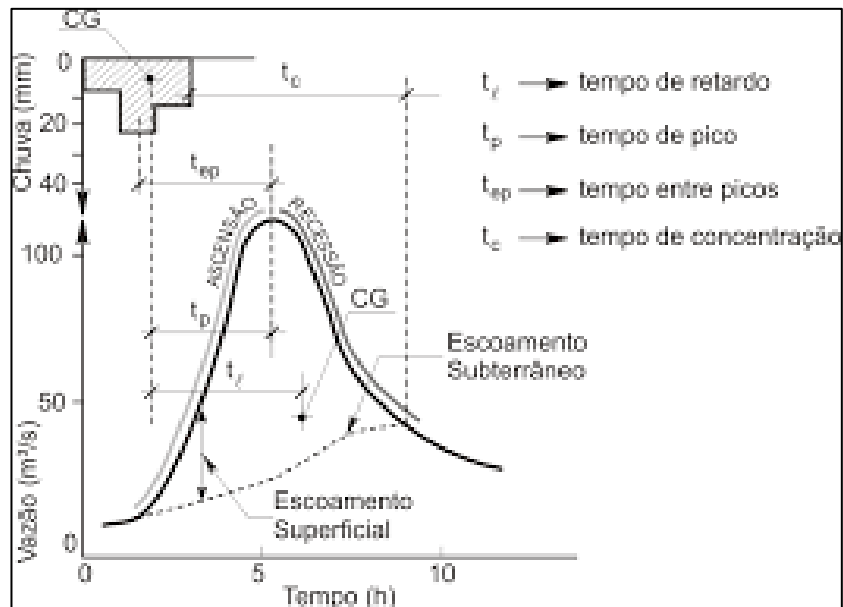
SISTEMA	CARACTERÍSTICA	INTERVALO	VALOR FREQUENTE
Microdrenagem	Residencial	2-5	2
	Comercial	2-5	5
	Áreas de prédios públicos	2-5	5
	Aeroportos	5-10	5
	Áreas comerciais e avenidas	5-10	10
Macro-drenagem		10-25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5-100	100

Fonte: TUCCI, 2008

A partir das curvas IDF é possível obter o tempo de duração da chuva. Para isso, uma das formas utilizadas é o método dos blocos alternados. Esse método permite uma melhor distribuição da precipitação ao longo do tempo para identificar em qual momento a precipitação se torna crítica (TONI, 2013), e, a partir desse método é gerado um hidrograma unitário. Através do método dos blocos alternados, juntamente com a aproximação da precipitação pelo método do coeficiente Curva Número (CN) (TONI, 2013), é possível transformar precipitação em vazão.

A água proveniente da precipitação pode ser infiltrada no solo, escoada ou evapotranspirada. A infiltração é a passagem da água da superfície para o interior do solo. Ela depende das águas disponíveis para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2001). Quando a água não consegue infiltrar ela pode ficar retida na superfície e escoar. O escoamento é representado quantitativamente pela vazão, profundidade e velocidade. Para demonstrar o comportamento de um escoamento é necessário entender o conceito de hidrograma (TUCCI, 2001). O hidrograma é um gráfico que relaciona a vazão no tempo. O comportamento de um hidrograma típico é demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de um hidrograma de projeto



Fonte: Tucci (2008)

Onde

t_l , tempo de retardo: é definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma;

t_p , tempo de pico; intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo da vazão máxima;

t_c , tempo de concentração: tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia, deslocar-se até a seção principal.

T_m , tempo de ascensão: tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma;

T_b , tempo de base: é o tempo entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida dá escoamento através da seção principal, ou que o rio volta às condições anteriores a da ocorrência da precipitação;

T_r , tempo de recessão: é o tempo necessário para a vazão baixar até o ponto C, quando acaba o escoamento superficial.

Após o início da chuva existe um intervalo de tempo em que o nível começa a se elevar. Este tempo deve-se às perdas iniciais por interceptação vegetal e depressões do solo, além do próprio tempo retardo de resposta da bacia. A elevação da vazão é a representação do escoamento superficial. O hidrograma atinge o seu máximo e apresenta a seguir a recessão onde se observa um ponto de inflexão que caracteriza o fim do escoamento superficial. A forma do hidrograma pode variar e essa variação depende de alguns fatores importantes como: relevo, densidade de drenagem, declividade do rio ou bacia, capacidade de armazenamento e forma;

cobertura da bacia – a vegetal tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração, em regiões urbanas o solo é mais impermeável, o escoamento superficial e seu tempo de pico aumentam. A vazão máxima e o hidrograma são necessários para o controle de cheias, dimensionamentos de obras de drenagem urbana, perímetro de irrigação, diques e extravasores de barragens. Além disso, os seus valores tem importância decisiva nos custos e segurança de projetos de engenharia (TUCCI, 2001).

2.6 DESASTRES HIDROLÓGICOS

De acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) 2015, 84,72% da população brasileira reside em áreas urbanas. Para que toda essa população seja atendida, é necessário que as cidades cresçam em ritmo acelerado, ignorando as normas urbanísticas. A população de maior poder aquisitivo tende a habitar os locais seguros enquanto a população carente ocupa áreas de risco (TUCCI, 2001). Algumas cidades se desenvolveram às margens de rios ou no litoral e, com o crescimento desordenado e acelerado das cidades, as áreas inundáveis foram ocupadas trazendo consequências.

As consequências do crescimento acelerado da população, e com o processo de urbanização, podem ser percebidas principalmente nos sistemas voltado aos recursos hídricos, como abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos e drenagem das águas pluviais (TUCCI, 1997). No que diz respeito a drenagem das águas pluviais, podem ocorrer alguns desastres hidrológicos como alagamentos, inundações e enchentes, que além de causar transtornos aos patrimônios, podem devastar as paisagens culturais. A diferença entre esses desastres pode ser encontrada na Figura 9

Figura 9 - Diferença entre enchentes, inundações e alagamentos

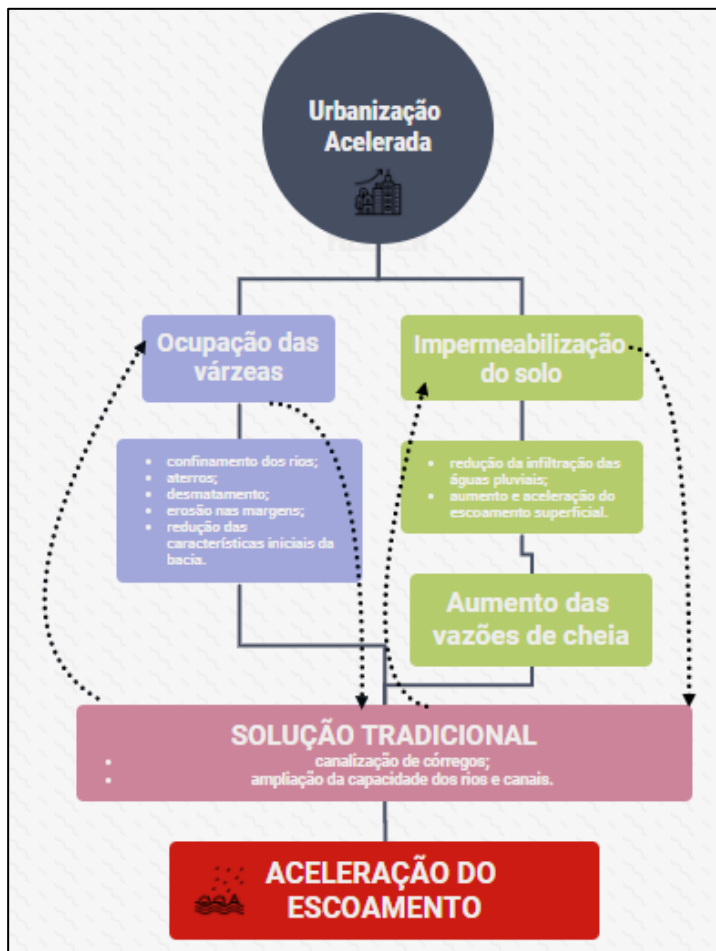


Fonte: SÃO BERNARDO DO CAMPO, 2015.

Devido ao solo impermeabilizado pela urbanização e uma infraestrutura precária, as inundações tendem a aumentar cada vez mais, podendo trazer problemas graves como perdas humanas. O aumento das inundações tem sido mais frequente nesse século, tendo relação com o fato de os engenheiros atuais projetarem sistemas com soluções pontuais, prevendo o deslocamento rápido do escoamento à jusante, e não considerando o contexto das bacias hidrográficas como um todo (TUCCI, 2003).

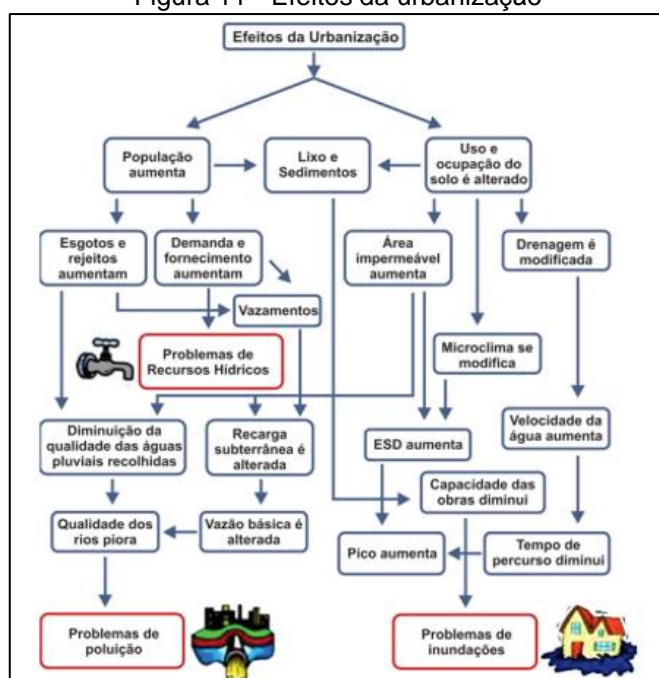
A impermeabilização do solo através da construção de pavimentos impermeáveis, calçadas e edificações acaba influenciando na velocidade de infiltração e alterações no ciclo hidrológico, como demonstrado no esquema da Figura 10 e da Figura 11.

Figura 10 - Esquema do comportamento das cidades após a urbanização acelerada



Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Paraná 2002b.

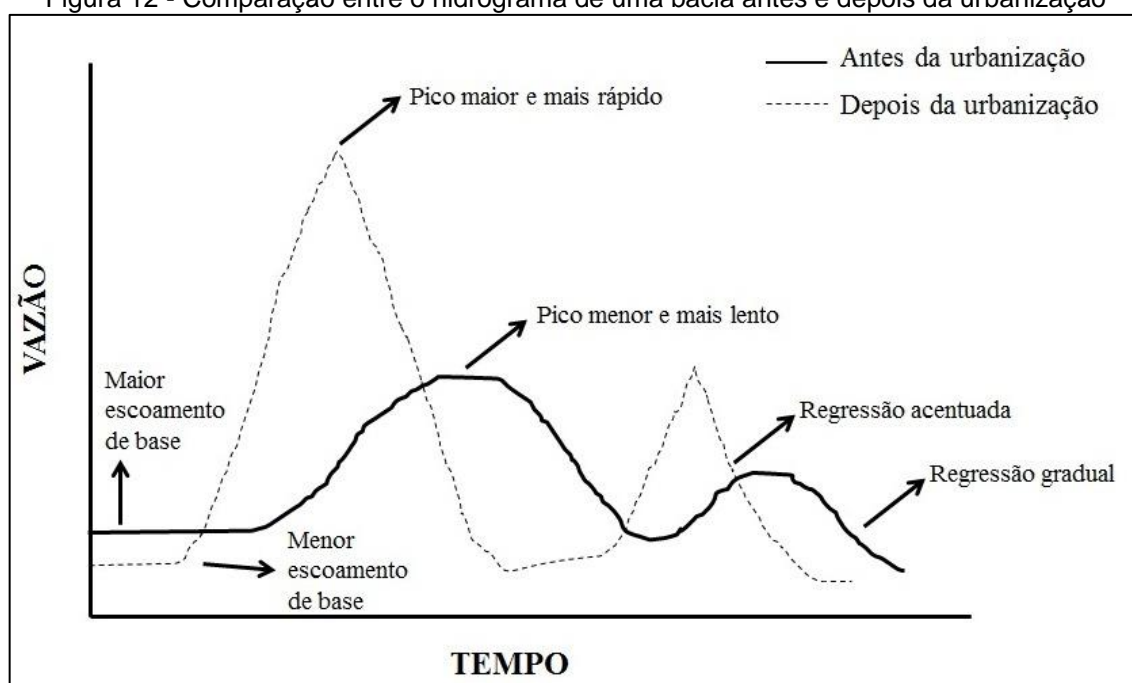
Figura 11 - Efeitos da urbanização



Fonte: São Paulo, 2012.

Nas regiões ainda não urbanizadas, o escoamento ocorre de maneira mais lenta e a maior parte da água é infiltrada, já nas regiões urbanizadas a impermeabilização diminui, e a vazão e a velocidade de escoamento, aumentam (SANTORO; AMARAL; TOMINAGA, 2009). A Figura 12 demonstra os efeitos da urbanização no hidrograma, em áreas urbanizadas o pico é maior e mais acentuado e em bacias não urbanizadas é mais lento e menor.

Figura 12 - Comparação entre o hidrograma de uma bacia antes e depois da urbanização



Fonte: adaptado de Schueler (1987).

2.7 MODELOS HIDROLÓGICOS

O entendimento dos processos do ciclo hidrológico é fundamental para estudos ambientais, gestão dos recursos hídricos e em projetos de obras hidráulicas (MARINHO FILHO et al., 2012). Para melhor entender a relação dos processos hidrológicos e de uma bacia hidrográfica surgiram os modelos hidrológicos. Os modelos são representações de um sistema, numa linguagem de forma fácil e que proporcionam a busca de diferentes respostas (TUCCI, 2005). Podem ser divididos em:

- Modelos físicos: representam o sistema por um protótipo em escala menor;
- Modelos analógicos: estes se valem de medições de grandezas físicas e fenômenos diferentes que são descritos pelas mesmas equações;

- Modelos matemáticas: denominados digitais, representam o sistema através de equações matemáticas.

2.7.1 Método racional para estimativa de vazões máximas

O método mais simples e mais usual para pequenas áreas (2007). Este modelo aplica um redutor na precipitação intensa, significando um percentual do total precipitado que escoar, esse redutor é influenciado pela cobertura vegetal, classe de solos, declividade e tempo de retorno da precipitação. A sua equação principal é representada abaixo pela Equação. 1

$$Q = C \times i \times A \quad (1)$$

Onde:

Q: vazão de cheia (L³/T);

C: coeficiente do escoamento superficial; pode ser obtido através da ocupação da bacia (Tabela 1) e por diferentes superfícies (Tabela 2).

i: intensidade da chuva (L/T);

A: área da bacia hidrográfica (L²).

Esta equação é recomendada apenas para bacias menores que 8 km², embora alguns autores recomendem para bacias de até 15 km² (BRUTSAERT, 2005).

Tabela 1 - Valores de escoamento superficial por características de ocupação da bacia

Zonas	C
Centro da cidade densamente construído	0,70 a 0,95
Partes adjacentes ao centro com menor densidade	0,60 a 0,70
Áreas residenciais com poucas superfícies livres	0,50 a 0,60
Áreas residenciais com muitas superfícies livres	0,25 a 0,50
Subúrbios com alguma edificação	0,10 a 0,25
Matas, parques e campos de esportes	0,05 a 0,20

Fonte: adaptado de ASCE, 1969.

Tabela 2 - Valores de escoamento superficial conforme o tipo de superfície utilizada

Superfície	Intervalo	Valor esperado
Asfalto	0,70 a 0,95	0,83
Concreto	0,80 a 0,95	0,88
Calçadas	0,75 a 0,85	0,80
Telhado	0,75 a 0,95	0,85
Gramma, solo arenoso plano	0,05 a 0,10	0,08
Gramma, solo arenoso inclinado	0,15 a 0,20	0,18
Gramma, solo argiloso plano	0,13 a 0,17	0,15
Gramma solo argiloso inclinado	0,25 a 0,35	0,30
Áreas rurais	0,0 a 0,30	

Fonte: adaptado de ASCE, 1969.

2.7.2 Método de Chicago

Este método é determinado a partir de dados de chuva distribuídos no tempo, como por exemplo, a partir das curvas IDF. É conveniente para pequenas áreas de drenagem. O hietograma padrão representa uma chuva intensa e de curta duração, como parte de uma chuva de longa duração. Pode ser determinado através das Equações 2, 3, 4 e 5.

$$t_b = \gamma \times t_c \quad (2)$$

$$t_a = (1 - \gamma) \times t_c \quad (3)$$

Onde:

t_b : tempo anterior ao pico (min), medindo do pico para a esquerda;

t_a : tempo posterior ao pico (min), medindo do pico para a direita;

t_c : tempo de concentração da bacia;

γ : medida do adiantamento do padrão de chuva;

$$i = \frac{a \times \left[(1-n) \times \left(\frac{t_b}{\gamma} \right) + b \right]}{\left[\frac{t_a}{\gamma - b} + b \right]^{(1+n)}} \quad (4)$$

$$i = \frac{a \times \left[(1-n) \times \left(\frac{t_a}{1-\gamma} \right) + b \right]}{\left[\frac{t_a}{\gamma - b} + b \right]^{(1+n)}} \quad (5)$$

Onde:

ib: intensidade de chuva antes do pico (mm/h);

ia: intensidade de chuva depois do pico (mm/h);

tb: tempo anterior ao pico (min) medindo do pico para a esquerda;

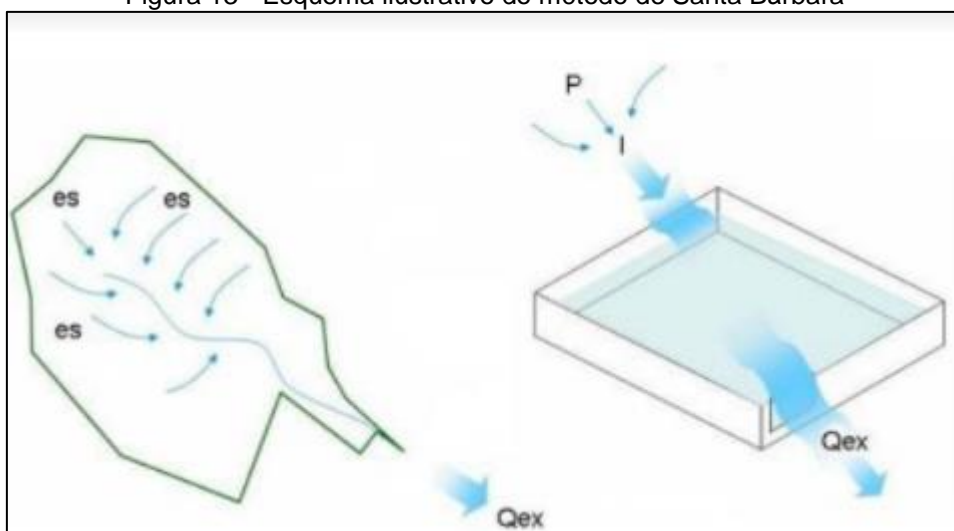
ta: tempo posterior ao pico (min) medido do pico para a direita;

γ : coeficiente de avanço.

2.7.3 Método de Santa Bárbara

Esse método busca obter o hidrograma de uma bacia considerando o local escolhido e, demonstrando as vazões de pico e as vazões por intervalo. O método considera que a área impermeável da bacia é diretamente conectada ao sistema de drenagem, desprezando as perdas de água (TOMAZ, 2011). O modelo, conforme a Figura 13, considera a bacia como um reservatório imaginário em que há entrada pelo escoamento superficial e saída pelo exutório (REZENDE, 2012).

Figura 13 - Esquema ilustrativo do método de Santa Bárbara



Fonte: Rezende (2012)

2.7.4 Storm Water management model

Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, é um software público que permite a modelagem do sistema de drenagem. É um modelo caracterizado como hidráulico-hidrológico e tem como entrada os dados de

precipitação e as características da bacia hidrográfica analisada e o programa responde com chuvas de intensidades variáveis, infiltração e coeficiente de escoamento (SHINMA, 2015). O modelo é dividido em diferentes blocos para simulação: o Runoff que transforma a chuva em vazão, o Transport que modela o transporte na rede de drenagem seguindo o conceito da onda cinemática, o Extran permite a modelação hidrodinâmica em condutos e canais; e o Storage/Treatment possibilita analisar a qualidade das águas (GARCIA; PAIVA, 2006). O software permite selecionar três modelos de infiltração, Equação de Horton, Green-Ampt e um baseado na Curva Número (CN) do Método SCS (ROSSMAN, 2010).

2.8 ZONEAMENTO DE ÁREAS COM RISCO DE ALAGAMENTOS

Para o controle dos alagamentos é necessário o zoneamento dessas áreas. Os mapeamentos das áreas suscetíveis aos desastres hidrológicos além de prever o risco, são indispensáveis para informações ao planejamento urbano, ordenamento territorial e direcionamento das expansões urbanas (RESENDE, 2012; CPRM, 2004). Quando o mapeamento é realizado com base em cartografia adequada e confiável, essa ferramenta é de grande utilidade para avanços no setor técnico e um sistema informativo pra a população (ENOMOTO, 2004). O zoneamento é de grande confiabilidade já que é elaborado através dos modelos hidráulicos e hidrodinâmicos e ferramentas de geoprocessamento (SILVA, 2006). Para a realização do mapeamento Tucci (2003) descreve algumas etapas necessárias:

- Topografia do local;
- Estudo de probabilidade de inundações de níveis para uma seção na proximidade local;
- Níveis de enchente;
- Seções batimétricas ao longo do rio;
- Cadastramento de obstruções ao longo do trecho;
- Modelo digital de terreno (MDT) da área de estudo;
- Vazões para o período de retorno;
- Perfis da linha d'água;

O resultado são mapas de locais que sofrem com alagamentos elaborados a partir de ferramentas de geoprocessamento com grande número de informações,

além dos níveis ou cotas de alagamentos (ENOMOTO, 2004; SILVA, 2006; TUCCI, 2007; RESENDE, 2012).

2.9 DRENAGEM URBANA CONVENCIONAL

A gestão das águas pluviais é um grande desafio enfrentado. A drenagem urbana tende a ser um instrumento para gerir essa água precipitada, ela pode ser projetada de forma convencional, ou de forma sustentável. A drenagem urbana convencional se trata de todo o tipo de medida que tem como objetivo minimizar os riscos causados pelas inundações (PORTO et al., 2001). Esse tipo de drenagem se baseia na coleta e transporte da água precipitada o mais rápido possível para longe da urbanização.

“A drenagem urbana tem sido desenvolvida com o princípio de drenar a água das precipitações o mais rápido possível a jusante, produzindo aumento da frequência e magnitude das enchentes. Este aumento traz consigo o acréscimo da produção de lixo e deterioração da qualidade da água.”.
(ARAÚJO, TUCCI; GOLDENFUM, 2000)

O sistema convencional traz problemas à jusante, como aumento da ocorrência de alagamentos, acúmulo de resíduos sólidos, crescimento de doenças vinculadas à água e impactos negativos ao ciclo hidrológico. As estruturas de maiores dimensões e com tempo de retorno de 100 anos são as estruturas de macrodrenagem. Quando o sistema de macrodrenagem é bem projetado os custos com a microdrenagem são menores (SÃO PAULO, 2012). O sistema de drenagem inicial, chamado de microdrenagem é composto pelos pavimentos das ruas, guias e sarjetas, bocas de lobo, galerias de águas pluviais e também canais de pequenas dimensões. O bom funcionamento da microdrenagem dependem além de um projeto, de sua limpeza e manutenção. Esse sistema é dimensionado para o escoamento de águas pluviais com tempo de retorno de até 10 anos, quando bem projetado, pode eliminar os alagamentos na área urbana (SÃO PAULO, 2012).

Dentre elementos da drenagem urbana convencional, segundo Bassani (2013) existem os elementos descritos a seguir, que podem ser encontrados na Figura 14.:

- a) Meios-fios: posicionados na linha que divide o passeio da via para deslocamentos dos veículos, elevado aproximadamente 15 cm acima do leito da rua;
- b) Sarjetas: situadas junto ao meio fio, formando canais abertos para o escoamento. A sarjeta recebe a água precipitada oriunda da via e do passeio público e dos dutos advindos das coberturas de edificações;
- c) Sarjetões: são elementos específicos utilizados no cruzamento as vias, para conciliar sua declividade;
- d) Bocas de lobo: captam as águas superficiais da sarjeta, transferindo-as para as tubulações e galerias da rede subterrânea.
- e) Conduitos de ligação: Dutos ou tubulações que capta as águas das bocas de lobo, conduzindo-as à jusante;
- f) Caixas de ligação: unem os elementos do sistema, como por exemplo, tubulações de montante para uma única tubulação à jusante;
- g) Poços de visita: São estruturas providas de tampo removível para permitir a inspeção e a limpeza da rede;
- h) Galerias: constituídas por tubulações ou canais cobertos, nas quais passam grande vazão de água durante os períodos chuvosos.

Figura 14 - Principais elementos da drenagem urbana convencional



Fonte: Bassani (2013)

As medidas para minimizar os impactos oriundos dos desastres hidrológicos podem ser estruturais ou não-estruturais. As estruturais modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos e as medidas não-estruturais podem minimizar os impactos dos alagamentos com menor custo.

2.9.1 Medidas Estruturais

As medidas estruturais compreendem obras de engenharia e intervenções físicas no ambiente que favoreçam o escoamento da água, como pavimentos permeáveis, galerias, bacias de detenção/retenção, diques, trincheiras de infiltração, desconexão de calhas na rede de drenagem e recomposição nativa da bacia hidrográfica (TOMINAGA, 2013). Podem ser extensivas, que são técnicas utilizadas para conter as inundações aumentando a cobertura vegetal do terreno, favorecendo a interceptação, dificultando o escoamento e aumentando a evapotranspiração (TUCCI, 2007).

E as medidas intensivas agem nos rios e seu tipo de controle depende da obra implantada. Podem ser reservatórios, reduzindo o pico do hidrograma e o impacto a jusante, diques ou *polders* que são obras que protegem áreas ribeirinhas (TUCCI, 2007). As diferentes medidas estruturais podem ser encontradas no Quadro 3.

Quadro 3 - Diferentes tipos de medidas estruturais extensivas e intensivas (continua)

Solução		Medida	Vantagem	Desvantagem	Aplicação
Extensivas		Cobertura vegetal	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes bacias	Pequenas bacias
		Técnicas de controle de perdas de solo	Reduz assoreamento	Idem ao anterior	Pequenas bacias
Intensivas	Estruturais	Diques e polders	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos em caso de falha	Grandes rios
	Melhoria do canal	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
	Reservatórios	Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil	Bacias intermediárias

Quadro 4 - Diferentes tipos de medidas estruturais extensivas e intensivas (conclusão)

Solução		Medida	Vantagem	Desvantagem	Aplicação
Intensivas	Reservatórios	Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
		Reservatórios para cheias	Operação com o mínimo de perdas	Partilhado	Controle de enchentes
	Mudança de canal	Caminho da cheia	Amortecimento de volume	Depende da topografia	Projetos de usos múltiplos
		Desvios	Reduz vazão do canal principal	Idem ao anterior	Bacias médias e grandes

Fonte: (Adaptado de Simons et al., 1977 apud Tucci, 2007).

2.9.2 Medidas não estruturais

As medidas não estruturais se tratam das responsabilidades de diversos segmentos da sociedade no sentido de melhorar a gestão das águas pluviais urbanas, algumas delas possuem caracteres normativos (SÃO PAULO, 2012). Essas medidas podem envolver políticas públicas e comportamento dos cidadãos, buscando reduzir o risco hidrológico (COLOMBELLI, 2018). Juntamente com as medidas estruturais as não estruturais permitem a diminuição de prejuízos, além de serem técnicas com menores custos de implantação (TUCCI, 1993). Elas são de grande importância e dependem muito mais da conscientização da população e de legislações e fiscalizações apropriadas. Algumas dessas medidas estão expostas no Quadro 5.

Quadro 5 - Alguns exemplos de medidas não estruturais utilizadas (continua)

Medida	Contexto
Planejamento Urbano	Contempla questões como restrição à ocupação de áreas inundáveis, definição da localização dos elementos de vegetação das cidades, como parques e praças, percentual de área permeável dos lotes urbanos, estabelecimento de zonas de proteção ambiental e incorporação de práticas sustentáveis em projetos urbanísticos. Essas medidas podem constar no Plano Diretor, Lei de Uso e Ocupação do Solo, Plano Diretor de Ordenamento Territorial ou em algum documento similar.

Quadro 6 - Alguns exemplos de medidas não estruturais utilizadas (conclusão)

Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU) ou Plano Diretor de Águas Pluviais (PDAP)	Planejamento detalhado do manejo das águas pluviais, contendo elementos como diagnósticos, prognósticos, objetivos e metas para o setor e definição de programas e ações para atingi-las. Devem ser instituídas em leis ou decretos.
Legislação	Determinação através de leis ou decretos para que o manejo das águas pluviais seja efetivo.
Manuais de Drenagem Urbana e Capacitação Profissional	São produtos do PDDU ou PDAP, contendo parâmetros de projeto, diretrizes para dimensionamento de estruturas e orientação técnicas em geral.
Educação Ambiental	Medidas que sensibilizem a população sobre a importância da drenagem urbana.
Controle da Conexão Ilegal de Esgoto	Qualquer lançamento de esgoto na rede de drenagem é proibido, devendo ser eliminado.
Fiscalização	A Administração Pública deve fiscalizar se o desenvolvimento urbano está obedecendo ao disposto no Plano Diretor de Uso e Ocupação do Solo e demais normas.
Zoneamento de Áreas Inundáveis	Vetar qualquer construção em áreas sujeitas a inundações, com medidas contra a habitação ilegal
Mapeamentos	Mapa de alerta para orientar a população de locais suscetíveis as inundações
Seguros Contra Inundações	Direito dos afetados de serem ressarcidos por danos materiais causados pelas inundações, recomendada apenas para locais onde a realocação de habitantes seja inviável
Sistema de Previsão de Cheias e de Alerta	Utilizam dados de monitoramento de variáveis hidrológicas em tempo real para fazer previsões e alertar a população quanto ao risco
Proteção Individual	Desenvolvimento de moradias adaptadas a inundações

Fonte: (COLOMBELLI, 2018) adaptado pela autora.

2.10 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL

A drenagem urbana sustentável é aquela que realiza esforços para manter o escoamento superficial o mais próximo possível das condições naturais de pré-desenvolvimento. Esse sistema tem como objetivo complementar o sistema convencional, e não, eliminá-lo (AGOSTINHO; POLETO, 2012). Além disso, a implementação de pequenas medidas na bacia hidrográfica supre a necessidade de grandes estruturas, o que pode trazer uma redução nos custos em infraestrutura (Oliveira et al., 2017). A drenagem urbana sustentável não compreende somente a prevenção de alagamentos e inundações, mas também possui alguns outros aspectos importantes que foram descritos por Tucci e Meller em 2007:

- Recarga de aquíferos subterrâneos, por meio da infiltração de águas pluviais no solo;
- Aumento da disponibilidade hídrica;
- Melhora do conforto hidroclimático, associado a processos de evapotranspiração;
- Incremento qualitativo das águas fluviais e preservação da biodiversidade e dos habitats aquáticos;
- Prevenção de processos erosivos na bacia hidrográfica;
- Preservação da morfologia fluvial.




Fletcher et al. (2015) trazem alguns conceitos sobre drenagem urbana sustentável os quais são descritos a seguir:

- Low Impact Development – LID: Essa técnica foi materializada por leis nos EUA, Canadá e Nova Zelândia e tem como premissa manter ou reestabelecer o balanço hidrológico de pré-ocupação através de soluções locais/pontuais integradas numa paisagem funcional hidrológica;
- Best Management Practices – BMPs: Busca identificar práticas estruturais e não estruturais com o objetivo de controle da poluição pluvial e sedimentos;
- Water Sensitive Urban Design – WSUD: Objetiva minimizar os impactos hidrológicos da urbanização no ambiente, no contexto do planejamento urbano na escala de bacia, sendo a drenagem urbana um instrumento setorial focado no controle de cheias, manejo fluvial/pluvial e a qualidade da água.
- Sustainable Drainage Systems – SUDS: Objetivo de estabelecer uma sequência de práticas e tecnologias para agir juntas buscando soluções mais sustentáveis que as convencionais. Reduzindo as vazões e taxas de escoamento, reduzindo volumes adicionais consequentes da urbanização, promover a recarga natural dos aquíferos, reduzir a concentração de poluentes e atuar como uma zona de amortecimento em caso de acidentes com derramamento de concomitantes, promover habitantes para animais e agregar valor estético as áreas urbanas.
- Trama verde-azul – TVA: Reúne abordagens integradas mais naturais para a solução de problemas urbanos e climáticos. Como componentes principais estão: manejo pluvial, adaptação climática, menor estresse térmico, mais biodiversidade, segurança alimentar, melhor qualidade do ar, produção

energética sustentável, águas e solos despoluídos, qualidade de vida, mobilidade, recreação, sombra e abrigo.

Além disso, algumas medidas estruturais em se tratando de drenagem urbana sustentável podem ser encontradas no Quadro 7.

Quadro 7 - Medidas estruturais utilizadas na drenagem urbana sustentável (continua)

Medida Estrutural	Descrição	Exemplo
Áreas verdes	<p>Importantes para alcançar a qualidade ambiental no meio urbano, possuem funções que ajudam a proporcionar um equilíbrio entre ambiente urbano e natural. Ainda segundo o autor, pode trazer benefícios sociais, como aumento da qualidade do ar, água e solo, regularização do sistema, alívio de tensões diários, embelezamento da paisagem e melhoria na qualidade de vida.</p>	
Telhado verde	<p>São coberturas vivas caracterizadas pela aplicação de camadas vegetais nos telhados de construções que melhoram o desempenho térmico e acústico das construções.</p>	
Pavimentos permeáveis	<p>É um dispositivo de infiltração onde o escoamento superfície é desviado através da superfície permeável. O pavimento auxilia para que a água infiltre rapidamente e permaneça armazenada em um reservatório. Algumas vantagens são observadas em sua utilização, como por exemplo, o tratamento da água da chuva, através da remoção de poluentes, diminuição da necessidade de canais de drenagem, aumento da segurança e conforto em vias.</p>	

Fonte: elaborado pela autora, 2021.

Quadro 8 - Medidas estruturais utilizadas na drenagem urbana sustentável (conclusão)

Valas de infiltração	São estruturas lineares pouco profundas e vegetadas. Permitem o armazenamento temporário de águas pluviais e favorecem sua infiltração no solo.	
Poços de infiltração	Recolhem a água do telhado e criam condições de escoamento através do solo.	
Trincheiras de infiltração	Construídas em formato regular, preenchidas com pedras limpas e forradas com tecido geotêxtil. As trincheiras são adequadas para locais onde o espaço disponível para infiltração é limitado.	
Bacias de detenção e retenção	Áreas cercadas por uma contenção que retém a água até que ocorra a infiltração através da base e laterais, promovendo a atenuação dos picos de cheia. Essa obra tem como finalidade armazenar temporariamente os escoamentos, sendo vazias durante a estiagem, dimensionadas para reter as águas pluviais após a precipitação.	

Fonte: elaborado pela autora, 2021.

As medidas de drenagem urbana sustentável juntamente com as medidas não estruturais são ótimos complementos para resolver a problemática dos alagamentos. Como é o caso do município de Grenoble, na França. A cidade utilizou terras existentes para melhorar a gestão da água em áreas urbanas como objetivo de se adaptar às mudanças climáticas. O órgão regulamentador da cidade se utiliza principalmente de ferramentas regulatórias do Plano Urbano e de planos de saneamento, que incluem que projetos de construção que devem integrar um

percentual mínimo de áreas com vegetação e de terreno aberto (WATER; PLANNING, 2022). .

3 METODOLOGIA

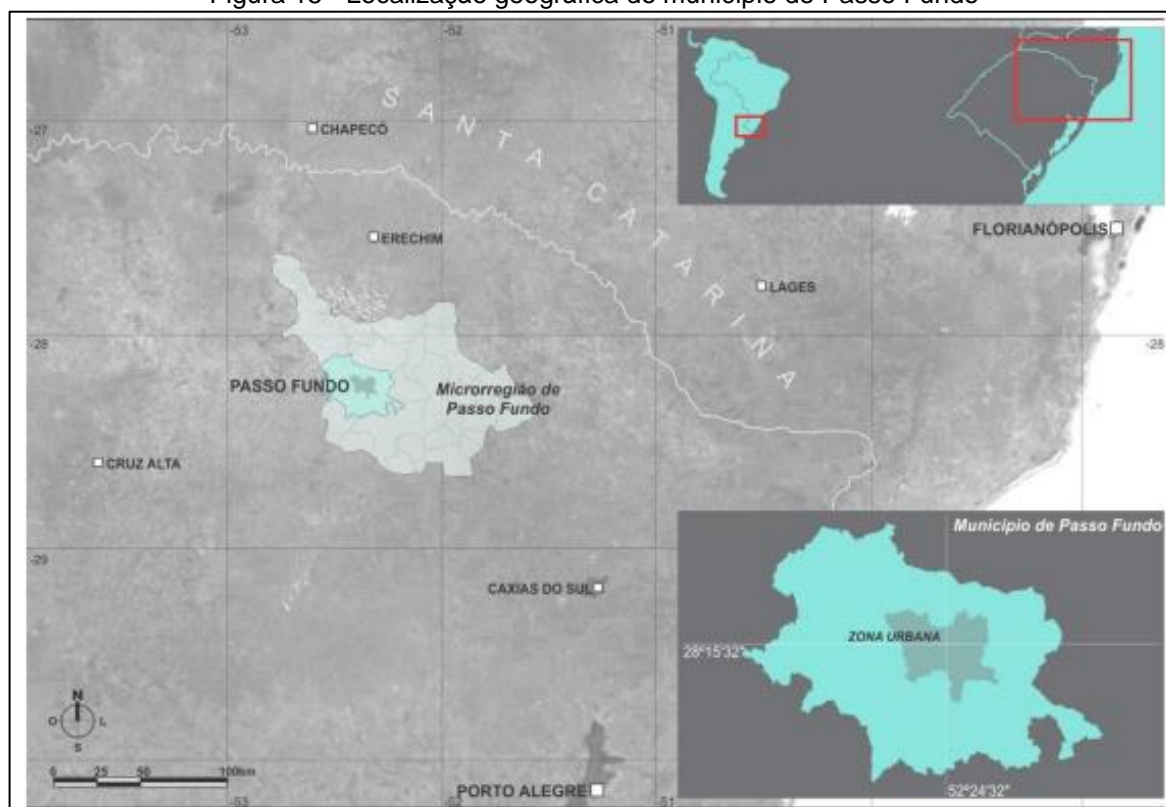
Este estudo é classificado, quanto a sua natureza, como uma pesquisa aplicada, já que objetiva a geração de conhecimentos para aplicação prática para a solução de um problema específico (PRODANOV; FREITAS, 2013). E quanto aos seus objetivos, é uma pesquisa explicativa, pois registra, analisa, classifica e interpreta os fenômenos observados (GIL, 2010, p.28).

Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada para a realização da pesquisa visando responder à questão: **Quais são as áreas do município de Passo Fundo que poderão sofrer com alagamentos frequentes e de que forma se pode tornar a estrutura de drenagem dessas áreas mais resiliente a esses impactos?**

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Passo Fundo é um município de médio porte que se localiza no norte do estado do Rio Grande do Sul e fica situado na Mesorregião do Noroeste Rio-Grandense, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Localização geográfica do município de Passo Fundo



Fonte: Plano Municipal de Saneamento Básico de Passo Fundo (2013)

Segundo o relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística o território municipal abrange uma área de 784,407km² e possui uma população de 206.103 habitantes, apresentando uma densidade demográfica de 235,92 hab./km², e uma taxa de urbanização de 97,5% (IBGE, 2010). Quanto a rede hídrica, seu território fica entre a região hidrográfica do Guaíba na porção sul e a do Uruguai nas demais.

Quanto a sua classificação climática, a Embrapa/Trigo classifica a área como uma Zona Climática fundamental temperada, seu clima é úmido com chuvas bem distribuídas durante o ano todo. Sua temperatura média varia entre 28,3°C nos meses mais quentes a 8,9°C nos meses mais frios. Seu relevo possui classes de declividade entre 13% a 24%, com as áreas mais planas localizadas próximos aos leitos dos rios e as de maior declividade na porção sudeste do município. Seus solos são classificados como Latossolo Vermelho Distrófico Húmico e Nitossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Bruno Distrófico e Nitossolo Háplico Distrófico, os latossolos são profundos, homogêneos e bem drenados.

O estado do Rio Grande do Sul possui dois cursos d'água, os que correm para o oceano Atlântico e os que correm para o Rio Uruguai. É drenado por uma densa malha hidrográfica com destaque para os coletores de água Rio Uruguai e o sistema Vacaí-Jacuí. No município de Passo Fundo estão as nascentes de dois importantes rios, o Rio Passo Fundo, que compõe a bacia hidrográfica do Uruguai, e do Jacuí, o maior dos rios que formam a bacia hidrográfica do Guaíba. Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico (2013), em grande parte do município, a tubulação da rede encontra-se em estado precário e sua substituição só é realizada com grandes apelos da população, não existindo programas de manutenção da rede. A limpeza das bocas de lobo e sarjetas também somente é realizada pela Secretaria de Obras com apelo da população, não possuindo cronograma específico para a realização do serviço. A Figura 16 demonstra uma boca de lobo presente no município obstruída pelo lixo. O maior problema de obstrução de bocas de lobo em Passo Fundo é causado pelo acúmulo de resíduos sólidos jogados nas ruas. Além desse problema, existe o lançamento de esgoto doméstico e ocupação irregular nas margens dos rios.

Figura 16 - Obstrução das bocas de lobo no município



Fonte: Plano Municipal de Saneamento Básico de Passo Fundo (2013)

Passo Fundo consta na lista do IBGE sobre os municípios que já foram atingidos por inundações ou alagamentos. Em 2022 várias ocorrências de alagamentos no município foram apontadas. Na madrugada do dia 28 de maio de 2022, houve relatos de alagamentos dentro do Hospital Municipal, no bairro Parque do Sol e Morada do Sol, na ponte do rio Pinheiro Torto, Bairro Vila Nova, Boqueirão e Bairro Santa Maria, com perigo e risco de a água entrar nas residências (RÁDIO UIRAPURU, 2022).

Figura 17 - Ocorrência de alagamentos em Passo Fundo em 28/05/2022

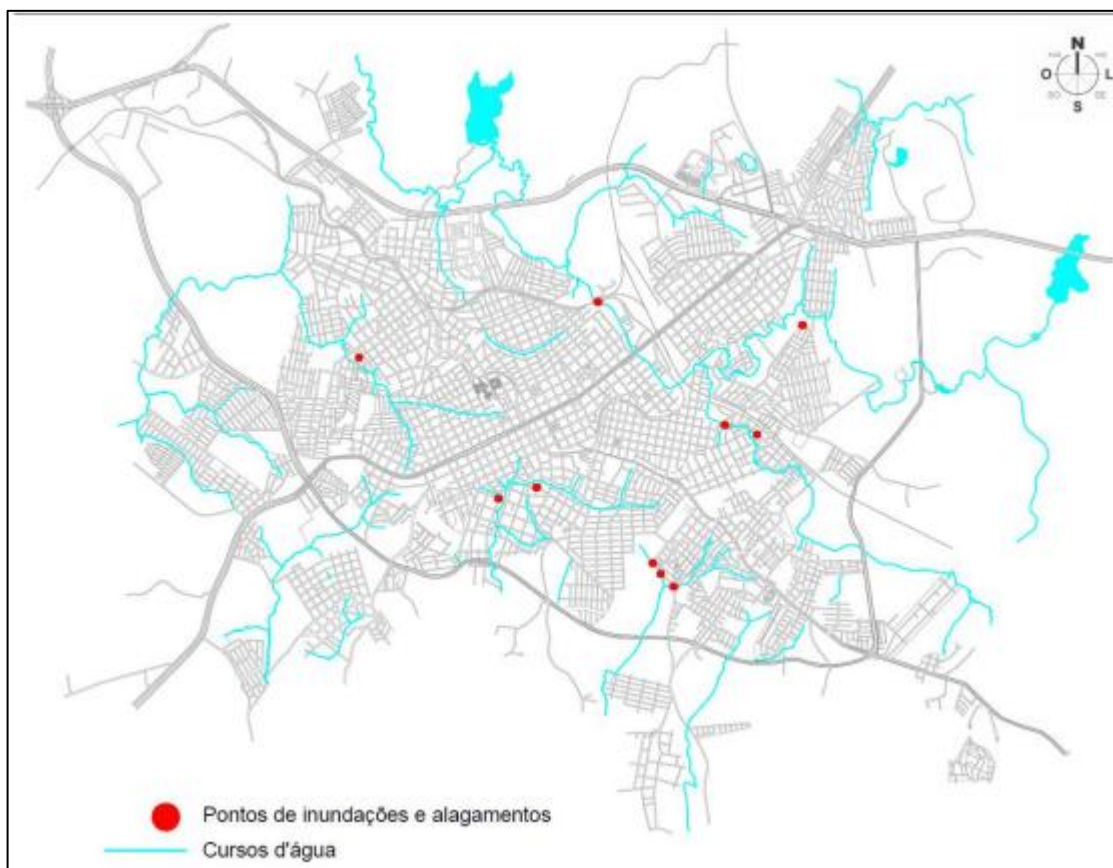




Fonte: Rádio Uirapuru (2022).

No dia 21 de junho de 2022 a cidade voltou a sofrer com chuvas torrenciais, o sistema de drenagem não conseguiu escoar suficientemente a água precipitada, ocorrendo alagamentos na maioria das ruas, tornando as ruas intransitáveis e ocasionando também acidentes de trânsito (RÁDIO UIRAPURU, 2022). Além de ruas trancadas devido aos alagamentos, esse mesmo evento de precipitações alagou o Instituto Geral de Perícias que precisou suspender seus trabalhos durante o dia (NACIONAL, 2022). Segundo a Prefeitura Municipal de Passo Fundo (2013), os alagamentos são os maiores problemas municipais em escopo de projetos elaborados pelo município. O Plano Municipal de Saneamento Básico de Passo fundo (2013), aponta 9 pontos com ocorrência de inundações e alagamentos, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Localização dos pontos suscetíveis a alagamentos no município de Passo Fundo



Fonte: Plano Municipal de Saneamento Básico de Passo Fundo (2013)

Uma medida estrutural executada pelo município de Passo Fundo é a sua rede de drenagem pluvial com galerias circulares de concreto armado, com diâmetros variando de 300 mm a 1500 mm, incluindo também bocas de lobo (caixas coletoras) e poços de visita, visando atender as ruas não servidas pela rede, descarregando-as nas redes existentes. Uma medida não-estrutural aplicada no município de Passo Fundo é a determinação de uma taxa de permeabilidade mínima para cada zona da cidade. Essa taxa, segundo o plano diretor é a “percentagem correspondente à porção mínima do lote correspondente a área permeável do solo”. A taxa de permeabilidade é definida através da taxa de ocupação de cada zona ou região da cidade, através de uma fórmula. Algumas zonas possuem um valor de taxa de permeabilidade estabelecido independente da taxa de ocupação (PASSO FUNDO, 2006).

3.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

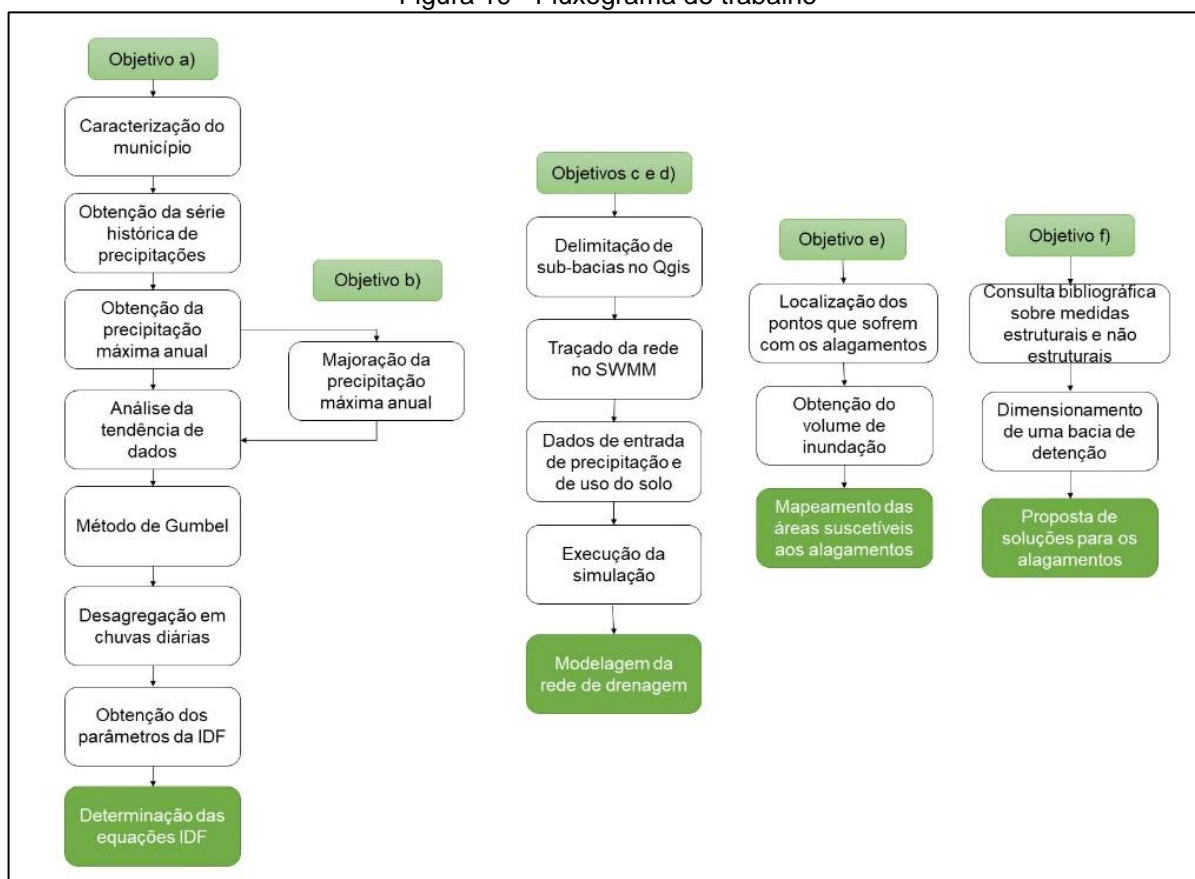
Para o desenvolvimento do presente estudo, foram analisados os dados hidrológicos disponíveis para a área de estudo escolhida, dessa forma, foi possível

obter a série temporal necessária para a elaboração das equações IDF. Para a elaboração do mapeamento de áreas que sofrem com os alagamentos, são necessárias algumas atividades elementares. Com o intuito de atingir os objetivos específicos deste estudo foi considerada a seguinte estrutura:

- Delimitação da área de estudo, sua bacia principal e sub-bacias;
- Coleta de informações e dados geográficos sobre a bacia de estudo;
- Determinação da equação IDF para o modelo de precipitação atual;
- Determinação da equação IDF para as projeções futuras.
- Delimitação da rede de drenagem atual no software SWMM afim de localizar os pontos de inundação.
- Elaboração do mapa de inundações em ambiente SIG.
- Propor alternativas para solucionar os problemas em drenagem urbana.

O fluxograma de trabalho pode ser encontrado na Figura 19.

Figura 19 - Fluxograma de trabalho



3.2.1 Determinação das equações IDF

Para obtenção das equações de intensidade, duração e frequência foram utilizados os dados da estação climatológica código 83914 – Passo Fundo, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por apresentar uma série histórica de dados referente aos períodos de 1961 a 2019, e também os dados da ANA, para a estação 2852020 – Passo Fundo, com dados entre 1950 a 1959. Dessa forma, foi considerada uma série histórica de 69 anos.

Na posse dos dados das precipitações máximas anuais, foram realizados os ajustes das equações IDF. A análise da tendência temporal foi realizada através do Método de Mann-Kendall. O teste de Mann-Kendall é um método robusto, sequencial e não paramétrico, utilizado para determinar se uma série de dados possui alguma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa (SILVA, 2015). Este método, não exige uma distribuição normal e por isso é frequentemente utilizado para o cálculo das variáveis ambientais, além disso, o método é pouco influenciado por mudanças abruptas em séries não homogêneas (Zhang et al., 2009). O teste baseia-se em rejeitar ou não a hipótese nula (H_0), adotando-se um nível de significância. No presente estudo, foi adotado um nível de significância de 5%. E é calculado pela seguinte Equação 7.

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{Sinal}(x_j - x_i) \quad (7)$$

Na qual:

$$S = \begin{cases} 1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

Onde:

S: é a estatística S do teste;

x_j e x_i : são valores da variável nos tempos j e i;

n: número de observações da série em estudo.

Uma vez que os dados foram submetidos aos testes não paramétricos, para validação dos dados amostrais, posteriormente por meio de regressão linear simples foram obtidos os coeficientes a e b que melhor se adequem a r^2 . Então, a função de probabilidade de Gumbel, apresentada na Equação 8, foi aplicada. O método de distribuição de Gumbel é o mais consagrado e bem aceito na literatura (KLEIN et al., [s. d.]

$$P(t, T) = P(24, T) + s(a + b \ln(-\ln(1 - \frac{1}{t}))) \quad (8)$$

(SAMPAIO, 2011 apud FLECK & QUEVEDO, 2016):

Onde:

P (t, T): evento extremo no decorrer do ano;

t: tempo de retorno. Serão obtidos os valores de chuva anuais para períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100, e 500 anos.

Ao final de Gumbel, utilizou-se o teste de aderência de Anderson-Darling, para uma significância de 5%. Este teste procura ponderar de maneira mais efetiva as distribuições, devido à possibilidade de observações maiores ou menores em qualidade do ajuste (ABREU et al., 2018). A estatística do teste de Anderson-Darling é calculada pela Equação 9.

$$A^2 = -N - \sum_{i=1}^N \frac{(2i-i)\{\ln Fx(x_{(i)}) + \ln[1 - Fx(x_{(N-i+1)})]\}}{N} \quad (9)$$

Onde:

A^2 : estatística do teste AD;

N: número de observações na série;

$X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$: observações ordenadas em ordem crescente.

Uma vez realizado o teste de aderência dos dados, foi realizada a desagregação das chuvas diárias, na qual, os valores de precipitação foram submetidos a processos de desagregação e, dessa forma, foram obtidas precipitações para diferentes durações. Essa desagregação é necessária devido à escassez de dados pluviográficos (KLEIN et al., [s. d.]), O método utilizado para a desagregação foi o método da CETESB (1979), que consiste no emprego de coeficientes para

transformar a chuva de um dia obtida pelos pluviômetros em chuvas com menor duração ((KLEIN et al., [s. d.])), Os coeficientes de desagregação de chuvas diárias, definidos pelo CETESB, para desagregação das chuvas diárias encontram-se na Tabela 3 - Coeficientes de desagregação de chuvas diárias.

Tabela 3 - Coeficientes de desagregação de chuvas diárias

Duração	Coeficiente de desagregação	Duração	Coeficiente de desagregação
24h/1 dia	1,14	1h/24h	0,42
12h/24h	0,85	30min/1h	0,74
10h/24h	0,82	25min/30min	0,91
8h/24h	0,78	20min/30min	0,81
6h/24h	0,72	15min/30min	0,70
4h/24h	0,63	10min/30min	0,54
2h/24h	0,52	5min/30min	0,34

Fonte: CETESB (1979).

As curvas IDF são representadas pela Equação 10, que é a equação genérica para as curvas de intensidade, duração e frequência

$$i = \frac{a \times T_r^b}{(t+c)^d} \quad (10)$$

Onde:

i: intensidade (mm/h);

Tr: tempo de retorno (anos);

t: duração da chuva (min);

a, b, c e d são parâmetros locais.

A determinação dos parâmetros a, b, c e d foi realizada utilizando a ferramenta Solver (Excel). Para aplicação da ferramenta, foi preciso minimizar o erro total entre os valores de intensidade pluviométrica estimada, através da variação da variação dos parâmetros a, b, c e d. Para o ajuste da equação foi utilizado a minimização do valor do erro médio quadrático da raiz (RMSE), conforme a Equação 11.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (G_T^t - I_T^t)^2}{n}} \quad (11)$$

Onde:

G: intensidade de chuva para um período de retorno de T anos e duração t minutos estimada pela distribuição estatística selecionada;

I: intensidade da chuva com período de retorno T anos e duração de t minutos obtida pela equação IDF ajustada.

A avaliação do desempenho dos parâmetros foi realizada por meio do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, através da Equação 12.

$$R = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N (i_0 - i_c)^2}{\sum_{k=1}^N (i_0 - i_{0'})^2} \quad (12)$$

Onde:

i_c = intensidade calculada pela equação IDF (mm/min);

i_0 = intensidade extraída dos dados originais;

N = quantidade de dados

$i_{0'}$ = média das intensidades extraídas dos dados originais.

Esse coeficiente varia do negativo infinito até 1,0, sendo que quando R tem valor 1,0 o ajuste é considerado perfeito, 0,75 é adequado e bom, e se varia entre 0,36 e 0,75 é considerado aceitável (OLIVEIRA, 2021). Para a criação das curvas IDF com o efeito das mudanças climáticas, as precipitações máximas registradas no período utilizado serão variadas em 5%, 10%, 25% e 30%, e novamente aplicada a função da distribuição de probabilidade de Gumbel e a função de desagregação de tempo em 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 120, 240, 360, 720 e 1440.

Os dados encontrados através dessa metodologia proporcionaram uma análise da curva IDF atual do município de Passo Fundo e análise das projeções climáticas. Isso trará um norte sobre como às mudanças climáticas impactarão no ciclo hidrológico de uma bacia e quais as consequências isso proporcionará. Esses dados também serviram como dados de entrada na verificação da rede de drenagem no modelo SWMM, o qual indicou quais pontos estão sofrendo com alagamentos.

3.2.2 Verificação da rede de drenagem no software SWMM

A modelagem foi realizada para os cenários analisados, Equação de Denardin e para as projeções de 5, 10, 25 e 30%. Foi utilizado um tempo de retorno de 10 anos, que é o tempo recomendado para as estruturas de micro drenagem. Como a rede não sofria grandes alterações entre as projeções de 5% a 10% e nem para as projeções de 25% a 30%, optou-se por utilizar os dois cenários críticos em cada caso (aumento de 10%, para um incremento de 1,5°C na temperatura e aumento de 30% para um incremento de 2,5°C na temperatura), para facilitar a leitura dos resultados.

O Storm Water Management Model é um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial. Esse modelo considera parâmetros como as entradas de fluxo na bacia (precipitação), perdas por infiltração, volume e evaporação e fornece fluxos de saída como a infiltração, evaporação e escoamento superficial (ENHS,2019; ROCHA, 2019).

A infiltração é o processo de entrada de água no solo, através da superfície, o software SWMM permite a escolha entre os modelos de Horton, Green-Ampt e Método do SCS (SHINMA, 2011; ENHS, 2019). No caso, foi utilizado o Modelo de Infiltração de Green-Ampt, descrito pelas Equações 13 e 14, onde as variáveis para cada classe de solo foram obtidas a partir da Tabela 4.

$$F_{(t)} = \psi \times \Delta\theta \times \ln \left(1 + \frac{F_{(t)}}{\psi \times \Delta\theta} \right) = K \times t \quad (13)$$

$$f_{(t)} = K \times \left(\frac{\psi \times \Delta\theta + F}{F} \right) \quad (14)$$

(GREEN; AMPT, 1911)

Onde:

Ψ : pressão de sucção (mm);

t: tempo (horas);

K: condutividade hidráulica (mm/h);

F(t): é a lâmina total infiltrada desde o início do processo (mm);

$\Delta\theta$: déficit inicial de umidade do solo em relação a saturação (adimensional).

Tabela 4 - Valores para os parâmetros de infiltração Green-Ampt conforme o tipo de solo da região

Classe do solo	K(mm/h)	Ψ (mm)	\emptyset	CC	WP
Areia	120,396	49,02	0,437	0,062	0,024
Areno-Siltoso	29,972	60,96	0,437	0,105	0,047
Silto-Arenoso	10,922	109,98	0,453	0,190	0,085
Silte	3,302	88,9	0,463	0,232	0,116
Franco-Siltoso	6,604	69,93	0,501	0,284	0,135
Silto-Arenoso-Argiloso	1,524	219,96	0,398	0,244	0,360
Silto-Argiloso	1,016	210,06	0,464	0,310	0,87
Franco-Silto-Argiloso	1,016	270	0,471	0,342	0,210
Argilo-Arenoso	0,508	240,03	0,430	0,321	0,221
Franco-Argiloso	0,508	290	0,479	0,371	0,251
Argila	0,254	320,04	0,475	0,378	0,265

Fonte : Rawls, W.J. et al. (1983) J. Hyd. Engr., 109:1316 apud UESPA (2012).

A propagação do escoamento é realizada através do Modelo de Onda Dinâmica, que gera resultados de maior precisão por utilizar equações completas de Saint-Venant. Esse modelo admite o armazenamento nos condutos, o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas do conduto, o remanso e o fluxo pressurizado, seu modelo ocorre seguindo a utilização da Equação 15.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \times A \times \frac{dy}{dx} + g \times A \times Sf - g \times A \times S_0 = 0 \quad (15)$$

Onde:

A: área (m²);

Q: vazão (L³.T⁻¹);

x: distância longitudinal (L);

t: tempo (T);

g: aceleração da gravidade (L.T⁻²)

S₀: inclinação do canal (L.L⁻¹)

S_f: inclinação da linha de energia (L.L⁻¹).

O modelo SWMM representa a rede de drenagem através de bacias, condutos e nós. O primeiro passo para a modelagem foi a obtenção da planta baixa do sistema de drenagem do município. Passo Fundo é dividido por duas sub-bacias, a do sistema

Jacuí e do sistema Uruguai. Os arquivos da rede foram disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Passo Fundo.

A partir dos dados da planta baixa, foi possível iniciar a modelagem no SWMM. Como Passo Fundo possui uma rede de drenagem extensa, a mesma foi dividida em sub-bacias, através do software Qgis, para que sua modelagem fosse facilitada. Para tanto, foi obtida a imagem de satélite de Passo Fundo, sendo possível através de ferramenta r.fill.dir do software Qgis obter o modelo de elevação digital do terreno. A partir disso, através da ferramenta r. watershed foi obtida a direção de drenagem e as linhas de fluxo dos recursos hídricos da região, e por último, através do complemento r. water. outlet foram identificados os exutórios e delimitadas as sub-bacias do sistema Jacuí.

Para modelagem das sub-bacias foram necessários alguns dados de entrada, como:

- a) Área (ha);
- b) Largura (m);
- c) Declividade (%);
- d) Áreas Impermeáveis (%);
- e) Coeficiente de Rugosidade de Manning – Superfícies Impermeáveis;
- f) Coeficiente de Rugosidade de Manning – Superfícies Permeáveis;

A área e largura foram determinadas através da planta planimétrica, pelo software AutoCAD. A área foi definida por áreas de contribuição para cada ponto. A largura média (área dividida pelo comprimento do percurso de água) foi determinada obtendo-se o comprimento do percurso d'água pelo mesmo software anterior.

O coeficiente de Manning para área permeável foi de 0,15 para superfícies gramadas, conforme a Tabela 5 - Coeficiente n de Manning - escoamento à superfície livre, e para as áreas impermeáveis $n=0,011$, asfalto liso. A declividade das áreas foi obtida a partir das curvas de nível, disponíveis na planta planialtimétrica e a porcentagem de área impermeabilizada foi definida a partir das imagens de satélite.

Tabela 5 - Coeficiente n de Manning - escoamento à superfície livre

Superfície	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012

Concreto normal	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubo de metal ondulado	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,05
Solos cultivados	
Cobertos de resíduos <20%	0,06
Cobertos de resíduos >20%	0,17
Campo (natural)	0,13
Gramma	
Curta, pradaria	0,15
Densa	0,24
Gramma-bermudas	0,41
Floresta	
Vegetação rasteira leve	0,4
Vegetação rasteira densa	0,8

Fonte: MCCUEN (1996). Apud Manual do SWMM Brasil (2012).

As seções transversais dos condutos foram obtidas através da planta planimétrica, pelo arquivo em dwg do município de Passo Fundo. Para a modelagem das tubulações foram necessários os seguintes dados:

- a) Comprimento (m);
- b) Declividade (m/m);
- c) Rugosidade;
- d) Seção Transversal
- e) Vazão de Base (m³/s);
- f) Offset de Saída (m).

Os nós são objetos presentes no sistema, que permitem a conexão dos trechos. Nesse caso, foram utilizados os poços de visita, para cada ponto era necessária a cota de radier, como na planta altimétrica esse valor não estava indicado, optou-se pela utilização da cota do ponto (determinada pela curva de nível) e foi descontado o valor de recobrimento de 1m, sendo essa uma das limitações deste estudo. O valor da intensidade da chuva foi determinado a partir equações IDF determinadas pelo passo anterior. O tempo de chuva t é igual ao tempo de concentração da bacia t_c , que é o tempo necessário para que toda a bacia passe a contribuir para a vazão do exutório. O tempo de concentração foi determinado através da equação de Kirpich, conforme a Equação 16, que possui resultados satisfatórios para bacias de diferentes tamanhos e também é recomendada pelo DNIT.

$$t_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad (16)$$

Onde:

t_c = tempo de concentração (min);

L= comprimento do talvegue (km);

H= desnível máximo (m).

Esse modelo além de proporcionar a transformação chuva-vazão demonstrou o comportamento da água em cada tubulação, mostrando dados como: os pontos que sofrem com alagamento, a duração do tempo de alagamento, a vazão no ponto e o volume inundado. Através dos modelos digitais de elevação e os dados encontrados nos itens 3.2 e 3.3 foram gerados os mapeamentos das áreas suscetíveis aos alagamentos. O mapeamento servirá como subsidio para o poder público implementar tanto medidas estruturais quanto não estruturais no combate dos desastres hidrológicos e também mostrará o comportamento da rede para as futuras projeções o que fornecerá bases para futuras revisões em planos diretores e planos municipais de saneamento básico.

Após o mapeamento das áreas suscetíveis aos alagamentos, serão propostas medidas de adaptação.As soluções propostas contemplarão as medidas não estruturais, e medidas estruturais como dimensionamento.

3.2.3 Propostas de soluções para os problemas no sistema de drenagem

Para solucionar os problemas encontrados, foram propostas medidas estruturais e não estruturais. As medidas não-estruturais não envolvem a intervenções construtivas e nem grande suporte financeiro. Podem ser iniciativas tomadas não somente pelo poder público, mas como por indivíduos, associações e entidades privadas. A combinação dessa medida com a medida estrutural pode minimizar significativamente os prejuízos causados pelos alagamentos, sem causar tantos transtornos com obras e trocas de tubulação. Dessa forma, através de consultas bibliográficas, foram analisadas algumas medidas não-estruturais e estruturais utilizadas e dessa forma foram selecionadas medidas que poderiam ser melhor aplicadas no município de Passo Fundo.

3.2.3.1 Dimensionamento de uma bacia de detenção

Uma bacia de detenção é um reservatório destinado a ampliar o controle da geração de escoamento superficial. São capazes de armazenar temporariamente o volume de água e liberar de forma mais lenta. A vazão máxima foi calculada a partir do método Racional apresentado na Equação 17.

$$Q_{\text{máx}} = 0,278 \times C \times I_{\text{máx}} \times A \quad (17)$$

onde:

$Q_{\text{máx}}$: vazão máxima (m³/s);

C: coeficiente de escoamento superficial ponderado, adimensional;

$I_{\text{máx}}$: intensidade máxima de precipitação (mm/h);

A: área da bacia contribuinte (km²).

O coeficiente de escoamento superficial ponderado foi obtido da seguinte forma:

$$C = \frac{A_i \times C_i + A_p \times C_p}{A_t} \quad (18)$$

onde:

A_i : área impermeável (ha);

C_i : coeficiente de escoamento da área impermeável (adimensional);

A_p : área permeável (ha);

C_p : coeficiente de escoamento da área permeável (adimensional);

A_t : área total (ha).

Após foi calculado o volume útil máximo do reservatório, a partir da equação apresentada por Silveira e Goldenfum (2007).

$$V_{\text{máx}} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \times \sqrt{C} \times T^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \times \sqrt{qs} \right)^2 \quad (19)$$

Onde:

$V_{\text{máx}}$: volume de dimensionamento (mm);

C: coeficiente de escoamento da área de concentração;

a, b e c: parâmetros da equação IDF;

T: tempo de retorno (anos);

Q_s : vazão de saída constante do dispositivo.

A vazão de saída para leitos impermeáveis é igual a vazão de pré-desenvolvimento, sendo:

$$q_n = 2,778 \times C \times i \quad (20)$$

onde:

Q_n : vazão de pré-dimensionamento l/(s.hab)

C: coeficiente de escoamento superficial ponderado, adimensional;

I: intensidade de precipitação (mm/h).

O volume máximo é multiplicado por 10 para se obter um equivalente em m³/ha. Obtido esse volume, pode-se estimar as informações da bacia e dimensionar a estrutura de saída, que neste caso será um orifício calculado pela Equação 21.

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad (21)$$

em que:

Q = vazão do orifício (m³/s);

C_d = coeficiente de escoamento (adimensional);

A = área da seção de escoamento (m²);

h = diferença entre o nível de água e o centro da seção de escoamento (m).

Para a simulação da bacia de retenção no software SWMM foi mantida a estrutura de drenagem atual com os mesmos diâmetros, declividades e extensão do trecho, já que a estrutura dimensionada servirá como um complemento.

4 RESULTADOS

4.1 EQUAÇÕES IDF

As maiores precipitações pluviométricas máximas diárias foram observadas, do ano de 1950 a 2019, conforme a Tabela 6 - Precipitações máximas diárias entre 1950 e 2019. Essas precipitações foram majoradas nos coeficientes das mudanças climáticas, conforme os dados disponibilizados pelo PBMC que considera que a região Sul poderá sofrer com um aumento de 5% a 10% no volume das precipitações e com clima entre 2,5°C e 3°C mais quentes num ambiente 25% a 30% mais chuvoso. Os maiores valores observados foram para os anos de 1998 (174 mm), 1986 (161,1 mm) e 1992 (151,30 mm), enquanto os menores valores foram para 1999 (53,1 mm), e 2004 (65,4 mm) e 2019 (65,2 mm) A série de dados apresentou uma média e desvio padrão de $100,21 \pm 20,60$ mm, respectivamente.

Tabela 6 - Precipitações máximas diárias entre 1950 e 2019 (continua).

Ano	Precipitação TA (mm)	Precipitação 5% (mm)	Precipitação 10% (mm)	Precipitação 25% (mm)	Precipitação 30% (mm)
1950	94,5	99,225	103,95	118,125	122,85
1951	121,9	127,995	134,09	152,375	158,47
1952	77,4	81,27	85,14	96,75	100,62
1953	131,4	137,97	144,54	164,25	170,82
1954	93,3	97,965	102,63	116,625	121,29
1955	83	87,15	91,3	103,75	107,9
1956	90,2	94,71	99,22	112,75	117,26
1957	98,4	103,32	108,24	123	127,92
1958	72,9	76,545	80,19	91,125	94,77
1959	108	113,4	118,8	135	140,4
1960	82	86,1	90,2	102,5	106,6
1961	79,2	83,16	87,12	99	102,96
1962	65,8	69,09	72,38	82,25	85,54
1963	86,8	91,14	95,48	108,5	112,84
1964	81	85,05	89,1	101,25	105,3
1965	112	117,6	123,2	140	145,6
1966	95,5	100,275	105,05	119,375	124,15
1967	91,8	96,39	100,98	114,75	119,34
1968	76,2	80,01	83,82	95,25	99,06
1969	82,6	86,73	90,86	103,25	107,38
1970	111,3	116,865	122,43	139,125	144,69
1971	95,7	100,485	105,27	119,625	124,41

Tabela 7 - Precipitações máximas diárias entre 1950 e 2019 (continua).

Ano	Precipitação TA (mm)	Precipitação 5% (mm)	Precipitação 10% (mm)	Precipitação 25% (mm)	Precipitação 30% (mm)
1972	161,1	169,155	177,21	201,375	209,43
1973	97,2	102,06	106,92	121,5	126,36
1974	NA	NA	NA	NA	NA
1975	132,6	139,23	145,86	165,75	172,38
1976	83,2	87,36	91,52	104	108,16
1977	99,1	104,055	109,01	123,875	128,83
1978	82,6	86,73	90,86	103,25	107,38
1980	75,2	78,96	82,72	94	97,76
1981	80,7	84,735	88,77	100,875	104,91
1982	103,7	108,885	114,07	129,625	134,81
1983	90,3	94,815	99,33	112,875	117,39
1984	118,2	124,11	130,02	147,75	153,66
1985	91,5	96,075	100,65	114,375	118,95
1986	NA	NA	NA	NA	NA
1987	NA	NA	NA	NA	NA
1988	114,4	120,12	125,84	143	148,72
1989	98,8	103,74	108,68	123,5	128,44
1990	NA	NA	NA	NA	NA
1991	78,8	82,74	86,68	98,5	102,44
1992	151,3	158,865	166,43	189,125	196,69
1993	96	100,8	105,6	120	124,8
1994	80,8	84,84	88,88	101	105,04
1995	99,6	104,58	109,56	124,5	129,48
1996	113	118,65	124,3	141,25	146,9
1997	122,8	128,94	135,08	153,5	159,64
1998	174	182,7	191,4	217,5	226,2
1999	53,1	55,755	58,41	66,375	69,03
2000	107,4	112,77	118,14	134,25	139,62
2001	138	144,9	151,8	172,5	179,4
2002	90,4	94,92	99,44	113	117,52
2003	116,5	122,325	128,15	145,625	151,45
2004	65,4	68,67	71,94	81,75	85,02
2005	142,4	149,52	156,64	178	185,12
2006	99,8	104,79	109,78	124,75	129,74
2007	135,8	142,59	149,38	169,75	176,54
2008	104,2	109,41	114,62	130,25	135,46
2009	102,8	107,94	113,08	128,5	133,64
2010	134,2	140,91	147,62	167,75	174,46
2011	100,8	105,84	110,88	126	131,04
2012	96	100,8	105,6	120	124,8
2013	73	76,65	80,3	91,25	94,9
2014	105,2	110,46	115,72	131,5	136,76
2015	111,4	116,97	122,54	139,25	144,82

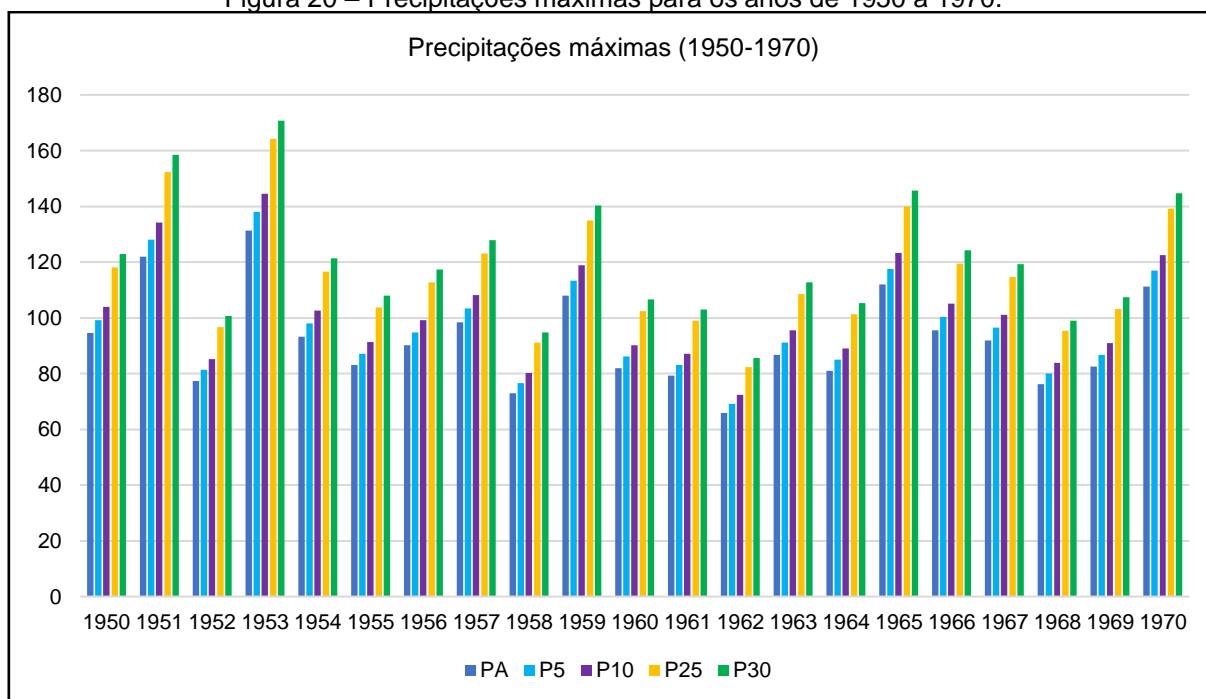
Tabela 8 - Precipitações máximas diárias entre 1950 e 2019 (conclusão).

Ano	Precipitação TA (mm)	Precipitação 5% (mm)	Precipitação 10% (mm)	Precipitação 25% (mm)	Precipitação 30% (mm)
2016	101	106,05	111,1	126,25	131,3
2017	110,6	116,13	121,66	138,25	143,78
2018	85	89,25	93,5	106,25	110,5
2019	65,2	68,46	71,72	81,5	84,76

Fonte: Autora, com base nos dados do INMET.

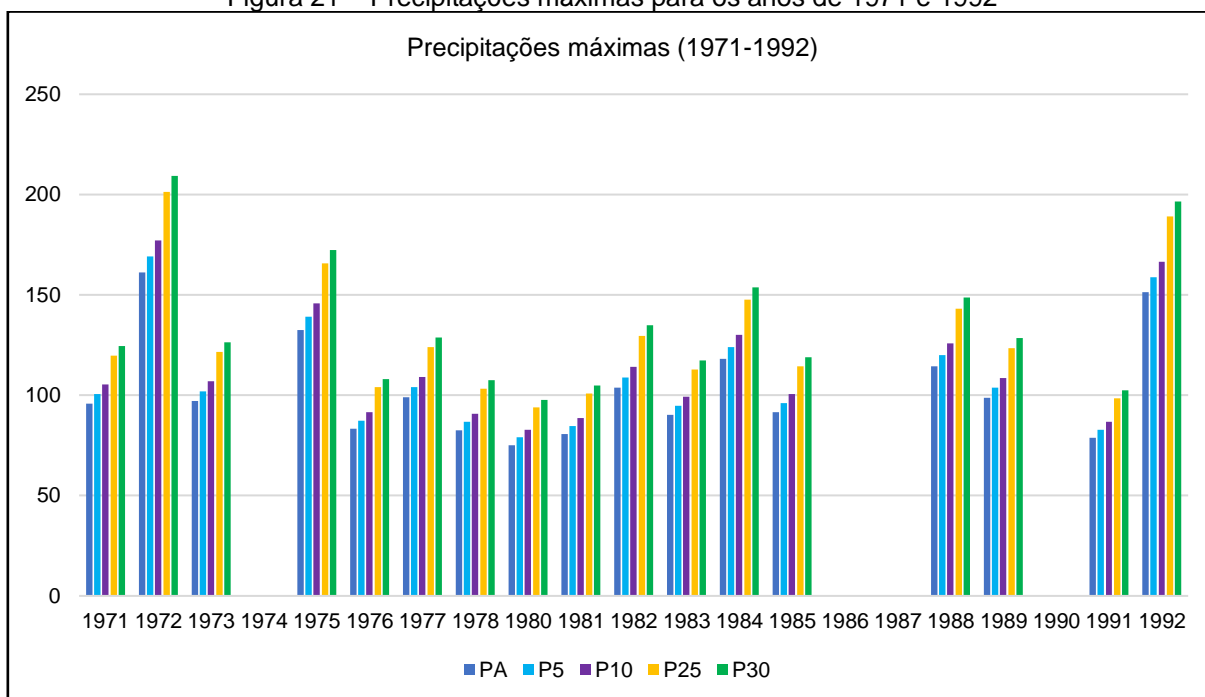
Os mesmos dados disponibilizados pela Tabela 6, estão demonstrados através das Figura 20, Figura 21 e Figura 22. Através destes gráficos percebe-se que o máximo das precipitações até o ano de 1970 se aproximava a valores de 180mm, enquanto ao passar dos anos esse máximo mudou para valores próximos a 250mm, anos de 1971 a 2019, sendo que o ano de 1999 permaneceu em valores de chuva muito baixos.

Figura 20 – Precipitações máximas para os anos de 1950 a 1970.



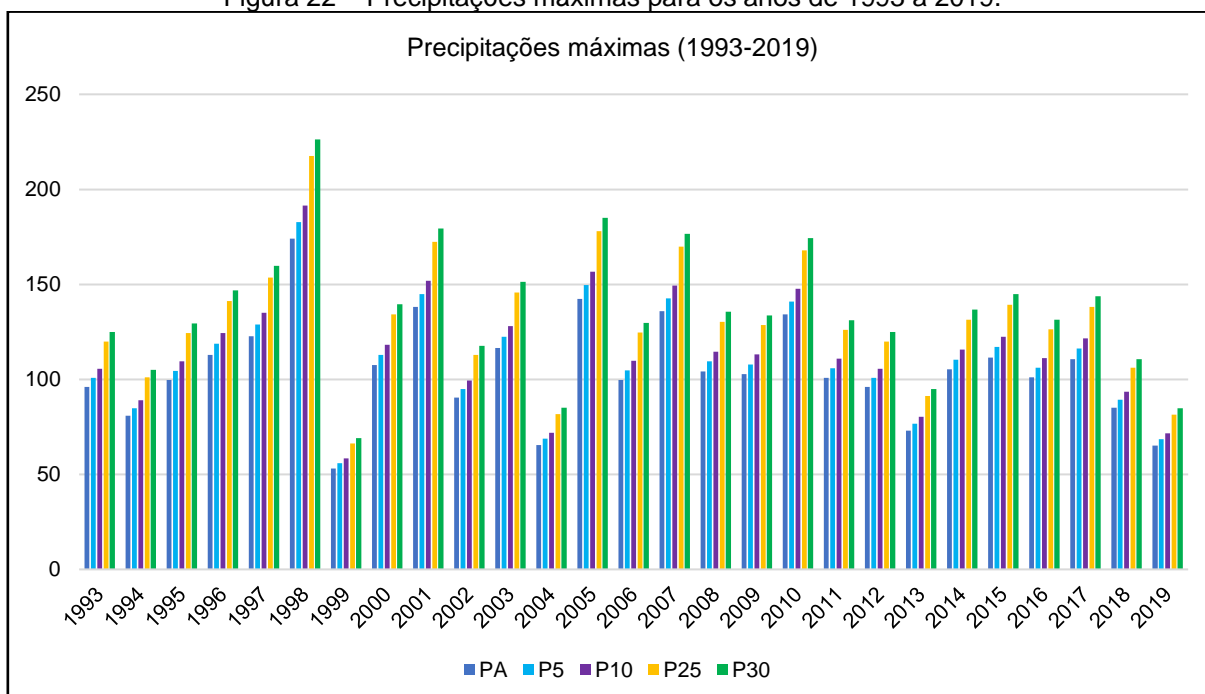
Fonte: Autora, com base nos dados do INMET (2022).

Figura 21 – Precipitações máximas para os anos de 1971 e 1992



Fonte: Autora, com base nos dados do INMET (2022).

Figura 22 – Precipitações máximas para os anos de 1993 a 2019.



Fonte: Autora, com base nos dados do INMET (2022).

As séries de dados não apresentaram nenhuma tendência temporal estatisticamente significativa, conforme o teste de Mann-Kendall, dessa forma puderam ser submetidos à modelagem probabilística, já que comprovam a aderência dos dados ao modelo Gumbel, apresentando resultados eficazes ao ajuste de eventos meteorológicos. Todas as distribuições foram aceitas ao teste de Anderson-Darling.

Os coeficientes encontrados para os tempos atuais e os tempos majorados, comparados com a equação utilizada de Denardin e Freitas, podem ser encontrados na Tabela 9 - Coeficientes das equações de intensidade, duração e frequência.

Tabela 9 - Coeficientes das equações de intensidade, duração e frequência

Equação	Coeficientes ajustados		R²
Denardin e Freitas (1982)	a: 670,74 b: 0,21	c: 7,9 d: 0,74	0,9972
Tempo atual (PA)	a: 865,318 b: 0,144	c: 9,222 d: 0,707	0,9979
Precipitação majorada em 5% (P5)	a: 908,433 b: 0,144	c: 9,218 d: 0,707	0,9979
Precipitação majorada em 10% (P10)	a: 952,175 b: 0,144	c: 9,222 d: 0,707	0,9979
Precipitação majorada em 25% (P25)	a: 1082,236 b: 0,144	c: 9,220 d: 0,707	0,9979
Precipitação majorada em 30% (P30)	a: 1125,353 b: 0,144	c: 9,223 d: 0,707	0,9979

A qualidade dos parâmetros foi verificada com base no coeficiente NS e pelo RMSE e seus valores estão dispostos na

Tabela 10, os valores de NS encontrados apresentaram um ajuste de 0,9978, dessa a intensidade estimada (variável dependente) é explicada 99,79% pela intensidade observada. As equações possuíram uma raiz do erro quadrático médio (RMSE), variando em valores de 0,3 mm/h, esses valores demonstram a confiabilidade dos dados encontrados já que quanto menor for o RMSE, maior é a confiabilidade (GOMES et al., 2019), e os valores baixos do RMSE juntamente com um r^2 muito próximo a 1, atestam um bom ajuste do modelo (Rudy et al., 2015).

Tabela 10 – Valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do Erro Padrão de Estimativa

Equação	Teste de Mann-Kendall ao nível de significância de 5%	Nash-Sutcliffe (NS)	RMSE (mm/h)
PA	Não há tendência	0,9979	0,327
P5	Não há tendência	0,9979	0,317
P10	Não há tendência	0,9979	0,333
P25	Não há tendência	0,9979	0,391
P30	Não há tendência	0,9979	0,393

A partir das precipitações máximas, presentes na Tabela 6, as precipitações diárias foram convertidas para valores de 24h, e corrigidas com os coeficientes de desagregação da CETESB, conforme a Tabela 3, dessa forma, obteve-se as intensidades de precipitação para diferentes durações de chuva. As Tabelas 11, Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 apresentam as intensidades para as precipitações máximas, para os diferentes períodos de retorno pela distribuição de Gumbel para cada uma das projeções realizadas. Para fins de comparação entre a Projeção atual de precipitações e a Equação proposta por Denardin, percebe-se que a equação de Denardin passa a ter valores de intensidade de chuva similares aos de tempo de retorno de 10 anos da Projeção atual apenas no tempo de retorno de 50 anos. Se considerarmos que a rede foi projetada utilizando o tempo de retorno de 10 anos para dimensionamento dos sistemas de drenagem, a chuva de projeto teria valores bem inferiores aos que realmente deveria ter com base nas precipitações atuais.

Tabela 11 – Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Denardin

Duração	TEMPO DE RETORNO					
	2	5	10	25	50	100
1440	3,6	4,3	5,0	6,0	7,0	8,1
720	5,9	7,2	8,3	10,1	11,6	13,4
600	6,8	8,2	9,5	11,5	13,3	15,4
480	8,0		11,1	13,5	15,6	18,1
360		9,6				
360	9,8	11,9	13,7	16,7	19,3	22,3
60	34,2	41,5	48,0	58,1	67,3	77,8
30	52,7	63,8	73,9	89,5	103,5	119,8
25	58,5	70,9	82,0	99,4	115,0	133,0
15	76,5	92,7	107,2	130,0	150,3	173,9
10	91,8	111,2	128,7	156,0	180,4	208,7
5	116,9	141,7	164,0	198,7	229,9	265,9

Fonte: Autora (2022).

Tabela 12 - Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção Atual (PA)

Duração	TEMPO DE RETORNO					
	2	5	10	25	50	100
1440	5,6	6,4	7	8	8,9	9,8
720	9,1	10,4	11,4	13,1	14,41	15,9
600	10,3	11,8	13	14,8	16,4	18,1
480	12	13,7	15,2	17,3	19,1	21,1
360	14,7	16,8	18,5	21,1	23,3	25,8
60	47,9	54,7	60,4	68,9	76,2	84,1
30	71,6	81,7	90,2	103	113,8	124,7
25	78,8	89,9	99,4	113,4	125,3	138,4
15	100,6	114,8	126,8	144,7	159,9	176,7
10	118,4	135,2	149,3	170,4	188,3	208,1

5	146,4	167,2	184,8	210,8	233	257,0
---	-------	-------	-------	-------	-----	-------

Fonte: Autora (2022).

Tabela 13 - Intensidades de chuva (mm) para Equação de Projeção para um aumento de 5% nas precipitações

Duração	TEMPO DE RETORNO					
	2	5	10	25	50	100
1440	5,9	6,7	7,4	9,9	9,3	10,3
720	9,5	10,9	12	13,7	15,1	16,7
600	10,8	12,3	13,6	15,6	17,2	19
480	12,6	14,4	21	18,2	20,1	22,2
360	15,4	17,6	19,4	22,2	24,5	27,1
60	50,3	57,4	63,4	72,4	80	88,3
30	75,1	85,7	94,7	108,1	119,4	132
25	82,7	94,4	104,3	119	147,1	162,5
15	105,6	120,5	133,2	152	167,9	185,5
10	124,4	141,9	156,8	178,9	197,7	218,5
5	153,9	175,6	194	221,4	244,6	270,3

Fonte: Autora (2022).

Tabela 14 - Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção para um aumento de 10% nas precipitações.

Duração (min)	TEMPO DE RETORNO					
	2	5	10	25	50	100
1440	6,1	7	7,7	8,8	9,8	10,8
720	10	11,4	12,6	14,4	15,9	17,5
600	11,3	12,9	14,3	16,3	18	19,9
480	13,2	15,1	16,7	19	21	23,2
360	16,1	18,4	20,4	23,2	25,7	28,4
60	52,7	60,1	66,4	75,8	83,8	92,6
30	78,7	89,8	99,2	113,2	125,1	138,3
25	86,7	98,9	109,3	124,7	137,8	152,3
15	110,7	126,3	139,5	159,2	175,9	194,4
10	130,3	148,7	164,3	187,5	207,1	228,9
5	161,2	183,9	203,2	231,9	256,3	283,2

Fonte: Autora (2022).

Tabela 15 Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção para um aumento de 25% nas precipitações.

Duração	TEMPO DE RETORNO					
	2	5	10	25	50	100
1440	7	8	8,8	10	11,1	12,3
720	11,3	12,9	14,3	16,3	18	19,9
600	12,9	14,7	16,2	18,5	20,5	22,6
480	15	17,2	19	21,6	23,9	26,4
360	18,3	20,9	23,1	26,4	29,2	32,2
60	59,9	68,3	75,5	86,1	95,2	105,2
30	89,4	102,1	112,8	128,7	142,2	157,1
25	98,5	112,4	124,2	141,7	156,6	173
15	125,7	143,5	158,5	180,9	199,9	220,9
10	148,1	168,9	186,7	213	235,4	260,1
5	183,2	209	231	263,6	291,2	321,8

Fonte: Autora (2022).

Tabela 16 Intensidades de chuva (mm) para a Equação de Projeção para um aumento de 30% nas precipitações.

Duração	TEMPO DE RETORNO					
	2	5	10	25	50	100
1440	7,2	8,3	9,1	10,4	11,5	12,7
720	11,8	13,4	14,8	16,9	18,7	20,7
600	13,4	15,2	16,8	19,2	21,2	23,5
480	15,6	17,8	19,7	22,4	24,8	27,4
360	19,0	21,7	24,0	27,4	30,3	33,4
60	62,2	70,9	78,4	89,4	98,8	109,2
30	92,9	106,0	117,1	133,6	147,7	163,2
25	102,3	116,7	129,0	147,2	162,6	179,7
15	130,6	149,0	164,7	187,9	207,6	229,4
10	153,8	175,5	193,9	221,3	244,5	270,2
5	190,3	217,2	240,0	273,8	302,5	334,3

Fonte: Autora (2022).

As Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27 mostram através da Curva IDF, os valores apresentados anteriormente. Visualmente é possível perceber que existe uma acentuação maior dos que a da projeção atual, ou seja, existe um aumento na intensidade da precipitação, tais resultados podem justificar a necessidade da atualização das equações IDF periodicamente.

Figura 23 – Curva IDF para a Projeção Atual

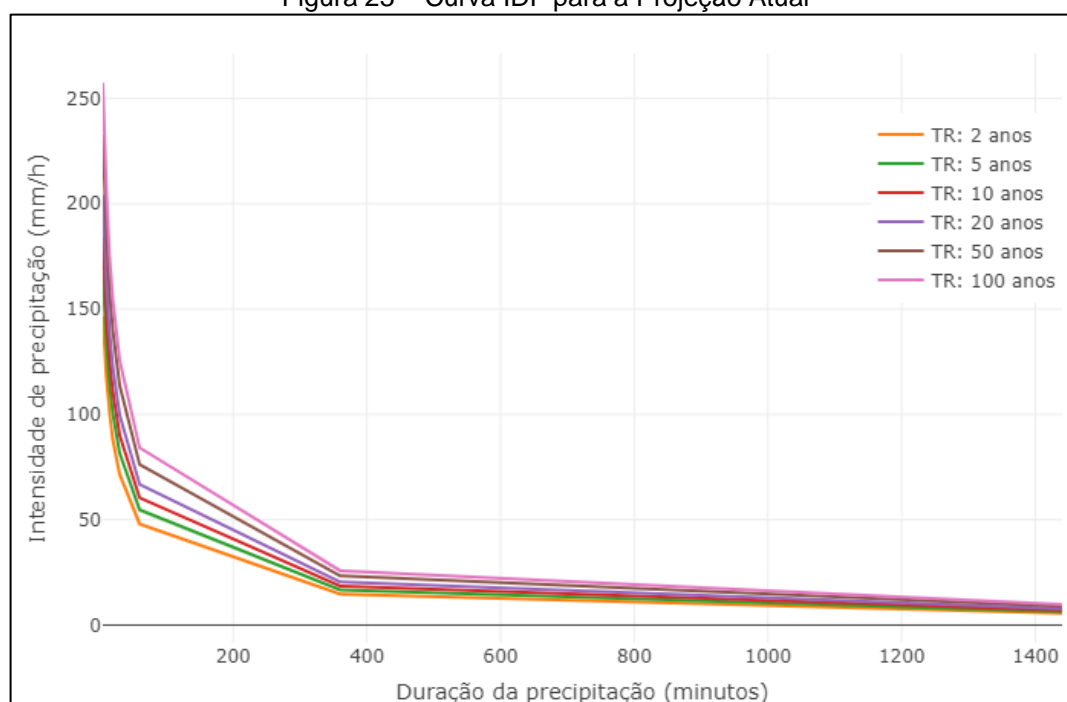


Figura 24 - Curva IDF para a Projeção de Aumento de 5% nas precipitações

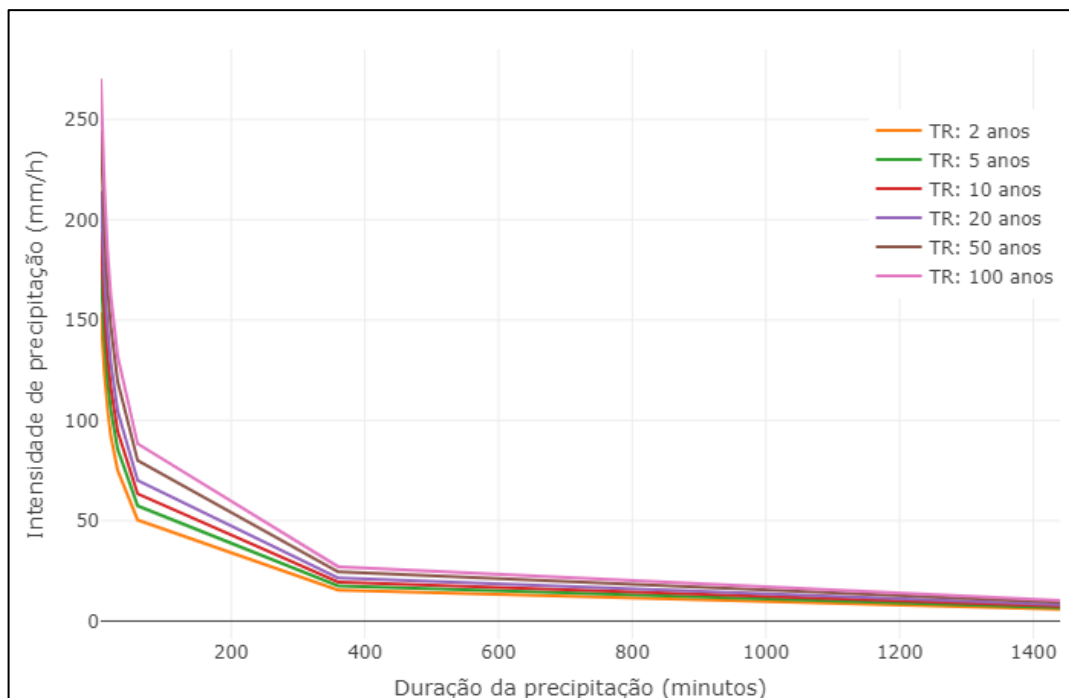


Figura 25- Curva IDF para a Projeção de Aumento de 10% nas precipitações

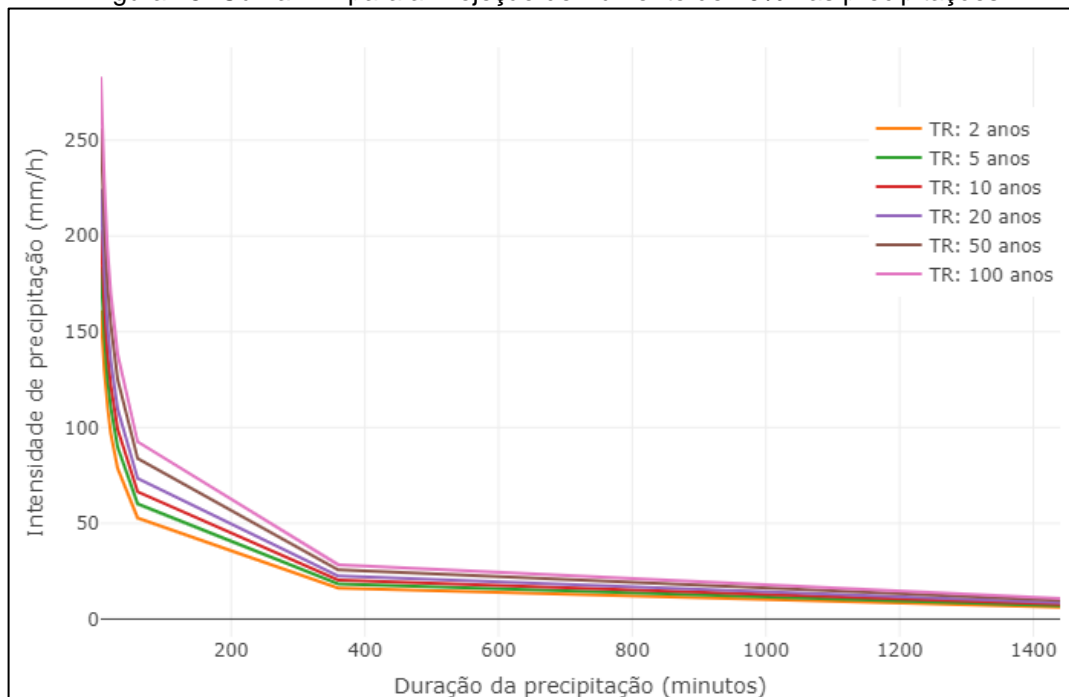


Figura 26- Curva IDF para a Projeção de Aumento de 25% nas precipitações

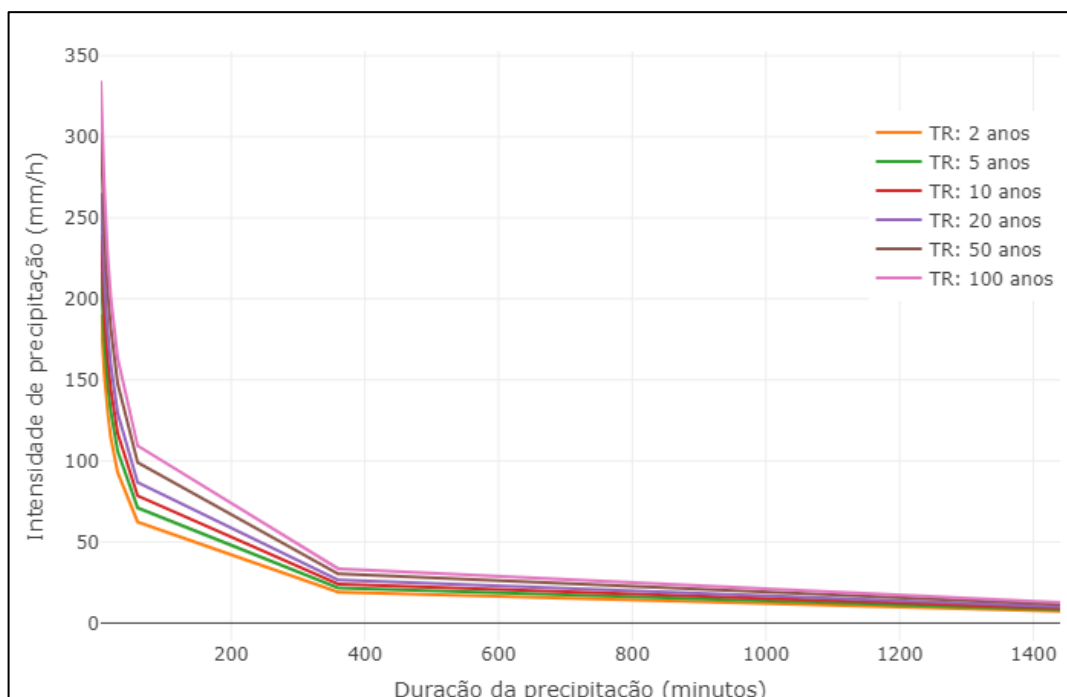
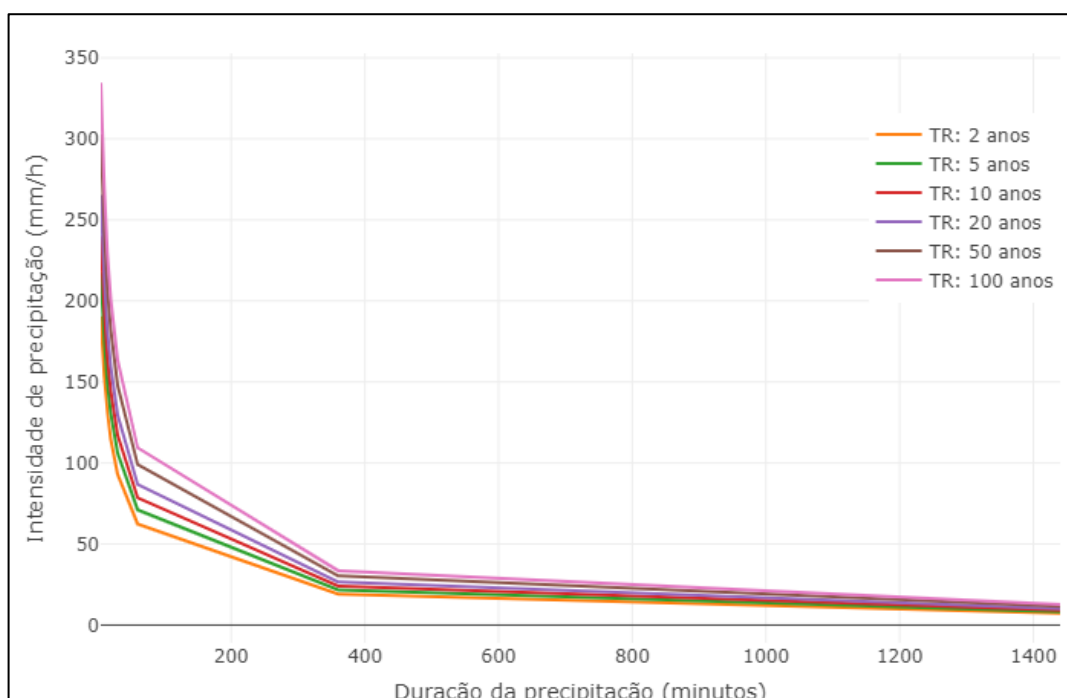


Figura 27- Curva IDF para a Projeção de Aumento de 30% nas precipitações



A partir da determinação das equações IDF, o próximo passo foi o cálculo das intensidades de chuva, para compará-las com a equação de Denardin, considerando as mesmas durações de chuva e de tempos de retorno, os resultados estão demonstrados na Tabela 17 - Intensidades de chuva para diferentes tempos de retorno para uma duração de chuva de 5 minutos.. No tempo de retorno, da equação de Denardin e da PA,

por exemplo, a intensidade de uma chuva de 5 minutos para 2 anos de TR é 25% maior na projeção atual. Essa diferença, pode se dar devido à ocorrência de maiores eventos de precipitações nos últimos anos, já que duas das maiores precipitações analisadas são de anos posteriores a 1982, que foi quando a equação de Denardin e Freitas foi estimada, mostrando que a equação que é utilizada atualmente favoreceu o subdimensionamento da rede.

Tabela 17 - Intensidades de chuva para diferentes tempos de retorno para uma duração de chuva de 5 minutos.

Denardin e Freitas		PA		P5	
TR (anos)	I (mm/h)	TR (anos)	I (mm/h)	TR (anos)	I (mm/h)
2	116,9	2	146,35	2	153,9
5	141,7	5	166,99	5	175,6
10	164	10	184,51	10	194
25	198,7	25	203,88	25	221,4
50	229,9	50	232,64	50	244,6
100	265,9	100	257,4	100	270,3
P10		P25		P30	
TR (anos)	I (mm/h)	TR (anos)	I (mm/h)	TR (anos)	I (mm/h)
2	161,2	2	183,2	2	190,2
5	183,9	5	209	5	217,2
10	203,2	10	231	10	240
25	231,9	25	263,6	25	273,8
50	256,3	50	291,2	50	302,5
100	283,2	100	321,8	100	334,3

Através da Tabela 17, nota-se uma relação diretamente proporcional entre o tempo de retorno e a intensidade de chuva, já que quanto maior é o Tempo de Retorno, maior é a altura de chuva precipitada. Como as estruturas de microdrenagem são projetadas para um tempo de retorno de 10 anos, esse foi o tempo de retorno escolhido para as análises posteriores.

4.2 RESULTADOS DA MODELAGEM DOS SISTEMAS DE DRENAGEM

O Modelo digital de elevação do terreno foi obtido e recortado no formato do Município, afim de ter uma espacialização de como as altitudes estão distribuídas dentro da área analisada. O MDE do município de Passo Fundo está demonstrado através da Figura 28. Através da ferramenta r. recode da ferramenta GRASS, pelo

próprio software do Qgis, foi criado o mapa de elevação do município, Figura 29. Este mapa demonstra altitudes que variam entre 400 e 760m..

Figura 28 – Modelo digital de elevação do município de Passo Fundo

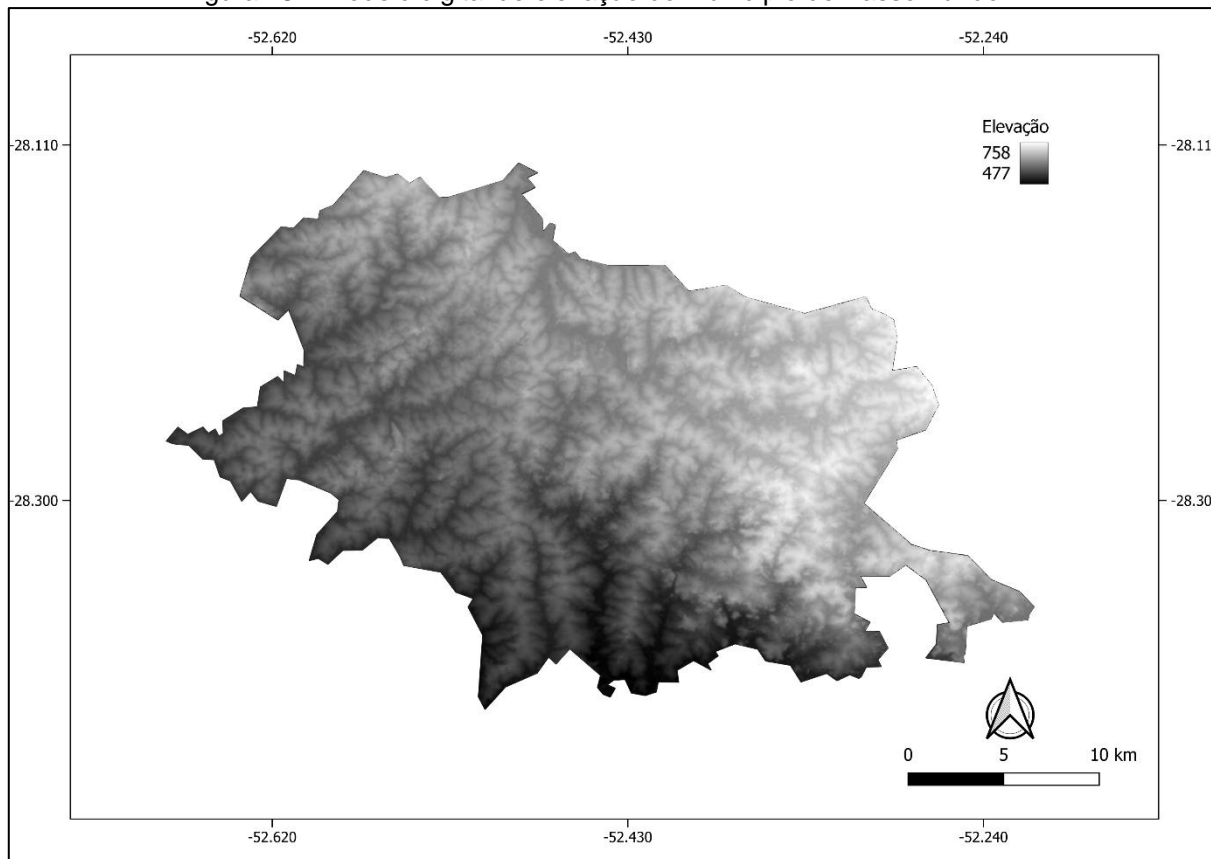
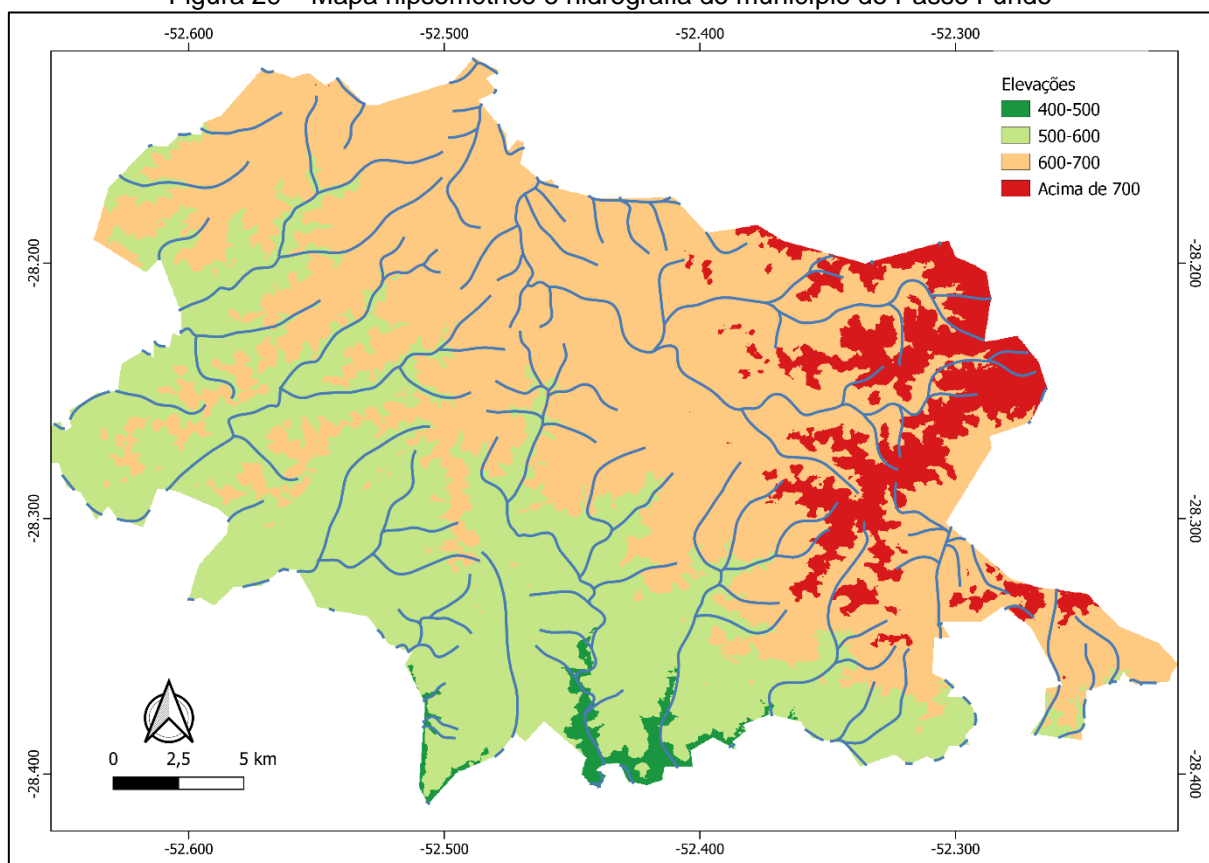
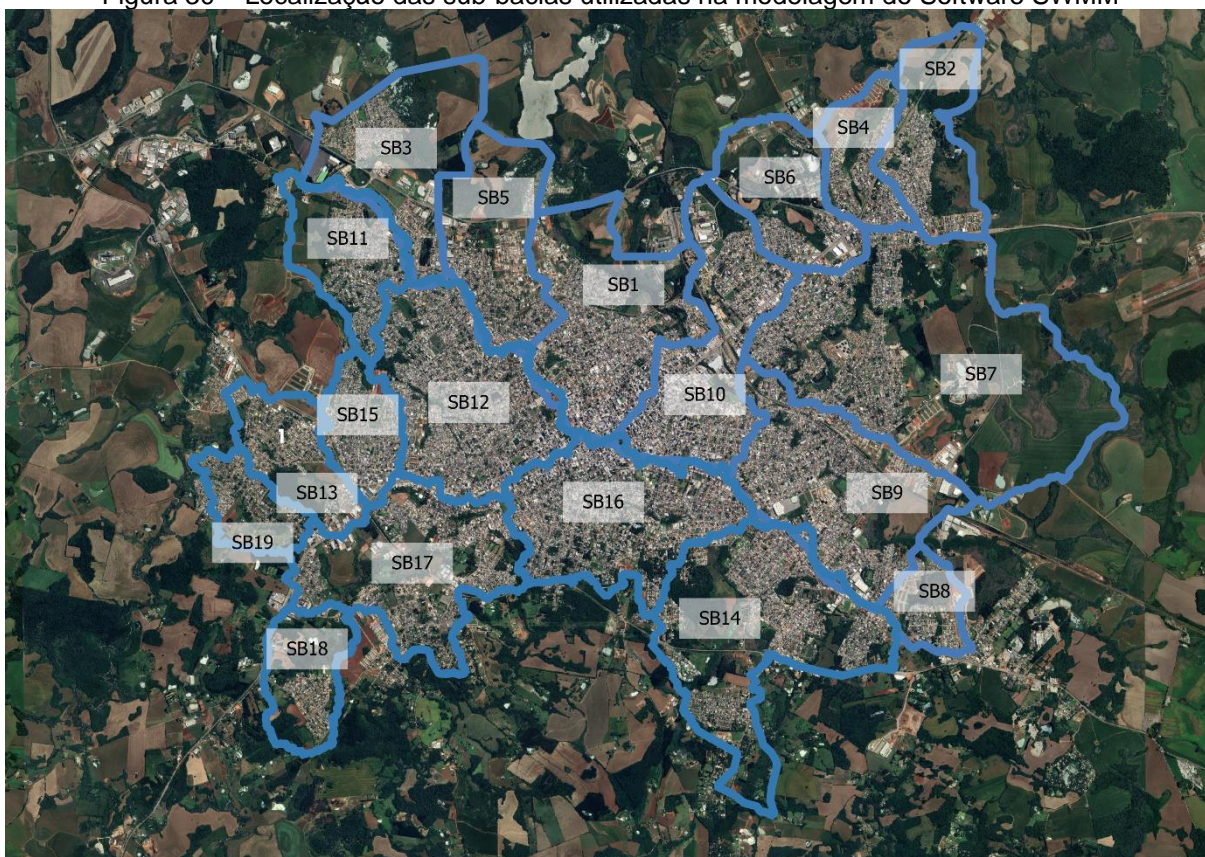


Figura 29 – Mapa hipsométrico e hidrografia do município de Passo Fundo



A modelagem do comportamento da rede levou em consideração a chuva de projeto, calculada pelas equações IDF. O município de Passo Fundo foi dividido em 19 sub-bacias, conforme a Figura 30 que demonstra a localização de cada uma das sub-bacias utilizadas na modelagem do sistema, sendo que a maioria delas possui uma grande urbanização e pouca presença de áreas verdes, o que dificulta a infiltração da água e acelera o escoamento superficial, causando sobrecarga nos sistemas e prejudicando a população.

Figura 30 – Localização das sub-bacias utilizadas na modelagem do Software SWMM



Cada sub-bacia foi dividida em diferentes arquivos de entrada para o software SWMM, sendo que cada uma possuía diferentes tempos de concentração, pois cada uma delas tem um rio principal. Dessas, através do arquivo da planta planimétrica foram extraídos os comprimentos do talvegue, e o desnível máximo das curvas de nível, assim foi possível obter o tempo de concentração e o tempo de pico de cada uma delas. Esse tempo foi arredondado para o múltiplo de 5 mais próximo. Além disso, cada uma das sub-bacias foi dividida em bacias menores, a partir da sua área de influência que foi determinada pelas curvas de nível disponíveis na planta planialtimétrica, e os pontos considerados são os poços de visita. Os dados levantados podem ser encontrados na Tabela 18 - Sub-bacias .

Tabela 18 - Sub-bacias do município de Passo Fundo (continua)

Sub-bacia	Número de Sub-bacias	Número de pontos	tc utilizado (min)
SB1	98	134	50
SB2	87	141	105
SB3	106	170	90
SB4	350	415	200

Tabela 19 - Sub-bacias do município de Passo Fundo (conclusão)

Sub-bacia	Número de Sub-bacias	Número de pontos	tc utilizado (min)
SB5	126	343	30
SB6	83	124	150
SB7	325	385	300
SB8	28	36	40
SB9	358	444	100
SB10	312	348	120
SB11	90	168	50
SB12	315	333	150
SB13	20	29	40
SB14	234	266	90
SB15	112	91	50
SB16	332	344	200
SB17	85	192	50
SB18	15	23	40
SB19	32	49	40
TOTAL	3.108	4.035	

Os maiores valores de tempo de concentração, que é o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o seu escoamento, acontece nas sub-bacias SB4 e SB7, de 200 minutos e 300 minutos, respectivamente. Isso porque o comprimento dos talwegues dessas áreas é maior que os das demais bacias. Para cada uma das sub-bacias encontradas, foram extraídos os dados de entrada para a modelagem no SWMM. Um exemplo dos dados utilizados é demonstrado na Tabela 20 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com os dados de entrada utilizados para a sub-bacia SB8.

Tabela 20 - Dados de entrada da sub-bacia 8 no software SWMM (continua)

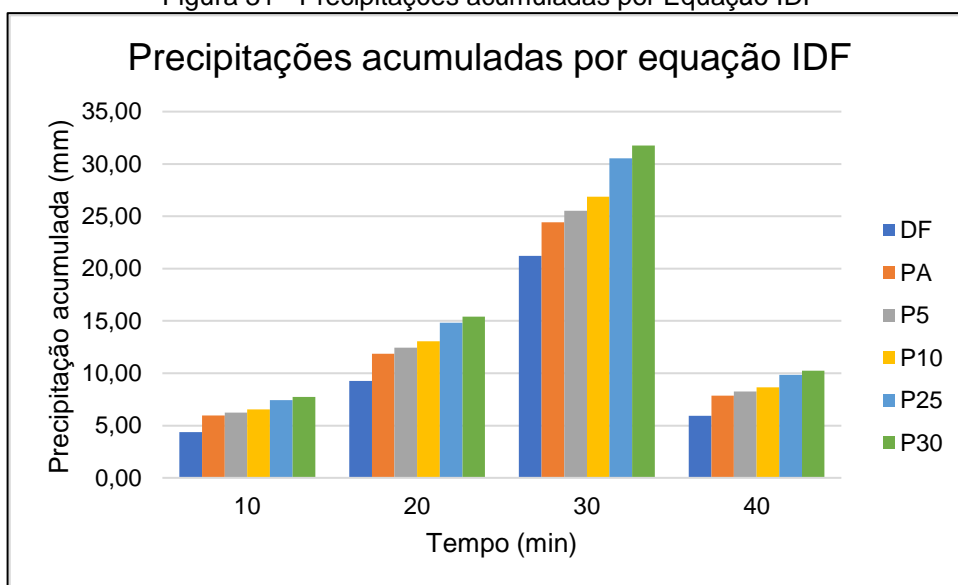
Sub-bacia	Área (m ²)	Largura equivalente (m)	Nó exutório	Declividade
SB1	13716,4	66,26	P1	6
SB2	2213,93	28,2	P1	5
SB3	2529,01	32,22	P3	5
SB4/SB5	2730,08	20,68	P6	6
SB6	1961,29	14,86	P4	6
SB7	1996,63	15,12	P5	6
SB8	1297,44	21,48	P5	5
SB9	2632,63	41,46	P7	8
SB10	1931,16	30,41	P10	14
SB11	15844,2	86,11	P12	10
SB12	19237,1	56,58	P29	3

SB13 4662,12 23,79 P6 9
Tabela 21 - Dados de entrada da sub-bacia 8 no software SWMM (conclusão)

Sub-bacia	Área (m ²)	Largura equivalente (m)	Nó exutório	Declividade
SB14	4806,24	24,52	P17	9
SB15	245,29	9,26	P10	11
SB16	2151,68	23,32	P18	8
SB17	4361,54	24,5	P23	8
SB18	15180,2	57,5	P10	8
SB19	8966,3	33,96	P19	8
SB20	3874,42	20,72	P24	9
SB21	3748,87	20,05	P27	9
SB22	14256,3	70,93	P26	7
SB23	10064,2	56,75	P30	8
SB24	4607,01	22,91	P33	7
SB25	4829,07	118,94	P33	10
SB26	2417,36	22,8	P33	8
SB27	2402,76	22,67	P34	8
SB28	4611,56	22,83	P31	7

Além dos dados de entrada para as sub-bacias, é necessário inserir a série temporal, com os a precipitação de projeto. No caso da sub-bacia 8, o tempo de concentração utilizado foi de 40 minutos, que foram divididos em tempos de 10 minutos.

Figura 31 - Precipitações acumuladas por Equação IDF



Fonte: Autora (2022).

Estes dados de entrada de precipitação, foram inseridos no software como uma série temporal do pluviômetro para gerar a simulação da rede. Após a execução da

simulação é gerado um relatório de resumo. Nesse relatório, está presente a síntese de inundação de cada nó, que é o dado que foi utilizado para a geração dos mapas.

Após os lançamentos iniciais, percebeu-se que para a Projeção de 5% e para a Projeção de 10% não haviam mudanças significativas, bem como para a Projeção de 25% e de 30%, neste caso, para não haver dados repetitivos e por indicarem cenários mais críticos, optou-se pela utilização dos cenários de 10 e 30%. Após essa definição, foi realizada a simulação em todas as sub-bacias, para obter o total de inundações na rede, conforme a Tabela 22 - Total de pontos alagados na rede., que demonstra que dos 4.035 pontos levantados, com a utilização da IDF atual 478 pontos da rede sofrem com os alagamentos.

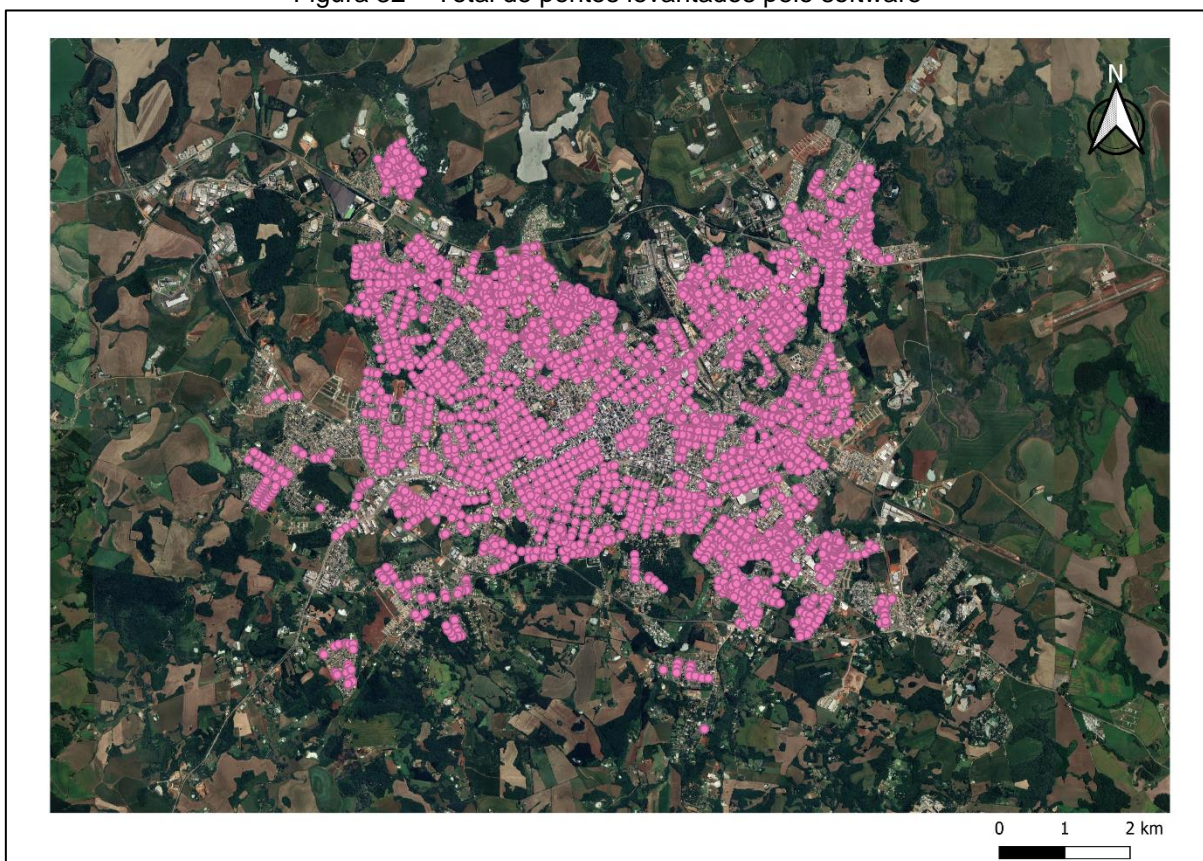
Tabela 22 - Total de pontos alagados na rede.

Pontos com alagamentos	
Denardin	456
Projeção atual	478
P10	497
P30	541

Fonte: Autora (2022).

Dos 4.035 poços de visita analisados, 11,30% apresentaram extravasamento para a IDF de Denardin, 11,84% para a projeção de precipitação atual, 12,32% para a P10 e 13,41% para a P30, demonstrando que com o aumento das precipitações a quantidades de pontos que sofrerão alagamentos na sub-bacia aumentará, fazendo com que áreas que hoje não sofrem com esse transtorno, passem a sofrer, necessitando desde já, de medidas para adaptação e mitigação para esse impacto. Conforme realizadas as simulações para o restante das equações, o número só aumentou. O que se nota é que, para a equação de Denardin e para a equação da Projeção atual, o número de pontos aumentou aproximadamente 4%, não é um aumento tão expressivo, mas demonstra novamente, que a utilização da equação se tornou obsoleta, já que pode subdimensionar a rede em alguns trechos. Através dos dados de volume inundado em que cada ponto, foi realizado o mapeamento para as áreas suscetíveis aos alagamentos, mostrando onde os pontos com maior volume estão concentrados. A Figura 32, demonstra em mapa, a totalidade de pontos levantados.

Figura 32 – Total de pontos levantados pelo software



As Figura 33, Figura 34, Figura 35, e Figura 36, mostram a localização dos pontos que sofrem com alagamentos e seu volume inundado. Na maioria dos pontos, para todas as projeções, os volumes são considerados baixos, o que indica que as soluções não precisam ser tão invasivas, mas que mesmo o volume sendo baixo, a quantidade de pontos é muito grande.

À medida que a Equação IDF utilizada muda, alguns pontos vão aumentando seu volume, ocasionando alagamentos mais graves. A partir da legenda presente nas Figuras é possível verificar como o volume máximo aumenta. Para a Equação de Denardin, existem apenas três pontos com valores altíssimos de inundação, quando se utiliza a Equação da Projeção Atual o número de pontos passa a ser cinco, para um incremento de 10%, seis pontos e de 30% passam a ser oito pontos com a indicação de volumes entre $2,00$ a $2,45 \times 10^6 \text{L}$, e cinco pontos com alagamentos entre $1,50$ a $2,00 \times 10^6 \text{L}$. Além do volume aumentar, a densidade de pontos passa a aumentar de mapa para mapa.

Figura 33 - Volumes de alagamento nos pontos para a Equação de Denardin

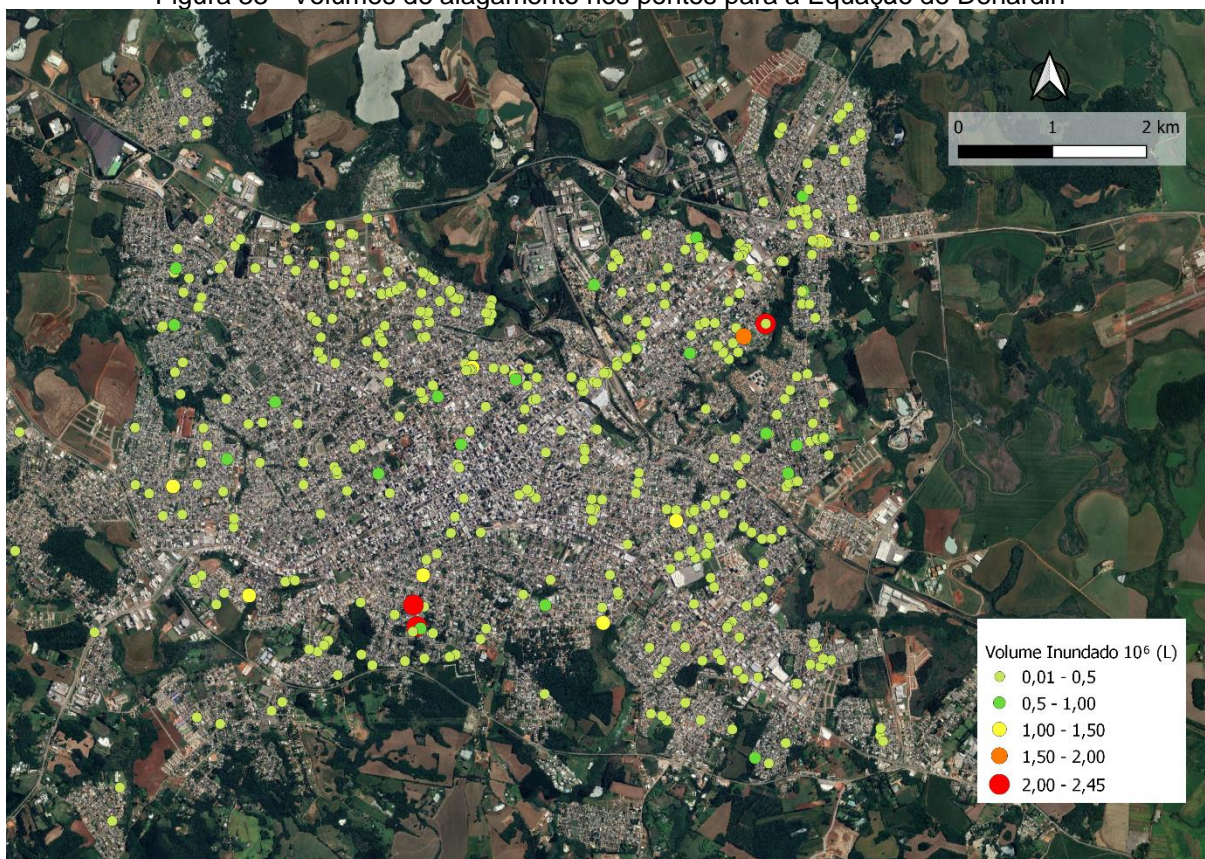


Figura 34 - Volumes de alagamento nos pontos para a Projeção Atual



Figura 35 - Volumes de alagamento nos pontos para um aumento de 10% nas precipitações

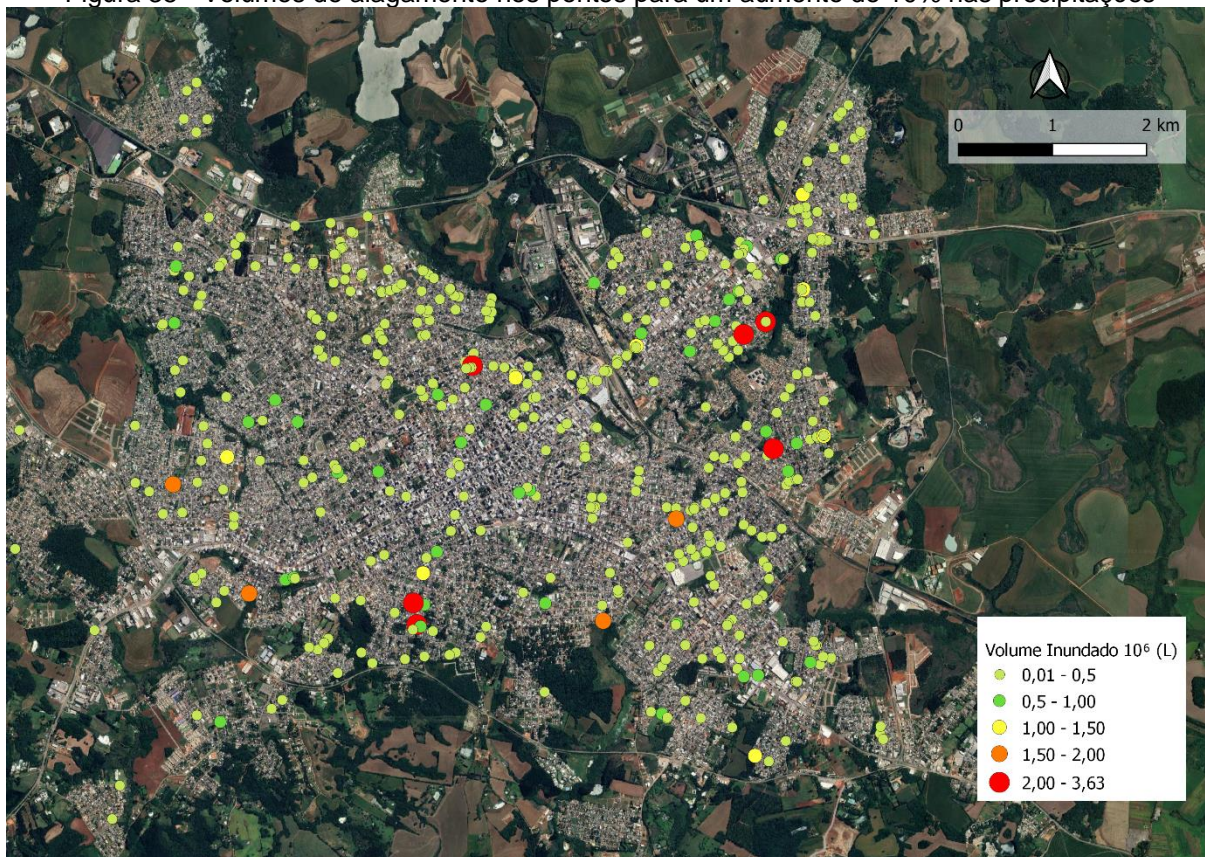
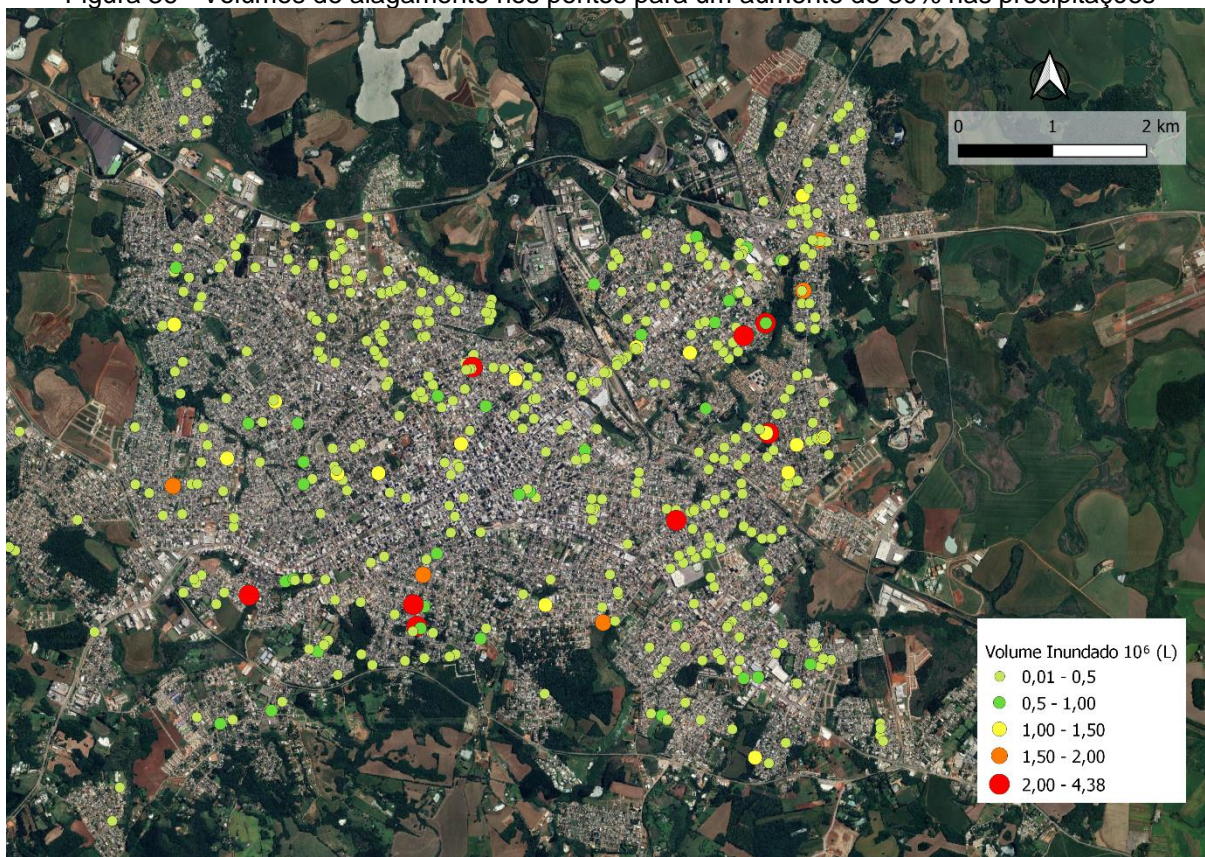


Figura 36 - Volumes de alagamento nos pontos para um aumento de 30% nas precipitações



Nota-se que os pontos que sofrem com volumes de inundação muito altos, estão relativamente próximos. Isso pode indicar que essas regiões necessitem de soluções mais invasivas para o combate aos alagamentos, como a troca do diâmetro dessas tubulações e até o dimensionamento de bacias de retenção, o que se tornaria um tanto difícil, já que essas áreas possuem grande urbanização e pouca presença de espaços verdes disponíveis.

A Figura 37 e a Figura 38, demonstram através de Gráficos na forma Box-Plot o comportamento das vazões e dos volumes observados. Para as Equações IDF analisadas. Os valores mínimos para as vazões se encontram entre 0,01 e 0,1 para as vazões pela Equação de Denardin e P10, e para a PA e P30 o valor fica compreendido entre 0,1 a 1, isso porque novos pontos surgem após a utilização da P10 com valores baixos e com o incremento na precipitação esses novos pontos aumentam o valor de suas vazões. Em geral, as vazões máximas não sofrem grandes variações, sendo de 2.028,77LPS para a Equação de Denardin e de 2.724,57LPS para a P30.

Figura 37 - Gráfico Box-Plot demonstrando o comportamento das vazões

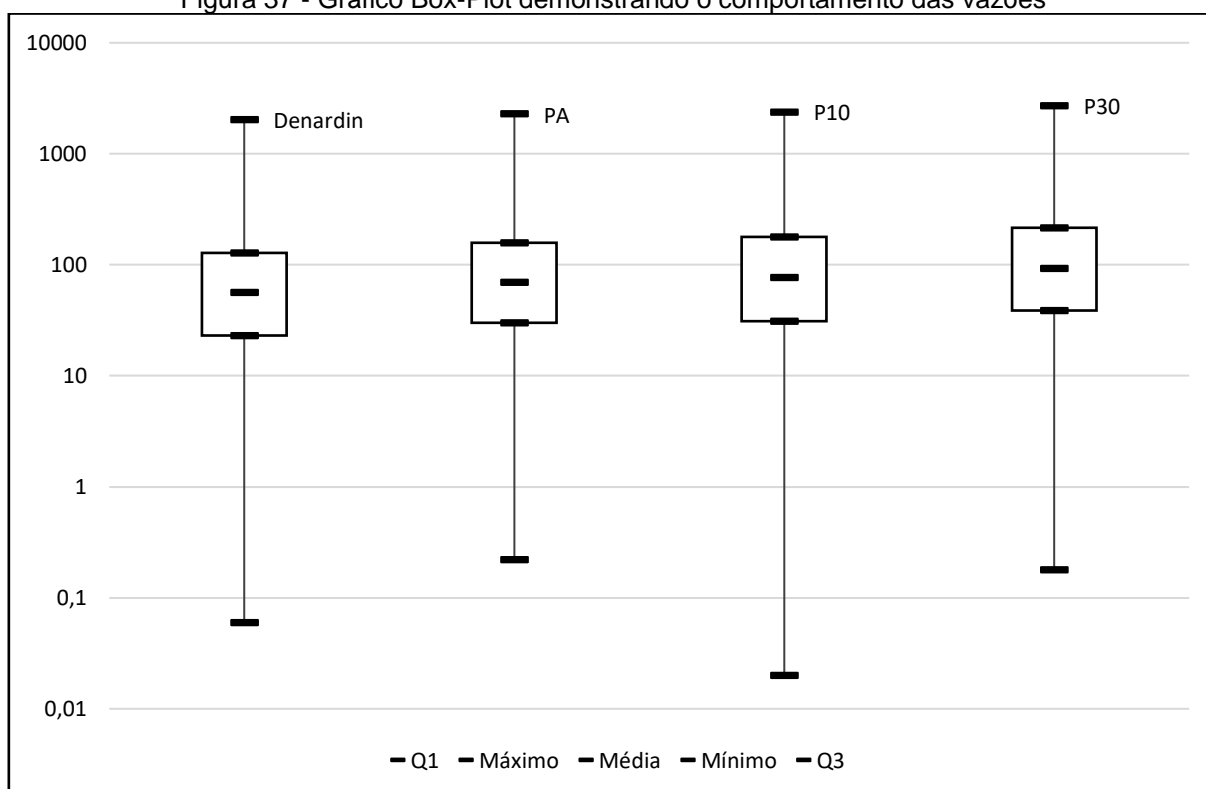
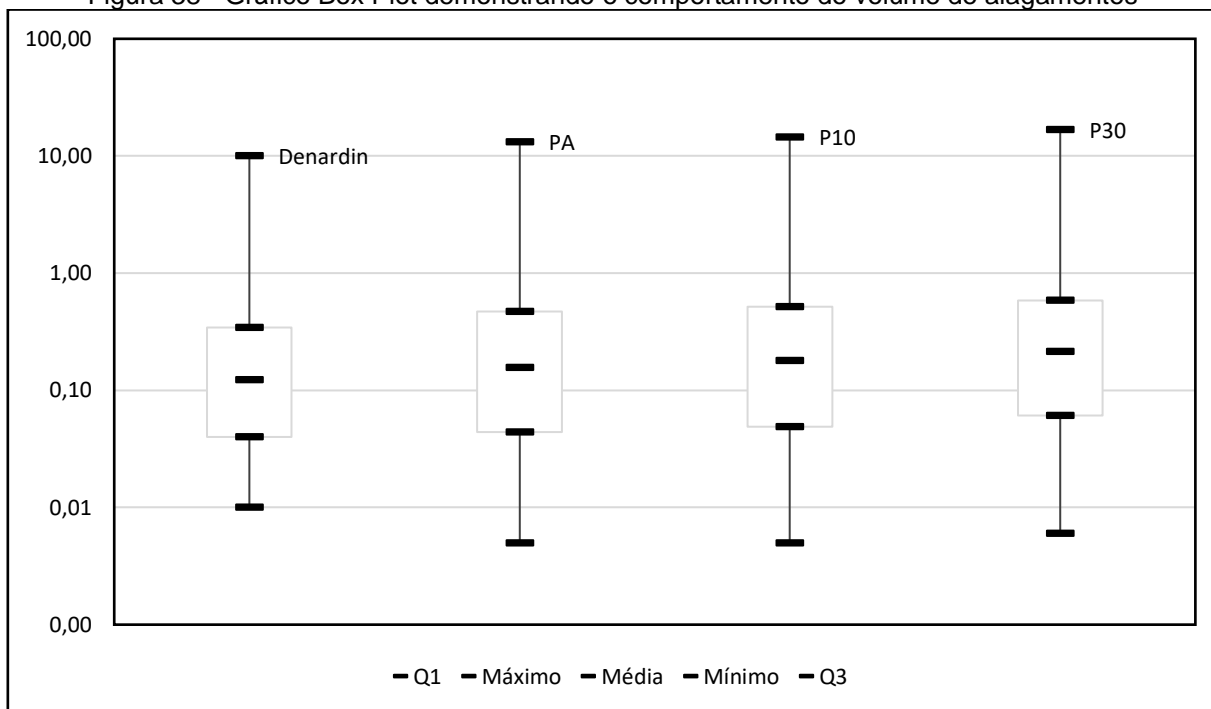


Figura 38 - Gráfico Box Plot demonstrando o comportamento do volume de alagamentos



4.3 PROPOSTAS PARA SOLUÇÃO DOS EVENTOS DE ALAGAMENTOS

A partir dos mapas realizados no item anterior, os alagamentos foram divididos em zoneamentos. Dessa forma, foram consideradas as soluções de medidas não estruturais para as de risco moderado, por serem menos invasivas. E para as regiões com risco alto, que são as de grande volume, foram consideradas combinações das medidas não estruturais com elementos da drenagem urbana sustentável.

4.3.1 Proposta de soluções para os alagamentos – Medidas não estruturais

Como uma alternativa complementar a rede de drenagem já existente, foram propostas medidas não-estruturais. Isso porque essas medidas iniciais adaptarão o município aos riscos de forma mais rápida, e menos invasiva do que a construção de novos dispositivos e a troca das tubulações. O Quadro 9 demonstra as principais sugestões de medidas não estruturais a serem utilizadas e seu funcionamento.

Quadro 9 - Proposta de medidas não estruturais para adaptação e mitigação dos alagamentos

MEDIDA NÃO ESTRUTURAL	PROTOCOLO
USO DO SOLO	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuir a taxa de ocupação nos terrenos nas quais possui o maior número de pontos com alagamento. - Elaboração de um plano de expansão urbana, levando em consideração os pontos com alagamento. - Redução do IPTU e demais taxas para construções conforme o uso do solo. - índices mais restritivos em áreas mais expostas aos alagamentos.
ZONEAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> - Reconhecimento de todos os pontos com os diferentes níveis de alagamentos; - Mapa dos alagamentos da cidade, subdividido em mapas de planejamento e alertas;
PLANO DIRETOR EM DRENAGEM URBANA	<ul style="list-style-type: none"> - Análise das medidas estruturais e não-estruturais a serem utilizadas na resolução dos problemas já existentes; - Protocolo para resolução dos problemas existentes, visando primeiramente as áreas mais expostas, resolvendo os problemas mais graves primeiro. - Programa de manutenção e inspeção dos sistemas de drenagem.
SEGURO ALAGAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> - Elaboração de um seguro enchente; - Informar aos proprietários das áreas com maior ocorrência de alagamentos a necessidade de contratar um seguro.

O município de Passo Fundo já possui Plano Diretor, mas para que o manejo das bacias hidrográficas seja mais eficiente, é necessária a elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana, que é um documento mais pontual para as questões de alagamentos, fornecerá diferentes diretrizes para cada sub-bacia, levando em conta suas particularidades.

Dessa forma, a partir dos mapas encontrados, com a localização dos pontos que sofrem com os alagamentos as sub-bacias foram divididas em três diferentes zoneamentos. As Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 demonstram o zoneamento para cada uma das análises climáticas realizadas. A zona de alagamentos I é uma área com volumes mais baixos de inundação, variando entre 0,01 a $1,00 \times 10^6$ L. A zona de alagamentos II é uma zona com volumes intermediários

de alagamentos, variando entre $1,00$ a $2,00 \times 10^6$ L. E a zona de alagamentos III são os locais que ocorrem volumes mais altos, proporcionando diversos danos a população de seu entorno.

Figura 39 - Zoneamento das sub-bacias (Denardin)

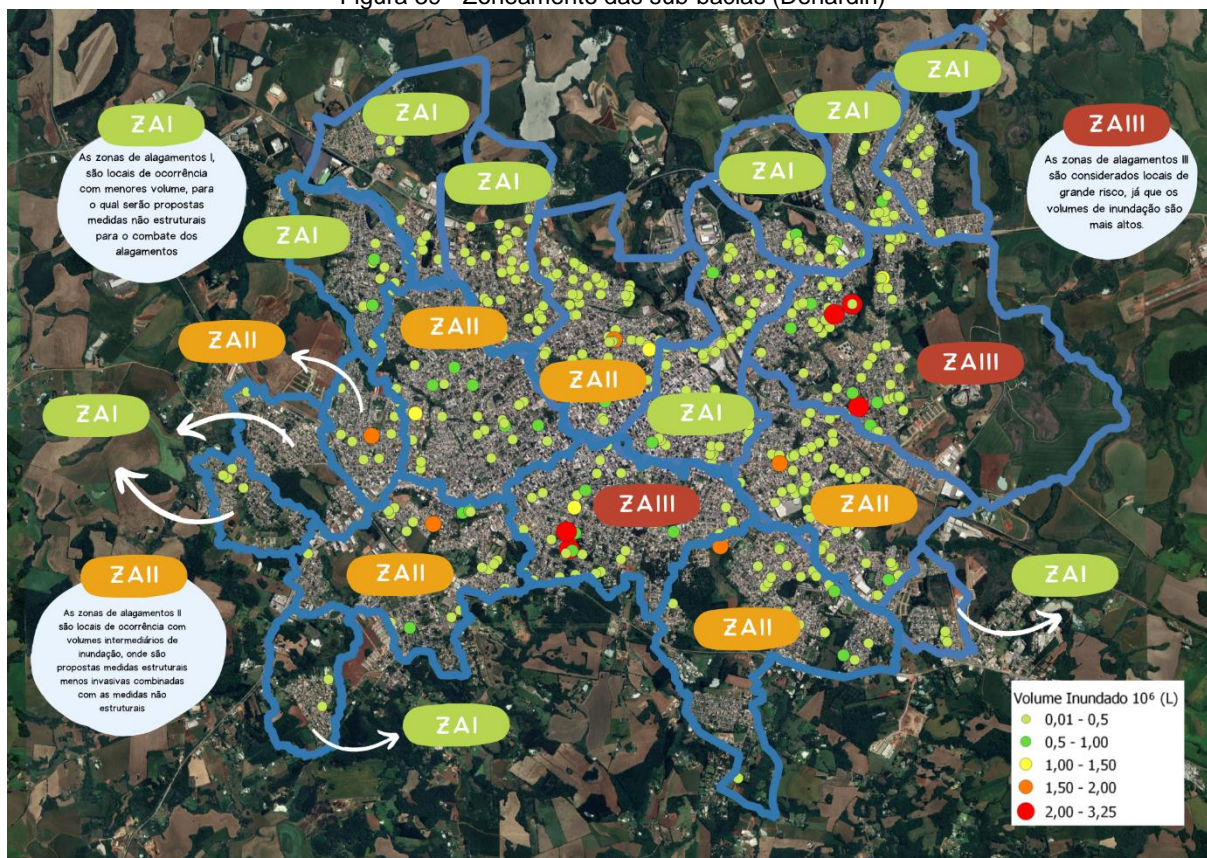
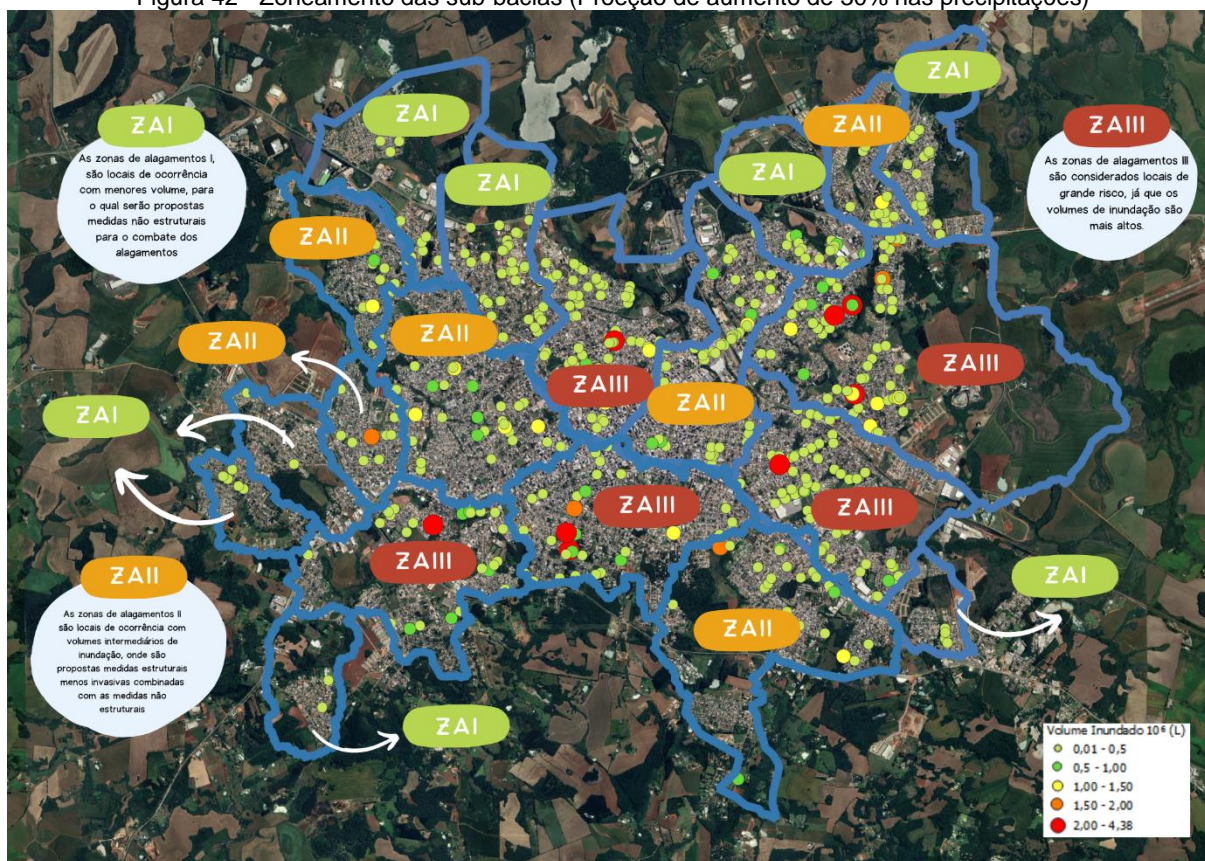


Figura 42 - Zoneamento das sub-bacias (Projeção de aumento de 30% nas precipitações)



A partir deste zoneamento, é possível perceber que as áreas de risco vão aumentando. Utilizando a Equação de Denardin, são encontradas duas ZII, utilizando a Equação da Projeção Atual esse valor continua o mesmo, mas a aumenta a quantidade de zonas intermediárias. Para a projeção de aumento de 10% nas precipitações a zona de alto risco aumenta para três localidades, e para a projeção de aumento de 30% nas precipitações são cinco localidades de alto risco, sendo que na sub-bacia 7, existe a concentração de três pontos, necessitando de intervenções mais expressivas.

4.3.2 soluções para os alagamentos – Medidas estruturais

Por se tratar de um cenário de alto risco, no qual os alagamentos possuem longa duração, além das alternativas já propostas anteriormente, a sugestão é a utilização de reservatórios de retenção. Para tanto, como a sub-bacia SB7, é a que possui a maior concentração de pontos com altos volumes de em alagamento, será proposta a transformação de duas áreas da bacia em praças, cada uma com um reservatório de retenção.

Cada reservatório atenderá a uma área de 0,807km² e de 0,851km², com um tempo de concentração de 30 minutos. Como o pior cenário é o P30, que possui vazões mais altas e durações maiores, sua equação IDF foi utilizada para o cálculo da intensidade de chuva na sub-bacia, resultando em uma intensidade máxima de projeto de 117,13mm/h. O coeficiente de escoamento foi estimado em 0,35 dessa forma, foi possível calcular a vazão pela seguinte Equação:

$$q_n = 2,778 \times 0,35 \times 117,13 = 113,88l .$$

Substituindo na equação de volume útil do reservatório (Equação 13), foi estimado um volume de 1,49mm/ha, que multiplicado por 10, para obter o valor em m/h e posteriormente pelas áreas do reservatório, o volume total resultante foi de 1.203,33m³ e 1.269,03m³. Dessa forma, optou-se pela utilização de duas bacias de detenção de 1.300,00m³ cada, com um orifício de 600mm de diâmetro como estrutura de saída.

A Figura 43 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstra uma área em potencial para locação de uma das bacias de detenção, tanto em função do escoamento, quanto do seu relevo. As áreas se mostram locais ideais para as bacias de detenção aberta que serão integradas na forma de parques para favorecer o aspecto paisagístico e para a utilização da população.

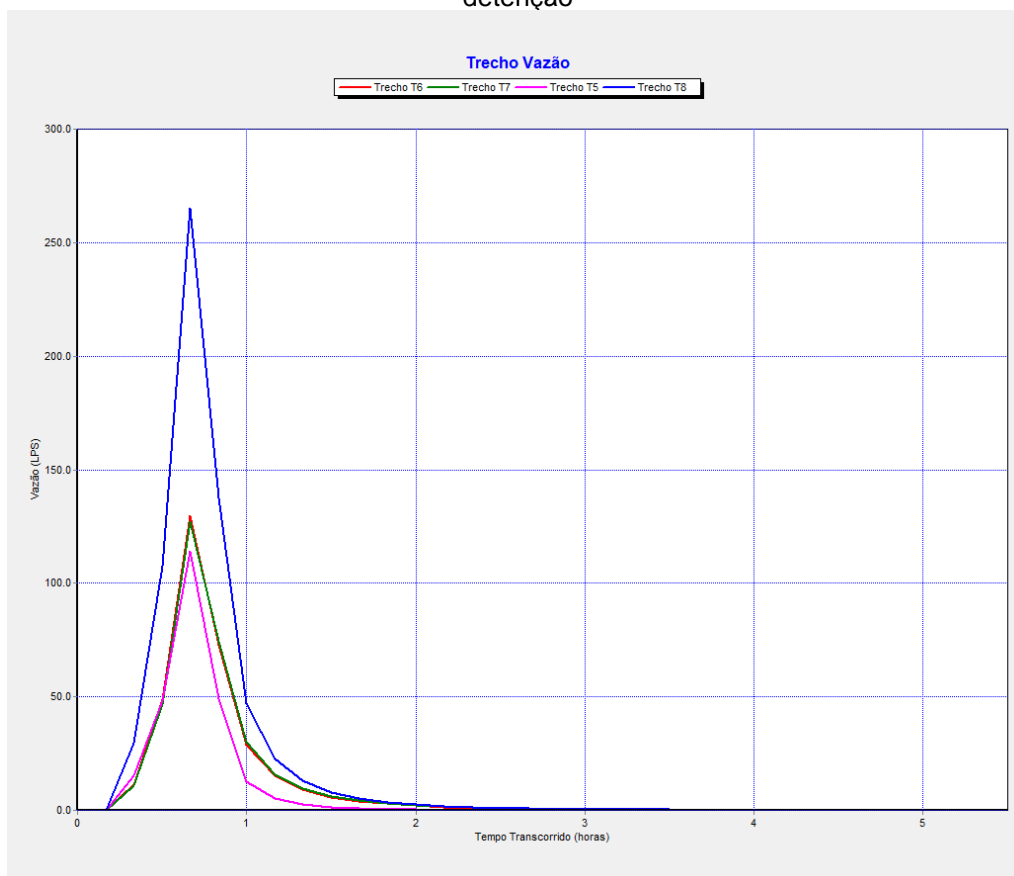
Figura 43 -Proposta para a localização da Bacia de Detenção



A Figura 44 e a Figura 45 demonstram hidrogramas para um trecho que sofre com os alagamentos, próximo ao local proposto para a bacia de detenção. Na Figura 44 demonstra o hidrograma antes do dimensionamento da bacia de detenção, sendo que um dos trechos possui uma vazão muito alta de aproximadamente 250 L/s, se comparado com os demais trechos. Já a Figura 45 demonstra o hidrograma para os mesmos trechos analisados, demonstrando que após o dimensionamento da bacia de detenção, a vazão de pico era de 250 L/s, agora se encontra em valores próximos a 160 L/s. Ou seja, houve uma redução de 64% na vazão de pico do trecho.

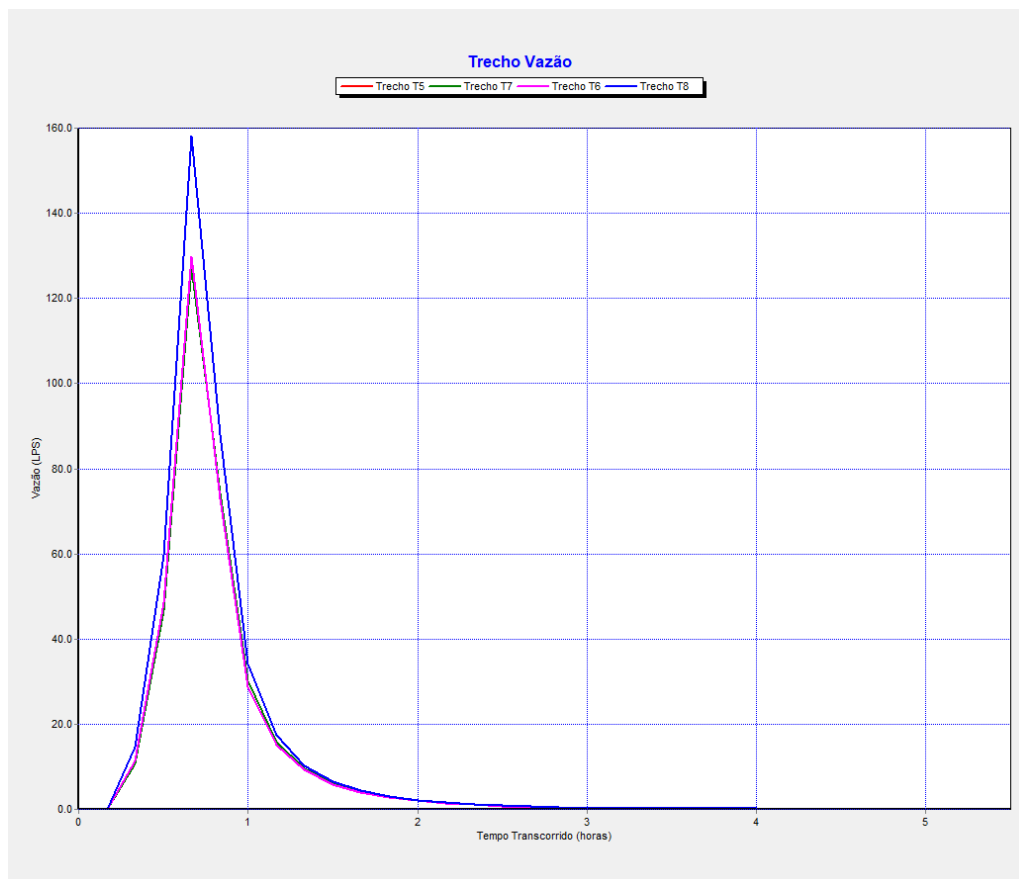
Esse resultado se assemelha ao encontrado no trabalho de Campana (2006), que observou que a redução média na vazão de pico com a utilização de uma bacia de detenção foi de 62,6% e pelo estudo proposto por Souza (2014), que demonstrou uma redução de 29% a 62% na vazão de pico e que além disso, a sua utilização da bacia de detenção reduziu a quantidade de poluentes presentes na água.

Figura 44 - Hidrograma para alguns dos trechos analisados, antes da utilização das bacias de detenção



Fonte: SWMM (2022).

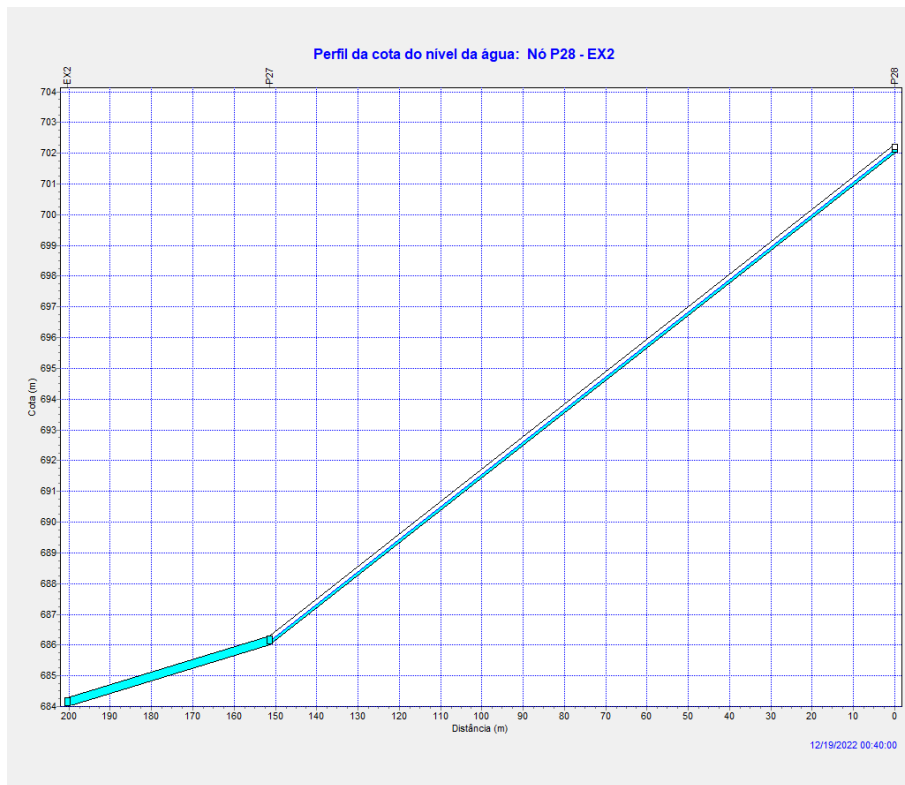
Figura 45 - Hidrograma para alguns trechos analisados, após a utilização da bacia de detenção



Fonte: SWMM (2022).

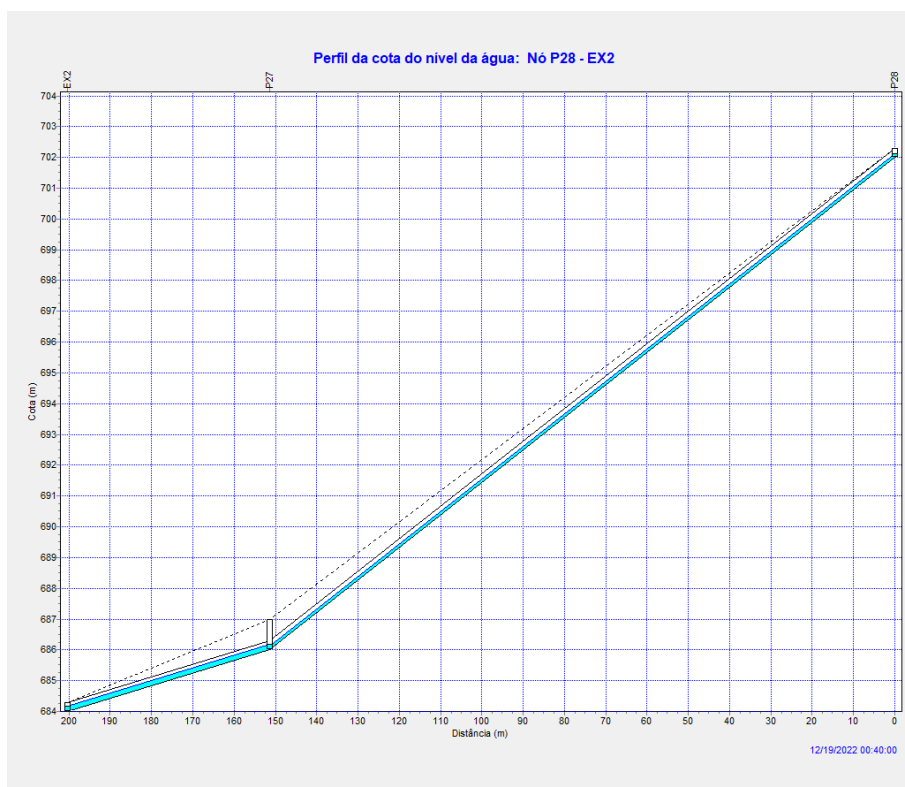
Já a Figura 46 e a Figura 47 demonstram o comportamento da chuva dentro da tubulação, a primeira imagem demonstra que ocorre um alagamento aos 40 minutos após o início da chuva, no qual dois pontos e uma tubulação possuem extravasamento, essa situação acontece na situação atual. A segunda Figura demonstra o comportamento dentro da tubulação após o dimensionamento de uma bacia de detenção, para o mesmo instante de ocorrência, ou seja, nesse trecho, além da BD diminuir a vazão no trecho, ela combate o alagamento nos pontos.

Figura 46 - Comportamento da tubulação antes da utilização da bacia de retenção



Fonte: SWMM (2022).

Figura 47 – Comportamento da tubulação após a utilização da bacia de retenção



Fonte: SWMM (2022).

As bacias de retenção, portanto, se tornam soluções úteis a rede complementar e combatem os alagamentos. Porém, nas sub-bacias analisadas, existem poucos espaços disponíveis para elas. Dessa forma, uma outra solução proposta para a área é a utilização, dentro dos próprios terrenos, espaços disponíveis em praças e nos canteiros da cidade, de jardins de chuva (sistemas de biorretenção).

Sistemas de biorretenção são depressões que tem como objetivo armazenar os volumes de escoamento, auxiliando sua infiltração no solo. Essa é uma solução útil para espaços urbanizados, já que podem ser integrados em diferentes áreas, desde um pequeno quintal, até estacionamentos. Suas dimensões, forma, materiais, e plantações podem ser variadas (LOURENÇO, 2014), mas a cobertura vegetal que será utilizada tem impacto direto no desempenho do sistema, por fazer parte do sistema de evapotranspiração e na capacidade de infiltração do sistema (LE COUSTOMER et al., 2012.)

Os jardins de chuva se mostraram eficiente em um trabalho realizado por (MELO et al., 2014), que utilizou um sistema de biorretenção piloto para análise de sua retenção temporária de chuva. A instalação deste dispositivo foi positiva para retenção temporária da chuva, mesmo para volumes de precipitação consideravelmente altos. Embora ainda não exista muita metodologia sobre a utilização dos Jardins de Chuva no Brasil, muitos autores recomendam que sua área superficial seja na proporção de 5% a 10% da área impermeável do local em que esse sistema de drenagem será implementado (SAATKAMP, 2019). No apresentado por Saatkamp (2019) foi comparada a utilização de jardins de chuva, em relação à uma bacia de amortecimento já construída em um loteamento. A autora destaca que a utilização dos sistemas de biorretenção é vantajosa, pois esses pequenos jardins são facilmente integrados aos ambientes, fornecendo danos baixos. Por serem estruturas menores, também fornecem menor custo para a sua instalação.

Com a realização do zoneamento e o levantamento de soluções possíveis foi realizada uma combinação de soluções para cada zoneamento. A Figura 48 aponta as soluções para cada um dos zoneamentos, sendo que a Zona de Alagamentos I teve suas propostas baseadas em medidas não estruturais. Enquanto as zonas de alagamentos II e III possui a combinação das medidas estruturais e não estruturais, sendo que a III possui propostas mais invasivas, como a troca de tubulações e o dimensionamento de bacias de retenção em áreas livres disponíveis.

Figura 48 - Proposta de soluções para os alagamentos para cada zoneamento

SOLUÇÕES PROPOSTAS

ZONA DE ALAGAMENTOS I

- Sistema de alerta para alagamentos;
- Programa educacional para os moradores locais.
- Aumento da taxa de permeabilidade para novas construções;
- Obrigatoriedade de jardins de biorretenção em novos loteamentos e condomínios.



ZONA DE ALAGAMENTOS II

- Sistema de alerta para alagamentos;
- Programa educacional para os moradores locais;
- Aumento da taxa de permeabilidade para novas construções;
- Obrigatoriedade de jardins de biorretenção em novos loteamentos e condomínios;
- Instalação de jardins de biorretenção em praças e canteiros já existentes;
- Inspeção da rede de drenagem a cada ano;
- Manutenção da rede a cada ano.



ZONA DE ALAGAMENTOS III

- Sistema de alerta para alagamentos;
- Programa educacional para os moradores locais;
- Aumento da taxa de permeabilidade para novas construções;
- Obrigatoriedade de jardins de biorretenção em novos loteamentos e condomínios;
- Instalação de jardins de biorretenção em praças e canteiros já existentes;
- Troca de tubulações para diâmetros maiores;
- Dimensionamento de bacias de detenção;
- Inspeção da rede de drenagem a cada seis meses;
- Manutenção da rede a cada seis meses.



Passo Fundo é a capital da microrregião de Passo Fundo, que é formada por 26 municípios, é um município classificado como polo regional que cumpre papéis de gestão no território gaúcho e é referência na área da saúde. Dessa forma, a ocorrência de alagamentos não afeta apenas o município, mas também, as demais localidades que dependem deles. Os alagamentos geram transtornos, interrompem o trânsito e atividades essenciais, por isso que identificar os pontos em que ocorre esse desastre hídrico e minimizar sua ocorrência é de extrema importância.

O mapeamento e as propostas de soluções servem para que o poder público, órgãos, entidades e associações tenham subsídios para a tomada de decisão. Não serve somente para o próprio município, mas para que os demais que compõem a microrregião de Passo Fundo possam ter um norte, frente a esse problema, seus riscos e suas fatalidades. Além disso, esse estudo pode ser utilizado para o dimensionamento da rede de drenagem de áreas que pertencem aos limites de influência do pluviógrafo utilizado, com bacias hidrográficas de regime de chuvas semelhantes.

Assim, este estudo faz com que o município esteja mais próximo de alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável, já que fornece informações para aumentar a urbanização inclusiva e sustentável (meta 11.3 do ODS 11), traz propostas para que os desastres hídricos sejam minimizados, diminuindo o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas (meta 11.5 do ODS 11). E por fim, reforça a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países (ODS 13).

5 CONCLUSÕES

As mudanças climáticas vêm ocorrendo ao longo dos anos e continuarão a ocorrer, diante disso, existe a necessidade de estudos que avaliem a mitigação e adaptação frente a eventos e desastres climáticos extremos. A drenagem urbana tem como objetivo minimizar os desastres associados a alagamentos, inundações, enchentes e enxurradas.

O presente estudo teve como objetivo realizar o mapeamento das áreas suscetíveis a alagamentos no município de Passo Fundo. Quantificar o impacto das mudanças climáticas é essencial para identificação das áreas em vulnerabilidade para a tomada de decisão nas estratégias de adaptação. O modelo de distribuição de Gumbel juntamente com a desagregação em chuvas diárias apresentaram resultados satisfatórios para a obtenção das equações IDF. Todas as distribuições testadas foram aceitas pelo teste de aderência de Anderson Darling. As equações IDF obtidas resultaram em estimativas com coeficiente R^2 de 0,9979 em relação aos dados e não apresenta diferença estatística significativa nos dados observados.

Ademais, as projeções futuras das equações IDFS evidenciaram o aumento na intensidade das chuvas. A partir da modelagem no SWMM utilizando as equações da IDF, notou-se o aumento dos pontos que sofrem com alagamentos conforme as projeções foram aumentando. Para a equação utilizada no dimensionamento do sistema de drenagem do município de Passo Fundo e para a projeção atual houve um aumento de 4% nos pontos que sofrem com os alagamentos, demonstrando que a utilização da equação proposta por Denardin já se tornou obsoleta.

A identificação das áreas que apresentaram pontos de alagamentos, através da representação por mapas, foi importante para que sejam identificadas qual áreas necessitam de intervenções maiores, seja por programas de alerta e evacuação, como por dispositivos complementares para o sistema de drenagem. Para tanto, foram propostas medida estruturais e não estruturais para resolução desses problemas. A maioria das soluções propostas foram não estruturais, já que por Passo Fundo ser uma cidade grande, a troca das tubulações geraria um transtorno muito grande, interrompendo outros serviços existentes. Além dessa interrupção, por ser uma cidade muito urbanizada, existem poucos espaços disponíveis para o dimensionamento de bacias de detenção e retenção, que são muito utilizadas como complementos para o sistema de drenagem.

Diante disso, vista à disponibilidade para a instalação de uma bacia de retenção, em uma área do município, foi realizado o dimensionamento dessa estrutura, e através do software SWMM e testado se sua utilização seria efetiva para trechos com alagamento. A bacia de retenção teve um resultado positivo, diminuindo a vazão de pico e fazendo com que o alagamento no trecho analisado não exista mais. Em comparação com outros trabalhos em que essa estrutura foi utilizada, percebe-se que ela realmente é uma medida muito efetiva para o combate aos alagamentos, além de fornecer uma estrutura paisagística para o local em que a estrutura é instalada.

Porém, como citado anteriormente, por existirem poucos espaços para instalação dessas estruturas, a bibliografia foi consultada novamente e avaliou-se a utilização de jardins de chuva para combate aos alagamentos. Nos trabalhos analisados, sua utilização demonstrou-se sempre positivas. Como a melhora da qualidade da água, melhora nos aspectos paisagísticos, diminuição do escoamento de saída e boa disponibilidade para utilização em locais com a grande presença de áreas impermeáveis.

As mudanças climáticas vêm ao longo dos anos trazendo impactos negativos para a sociedade, como o aumento de desastres naturais. Alagamentos são problemas frequentes e sua causa está associada a projetos inadequados de redes de drenagem. Pesquisas demonstram que com o aumento da temperatura, o regime de chuvas irá mudar, regiões secas, ficarão cada vez mais secas enquanto outras regiões sofrerão com chuvas intensas. Dessa forma, é necessário repensar nossas estruturas existentes.

Esta dissertação propôs uma nova equação de intensidade-duração e frequência, já que a que foi utilizada para o dimensionamento das redes de drenagem do município foi proposta em 1982, e o regime de chuvas não é estacionário. As IDFS foram majoradas para acompanhar as projeções de aumento de precipitações. Com isso, foi possível mapear as regiões de Passo Fundo que sofrem com os alagamentos, e com esses mapas, é possível verificar como o volume de alagamento irá aumentar conforme as mudanças climáticas. Esses mapas, servem de subsídio para a tomada de decisão ao combate de alagamentos. Com ele é possível ver quais regiões possuem mais pontos em alagamentos, quais pontos precisam de medidas de intervenção mais rápidas e invasivas e quais pontos podem ser resolvidos com medidas mais simples.

A sugestão para trabalhos futuros é a de que além de analisar pelo software SWMM como as mudanças climáticas afetarão os alagamentos, testar as combinações de soluções para verificar como o regime de escoamento se comporta em cada uma das propostas, dessa forma, escolhendo qual se adapta melhor ao local de estudo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Marcel Carvalho et al. Critérios para Escolha de Distribuições de Probabilidades em Estudos de Eventos Extremos de Precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 601-613, dez. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334004>.

AHLERT, Alvori ; CAPPONI, Neiva Feuser. “PAZ, JUSTIÇA E INSTITUIÇÕES FORTES”: os objetivos do desenvolvimento sustentável como referentes para a educação para a paz. **Revista Caminhos - Revista de Ciências da Religião**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 574, 10 set. 2019. Pontifícia Universidade Católica de Goiás -PUC Goiás. <http://dx.doi.org/10.18224/cam.v17i2.7304>.

ANDRIKOPOULOU, Tatiana et al. A Framework to Evaluate the SDG Contribution of Fluvial Nature-Based Solutions. **Sustainability 2021, Vol. 13, Page 11320**, [s. l.], v. 13, n. 20, p. 11320, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/SU132011320>.

ARAÚJO, Paulo Roberto de; TUCCI, Carlos E. M.; GOLDENFUM, Joel A.. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS NA REDUÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL. Rbrh - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 21-29, set. 2000. Trimestral.

ARORA, Naveen Kumar; MISHRA, Isha. COP26: more challenges than achievements. **Environmental Sustainability**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 585-588, dez. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42398-021-00212-7>.

BARBISAN, Ailson Oldair et al. Técnica de valoração econômica de ações de requalificação do meio ambiente: aplicação em área degradada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 119-128, mar. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522009000100013>.

BERTONI, Juan C.; TUCCI, Carlos E. M In: TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade/Ufrgs, 2001. 939 p.

BONNAFOUS, Luc; LALL, Upmanu; SIEGEL, Jason. A water risk index for portfolio exposure to climatic extremes: conceptualization and an application to the mining industry. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 2075-2106, 19 abr. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-2075-2017>.

CAMPANA, Nestor. Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de retenção. Ambiente e Água - An Interdisciplinary **Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 98-111, 31 dez. 2006. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.36>.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384p.

COLOMBELLI, Karina. **serviço público de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas: avaliação do contexto brasileiro e da adaptabilidade de práticas norte-**

americanas para a proposição de melhorias institucionais e financeiras. 2018. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CORTESE, Tatiana.Tucunduva. P.; NATALINI, Gilberto. **Mudanças Climáticas: Do Global ao Local.** [Digite o Local da Editora]: Editora Manole, 2014. 9788520446607. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520446607/>.

DOS SANTOS, Diego Jatobá et al. Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5°C, 2°C and 4°C. **Sustentabilidade em Debate**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 57–73, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933>

EMBRAPA, **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária** -. **Gráfico de Precipitação.** Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/app/principal/graficos.php>. Acesso em: 26 jun. 2022.

ENHS- **Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Download SWMM.** Disponível em: Acesso em: 16 ago. 2022.

FLECK, P. R.; QUEVEDO, D. M. Curvas de Intensidade/Duração/Frequência e dias sem chuva a partir de dados da estação meteorológica de Campo Bom/RS. In: SPG – Seminário de Pós-graduação, 9., Novo Hamburgo. **Anais do Seminário de Pós-Graduação. Novo Hamburgo:** editora Feevale, 2016. p. 161-168.

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

FREITAS, Carlos Machado de et al. Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.L.], v. 19, n. 9, p. 3645-3656, set. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1413-81232014199.00732014>.

GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnacarrère et al. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela - RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 99-108, 2006.

GARCIA, S. S.; et al. Determinação da equação intensidade-duração-frequência para três estações meteorológicas do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.6, p.575–581, 2011.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOMES, Pedro Henrique de Oliveira et al. Comparação entre medição de sinais e predição por simulado baseado em traçado de raios. **VIII Conferencia Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação**, Salvador, Ba, v. 1, n. 1, p. 1-14, out. 2019.

GONÇALVES, Lidiene Souza. **Relações Intensidade-Duração-Frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. Porto Alegre, 117p., 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GUASSELLI, Laurindo Antonio et al. Modelagem Hidrológica E Espacialização De Áreas Suscetíveis Às Inundações No Município De Igrejinha, Rs. **Geo UERJ**, [s. l.], v. 0, n. 28, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2016.10984>

HOLTZ, Fabiano da Costa. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas> >.

IPCC, 2014: Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambio climático, 2015. **Climate Change 2014: Mitigation of climate change**. Genebra, Suíça, p. 161, 2015. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume.pdf.

JENNINGS, Connor Patrick et al. The human cost of weather related disasters, v. 3, n. 7, p. 59–78, 2015.

KLEIN, Naíse Michele et al. **Curva de intensidade, duração e frequência de chuvas para a região de Maravilha-SC**. [s. l.],

LE COUSTOMER, S. et al. The Influence of Design Parameters on Clogging of Stormwater Biofilters: a large-scale column study. **Water Research**, v. 46, n. 20, p. 6743-6752, 2012

LOURENÇO, R. R. A. **Sistemas urbanos de drenagem sustentáveis**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2014.

MANUAL DO SWMM BRASIL. **EPA 5.0 – Modelo de Gestão de Drenagem Urbana**. 2012. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>. Acesso em: 09 de junho de 2022.

MENGUE, Vagner Paz et al. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai. **Pesquisas em Geociência**, Porto Alegre, v. 43, n. 1, p. 41-54, jan. 2016.

MELO, T. dos A. T. DE; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. da S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147-165, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

MILLER, James D. ; HUTCHINS, Michael. The impacts of urbanization and climate change on urban flooding and urban water quality: a review of the evidence concerning the United Kingdom. **Journal Of Hydrology: Regional Studies**, [S.L.], v. 12, p. 345-362, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>.

NACIONAL, O. **Chuva intensa provoca alagamentos e inundações em Passo Fund.** 2022. Disponível em: <https://www.onacional.com.br/cotidiano,1/2022/06/22/chuva-intensa-provoca-alagamento,122598>. Acesso em: 20 mar. 2023.

Nações Unidas, 2015 Nações Unidas **Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável A / RES / 70/1** Assembleia Geral das Nações Unidas, Nova York (2015) Nações Unidas. Tomar medidas para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; Nações Unidas: Paris, França, 2020.

OLIVEIRA, Dayanne Rodrigues. **Métodos de desagregação na geração de equações IDF**: estudo comparativo aplicado a municípios cearenses providos de pluviógrafos. 2021. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Cratêus, 2021.

PBMC. **Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2016. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PASSO FUNDO. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Passo Fundo – PMSB** Passo Fundo. (2013) Produto 2 – Relatório do Diagnóstico. Passo Fundo.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Séries Históricas de Estações. Disponível em: < http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>.

PINTO, Talita Priscila. Justiça climática: o grande tema da COP-27. **Agroanalysis**, São Paulo, v. 24, n. 12, p. 16-17, dez. 2022.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Plano Diretor De Drenagem Urbana**. Manual de Drenagem Urbana. 2005. Disponível em: < http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf >

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2 ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. P. 277.

PORTO, Rubem L. et al In: TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Universidade/Ufrgs, 2001. 939 p.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open-Source Geospatial Foundation. 2017. Disponível em: http://qgis.osgeo.org/pt_R/site/. Acesso: 09 de maio de 2022.

RÁDIO UIRAPURU. **VÍDEOS: chuva forte causa alagamentos e transtornos em diversos pontos de Passo Fundo.** 2022. Disponível em: <https://rduirapuru.com.br/videos-chuva-forte-causa-alagamentos-e-transtornos-em-diversos-pontos-de-passo-fundo/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

UIRAPURU, Rádio. **GALERIA: chuva forte e granizo atingem Passo Fundo causando alagamentos.** Disponível em: <https://rduirapuru.com.br/galeria-chuva-forte-e-granizo-atingem-passo-fundo-causando-alagamentos/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

RAMOS, Alessandra Maria. **Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade.** 2010. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

REZENDE, Greyce Bernardes de Mello. **Modelo Hidrológico e Hidráulico para Estimativa e Delimitação de Áreas Inundadas: uma ferramenta de auxílio à elaboração de planos diretores de drenagem urbana.** 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro. **Aplicação do SWMM para Modelagem Hidrológico-Hidráulica em uma Grande Bacia de um Rio Costeiro.** 2019. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/50566>. Acesso em: 21 maio 2022.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 26, n. 74, p. 65-92, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142012000100006>.

ROSSMAN, L. A., Storm Water Management Model. Version 5.0. National Risk Management Research Laboratory, **United States Environmental Protection Agency**, Cincinnati, Ohio. 2010.

RUDY, S.; DZIKI, D.; KRZYKOWSKI, A.; GAWLIK-DZIKI, U.; POLAK, R.; RÓZYLO, R.; KULIG, R. Influence of pre-treatments and freeze-drying temperature on the process kinetics and selected physic-chemical properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon* Ait.). **LWT-Food Science and Technology**, v. 63, n. 1, p. 497-503, 2015.

SAATKAMP, Gabriela. **JARDIM DE CHUVA: estudo comparativo de um sistema de biorretenção e uma bacia de amortecimento pluvial.** 2019. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SAITO, Silvia Midori et al. Avaliação dos desastres naturais ocorridos no Rio Grande do Sul em 2008. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Sbsr**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 4828-4834, abr. 2011.

SAMPAIO, Marcela Vilar. **Determinação e Espacialização das Equações de Chuvas Intensas em Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul. Santa Maria, 146 p., 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria.**

SANYAL, J. & LU, X.X. 2004. Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: A Review. **Natural Hazards**, 33: 283-301.

SÃO PAULO. Prefeitura de São Paulo. Secretaria de Desenvolvimento Urbano (org.). **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana.** São Paulo: Smdu, 2012. 170 p.

Sarpong, K.A., Xu, W., Gyamfi, B.A. et al. Can environmental taxes and green-energy offer carbon-free E7 economies? An empirical analysis in the framework of COP-26. **Environ Sci Pollut Res** (2023). <https://doi-org.ez116.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11356-023-25904-x>

SCHARDONG, André; SIMONOVIC, Slobodan P. POSSÍVEIS IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CURVAS INTENSIDADE DURAÇÃO FREQUÊNCIA. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves – RS, v. 1, n. 1, p. 1-9, nov. 2013.**

SHINMA, Taís Arriero. **Avaliação de incertezas na calibração automática do modelo SWMM.** 2015. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SHINMA, Taís Arriero. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão.** 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: Acesso em: 16 ago. 2022

SILVA JUNIOR, Marcos Antonio Barbosa da et al. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal Of Environmental Analysis And Progress**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 302-318, 28 ago. 2020. *Journal of Environmental Analysis and Progress - JEAP.* [http://dx.doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3025.302-318.](http://dx.doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3025.302-318)

SILVA V.L. et al.; Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. **Revista brasileira de meteorologia**, v.30, n.2, São Paulo, 2015.

SILVEIRA, André L. L. da; LOUZADA, José A., BELTRAME; Lawson In: TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Universidade/Ufrgs, 2001. 939 p.

SILVEIRA, André L. L. da in: TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Universidade/Ufrgs, 2001. 939 p.

SOUZA, Fernanda Pereira de. **monitoramento e modelagem hidrológica da sub-bacia do lago Paranoá - Brasília/DF - e avaliação de bacia de retenção.** 2014. 139

f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

STOKER, Robert P.; RICH, Michael J. Fertile Ground: implementing the 2030 agenda in u.s. cities. **Land**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1122, 22 out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/land10111122>

THOMAZ, Plínio. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. Guarulhos: Epusp, 2002. 452 p.

TILIO NETO, PD. Ecopolítica das mudanças climáticas: o IPCC e o ecologismo dos pobres [online]. Rio de Janeiro: **Centro Edelstein de Pesquisas Sociais**, 2010. 155 p. ISBN: 978-85-7982-049-6. Available from SciELO Books.

TOMAZ, Plínio. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. 2. ed. Guarulhos: Navegar, 2011. 478 p.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela (org.). **DESASTRES NATURAIS**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 197 p.

TOMINAGA, Erika Naomi de Souza. **Urbanização e Cheias**: medidas de controle na fonte. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

TONI, Pedro Augusto Weber. **Dimensionamento de drenagem pluvial**: impacto do arranjo do micro reservatório no controle do escoamento. 2013. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

TUCCI, Carlos E. M.; MELLER, Adalberto. Regulação das águas pluviais urbanas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 4, n. 1, p. 75-89, jan./jun. 2007.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília: CEPAL/IPEA, 2012. 50 p.

TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Universidade/Ufrgs, 2001. 939 p.

WATER, Grenoble; PLANNING, Urban. European Green Capital Award 2022 Good Practice Factsheets Grenoble EGC Winner 2022. [s. l.], 2022.

WARD, Philip J. et al. The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies. **Water Security**, [S.L.], v. 11, p. 100070, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100070>.

WOLLMANN, Cássio A. The floods in Rio Grande do Sul during 21th century. **Mercator**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 79-91, 30 abr. 2014. Mercator - Revista de Geografia da UFC. <http://dx.doi.org/10.4215/rm2014.1301.0006>.

ZHANG, W. et al. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. **Global and Planetary Change** 69:35-47. 2009.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br