

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**GIÓRGIA BUFFON PERINI**

**COMPARAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS DE PROJETO UTILIZANDO  
DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA NA BACIA DO ARROIO PINHAL - RS**

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**GIÓRGIA BUFFON PERINI**

**COMPARAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS DE PROJETO UTILIZANDO  
DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA NA BACIA DO ARROIO PINHAL - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso II desenvolvido no curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, entregue como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**GIÓRGIA BUFFON PERINI**

**COMPARAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS DE PROJETO UTILIZANDO  
DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA NA BACIA DO ARROIO PINHAL - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso II desenvolvido no curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, entregue como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Aprovado (a) em 09/12/2020**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Tiago Panizzon

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Romualdo Nunes Vanacor

Universidade de Caxias do Sul – UCS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, pelo apoio incondicional e inalterável em buscar mais um degrau em minha vida.

Ao meu orientador e professor Taison Anderson Bortolin, por me despertar a vontade em estudar a hidrologia e os fenômenos que a cercam, pela sua disponibilidade, atenção e por não medir esforços para a contribuição do estudo.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul por todo o conhecimento propagado e pela dedicação ao ensinar.

A Universidade de Caxias do Sul por proporcionar toda a infraestrutura para o conhecimento técnico e científico.

## RESUMO

As inundações e enchentes são consequências de fenômenos naturais, mas é percebido o seu aumento devido a desordenada urbanização das cidades, mudanças climáticas e ambientais, mas também as desigualdades sociais que aumentam a quantidade de pessoas residindo em áreas de risco. Dessa maneira se revela a importância de se estudar esses fenômenos visto que causam prejuízos e transtornos, reprimem o desenvolvimento contínuo das cidades, além de causar doenças e epidemias. Para reverter esse problema, é necessário o desenvolvimento de estudos hidrológicos que visem o planejamento urbano sustentável e o dimensionamento de obras hidráulicas. Tendo em mente a importância dos aspectos citados, esse estudo tem por objetivo realizar uma estimativa de vazões máximas em uma bacia hidrográfica para seis diferentes tempos de concentração e também diferentes métodos de estimativa de chuva excedente e hidrogramas. A sub-bacia hidrográfica do estudo está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, no município de Caxias do Sul/RS e possui área total de 45,8 km<sup>2</sup>. Para a estimativa das vazões por diferentes métodos foi utilizado o software *ABC6* que proporcionou encontrar as maiores vazões no método do Triângulo do SCS no método da chuva excedente de Green e Ampt. Os resultados obtidos de tempo de concentração apresentaram uma alta variabilidade, isso pode estar relacionado com as condições iniciais pelas quais foram determinadas cada uma das fórmulas. O maior tempo de concentração foi encontrado no método de SCS e o menor tempo no método de Kerby. Além disso, as altas taxas de urbanização na sub-bacia, 49,61% em relação a área total e o alto valor de CN, refletiram nas vazões máximas simuladas. Com finalidade da implementação do reservatório de detenção, foi utilizado o método de Kirpich para o tempo de concentração como parâmetro para a análise, por ser o mais utilizado na literatura em geral. Indica-se que a implementação de apenas um reservatório de detenção não seria suficiente para amenizar os impactos causados pelas enchentes que ocorrem no local da sub-bacia. Por fim, recomenda-se como continuidade desse estudo uma análise mais criteriosa com a simulação de mais reservatórios para analisar o resultado do amortecimento no hidrograma de pico.

**Palavras-chave:** Urbanização. Inundações. Modelagem hidrológica. Tempo de concentração. Vazões de pico.

## ABSTRACT

Floods and inundations are the consequences of the natural phenomena, but their increase is perceived due to disordered urbanization of the cities, climate and environmental changes and to social inequalities that increase the number of people residing in areas of risk as well. Because of that is possible to realize the importance of studying these phenomena revealed, since they cause damage and inconvenience, repress the continuous development of the cities and can also cause diseases and epidemics. To solve this problem, it is necessary to develop hydrological studies aimed to sustainable urban planning and the dimensioning of hydraulic works. Having in mind the importance of the mentioned aspects, this study aims to estimate the maximum flows in a hydrographic basin for six different concentrations times and also different methods for estimating excess rain and hydrographs. The hydrographic sub-basin that is being studied is located in the River Caí Hydrographic Basin, in the city of Caxias do Sul/RS and has a total area of 45.8 km<sup>2</sup>. To estimate the flow rates by different methods, the ABC6 software was used, which provided the highest flow rates in the SCS Triangular method for the Green and Ampt method. The results obtained from the time of concentration showed a high variability, this may be related to the initial conditions under which each of the formulas was determined. The longest concentration time was found in the SCS method and the shortest time in the Kerby method. In addition, the high rates of urbanization in the sub-basin, 49.61% in relation to the total area and the high CN value, reflected in the simulated maximum flows. In order to implement the detention reservoir, the Kirpich method for the concentration time was used as a parameter for the analysis, as it is the most used in the literature in general. It is indicated that the implementation of just one detention reservoir would not be sufficient to mitigate the impacts caused by the floods that occur at the sub-basin. Finally, it is recommended as a continuation of this study a more careful analysis with the simulation of more reservoirs to analyze the result of the damping in the peak hydrograph.

**Keywords:** Urbanization. Floods. Hydrological modeling. Time of concentration. Peak flows.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico.....	15
Figura 2 - Alterações provocadas pela urbanização no ciclo hidrológico.....	20
Figura 3 - Aumento da vazão devido aos impactos da urbanização .....	20
Figura 4 - Características dos leitos nos rios.....	22
Figura 5 - Elevação do rio .....	22
Figura 6 - Processo de impacto da urbanização .....	25
Figura 7 - Modelos precipitação-vazão.....	31
Figura 8 - Hietograma tipo .....	33
Figura 9 - Hidrograma tipo .....	34
Figura 10 - Fluxograma metodológico.....	36
Figura 11 - Mapa de localização de Caxias do Sul .....	37
Figura 12 - Mapa de localização da sub-bacia do Arroio Pinhal com exutório definido na localidade de Galópolis .....	52
Figura 13 - Classificação do tipo de solo na sub-bacia hidrográfica de estudo .....	54
Figura 14 - Classificação do uso do solo da sub-bacia de estudo .....	55
Figura 15 - Ordenamento de Strahler.....	57
Figura 16 - Comprimento do talvelgue .....	57
Figura 17 - Hietogramas para diferentes tempos de concentração.....	61
Figura 18 - Hidrogramas para os tempos de concentração extremos.....	65
Figura 19 - Mapa de localização do reservatório .....	68
Figura 20 - Comparativo hidrogramas TR 10 anos x 50 anos .....	69
Figura 21 - Hidrograma amortecido pelo reservatório proposto.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de $K_t$ e $S_f$ .....	41
Tabela 2 - Parâmetros de Horton para diferentes tipos de solo.....	42
Tabela 3 - Parâmetros de Horton considerados no software.....	43
Tabela 4 - Métodos de cálculo do tempo de concentração .....	47
Tabela 5 – Parâmetros da curva IDF de Caxias do Sul.....	48
Tabela 6 - Número da curva CN para bacias urbanas na condição de umidade II.....	50
Tabela 7 - Características físicas do reservatório.....	51
Tabela 8 - Resultados dos parâmetros fisiográficos da sub-bacia de estudo .....	55
Tabela 9 – Parâmetros considerados e resultados do tempo de concentração .....	59
Tabela 10 - Resultados do parâmetro CN .....	59
Tabela 11 - Volumes totais dos hietogramas conforme o tempo de concentração .....	61
Tabela 12 - Resultados de volumes excedentes e infiltrados conforme os tempos de concentração.....	63
Tabela 13 - Resultados das vazões de pico para TR 10 anos.....	66
Tabela 14 - Diferença percentual entre métodos.....	67
Tabela 15 - Vazão amortecida.....	70

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tempos de concentração.....	18
Quadro 2 - Condicionantes antrópicos.....	23
Quadro 3 - Causas e efeitos da urbanização.....	24
Quadro 4 - Medidas extensivas e intensivas.....	27
Quadro 5 - Parâmetros da bacia hidrográfica.....	38
Quadro 6 - Grupos hidrológicos do solo das sub-áreas.....	50
Quadro 7 - Classificação dos solos da bacia hidrográfica.....	53

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
3.1	CICLO HIDROLÓGICO .....	14
3.2	BACIA HIDROGRÁFICA .....	16
3.3	URBANIZAÇÃO E INFLUÊNCIA NO CICLO HIDROLÓGICO.....	19
3.4	CHUVAS INTENSAS E ESCOAMENTO .....	21
3.5	MEDIDAS DE CONTROLE PARA INUNDAÇÃO .....	26
<b>3.5.1</b>	<b>Medidas estruturais.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Medidas não estruturais .....</b>	<b>27</b>
3.6	MODELOS HIDROLÓGICOS .....	29
<b>3.6.1</b>	<b>Modelos precipitação-vazão .....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	36
<b>4.1.1</b>	<b>Localização da bacia hidrográfica .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Características físicas da bacia hidrográfica .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Classificação do tipo e uso do solo .....</b>	<b>40</b>
4.2	MODELAGEM PRECIPITAÇÃO-VAZÃO .....	40
<b>4.2.1</b>	<b>Métodos de cálculo da chuva excedente .....</b>	<b>40</b>
4.2.1.1	Método do SCS .....	40
4.2.1.2	Método de Green e Ampt .....	41
4.2.1.3	Método de Horton .....	42
<b>4.2.2</b>	<b>Métodos de cálculo do hidrograma.....</b>	<b>43</b>
4.2.2.1	Método Triangular do SCS .....	40

4.2.2.2	Método de Clark.....	41
4.2.2.3	Método de Santa Bárbara .....	42
4.3	PARÂMETROS DE ENTRADA NO SOFTWARE ABC 6 .....	46
<b>4.3.1</b>	<b>Tempo de concentração .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Período de retorno e intervalo de discretização dos cálculos .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Curvas IDF.....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Número de curva – CN .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Reservatório paralelo.....</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
5.1	DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA .....	52
5.2	CLASSIFICAÇÃO DO TIPO E USO DO SOLO .....	53
5.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	55
5.4	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....	58
5.5	NÚMERO DA CURVA – CN .....	59
5.6	CHUVA EXCEDENTE .....	59
<b>5.6.1</b>	<b>Hietogramas.....</b>	<b>60</b>
<b>5.6.2</b>	<b>Volumes infiltrados e excedentes .....</b>	<b>62</b>
5.7	HIDROGRAMAS .....	63
5.8	RESERVATÓRIO .....	68
<b>5.8.1</b>	<b>Localização do reservatório.....</b>	<b>69</b>
<b>5.8.2</b>	<b>Modelagem para TR de 50 anos.....</b>	<b>69</b>
<b>5.8.3</b>	<b>Amortecimento do hidrograma.....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As inundações e enchentes são consequências de fenômenos naturais como chuvas intensas e outros eventos climáticos que fazem parte da dinâmica planetária. Apesar disso é perceptível que ao longo do tempo em decorrência das ações antrópicas esses eventos sejam intensificados, pois tais ações alteram o meio, mediante canalizações, urbanização intensa das cidades, desmatamento, entre outros. Essas ações têm potencializado os efeitos consequentes dos desastres e impactado negativamente diferentes regiões, alterando o ambiente e causando danos para milhares de pessoas.

A intensificação de problemas associados às inundações e enchentes pode ser explicada devido ao aumento geral da população global, mudanças climáticas e ambientais e a consolidação de um modelo econômico caracterizado por grandes desigualdades sociais, que contribui significativamente para o crescimento de populações residindo em áreas de risco (MENEZES, 2014).

Segundo o IBGE (2010), pesquisas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística revelam que 8,27 milhões de brasileiros vivem em áreas de risco em 827 municípios do país. A região sudeste é a que apresenta o maior número de pessoas em área de risco, com destaque para São Paulo que registrou 1,52 milhões de pessoas e Minas Gerais com 1,37 milhões.

Conforme o IBGE (2018), a região sul do país, com 144 municípios avaliados, revelou que 703.368 moradores estão em áreas de risco, representando 6% da população total desses municípios. O estado do Rio Grande do Sul, com população total de 10.693.929 habitantes, totaliza 274.390 moradores em áreas de risco nos municípios monitorados, o que representa 7,1% da população total.

Em Caxias do Sul, também há situações semelhantes, como é mostrado na reportagem do jornal Pioneiro do dia 07 de maio de 2018 em que a população do bairro Galópolis sofreu com os efeitos das enchentes devido a construções ribeirinhas. Outra situação similar foi noticiada no mesmo jornal no dia 25 de fevereiro de 2020 onde o Arroio Pinhal transbordou novamente após um intenso evento de precipitação, causando transtornos e preocupações à população que reside nessas áreas (PIONEIRO, 2010).

A partir desses dados, revela-se a importância de se estudar as enchentes e os fenômenos que a cercam, visto que causam prejuízos e transtornos, reprimindo o desenvolvimento contínuo das cidades, acarretando perdas econômicas significativas, doenças e epidemias, perda de colheitas e vidas humanas. À vista disso, diversos pesquisadores buscam uma solução efetiva

para o seu controle, entendido como o conjunto de medidas que visam reduzir seus impactos ou neutralizar as consequências da interferência antrópica que agrava as cheias.

Essas medidas são divididas em medidas estruturais e não estruturais. Conforme Lou (2010) as medidas estruturais são as que modificam o ambiente por meio de obras de engenharia na bacia ou no rio como reservatórios de amortecimento e modificações no curso d'água. Já as medidas não estruturais buscam reduzir os prejuízos causados pelas enchentes por meio de medidas preventivas.

Para a aplicação de medidas estruturais, geralmente são empregados modelos matemáticos e hidrológicos que permitem entender o comportamento das chuvas e vazões em bacias hidrográficas. Os modelos precipitação-vazão são ferramentas mais utilizadas de simulação hidrológica e têm por objetivo entender o comportamento da bacia, possibilitar o dimensionamento de obras hidráulicas e previsão de cheias (BARP, 1999). Na literatura, existem diferentes métodos de estimativa de vazões máximas, como SCS, Clark, Santa Bárbara, entre outros, que podem apresentar diferentes resultados quando aplicados em uma mesma bacia.

Geralmente em bacias hidrográficas urbanas as séries de vazões são incompletas ou inexistentes, isso pode ser explicado pelo fato de serem bacias de menor tamanho, visto que bacias maiores com volumes mais significativos despertam maior interesse a estudos, mas também devido a custos operacionais. Existem atualmente diversos métodos empíricos que possibilitam estimar vazões a partir da propagação de hidrogramas sintéticos que apresentam diferentes resultados por considerarem diferentes parâmetros em suas estimativas. Dessa forma a modelagem se torna uma alternativa para contornar o problema da escassez de informações quantitativas de vazões, visto que possibilita alcançar dados de vazões de projeto (GALVÍNCIO; SOUSA; MOURA, 2005).

Tendo em mente a importância dos aspectos citados, esse trabalho apresenta um estudo da aplicação de diferentes métodos de vazões de projeto empregando o software *ABC6*, contribuindo também com a avaliação do efeito da proposição de uma medida estrutural que tem por objetivo minimizar os problemas de inundação em uma bacia hidrográfica urbanizada no município de Caxias do Sul.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o escoamento superficial em uma bacia urbana por diferentes métodos e analisar o impacto da aplicação de uma medida estrutural nos hidrogramas de cheia.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Delimitar e realizar a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica referente ao estudo;
- b) Comparar as vazões de pico estimadas por diferentes métodos com o auxílio do software ABC6;
- c) Analisar a influência de diferentes tempos de concentração na estimativa de vazões máximas na bacia de estudo;
- d) Avaliar o impacto nas vazões de projeto com a implementação de uma medida estrutural na bacia considerando o pior cenário de estimativa de vazão.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo, é abordado o referencial teórico, com os tópicos de importância para a construção e entendimento das questões referentes a este estudo. Os assuntos aqui tratados são: ciclo hidrológico, bacia hidrográfica e suas características, urbanização e sua influência no ciclo hidrológico, chuvas intensas e escoamento, medidas de controle para inundações e os modelos hidrológicos para o cálculo do escoamento superficial.

#### 3.1 CICLO HIDROLÓGICO

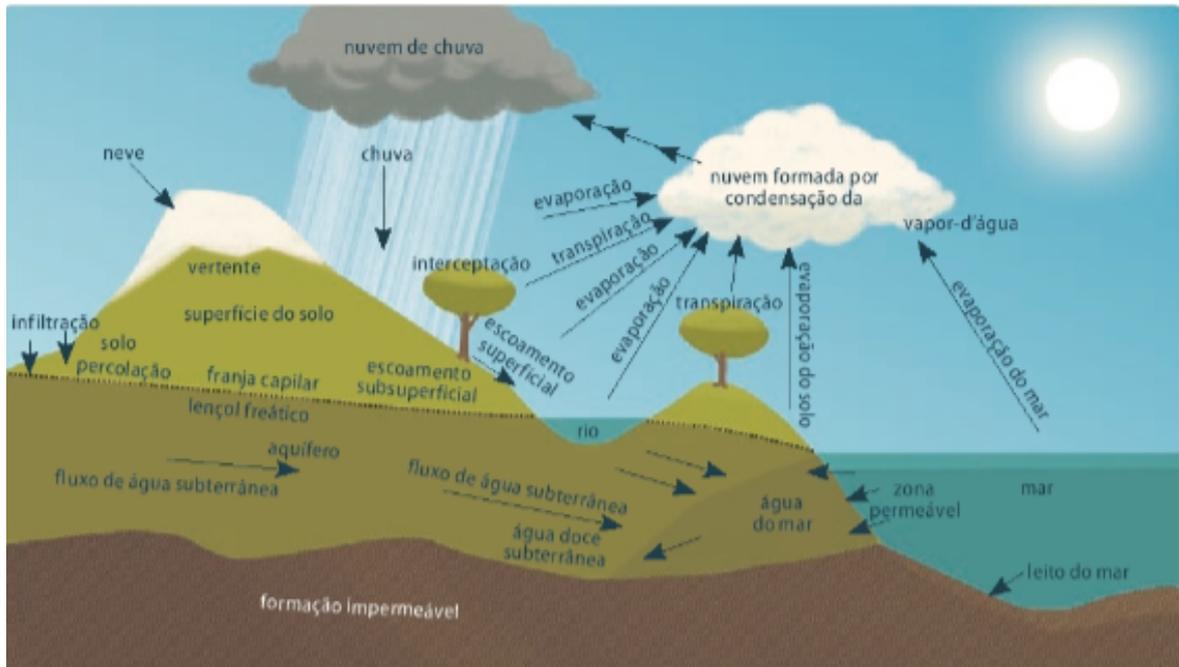
Para Tucci (2009), o ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a *superfície terrestre* (continentes e oceanos) e a *atmosfera*, alimentado principalmente pela energia solar, gravidade e rotação terrestre. A troca entre as circulações da superfície terrestre e da atmosfera, ocorre em dois sentidos:

- a) No sentido superfície-atmosfera: o fluxo de água acontece principalmente na forma de vapor, como decorrência dos fenômenos de evaporação dos oceanos, lagos e rios e transpiração das vegetações;
- b) No sentido atmosfera-superfície: o fluxo de água acontece em qualquer estado físico, sendo mais relevante as precipitações (chuva e neve), ocorrendo também fenômenos como infiltrações, escoamento superficial e subterrâneo.

De acordo com Silva (2015), “o ciclo hidrológico não tem começo e fim estritamente definidos e os diversos processos envolvidos ocorrem de forma contínua e dinâmica”. Entre os fatores contribuintes para a variabilidade do ciclo hidrológico, pode-se indicar: diferenças na quantidade de energia solar que atinge os diversos locais da Terra, quantidade de vapor de água, CO<sub>2</sub> e ozônio na atmosfera e variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais (TUCCI, 2009).

O ciclo hidrológico possui diversas fases e processos. Os de interesse principal e citados nesse trabalho podem ser verificados na Figura 1 e são: evaporação, condensação, precipitação, interceptação, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo.

Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico.



Fonte: TAVEIRA (2018).

O ciclo hidrológico inicia pela evaporação, que acontece quando a água no seu estado líquido retorna ao estado gasoso devido à energia recebida do sol e de outras fontes (PINTO et al., 2017). O vapor transportado por massas de ar pode condensar-se e formar nuvens que resultam em precipitações (VILLELA; MATTOS, 1976).

Quando a precipitação entra em contato com a superfície terrestre, pode sofrer interceptação, que é o processo de interrupção da água precipitada nas folhas e caules da vegetação presente e que não chega a atingir a superfície do solo (TAVEIRA, 2018). As copas das árvores interceptam as precipitações e retardam o escoamento, a água que não é interceptada pode seguir diversos outros caminhos (CHRISTOFIDIS, 2010). Visto que o solo é um meio poroso, a água infiltra no solo enquanto ele não se satura. A partir do momento que acontece a saturação, a infiltração decresce até uma taxa residual e o excesso não infiltrado da precipitação gera o escoamento superficial, que é orientado por gravidade das cotas mais altas para as cotas mais baixas da superfície (TUCCI, 2009).

O escoamento pode ser dividido em três tipos: superficial, subsuperficial e subterrâneo. O escoamento superficial se refere à água que não é absorvida pelo solo e acaba sendo escoada sobre a superfície em direção aos leitos dos rios, é um processo impulsionado por gravidade, ou seja, a água é transportada das partes mais altas para as mais baixas. O escoamento subsuperficial ocorre nas primeiras camadas do subsolo, alimenta os canais fluviais

possibilitando a vazão no rio e é impulsionado por gravidade também. Já o escoamento subterrâneo, ou denominado escoamento de base ocorre nas camadas mais profundas do solo e de forma mais lenta que ambos citados acima, é responsável pela vazão dos rios quando não ocorre precipitação, ou seja, é responsável pela recarga do aquífero em tempos de estiagem (TAVEIRA, 2018).

O escoamento é a parcela de chuva que não é absorvida pelo solo, ou seja, é responsável pela vazão no rio. Assim, é possível perceber que é um fator essencial nos estudos em relação à bacia hidrográfica.

### 3.2 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica pode ser entendida como a área de captação natural dos fluxos de água, originados a partir da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, denominado exutório, onde toda a vazão afluyente pode ser medida (COLLISCHONN; TASSI, 2011; GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

O corpo de água principal dá o nome à bacia hidrográfica e recebe contribuição dos seus afluentes, sendo que cada um deles pode apresentar contribuintes menores. Dessa forma, em uma bacia existem várias sub-bacias ou áreas de drenagem, que são unidades fundamentais para a conservação e o manejo da mesma (SEMA, 2020).

As diferentes atividades que acontecem em uma bacia hidrográfica alteram a sua resposta hidrológica. Dessa forma, podem ser classificadas em: bacias naturais, onde há vegetação nativa com pouca ou nenhuma interferência antrópica, bacias rurais, áreas com atividade principal focada na agricultura e/ou pecuária, e bacias urbanas, áreas urbanizadas e com maior interferência antrópica (TAVEIRA, 2018).

A bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema físico, onde há entrada de água (volume de água precipitado) que geram saídas de água (escoamento e evapotranspiração) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). É possível analisar a transformação de chuva em vazão com o auxílio do hidrograma, ou seja, as saídas, e hietogramas, referente as entradas – a precipitação ao longo do tempo (TUCCI, 2009).

Sua delimitação é feita por divisores de água, ou denominados divisores topográficos, que estão localizados na parte mais alta do relevo entre duas vertentes. A delimitação pode ser realizada por meio digital com apoio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) ou manualmente utilizando cartas topográficas (TAVEIRA, 2018).

A análise de índices relativos à bacia hidrográfica auxilia no entendimento do funcionamento da mesma e como esses valores podem influenciar na sua resposta hidrológica.

A área é uma das características mais importantes da bacia por definir sua potencialidade hídrica (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Para Villela e Mattos (1976) é a projeção horizontal inclusa entre seus divisores topográficos e é o elemento básico para o cálculo de outras características físicas. A forma da bacia interfere nos picos de vazão, sendo que para as bacias com formato circular normalmente ocorrem picos de enchentes mais elevados – visto que o canal principal e tributários são mais curtos – do que bacias com formatos alongados (TAVEIRA, 2018).

A densidade de drenagem é definida pela soma do comprimento de todos os cursos d'água no interior da bacia dividido pela área da bacia (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). É um índice importante por representar a influência da topografia, solo e vegetação. Valores baixos de densidade de drenagem normalmente estão associados a regiões com rochas permeáveis e chuvas de baixa intensidade (LIMA, 2008).

O relevo tem grande influência sobre fatores meteorológicos e hidrológicos da região, visto que a velocidade do escoamento superficial é determinada pela declividade do terreno (a declividade do terreno determina o tempo que a água leva para se distribuir pela bacia hidrográfica) e fatores do clima, como temperatura e precipitação que dependem da altitude (VILLELA; MATOS, 1976).

Segundo Collischonn e Dornelles (2013), a declividade é uma característica que afeta diretamente o tempo de viagem da água por toda bacia hidrográfica. Quanto maior for a declividade do terreno onde a bacia está inserida, maior serão as variações das vazões instantâneas (PORTO; FILHO; SILVA, 1999).

A ordem dos cursos da água pode ser determinada seguindo os critérios introduzidos por Strahler, em que todos os canais sem tributários são de primeira ordem (mesmo que sejam nascentes), de segunda ordem são originados pelo encontro de dois canais de primeira ordem, de terceira ordem são formados pela junção de 2 canais de 2ª ordem e assim sucessivamente (TUCCI, 2009).

O tempo de concentração pode ser definido como o tempo de viagem da gota mais distante da bacia, desde o início do escoamento, até o momento em que a gota atinge o exutório (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Pode ser definido também como o tempo entre o fim do evento de precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma, caracterizado pelo fim do escoamento superficial e o predomínio do escoamento subterrâneo. Depende da distância total

a ser percorrida e velocidade com que a água escoar. Dessa forma é possível analisar que o tempo será maior em bacias maiores, visto que a água deve percorrer maiores distâncias, do que em bacias pequenas; e em bacias montanhosas será maior do que em planas. Existem diversas equações empíricas que podem determinar o tempo de concentração, como Kirpich, Onda cinemática, Dooge, Kerby, entre outros (ESTEVEZ; MENDIONDO, 2003).

O tempo de concentração é um importante parâmetro de projeto haja visto que é o mais utilizado no cálculo dos hidrogramas e das chuvas de projeto, entretanto, em face das diversas fórmulas existentes esse parâmetro torna-se difícil de ser estabelecido com precisão, diante da pouca ou quase nenhuma informação sobre a aplicabilidade das fórmulas (SILVEIRA, 2005). No Quadro 1 encontram-se alguns métodos existentes e suas definições.

Quadro 1 - Tempos de concentração

<b>Método</b>	<b>Comentário</b>
Onda cinemática	Adequada para pequenas bacias. A tendência é de que o tempo de concentração seja superestimado à medida que a área da bacia aumenta (PAIVA, 2001).
Bransby-Willians	Definida para bacias hidrográficas rurais com área inferior a 130 km <sup>2</sup> (KIM et al., 2019).
Dooge	Determinada a partir de dados de 10 bacias rurais na Irlanda com áreas entre 140 a 930 km <sup>2</sup> . É esperado que funcione melhor para bacias médias e com escoamento predominante em canais (ESTEVEZ E MENDIONDO, 2003; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).
Kerby	Estabelecida para bacias com área inferior a 0,05km <sup>2</sup> e comprimento do talvelgue inferior 0,37 km. Em bacias maiores pode gerar resultados incoerentes (SAMPAIO et al., 2016).
Kirpich II	Estipulada a partir de sete bacias do Tenessee com canais bem definidos, altas declividades (variando de 3 a 10%) e áreas de até 0,5km <sup>2</sup> . É esperado que forneça bons resultados para bacias nessas condições, entretanto estudos mostram que o método apresenta erros relativamente baixos quando aplicada em bacias maiores, de até 12000km <sup>2</sup> (PAIVA, 2001; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).
SCS	Definida em bacias rurais com áreas de até 8 km <sup>2</sup> , é muito sensível em relação ao valor de CN. Para a aplicação em bacias urbanas é necessário ajuste em função da área impermeabilizada e dos canais que sofrem modificações. Esse equacionamento acaba por superestimar o valor do tempo de concentração em comparação a outros como as expressões de Kirpich e Dooge, e também para valores baixos de CN (ESTEVEZ E MENDIONDO, 2003).

Fonte: A autora (2020).

### 3.3 URBANIZAÇÃO E INFLUÊNCIA NO CICLO HIDROLÓGICO

Antes da população se concentrar nos grandes centros, a maior parte residia no campo. A partir da industrialização a população rural se deslocou para as cidades em busca de emprego e serviços como saúde, educação e transporte. Esse processo intensificou a urbanização no Brasil, que aconteceu de maneira não planejada.

Segundo o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre (2005), atualmente as cidades se desenvolvem com falta de planejamento e esse processo provoca impactos negativos tanto ao meio ambiente como à população. É possível perceber que o controle e uso do solo ocorre de forma inadequada e a população passa a residir em áreas de risco. Da mesma forma, sistemas de drenagem são mal pensados, o que gera aumento das inundações em algumas áreas das cidades.

O crescimento urbano acontece de maneira insustentável e, conforme as cidades crescem, as modificações no ambiente natural ficam explícitas. Poletto (2014) destaca que a ocupação urbana altera o ambiente por meio de áreas impermeáveis como pavimentação de ruas, edificações, telhados, estacionamentos, calçadas, etc. diminuindo os tempos de concentração e aumentando os picos de vazão.

Assim sendo, é possível perceber que a urbanização altera o meio natural e a cobertura vegetal, provocando mudanças nos componentes do ciclo hidrológico natural. As principais alterações produzidas no ciclo hidrológico podem ser visualizadas na Figura 2 e são descritas por Tucci (1997):

- a) Redução da infiltração no solo e conseqüentemente aumento do escoamento de base;
- b) Aumento das vazões máximas, antecipando e elevando seus picos, visto que o tempo de deslocamento do escoamento é reduzido por estar canalizado. Essa alteração está representada na Figura 3;
- c) Diminuição do nível do lençol freático devido a falta de alimentação (redução da infiltração). Além disso, nota-se um prejuízo na recarga dos mananciais superficiais em épocas de estiagem pelo lençol freático. Como consequência, é possível dizer que a urbanização aumenta as enchentes em épocas de chuva e reduz a vazão dos cursos d'água em épocas de seca;
- d) Redução da evapotranspiração, pois a superfície urbana não retém água da mesma forma que a cobertura vegetal.

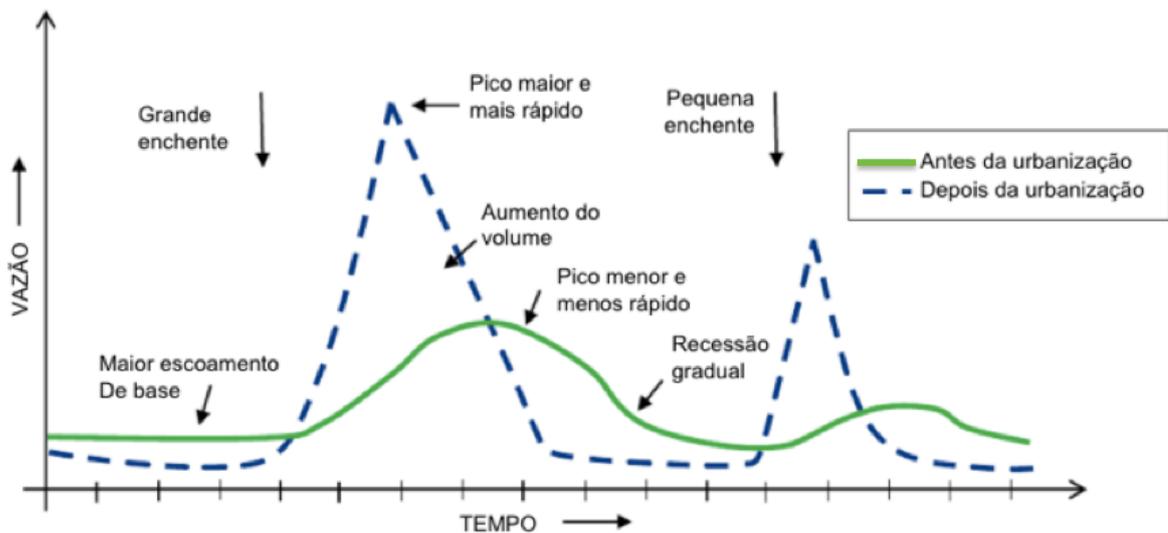
A intensidade que as alterações acontecem variam de acordo com as condições de cada localidade, conforme o tipo de solo, cobertura, geologia, pluviosidade e clima. Nota-se também que o efeito da urbanização é mais significativo para precipitações de maior frequência. Para precipitações de baixa frequência, a relação entre a urbanização e o ciclo hidrológico são menores.

Figura 2 - Alterações provocadas pela urbanização no ciclo hidrológico.



Fonte: FARIA (2013).

Figura 3 - Aumento da vazão devido aos impactos da urbanização



Fonte: Adaptado de Schueler (1987 apud TUCCI, 2005).

Além da urbanização causar mudanças no ciclo hidrológico, pode gerar também o aumento de situações de risco a desastres naturais como enchentes e inundações, devido ao crescimento desordenado das cidades.

### 3.4 CHUVAS INTENSAS E ESCOAMENTO

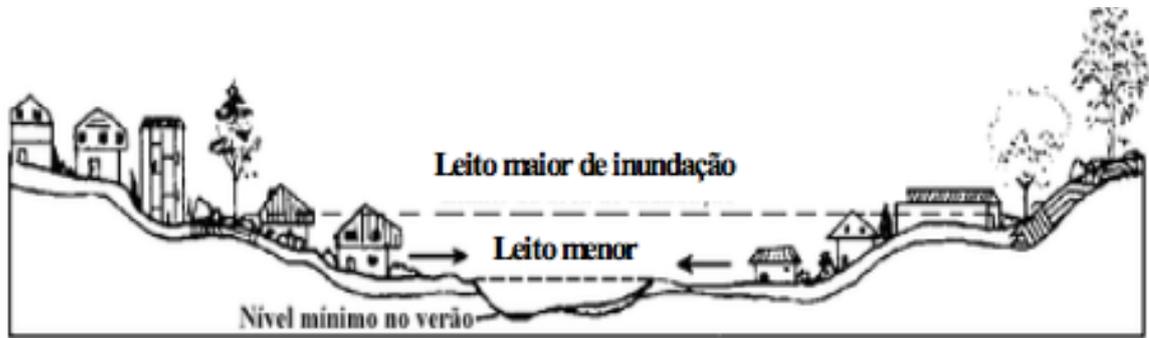
Atualmente, uma parcela da população reside em áreas de risco, que são suscetíveis a enchentes e aos transtornos associados. Esse processo é uma das características negativas da urbanização que altera o meio para o seu conforto, modificando sistemas de drenagem naturais, processo esse que intensifica cenários de inundações nas cidades.

As inundações e enchentes são fenômenos naturais que acontecem nos cursos d'água decorrentes de chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração. A magnitude e frequência está associada em função da intensidade e distribuição da precipitação, grau de saturação do solo, características da bacia e taxa de infiltração de água no solo (TOMINAGA et al., 2009).

Podem ocorrer em consequência da urbanização ou ocupação de áreas ribeirinhas, e ambas acontecem de forma isolada ou integrada. Para Tucci (1997) as enchentes provocadas pela urbanização são consequência do aumento da ocupação do solo e superfícies impermeáveis, além de obstruções ao escoamento produzidas pelo processo. As decorridas da ocupação de áreas ribeirinhas são consequência do processo natural em que o rio ocupa o seu leito maior no tempo de retorno estimado, em média a cada dois anos.

Os rios possuem geralmente dois leitos: leito maior e leito menor. O leito menor refere-se a área onde a água escoar na maior parte do tempo e no maior, denominado também como planície de inundação, é a área onde ocorrem as inundações, processo natural do rio conforme eventos extremos (TUCCI, 2005). Os leitos maior e menor do rio podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 4 - Características dos leitos nos rios



Fonte: TUCCI (2005).

Muitas vezes os conceitos de enchente e inundação são entendidos como análogos, porém é importante entender que são termos distintos, mas que possuem relação direta. Segundo o Ministério das Cidades/IPT (2007) enchente é definida como a elevação temporária na vazão em um canal devido ao aumento de chuva. Quando esse aumento é superior e capaz de transbordar para áreas acima do leito menor, é denominado de inundação. A diferença entre os conceitos pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 - Elevação do rio



Fonte: Ministério das Cidades/IPT (2007).

Cançado (2009) classifica os danos causados pelas inundações como tangíveis e intangíveis. Danos tangíveis são possíveis de mensuração, estimados por preço de mercado. Já os intangíveis estão relacionados a valor sentimental, de difícil quantificação monetária.

O Ministério das Cidades/IPT (2007) classifica os danos causados à população como diretos e indiretos. Danos diretos estão relacionados com mortes por afogamento, destruição de moradias e danos materiais no geral. Danos indiretos se referem em geral a doenças transmitidas pela água contaminada como leptospirose e cólera.

Para Lou (2010) são diversos prejuízos causados pelas enchentes nas cidades, como riscos de mortes por afogamento, população desalojada ou desabrigada, desvalorização de imóveis e danos à propriedade, interrupção de atividades comerciais e perdas de produção econômica, bem como danos à infraestrutura urbana que acaba por comprometer atendimento a serviços básicos.

Tominaga et al. (2009) diz que a probabilidade de ocorrência de inundações e enchentes está associada a combinação de condicionantes naturais e antrópicos.

- a) Condicionantes naturais: formas do relevo, características da rede de drenagem da bacia, características do solo e teor de umidade, presença de cobertura vegetal, intensidade, quantidade, distribuição e frequência das chuvas.
- b) Condicionantes antrópicos: uso e ocupação irregular das planícies de inundação, disposição de lixo, alterações nas características da bacia hidrográfica como canalização dos cursos d'água e impermeabilização do solo.

A partir do desenvolvimento das cidades, diversos outros condicionantes antrópicos são introduzidos na bacia hidrográfica. Alguns desses condicionantes podem ser observados no Quadro 2.

Quadro 2 - Condicionantes antrópicos

(continua)

Aumento da temperatura	O aumento de superfícies impermeáveis possibilita maior absorção de energia solar, que causa o aumento de temperatura no ambiente e produz “ilhas de calor” na parte central das cidades. A elevação de temperatura é responsável também pelo aumento de precipitações.
Aumento de sedimentos e material sólido	Em consequência ao aumento de construções, limpeza de terrenos para novos loteamentos, construções de calçadas, ruas, avenidas e rodovias, ocorre o aumento de sedimentos produzidos dentro da bacia. As principais consequências ambientais são a erosão das superfícies, assoreamento das seções de drenagem e transporte de poluentes que contaminam as águas pluviais.

(conclusão)

Obstruções no escoamento	A produção de lixo obstrui a drenagem, esse problema pode ser minimizado com uma frequência adequada de coleta de lixo e educação da população, problemas de falta de manutenção podem agravar a situação.
Áreas de riscos de encostas	Ocupações irregulares em áreas de risco nas cidades é uma das principais causas de morte durante o período chuvoso.
Qualidade da água pluvial	Depende de diversos fatores como frequência da limpeza urbana e se ela ocorre, época do ano e tipo de uso da área urbana. Decorre do fato da poluição existente no ar que se precipita junto a água, lavagem das superfícies urbanas contaminadas por diferentes componentes e lixo urbano depositado.
Contaminação dos aquíferos	Existem algumas condições de contaminações como aterros sanitários que possuem capacidade de contaminar as águas subterrâneas, uso de fossas sépticas como destino final do esgoto e por meio das redes de condutos pluviais – infiltração no seu transporte ou entupimento de trechos.

Fonte: Adaptado de TUCCI (2005).

O tipo de precipitação é uma condição importante ao se analisar as causas das enchentes. As chuvas orográficas e, principalmente, convectivas (grande volume de água em um curto período de tempo, sobre uma área relativamente pequena), são responsáveis por precipitações intensas em áreas localizadas, e estão relacionadas diretamente a inundações em áreas urbanas (TUCCI, 2005; LIMA, 2008).

As curvas IDF auxiliam medir as chuvas máximas de um ponto em uma bacia hidrográfica. Elas relacionam a intensidade máxima da chuva em mm/h com a duração no tempo em minutos e a probabilidade ou tempo de retorno em anos. Podem ser utilizadas para estimar vazões de projeto em pequenas bacias como também a drenagem de forma geral. No Brasil, as IDF foram determinadas por Otto Pfafstetter no ano de 1995 e continuam sendo utilizadas até hoje (RHAMA, 2001). Outras causas das enchentes e os efeitos gerados por elas podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3 - Causas e efeitos da urbanização

(continua)

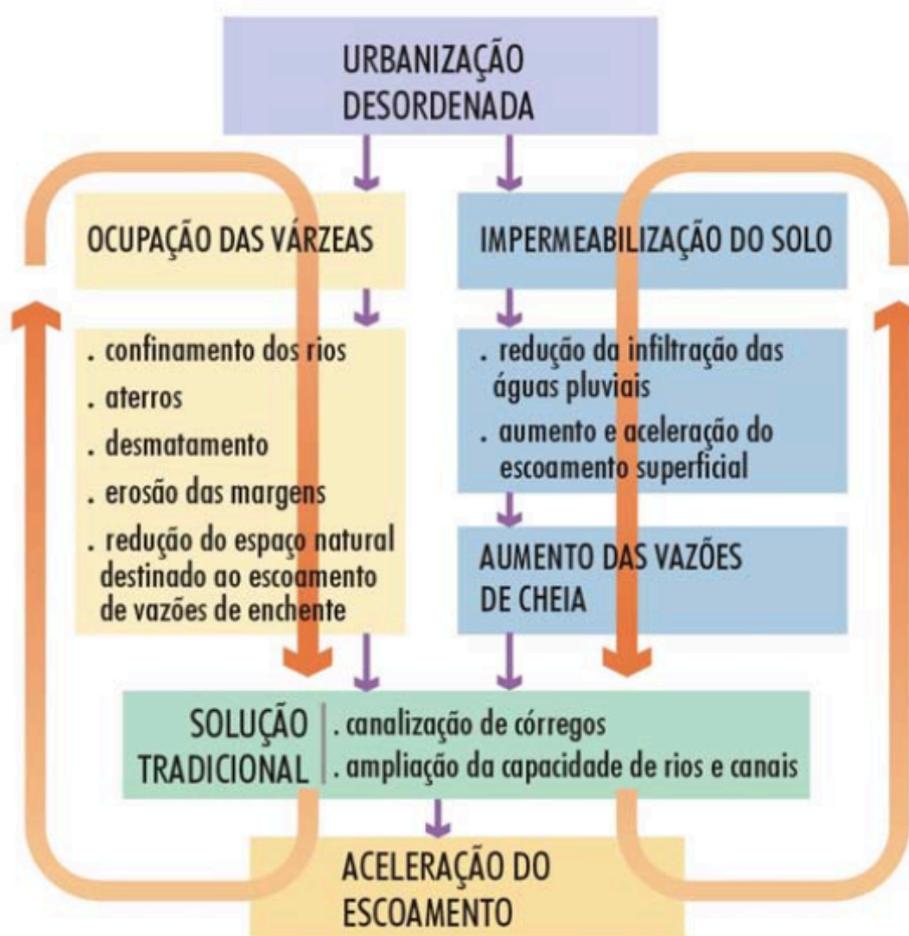
<b>Causas</b>	<b>Efeitos</b>
Impermeabilização	Maiores picos e vazões
Redes de drenagem	Maiores picos a jusante
Resíduos sólidos	Degradação da qualidade da água, entupimento de bueiros e galerias

<b>Causas</b>	<b>Efeitos</b>
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes, maiores erosões e assoreamento em canais
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos, picos e custos com utilidade pública

Fonte: Adaptado de Tucci (2009).

A Figura 6 representa esquematicamente o conjunto de processos que são originados devido ao uso do solo, tanto na ocupação das várzeas como a impermeabilização, cujas ações resultam na aceleração do escoamento.

Figura 6 - Processo de impacto da urbanização



Fonte: Sudersha (2002 apud TUCCI, 2005).

Como solução aos problemas das enchentes e inundações, a política existente é de escoar a água o mais rápido possível por meio de canalizações, entretanto essa solução tem caráter local e acaba por gerar o aumento de vazões a jusante. Dessa forma, o estudo de novas soluções vem ganhando força nos últimos tempos (CANHOLI, 2014).

### 3.5 MEDIDAS DE CONTROLE PARA INUNDAÇÃO

Medidas de controle para inundações são ações em relação ao uso e ocupação do solo que têm por objetivo prevenir transtornos de enchentes que podem ser decorrentes da alta impermeabilização da bacia de drenagem e/ou ocupação das áreas ribeirinhas inundáveis, situações que sobrecarregam a capacidade natural de armazenamento do escoamento. Para ações eficazes de melhoria, é preciso uma combinação adequada entre medidas estruturais e não estruturais (CANHOLI, 2014).

As medidas de controle estruturais são as que modificam o sistema fluvial evitando prejuízos decorrentes das enchentes, e as não estruturais são as que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes (TUCCI, 1997).

#### 3.5.1 Medidas estruturais

Medidas estruturais são as responsáveis por projetos de modificações nos cursos da água, obras hidráulicas, reservatórios de amortecimento, entre outros (LOU, 2010). As medidas estruturais podem ser implantadas com o objetivo de correção e/ou prevenção devido as enchentes. Canholi (2014) afirma que podem ser caracterizadas como medidas intensivas e extensivas

- a) Medidas extensivas: são as que agem na bacia e correspondem ao controle da erosão do solo e recomposição da cobertura vegetal. Para Tucci (1997) essas medidas modificam a relação entre precipitação e vazão, como a alteração da cobertura do solo com o objetivo de reduzir os picos de enchentes, além de controlar processos erosivos na bacia.
- b) Medidas intensivas: são as que agem no rio, conforme o objetivo, podem ser de aceleração do escoamento (canalização), retardamento do fluxo (reservatórios como bacias de detenção/retenção), desvio do escoamento (tuneis de derivação e canais de desvio).

No Quadro 4, verificam-se as medidas extensivas e intensivas de maior importância, suas principais vantagens e desvantagens, bem como aplicação.

Quadro 4 - Medidas extensivas e intensivas

<b>Medida</b>	<b>Principal vantagem</b>	<b>Principal desvantagem</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Medidas extensivas</b>			
Alteração da cobertura vegetal	Redução do pico da cheia	Impraticável em grandes áreas	Pequenas bacias
Controle de perda do solo	Auxilia na redução do assoreamento	Impraticável em grandes áreas	Pequenas bacias
<b>Medidas intensivas</b>			
Diques e polders	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes rios e na planície
Melhoria do canal (aceleração do escoamento)			
Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rio com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
<b>Reservatório</b>			
Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil devido à desapropriação	Bacias intermediárias
Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
Reservatórios para cheias	Operação com mínimo de pedras	Custo não partilhado	Restrito ao controle de enchentes
<b>Mudança de canal</b>			
Caminhos da cheia	Amortecimento de volume	Depende da topografia	Grandes bacias
Desvios	Reduz vazão do canal principal	Depende da topografia	Bacias médias e grandes

Fonte: Adaptado de Tucci (2005).

### 3.5.2 Medidas não estruturais

Medidas não estruturais estão relacionadas a medidas que procuram reduzir os danos ou as consequências das inundações através de normas, ou seja, possuem caráter preventivo como regulamentos e programas que têm por objetivo a organização do uso e ocupação do solo, implementação de sistemas de alerta e conscientização da população em relação à manutenção dos dispositivos de drenagem (CANHOLI, 2014).

Não são medidas projetadas para dar uma proteção completa, visto que isso exigiria a proteção contra a maior enchente possível, o que é física e economicamente inviável na maior parte das situações (TUCCI, 1997).

Ao contrário das medidas estruturais, que demandam altos custos de implementação, as não estruturais podem ser eficazes a custos mais baixos e com horizontes mais longos de atuação, visto que buscam disciplinar a ocupação territorial e as atividades econômicas. Mediante a delimitação de áreas sujeitas a inundações é possível estabelecer um zoneamento e regulamentações para construções futuras (CANHOLI, 2014).

Conforme Tucci (2005) as medidas não estruturais podem ser agrupadas em previsão e alerta de inundação, zoneamento das áreas de risco, construção a prova de enchente e seguro e proteção individual contra inundação.

- a) Sistema de previsão e alerta: o intuito principal é antecipar a ocorrência da inundação para que a população que reside em áreas inundáveis possa tomar as medidas necessárias, reduzindo assim os transtornos. Existem algumas etapas nesse processo como o (i) sistema de coleta e transmissão de informações (ii) centro de previsão (iii) defesa civil.
- b) Zoneamento de áreas inundáveis: é o conjunto de regras para ocupação de áreas inundáveis, engloba algumas etapas como a determinação do risco das enchentes, mapeamento das áreas sujeitas a inundação e o zoneamento. Tem por objetivo a minimização de perdas materiais e humanas e permite o desenvolvimento racional das áreas ribeirinhas.
- c) Construção a prova de enchente: conjunto de medidas que visam reduzir perdas em construções localizados nas áreas de inundação, como: elevação de estruturas existentes, uso de materiais resistentes a água, instalação de vedação temporária/permanente nas aberturas das estruturas.
- d) Seguro de inundação: procedimento no qual o proprietário paga o “prêmio do seguro”. Entretanto na maioria das vezes a população que reside em áreas de risco não possui condições financeiras de arcar com essas despesas e o processo se torna inviável.

### 3.6 MODELOS HIDROLÓGICOS

Segundo Tucci (1998), um modelo pode ser definido como “a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas.”

O modelo hidrológico é uma ferramenta que a ciência desenvolveu com o objetivo de auxiliar a compreensão e representação da bacia hidrográfica para prever condições diferentes das previstas, como o impacto da urbanização e previsão de enchentes. Os modelos são aplicáveis em todas as áreas de conhecimento e podem ser de três tipos: físicos, analógicos e matemáticos. O modelo físico representa o sistema por um protótipo em escala, modelos analógicos fazem analogias das equações que conduzem diferentes fenômenos e os modelos matemáticos retratam a natureza do sistema por meio de equações matemáticas (SILVEIRA, 2010).

Para Rennó (2004) e Tucci (1998) os modelos matemáticos de simulação podem ser classificados sob diferentes aspectos, como o tipo de variáveis utilizadas, relações entre as variáveis, forma de representação dos dados, existência de relações espaciais e a existência de dependência temporal, conforme:

- a) Estocásticos ou determinísticos: uma das principais classificações dentro da simulação hidrológica, parte do princípio de que quando ao menos uma das variáveis tiver comportamento aleatório e o conceito de probabilidade for introduzido na formulação do modelo, ele será considerado estocástico. De outra maneira, se o conceito de probabilidade não é introduzido e a ocorrência das variáveis é desprezada, o modelo pode ser dito determinístico.
- b) Empíricos ou conceituais: quando as funções utilizadas na elaboração do modelo levam em consideração os processos físicos, o modelo pode ser considerado conceitual. Entretanto, para modelos empíricos os valores calculados são ajustados aos dados observados, ou seja, relações baseadas em observações, por meio de funções sem relação com os processos físicos envolvidos. São específicos para a região e condição para a qual foram estimados.
- c) Discretos ou contínuos: quando os fenômenos são contínuos no tempo são ditos contínuos, e discretos quando as mudanças se dão em intervalos discretos. A escolha do intervalo no qual o modelo será executado depende do fenômeno estudado e

precisão desejada nos resultados. Quanto menor o intervalo, maior será a precisão e conseqüentemente o custo computacional para gerar os resultados.

- d) Pontuais ou distribuídos: modelos pontuais (concentrados/agregados) não levam em consideração a variabilidade espacial e modelos distribuídos consideram que as variáveis e parâmetros dependem do espaço/tempo.
- e) Estatísticos ou dinâmicos: quando há dependência temporal, modelos estatísticos apresentam o resultado produzido por meio de um conjunto de dados de entrada e a solução das equações. Em contrapartida, o modelo dinâmico é resolvido por meio de uma iteração das equações.

A escolha do modelo a ser adotado depende da aplicação e disponibilidade de dados. É necessário escolher o modelo adequado para que assim sejam obtidos os resultados apropriados para o estudo.

### **3.6.1 Modelos precipitação-vazão**

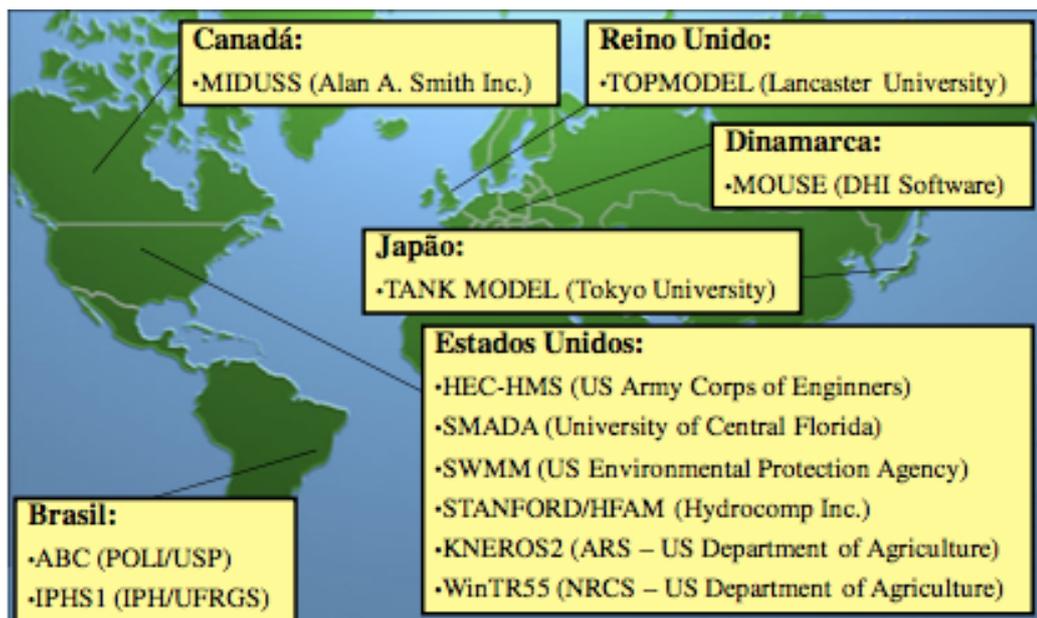
Para Tucci (1998) os modelos precipitação-vazão representam parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão e surgiram da necessidade de obter maiores séries hidrológicas de vazões. Por meio dos dados de precipitação é possível determinar vazões desconhecidas para cenários novos na bacia como alterações no uso do solo, urbanização, desmatamentos e obras de engenharia. A estrutura dos modelos precipitação-vazão fundamenta-se, conforme Lou (2010) e Tucci (1998) nos seguintes elementos:

- a) Discretização da bacia hidrográfica: os modelos usam critérios de subdivisão espacial para representar a bacia. Existem algumas possibilidades de estrutura: concentrado, distribuído por sub-bacias e distribuído por módulos. O concentrado considera que toda a área da bacia pode ser caracterizada por uma precipitação média, é utilizado normalmente para bacias pequenas. O critério distribuído por sub-bacias parte da ideia de subdividir a bacia conforme a disponibilidade de dados, locais de interesse e variabilidade dos parâmetros físicos. Já o distribuído por módulos é efetuado pela divisão da bacia em formas geométricas (quadrados, retângulos, entre outros), não possui relação direta com a forma da bacia e visa um maior detalhamento já que os módulos possuem dimensões menores, porém gera um número elevado dos mesmos para grandes bacias, o que dificulta o entendimento

- b) Variáveis de entrada: as variáveis normalmente utilizadas são a precipitação, evapotranspiração e vazão. A precipitação é a principal variável de entrada com a maior disponibilidade de dados (postos pluviométricos), a evapotranspiração possui pouca quantidade de dados, e dados de vazão, utilizados para ajuste dos parâmetros do modelo e essenciais em cenários de calibração.
- c) Estrutura básica de integração dos processos: os processos são integrados para representar parte do ciclo hidrológico e a estrutura é dividida em bacia e canal.
- d) Aquisição dos dados físicos das bacias: as características naturais e do uso do solo são variantes e isso gera grande quantidade de informação que é um fator de dificuldade para as informações serem transferidas para o modelo.
- e) Determinação dos parâmetros: podem ser de diversos tipos. Parâmetros de modelos que são estimados com base nas características físicas ou ajustados com base em dados observados das variáveis de entrada e saída.

A partir do surgimento do computador e aprimoramento de técnicas numéricas e estatísticas, houve a intensificação de modelos chuva-vazão que foram criados com o intuito de auxiliar pesquisadores, além de serem utilizados amplamente na prática de engenharia para a solução de diferentes problemas. A relação de alguns programas e os países onde foram desenvolvidos podem ser visualizados na Figura 7.

Figura 7 - Modelos precipitação-vazão



Fonte: Zahed Filho (2009 apud SILVEIRA, 2010).

Segundo Silveira (2010) os aspectos mais importantes a serem considerados quanto ao uso de um modelo precipitação-vazão são os objetivos para os quais o modelo está sendo utilizado, as limitações do modelo, assim como a qualidade e quantidade de informações utilizadas em conjunto com o modelo.

Os modelos IPH foram desenvolvidos pelo Instituto de pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS). O modelo IPH II foi desenvolvido para o uso em projetos de engenharia nas bacias rurais e urbanas e utiliza poucos parâmetros, baseado em algoritmos conhecidos (LOU, 2010).

O HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do exército dos EUA e projetado para simular os processos de escoamento por meio de dados de precipitação em uma bacia hidrográfica ramificada. O modelo é aplicado em larga escala, desde bacias naturais a pequenas bacias urbanas (HOEPFNER, 2007). Este modelo computacional foi utilizado em um estudo comparativo entre vazões de pico estimadas para a bacia hidrográfica do rio bom retiro em Joinville-SC realizado por Ana Hoepfner na Universidade Federal de Santa Catarina.

O Topmodel é um modelo semidistribuído que utiliza relações físicas para representar a bacia e os processos hidrológicos. A estrutura do modelo é baseada na discretização em sub-bacias, mas utiliza um fator topográfico obtido em mapas detalhados (TUCCI, 1998).

O modelo SSD ABC – Sistema de suporte a decisões para análise de ondas de cheia em bacias complexas será o utilizado no presente trabalho e foi desenvolvido pelo Labsid da Universidade de São Paulo (USP), a partir da necessidade de atender alunos de graduação e pós-graduação. Atualmente tem sido amplamente utilizado, devido à sua fácil interface, seus métodos de cálculo disponíveis que permitem a análise de diferentes cenários na bacia e a disponibilidade de download totalmente gratuito. Além disso, os gráficos e relatórios gerados tornam a análise do usuário mais prática. A última versão publicada do modelo ABC6, foi desenvolvida para permitir o estudo de bacias complexas e a criação de diversos cenários, com o objetivo de testar modelos hidrológicos precipitação-vazão (LABSID, 2020; LUNARDI, 2013). Silva (2015) e Silveira (2010) demonstram a relevância do modelo em seus estudos, que retratam a análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição direta, bem como outros estudos aqui não citados.

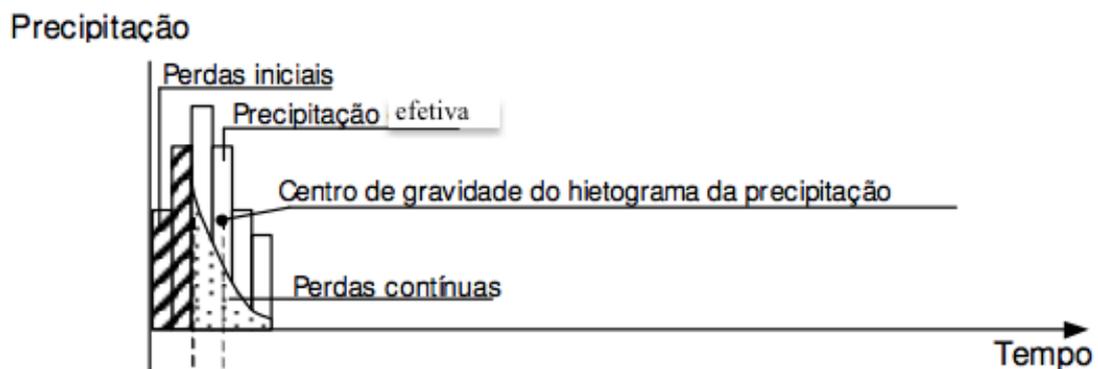
Conforme Silveira (2010) as principais funções executadas pelo modelo são:

- a) Interfaces de entrada e saída gráficas, permitindo a análise de várias bacias hidrográficas interligadas por meio da criação de uma topologia esquemática na tela;

- b) Determinação de chuvas de projeto para os períodos de retorno escolhidos pelo usuário;
- c) Cálculo de hidrogramas de cheia a partir da chuva de projeto e em função das características físicas da bacia hidrográfica em questão;
- d) Pré-dimensionamento de reservatórios de controle de cheias;
- e) Pré-dimensionamento de largura de vertedores de soleira livre;
- f) Formulação de alternativas e análise de cenários por parte do usuário.

O modelo ABC6 permite quantificar a chuva excedente. O hietograma, que pode ser visualizado na Figura 8, é a representação da precipitação ocorrida ao longo do tempo, a precipitação que cai sobre a superfície infiltra totalmente no solo até saturá-lo, a partir do momento que decresce até uma taxa de infiltração, que passa a ser inferior à precipitação, assim aumenta o escoamento superficial.

Figura 8 - Hietograma tipo



Fonte: Adaptado de Portela (2006).

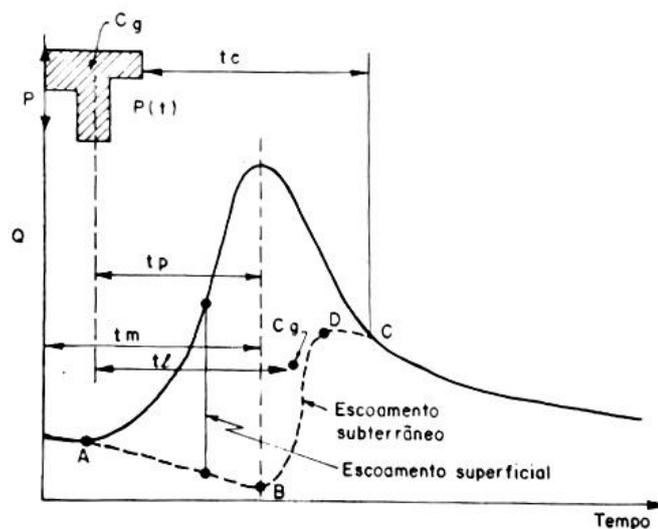
Para a determinação da chuva excedente, o modelo ABC6 quantifica a infiltração a partir de quatro métodos de avaliação distintos, esse estudo utiliza os métodos do SCS, Green e Ampt e Horton que estão descritos abaixo.

- a) SCS (Soil Conservation Service): “um dos métodos de utilização que se aplica especialmente quando não se dispõe de dados hidrológicos para determinar o escoamento superficial direto” (SILVEIRA, 2010)
- b) Green e Ampt: a equação é uma visão simplificada do processo de infiltração da água no solo. O processo idealizado é de uma frente de molhamento abrupta e descreve o avanço da frente de molhamento ao longo do tempo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

- c) Horton: é uma relação empírica que representa o decréscimo da infiltração ao longo do tempo. O método foi estabelecido por Horton em 1939 por meio de ensaios de campo onde o solo foi submetido a precipitações com intensidades superiores à capacidade de infiltração (LUNARDI, 2013).
- d) Índice  $\Phi$ : é uma aproximação grosseira do método de Horton, entretanto pode ser utilizado sem gerar grandes erros aos estudos. O índice “ $F_i$ ” é a taxa de infiltração “ $f$ ” suposta constante ao longo do tempo (SILVEIRA, 2010).

O hidrograma é o nome dado ao gráfico que relaciona a vazão no tempo. O comportamento típico de um hidrograma pode ser observado na Figura 9. É possível observar que a partir de um determinado evento de precipitação, ocorre um intervalo de tempo em que o nível começa a elevar-se. O tempo de retardo deve-se a perdas iniciais tanto pela interceptação como o próprio tempo de deslocamento da água dentro da bacia hidrográfica. O escoamento superficial é o processo predominante no período de elevação da vazão até o pico (*fase de ascensão*). A partir do momento em que o hidrograma atinge o máximo, apresenta a *fase de recessão* onde é observado um *ponto de inflexão* (fim do escoamento superficial e predominância do escoamento subterrâneo). A forma do hidrograma depende de uma série de fatores como relevo, cobertura da bacia, densidade de drenagem, modificações artificiais no rio e distribuição, duração e intensidade dos eventos de precipitação (TUCCI, 2009).

Figura 9 - Hidrograma tipo



Fonte: Adaptado de Tucci (2009).

O hidrograma pode ser caracterizado por três partes principais: ascensão (relacionada com a intensidade da precipitação), região de pico (próximo ao valor máximo) e recessão (somente há contribuição do escoamento subterrâneo para a vazão total do rio).

O hidrograma unitário é resultante do escoamento superficial de uma chuva unitária. Conhecendo o hidrograma unitário de uma bacia, é possível calcular as ordenadas do escoamento superficial de qualquer chuva. É um dos métodos disponíveis mais práticos para determinar a relação entre precipitação e o hidrograma resultante (SILVEIRA, 2010). O modelo ABC6 possui três métodos para o traçado do hidrograma unitário sintético, que são:

- a) Triangular do SCS: parte do princípio que o escoamento superficial é equivalente a área de um triângulo, devido a isso é considerado um método geométrico, não considera os efeitos de translação e amortecimento do escoamento na bacia hidrográfica (SILVA, 2015).
- b) Clark: considera os efeitos de translação e armazenamento que são determinados por meio do trânsito da chuva excedente na bacia. O método é baseado no conceito de isócronas, linhas imaginárias na bacia onde há o mesmo tempo de translação até o exutório, e de histograma tempo-área (LUNARDI, 2013).
- c) Santa Bárbara: foi desenvolvido para bacias urbanas por James M. Stubchau em 1975, funcionário do órgão responsável pelo controle das inundações em Santa Barbara na Califórnia (LUNARDI, 2013). É a simplificação do método de Clark diferenciando-se na maneira como considera as áreas de contribuição e os efeitos de translação (SILVA, 2015).

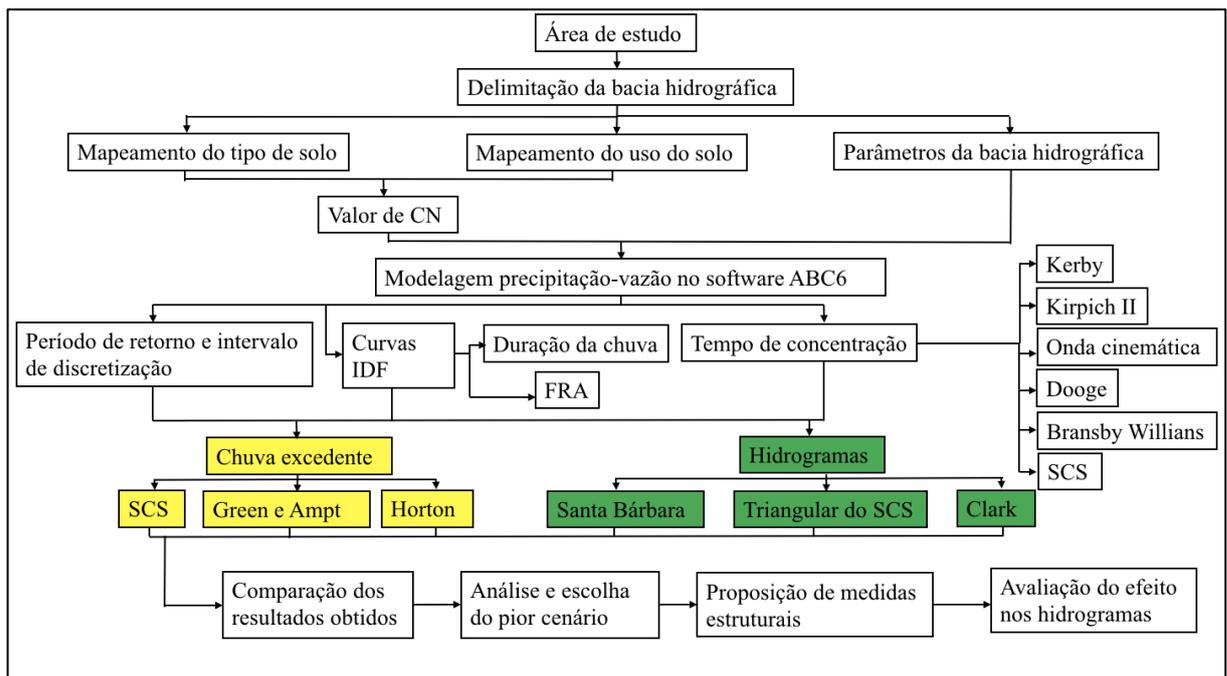
Devido aos benefícios e possibilidades da utilização do método ABC6 citados acima, este foi o escolhido para o presente estudo, que se propõe a avaliar e comparar, por meio de diferentes métodos de estimativa, as vazões de pico estimadas em uma mesma localidade para que assim seja possível sugerir medidas que tenham por objetivo minimizar os problemas causados pelas enchentes.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é abordada a metodologia composta pelo desenvolvimento de diferentes etapas para atingir os objetivos delineados no estudo. O fluxograma representado na Figura 10 mostra de forma simplificada as principais atividades realizadas, que foram:

- Delimitação da sub-bacia no Google Earth;
- Definição dos parâmetros da bacia como área e perímetro;
- Mapeamento do tipo e uso do solo da região;
- Modelagem precipitação-vazão por diferentes métodos e diferentes tempos de concentração por meio do software ABC6;
- Proposição de medidas estruturais e avaliação do efeito no amortecimento das vazões de pico.

Figura 10 - Fluxograma metodológico



Fonte: A autora (2020).

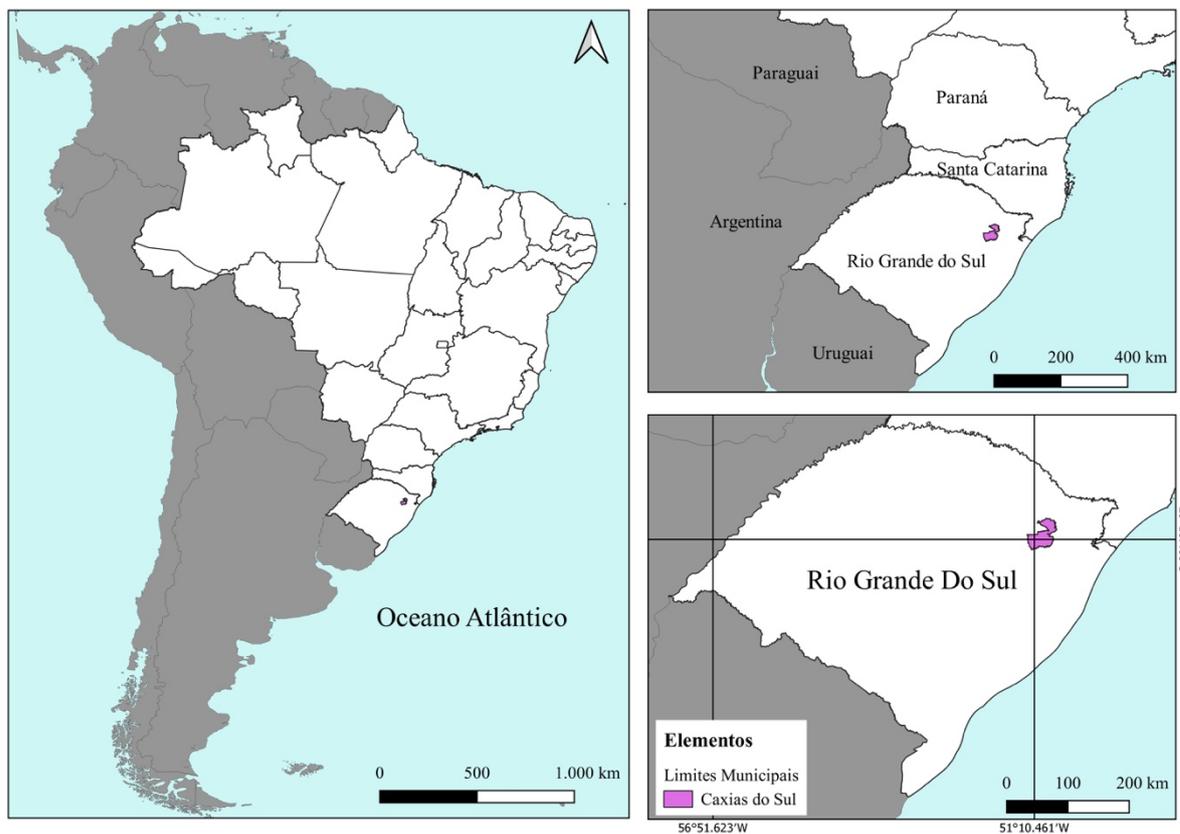
### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do trabalho é a sub-bacia do Arroio Pinhal, onde uma parte urbanizada do município de Caxias do Sul está inserida.

#### 4.1.1 Localização da bacia hidrográfica

A sub bacia do Arroio Pinhal está inserida na área do município de Caxias do Sul, que ocupa uma área de 1.652,37 km<sup>2</sup> e população estimada de 510.906 pessoas. A altitude é de 760 m acima do nível do mar, o clima da cidade é caracterizado como subtropical com temperaturas oscilando entre -1,4°C e 33,6°C, tendo como média 16°C, e apresenta eventos de precipitação que variam entre 1500 e 1800 mm por ano. Caxias do Sul está distante 96 km da capital do estado, Porto Alegre, e encontra-se na extremidade leste da encosta superior do nordeste do estado do Rio Grande do Sul, a localização do município pode ser visualizada na Figura 11 (CAXIAS DO SUL, 2014; IBGE, 2020).

Figura 11 - Mapa de localização de Caxias do Sul



Fonte: A autora (2020).

O Arroio Pinhal é um curso d'água que faz parte da bacia hidrográfica do Rio Caí. A bacia do Rio Caí encontra-se na região hidrográfica do Guaíba e está situada a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Possui uma área de 4.983,38 km<sup>2</sup> de superfície abrangendo total ou parcialmente 42 municípios como Gramado, Carlos Barbosa, São Vendelino e Caxias do Sul. As nascentes estão localizadas em São Francisco de Paula, a 1.000 metros de altitude e os

principais usos da água se reservam à irrigação, usos industriais e abastecimento humano (RIO GRANDE DO SUL, 2008).

#### 4.1.2 Características físicas da bacia hidrográfica

Para compreender o funcionamento da bacia hidrográfica é imprescindível conhecer algumas características físicas como área, perímetro, comprimento do rio principal, número total de segmentos de drenagem, densidade de drenagem, entre outros, os quais podem ser obtidos a partir de um estudo fisiográfico da bacia. Alguns parâmetros definidos no estudo podem ser observados no Quadro 5. A área, perímetro e comprimento do rio principal foram determinados por meio do software *Google Earth Pro*. O comprimento total da rede de drenagem foi obtido somando todos os comprimentos dos cursos d'água presentes na bacia hidrográfica e o número total de segmentos de drenagem por meio da análise do mapa da bacia hidrográfica e seus cursos d'água.

Quadro 5 - Parâmetros da bacia hidrográfica

(continua)

Nome do parâmetro	Definição	Equacionamentos
Área da bacia (A)	Corresponde a toda área drenada. (km <sup>2</sup> )	-
Perímetro da bacia (P)	Comprimento da linha imaginária no divisor de águas que delimita a bacia. (km)	-
Comprimento do rio principal (Lb)	Comprimento do curso d'água mais longo presente na bacia hidrográfica. (km)	-
Comprimento total da rede de drenagem (Lt)	Soma de todos os comprimentos de rios da bacia hidrográfica. (km)	-
Número total de segmentos de drenagem (Nt)	Número total de cursos d'água na bacia hidrográfica.	-
Nt (1ª ordem)	Número total de cursos d'água na bacia hidrográfica de primeira ordem conforme o ordenamento de Strahler.	-
Densidade de drenagem (Dd)	É obtido pelo comprimento total de drenagem dividido pela área de drenagem da bacia, e pode ser definido como a capacidade da bacia em gerar escoamentos rápidos. (km/km <sup>2</sup> )	$Dd = \frac{Lt}{A}$
Número de confluências (NC)	Representa as confluências entre rios na bacia hidrográfica	-

(conclusão)

Nome do parâmetro	Definição	Equacionamentos
Densidade de confluências (Dc)	Representa a densidade de drenagem. É a divisão do número de confluências pela área da bacia.	$Dc = \frac{NC}{A}$
Extensão média do escoamento superficial (Les)	Caracteriza a distância média que a água da chuva percorre até atingir o curso de água mais próximo. (km)	$Les = \frac{A}{4 \times Lt}$
Densidade de rios (Dr)	É a relação do número total de segmentos de ordem 1, determinado a partir do ordenamento de Strahler, com a área da bacia hidrográfica.	$Dr = \frac{Nt (1^a \text{ ordem})}{A}$
Coefficiente de compacidade (Kc)	Relaciona o perímetro da bacia com a área. Quanto mais próximo o valor for de 1, maior é a sua tendência em ocasionar escoamentos rápidos, ou seja, a bacia é mais compacta. Dessa forma, quanto maior o valor do coeficiente de compacidade, menor o risco de enchentes ocorrerem na bacia. (adimensional)	$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$
Índice de circularidade (Ic)	Auxilia na determinação da tendência de formato alongado ou circular da bacia. Quanto mais próximo o índice de circularidade for de 1, a bacia terá maior tendência a circularidade. Bacias alongadas são menos propícias a enchentes, em razão das chuvas que caem sobre a bacia não concentrarem grandes volumes de água no rio principal, já que a distância em relação ao exutório é grande. (adimensional)	$Ic = \frac{4 \times \pi \times A}{P^2}$
Índice de Conformação ou fator de forma (I)	Pode fornecer alguma indicação sobre a tendência a inundação. Quanto maior o valor do fator de forma, maiores as chances de certa bacia sofrer inundações.	$I = \frac{A}{Lb^2}$
Coefficiente de manutenção (Cm)	Possui como finalidade fornecer a área mínima necessária para a manutenção de um metro de canal de escoamento. É um dos parâmetros com maior relevância para a caracterização do sistema de drenagem. (km <sup>2</sup> /km)	$Cm = \frac{1}{Dd}$
Declividade média do Rio (Sm)	A declividade média do rio pode ser definida como a diferença de altitude entre o início e o fim da drenagem dividida pelo comprimento da drenagem. É um dos fatores importantes que regulam o tempo de duração do escoamento superficial na bacia.	$S = \frac{z_{100} - z_o}{L}$

Fonte: A autora (2020).

### 4.1.3 Classificação do tipo e uso do solo

A classificação do tipo de solo foi realizada a partir da análise do mapeamento semidetalhado de solos do município de Caxias do Sul, executado pela Embrapa e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS) no ano de 2007. Com o auxílio do software *Google Earth Pro* foi possível visualizar por meio de polígonos as áreas referentes a cada tipo de solo presente na sub-bacia.

O uso do solo foi classificado a partir de imagens de satélite disponíveis no software *Google Earth Pro*, dessa maneira se subdividiu a área da bacia em três sub-áreas diferentes: urbanizadas, não urbanizadas e vegetação.

## 4.2 MODELAGEM PRECIPITAÇÃO-VAZÃO

Para a modelagem precipitação-vazão do estudo foi utilizado o software *ABC6* versão 1.35. O cálculo da chuva excedente foi realizado para os métodos SCS, Green e Ampt e Horton, e os hidrogramas pelos métodos Triangular do SCS, Clark e Santa Bárbara.

### 4.2.1 Métodos de cálculo da chuva excedente

#### 4.2.1.1 Método do SCS

O método do SCS é um método simples e vastamente utilizado para estimar o volume de escoamento superficial em um evento de precipitação. O método foi desenvolvido pelo National Resources Conservation Center nos EUA, e está representado pela Equação 1.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (01)$$

onde  $Q$  é a chuva efetiva (mm);  $P$  é a precipitação durante um evento (mm); e  $S$  é um parâmetro e depende da capacidade de infiltração e armazenamento do solo (mm). Segundo Lunardi (2013), o valor de  $S$  irá depender do uso, ocupação e condições de umidade do solo e é calculado conforme a Equação 2.

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (02)$$

sendo  $S$  potencial máximo de retenção do solo (mm) e CN o “número de curva”, que varia de 0 a 100.

$I_a$  é uma estimativa das perdas iniciais de água (mm) calculada pela Equação 3, considerando que, em casos em que  $P < I_a$ , a precipitação efetiva será nula.

$$I_a = \frac{S}{5} \quad (03)$$

Para a aplicação do método no software é necessário inserir o valor de CN. A maneira pela qual o parâmetro foi considerado está descrita no item 4.3.4 do estudo.

#### 4.2.1.2 Método de Green e Ampt

O método de Green e Ampt parte do princípio de que o solo possui um perfil homogêneo, profundidade infinita e pressupõe a existência de uma frente de umedecimento (LIMA, 2010). O método pode ser descrito segundo a Equação 4 que descreve a frente de molhamento ao longo do tempo, como consequência serão maiores os volumes escoados e menores os infiltrados.

$$F_{(t)} = K \times t + \psi \times \Delta\theta \times \ln \left[ 1 + \frac{F_{(t)}}{\psi \times \Delta\theta} \right] \quad (04)$$

sendo  $F_{(t)}$  a lâmina total infiltrada (mm);  $K$  é o coeficiente de condutividade hidráulica (mm/h);  $\psi$  potencial mátrico (mm); e  $\Delta\theta$  é a diferença entre porosidade e a capacidade de campo; e  $t$  tempo (h).

O software *ABC6* requer que alguns parâmetros sejam inseridos como o fator de sucção-armazenamento  $S_f$  (mm) e a condutividade hidráulica do solo  $K_t$  (mm/h). Os valores podem ser obtidos conforme a Tabela 1 que relaciona o valor de CN com os parâmetros.

Tabela 1 - Valores de  $K_t$  e  $S_f$

(continua)		
CN	$K_t$ (mm)	$S_f$ (mm)
95	0,40	11,20

		(conclusão)
90	0,80	22,40
85	1,20	33,60
83	1,36	38,12
80	1,60	44,90
75	2,00	54,90
70	4,00	40,50
65	6,00	35,80
60	7,90	29,10
55	9,90	25,00
50	11,80	22,20
45	13,80	20,30
40	15,70	18,90

Fonte: Oliveira et al. (2016).

#### 4.2.1.3 Método de Horton

O método de Horton propõe o equacionamento conforme a Equação 05, que representa a redução da taxa de infiltração que se inicia em  $f_0$  e diminui exponencialmente ao longo do tempo.

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-\beta \times t} \quad (05)$$

onde  $f$  é a capacidade de infiltração no tempo (mm/h);  $f_c$  é capacidade de infiltração em condição de saturação (mm/h);  $f_0$  é a capacidade de infiltração quando o solo está seco (mm/h);  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (h); e  $\beta$  é um parâmetro que pode ser determinado a partir de medições em campo ( $h^{-1}$ ).

Para a modelagem no software *ABC6* é necessário inserir três parâmetros: taxa de infiltração inicial, taxa de infiltração final e infiltração acumulada. Os valores da taxa de infiltração inicial e final foram obtidos considerando a análise da Tabela 2. Os parâmetros inseridos podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros de Horton para diferentes tipos de solo

Parâmetros da fórmula de Horton	Classificação Hidrológica do solo - SCS			
	A	B	C	D
Taxa de infiltração inicial (mm/h)	250	200	130	80
Taxa de infiltração final (mm/h)	25	13	7	3

Fonte: Porto (1995 apud SILVEIRA, 2010).

Tabela 3 - Parâmetros de Horton considerados no software

Taxa de infiltração inicial (mm/h)	130
Taxa de infiltração final (mm/h)	7
Infiltração acumulada (mm)	40

Fonte: A autora (2020).

Os valores considerados na Tabela 3 foram os da classe hidrológica do solo C haja visto que essa classe é pertencente a solos argilosos. O valor da infiltração acumulada foi obtido considerando o valor da declividade da bacia hidrográfica.

#### 4.2.2 Métodos de cálculo do hidrograma

Para o presente estudo, não se considerou a utilização do método racional, haja visto que esse método é aconselhado por diversos autores, como Canholi (2005) para bacias menores que 2 km<sup>2</sup> e a bacia do estudo possui uma área maior. Dessa maneira, se utilizou diversos métodos para encontrar o HU sintético, como o método triangular do SCS, Clark e Santa Bárbara, apresentados a seguir.

##### 4.2.2.1 Método Triangular do SCS

Conforme Silveira (2010), o método triangular do SCS é um método mais geométrico do que físico, visto que admite que o escoamento é igual à área de um triângulo, que é definido pelo tempo de pico (Equação 6), tempo de subida (Equação 7), e tempo de base (Equação 8), conforme:

$$t_p = 0,6 \times t_c \quad (06)$$

$$T_p = t_p + \frac{d}{2} \quad (07)$$

$$t_b = T_p + 1,67 \times T_p \quad (08)$$

onde  $t_p$  é o tempo de pico (h);  $T_p$  é o tempo de subida (h);  $d$  é a duração da chuva crítica (h);  $t_b$  é o tempo de base (h) e  $t_c$  é o tempo de concentração (h). A partir desses equacionamentos, é possível determinar a vazão de pico por meio da Equação 9.

$$q_p = \frac{0,208 \times A}{T_p} \quad (9)$$

sendo  $T_p$  o tempo de subida (h);  $A$  a área (km<sup>2</sup>) e  $q_p$  a vazão de pico (m<sup>3</sup> × s<sup>-1</sup>) por mm de chuva efetiva. Foi considerado para tempos de duração de chuva menores que tempo de subida a Equação 10 e para tempos de duração de chuva maiores que o tempo de subida a Equação 11.

$$q = t \times \frac{q_p}{T_p} \quad (10)$$

$$q = \frac{q_p}{(t_b - T_p) \times (t_b - t)} \quad (11)$$

onde  $q$  é a vazão unitária (m<sup>3</sup>/s × mm);  $t$  é o tempo de duração da chuva (h);  $q_p$  é a vazão de pico;  $T_p$  o tempo de subida (h) e  $t_b$  é o tempo de base (h).

#### 4.2.2.2 Método de Clark

O método de Clark pode ser dividido em duas partes: a primeira, constitui-se em dividir a bacia hidrográfica em subáreas e a translação das mesmas para que todas contribuam na vazão, e a segunda, consiste na simulação de um reservatório linear para considerar o decréscimo de água quando não está mais chovendo. A divisão da bacia é delimitada por isócronas localizadas em pontos específicos dentro da bacia para que possuam o mesmo tempo de translação até a saída. O método pode ser descrito pela Equação 12 (PORTO; FILHO; MARCELLINI, 1999).

$$Q_2 = m_o \times I_2 + m_1 \times I_1 + m_2 \times Q_1 \quad (12)$$

em que  $I$  são as vazões de entrada no reservatório e os respectivos coeficientes  $m_o$ ,  $m_1$  e  $m_2$  podem ser calculados pelas Equações 13 e 14, respectivamente.

$$m_o = m_1 = \frac{(0,5 \times t)}{(k + 0,5 \times t)} \quad (13)$$

$$m_2 = \frac{(k - 0,5 \times t)}{(k + 0,5 \times t)} \quad (14)$$

Para o método de Clark é necessário inserir dois parâmetros diferentes no software *ABC6*, coeficiente de forma e constante do reservatório linear. O coeficiente de forma varia de 1 a 2 e para esse estudo foi utilizado o valor de 1,5. A constante do reservatório linear foi calculada conforme a fórmula de Dooge que pode ser descrito pela Equação 15.

$$K = 16,1 \times \frac{A^{0,23}}{S^{0,70}} \quad (15)$$

Sendo que  $A$  é a área da bacia em  $\text{km}^2$  e  $S$  a declividade em  $\text{m/km}$ . Dessa maneira a constante considerada nas simulações foi igual a 3.

#### 4.2.2.3 Método de Santa Bárbara

O método de Santa Bárbara pode ser entendido como uma simplificação do método de Clark, pois admite que a bacia seja dividida em apenas uma isócrona e o acúmulo do escoamento para cada período pode ser calculado por meio do escoamento na área impermeável (Equação 16), escoamento na área permeável (Equação 17) e acúmulo total do escoamento (Equação 18) (PORTO; FILHO; MARCELLINI, 1999).

$$R(I) = d' \times P(\Delta t) \quad (16)$$

$$R(P) = (1 - d') \times [P(\Delta t) - F(\Delta t)] \quad (17)$$

$$R(\Delta t) = R(I) + R(P) \quad (18)$$

considerando  $P(\Delta t)$  o acúmulo de chuva durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ ;  $F(\Delta t)$  a infiltração durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ ;  $d'$  a parte impermeável (da área total da bacia);  $\Delta t$  período de tempo incrementado (h).

Assim, o hidrograma instantâneo para cada período é calculado conforme a Equação 19.

$$I(\Delta t) = \frac{R(\Delta t) \times A}{\Delta t} \quad (19)$$

onde  $R(\Delta t)$  é o acúmulo total do escoamento;  $A$  a área de drenagem da bacia e  $\Delta t$  o incremento de tempo. Por meio do amortecimento desses hidrogramas  $I(\Delta t)$  é possível obter o hidrograma de saída  $Q(\Delta t)$ , conforme a Equação 20.

$$Q_2 = m_o \times I_2 + m_1 \times I_1 + m_2 \times Q_1 \quad (20)$$

em que  $I$  são as vazões de entrada no reservatório e  $m_o$ ,  $m_1$  e  $m_2$  podem ser representadas pelas Equações 21 e 22, respectivamente.

$$m_o = m_1 = \frac{(0,5 \times t)}{(t_c + 0,5 \times t)} \quad (21)$$

$$m_2 = \frac{(t_c - 0,5 \times t)}{(t_c + 0,5 \times t)} \quad (22)$$

### 4.3 PARÂMETROS DE ENTRADA NO SOFTWARE ABC 6

Neste sub-capítulo, são abordados alguns outros parâmetros necessários à modelagem no software *ABC6* que não são referentes aos métodos aplicados como tempo de concentração, período de retorno, intervalo de discretização, entre outros.

#### 4.3.1 Tempo de concentração

Conforme Silveira (2010), o tempo de concentração pode ser definido como o “tempo necessário que a água precipitada no ponto mais distante na bacia leva para deslocar-se até a seção de saída”. Atualmente existem diversos equacionamentos que possibilitam o cálculo do

tempo de concentração em função de diversas características da bacia, entretanto é fundamental que as fórmulas sejam aplicadas de maneira coerente, ou seja, em condições semelhantes para as quais foram previstas. Nesse estudo, optou-se por calcular o tempo de concentração por seis métodos diferentes disponíveis no software *ABC6*, conforme pode ser analisado na Tabela 4. Para a aplicação das equações foi adotada rugosidade de retardo igual a 0,0460 referente à grama rigorosamente aparada (parâmetro que mais se assemelhou com as características da bacia) e rugosidade de Manning igual a 0,015 devido a bacia possuir bastante área urbanizada.

Tabela 4 - Métodos de cálculo do tempo de concentração

Método	Equacionamento
Onda cinemática	$tc = 55 \times \left( \frac{n^{0,6} \times L^{0,6}}{I^{0,4} \times S^{0,3}} \right)$
Bransby-Willians	$tc = 306 \times \frac{L}{5280} \times \left( \frac{1}{A^{0,1} \times S^{0,2}} \right)$
Dooge	$tc = 70,8 \times \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}}$
Kerby	$tc = 7,23 \times \left( \frac{L \times c}{S^{0,5}} \right)^{0,467}$
Kirpich II	$tc = 0,28 \times \left( \frac{L^2}{S} \right)^{0,385}$
SCS	$tc = 0,43 \times \frac{L^{0,8}}{S^{0,5}} \times \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}$

**Variáveis:** **L:** Comprimento do rio principal (m); **A:** Área da bacia (Km<sup>2</sup>); **S:** Declividade (m/Km); **c:** rugosidade de retardo; **h:** Diferença de cotas (m); **n:** Rugosidade de Manning; **I:** Intensidade da precipitação (mm/h); **CN:** Número da curva.

Fonte: A autora (2020).

#### 4.3.2 Período de retorno e intervalo de discretização dos cálculos

O período de retorno pode ser definido como o inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou excedido em anos. Nesse estudo, para uma análise inicial considerando obras

internas e de pequeno porte na bacia hidrográfica, o período de retorno escolhido foi de 10 anos. Entretanto, para uma posterior análise do pior cenário nos hidrogramas de cheia, será utilizado um período de retorno igual a 50 anos prevendo obras de maior porte na bacia hidrográfica.

Com o intuito de obter uma maior precisão nos resultados, o software *ABC 6* sugere que o intervalo de discretização dos cálculos seja na ordem 1/10 do tempo de concentração da bacia hidrográfica. Dessa maneira, foi calculado um intervalo de discretização para cada tempo de concentração considerado na análise, cujos valores podem ser visualizados na Tabela 9.

### 4.3.3 Curvas IDF

Para o presente estudo foram utilizadas as curvas IDF de Pfafstetter disponibilizadas pelo software, conforme dados da Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros da curva IDF de Caxias do Sul

Coeficientes	Valor
a	0,5
b	23
c	20
5min	0
15min	0,08
30min	0,08
1h e 6d	0,08

Fonte: A autora (2020).

Foi considerada também a duração da chuva em minutos, que varia conforme cada tempo de concentração aplicado na análise. O coeficiente de redução espacial (FRA) foi aplicado seguindo o mesmo critério, visto que compensa o fato de que a intensidade média da chuva em grandes áreas é menor. Pode ser calculado conforme a Equação 23 sendo que  $A$  é a área da bacia ( $\text{km}^2$ ) e  $t_c$  o tempo de concentração (min). Os valores de duração de chuva e coeficiente de redução espacial podem ser observados na Tabela 10.

$$FRA = 1 - \frac{\sqrt{A}}{27,3 \times t_c^{0,215}} \quad (23)$$

#### 4.3.4 Número de curva – CN

O número da curva “CN”, varia entre 0 e 100 conforme o tipo hidrológico do solo, uso e ocupação e grau de saturação do solo. Os valores mais baixos indicam baixo potencial de escoamento superficial e os altos maior potencial, ou seja, quanto maior a impermeabilização de certa área, maior será o valor de CN.

Para a determinação do parâmetro CN, seguiram-se os passos explicados pelas etapas abaixo:

- a) Determinação das sub-áreas: Para o estudo foi escolhido subdividir a bacia em três diferentes sub-áreas de contribuição conforme o uso do solo, que foram área urbanizada (sub-área 1), não urbanizada (sub-área 2) e vegetação (sub-área 3).
- b) Determinação da condição de umidade: Para as três sub-áreas foi utilizado condição de umidade antecedente II.
- c) Determinação do grupo hidrológico de cada sub-área: Foi definido com base na análise realizada do tipo de solo presente na bacia, analisando cada sub-área e a maior quantidade de solo presente na mesma. Essa análise pode ser melhor entendida no Quadro 6.
- d) Determinação do uso do solo: O uso do solo foi determinado por meio da análise da tabela disponibilizada pelo software (Tabela 6) buscando adequar-se da melhor maneira a situação das sub-áreas.
- e) Determinação do valor CN correspondente a cada sub-área de contribuição analisando a Tabela 6.
- f) Determinação do valor CN final realizando a média ponderada dos três valores obtidos em relação a sua sub-área correspondente, conforme a Equação 24.

$$CN = \frac{A_1 \times CN_1 + A_2 \times CN_2 + \dots + A_n \times CN_n}{A_1 + A_1 + \dots + A_n} \quad (24)$$

Quadro 6 - Grupos hidrológicos do solo das sub-áreas

<b>Área urbanizada</b>		
Classe do solo		Solo determinado
PaCd1	Argissolo	Grupo D: Solos Argilosos (de 30% a 40% de argila total)
CxBd9	Cambissolo	
PaCd3	Argissolo	
<b>Área não urbanizada</b>		
Classe do solo		Solo determinado
CxBd13	Cambissolo	Grupo C: Solos barrentos com teor de argila de 20% a 30%
CxBd6	Cambissolo	
RLe2	Neossolo	
PaCd3	Argissolo	
<b>Área de vegetação</b>		
Classe do solo		Solo determinado
RLe2	Neossolo	Grupo C: Solos barrentos com teor de argila de 20% a 30%
CxBd13	Cambissolo	
PaCd1	Argissolo	

Fonte: A autora (2020).

Tabela 6 - Número da curva CN para bacias urbanas na condição de umidade II

Cobertura do solo	Condições de superfície	Tipo de solo			
		A	B	C	D
Residencial	Lote até 500 m <sup>2</sup> (65% impermeável)	77	85	90	92
	Lote até 100 m <sup>2</sup> (38% impermeável)	61	75	83	87
	Lote até 1500 m <sup>2</sup> (30% impermeável)	57	72	81	86
Espaços abertos, parques e jardins	Boas condições, cobertura de grama	39	61	74	80
	Condições médias, cobertura de grama	49	69	79	84

Fonte: Adaptado de ABC6 (2020). Reservatório paralelo

#### 4.3.5 Reservatório paralelo

O presente estudo considerou a implementação de um reservatório paralelo próximo ao exutório da bacia hidrográfica. Para um pré-dimensionamento do reservatório paralelo no software *ABC6*, é necessário inserir alguns parâmetros, como a área do reservatório em planta,

altura do reservatório e altura da lâmina d'água inicial. Os parâmetros considerados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Características físicas do reservatório

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Área do reservatório em planta (m <sup>2</sup> )	10.000
Altura do reservatório (m)	3
Altura da lâmina d'água inicial (m)	0

Fonte: A autora (2020).

Foi considerada área do reservatório equivalente a um campo de futebol pré-existente no local com coordenadas geográficas: latitude 29°13'26.87''S e longitude 51°9'37.33''O. A altura da lâmina d'água inicial foi considerada zero haja visto que o reservatório do estudo se refere a um reservatório de detenção, cuja área inicial é seca e pode ser utilizada para fins recreacionais, com armazenamento de curto prazo da água.

É importante destacar que a escolha dos parâmetros a serem adotados não é apenas uma escolha hidráulica, é necessário também verificar o custo de implementação do reservatório, como também realizar um estudo de viabilidade técnica e financeira e consultar a população que reside no local. O software *ABC6* auxilia no pré-dimensionamento do reservatório na bacia hidrográfica, a fim de evitar inundações e enchentes, porém é necessário verificar na prática qual a capacidade de volume de armazenamento que o terreno proporciona, para então analisar as condições de implementação do reservatório.

A seguir serão apresentados todos os resultados obtidos posteriormente à definição de todos os coeficientes e parâmetros aqui citados, bem como as discussões e análises necessárias ao estudo.

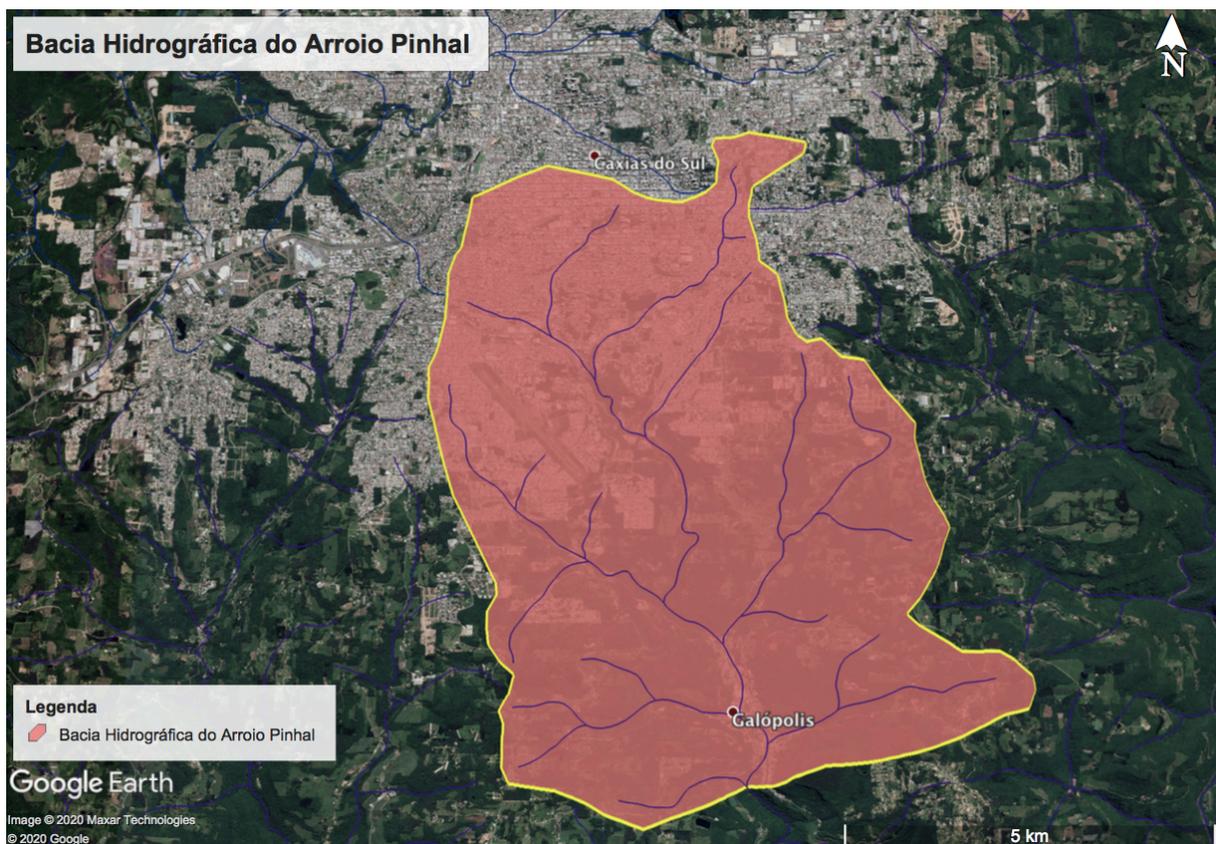
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são abordados os resultados obtidos por meio de diversas análises e também discussões necessárias para a complementação do estudo em questão. Serão abordados a delimitação da bacia hidrográfica, classificações do tipo e uso do solo bem como a caracterização fisiográfica e os resultados obtidos por meio da modelagem precipitação-vazão no software *ABC6*.

### 5.1 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica do estudo foi definida com o exutório na localidade do bairro Galópolis. A sub-bacia possui área total de 45,8 km<sup>2</sup>, perímetro de 31,4 km e comprimento do rio principal de 11 km. A delimitação pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 - Mapa de localização da sub-bacia do Arroio Pinhal com exutório definido na localidade de Galópolis



Fonte: A autora (2020).

## 5.2 CLASSIFICAÇÃO DO TIPO E USO DO SOLO

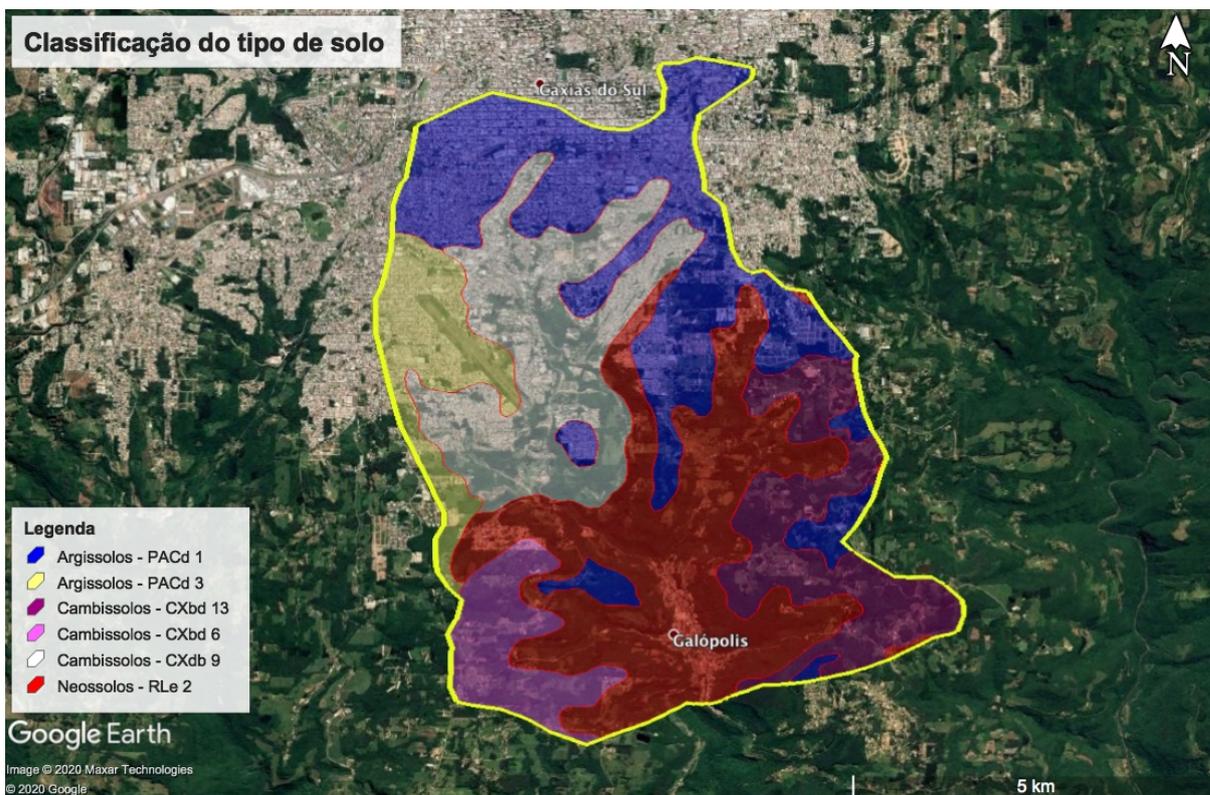
No Quadro 7, é possível verificar os diferentes tipos de solos encontrados na bacia hidrográfica e na Figura 13 é possível analisar as áreas nas quais cada tipo de solo se encontra.

Quadro 7 - Classificação dos solos da bacia hidrográfica

Classe do solo	Características
Cambissolos	<b>Cxbd 6:</b> associação do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (típico de textura argilosa), relevo ondulado. Neossolo Litólico Eutrófico, (solo típico textura média), relevo forte ondulado (UFGRS; EMBRAPA, 2007).
	<b>Cxbd 9:</b> associação do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (solo típico textura argilosa). Neossolo Litólico Distrófico (solo típico textura média), relevo forte ondulado (UFGRS; EMBRAPA, 2007).
	<b>Cxbd 13:</b> associação do Cambissolo Háplico Tb e Ta, Distrófico e Eutrófico, (solo típico textura média), fase pedregosa relevo ondulado. Neossolo Litólico Eutrófico (solo típico textura média), fase pedregosa relevo forte ondulado. Argissolo Acinzentado Distrófico, (solo textura média/argilosa), fase relevo ondulado (UFGRS; EMBRAPA, 2007).
Argissolos	<b>PACd 1:</b> Associação do Argissolo Acinzentado Distrófico, (solo típico textura muito argilosa), relevo suave ondulado. Cambissolo Háplico Ta Distrófico, (solo típico textura argilosa), relevo ondulado. Neossolo Litólico Eutrófico, (típico chernossólico), textura média, fase pedregosa, relevo ondulado (UFGRS; EMBRAPA, 2007).
	<b>PACd 3:</b> Associação do Argissolo Acinzentado Distrófico, (solo típico textura muito argilosa). Cambissolo Háplico Ta Distrófico, (solo típico textura média). Neossolo Litólico Eutrófico, (solo típico textura média), fase pedregosa, todos relevos ondulados (UFGRS; EMBRAPA, 2007).
Neossolos	<b>RLe 2:</b> Associação do Neossolo Litólico Eutrófico, (solo típico textura média), fase pedregosa e rochosa, relevo montanhoso. Cambissolo Háplico Ta Eutrófico, (solo típico textura argilosa), fase pedregosa, relevo forte ondulado. Aflorestamento Rochosos, relevo escarpado (UFGRS; EMBRAPA, 2007).

Fonte: A autora (2020).

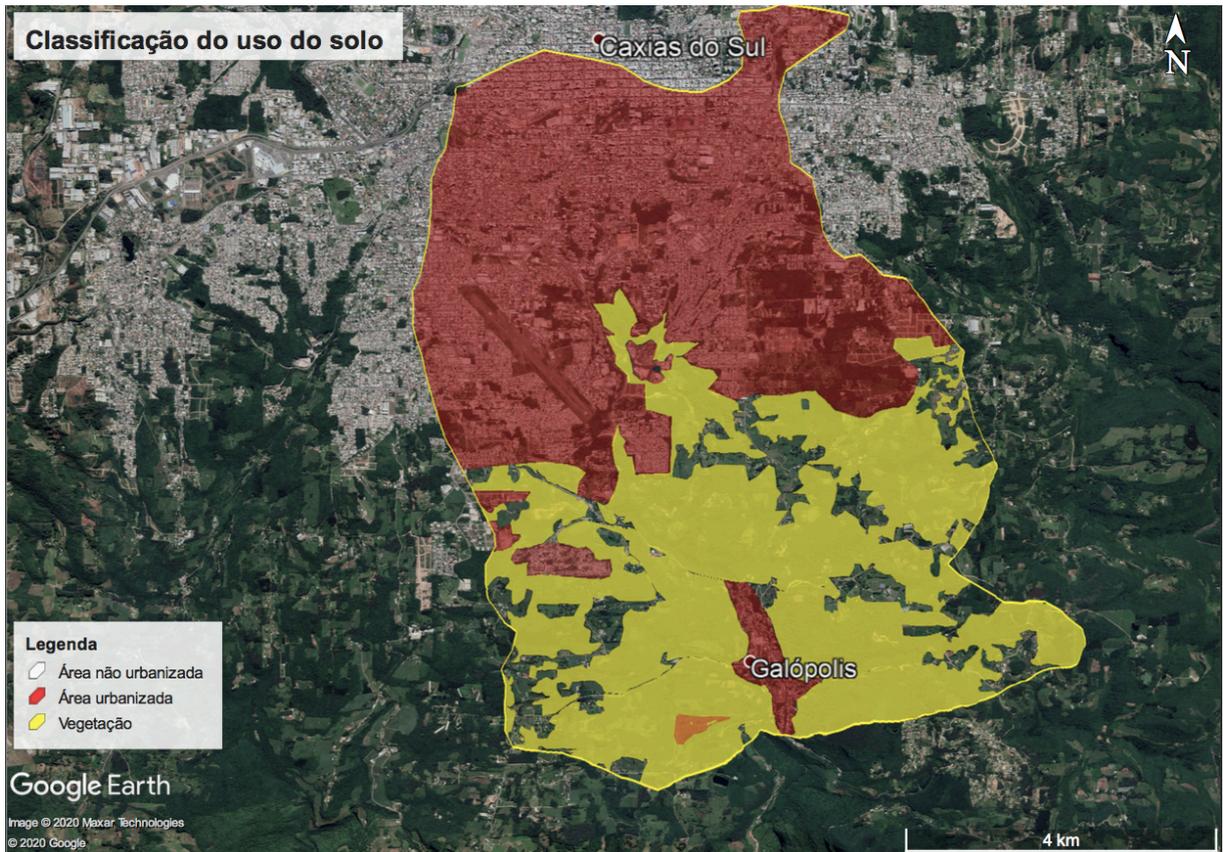
Figura 13 - Classificação do tipo de solo na sub-bacia hidrográfica de estudo



Fonte: Adaptado de UFRGS; EMBRAPA (2007).

Por meio do software Google Earth Pro foi possível dividir a área do estudo em três sub-áreas diferentes e encontrar os valores de área iguais a 22,72 km<sup>2</sup>, 4,54 km<sup>2</sup> e 18,54 km<sup>2</sup> para a área urbanizada, não urbanizada e vegetação, respectivamente. É possível identificar que a bacia possui uma área urbanizada significativa, ocupando um total de 49,61% em relação a área total. A área de vegetação apresentou-se considerável com 40,48% em relação a área total e áreas não urbanizadas com o menor percentual de 9,91%. O mapa com a divisão das áreas pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 - Classificação do uso do solo da sub-bacia de estudo



Fonte: A autora (2020).

### 5.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA

São diversas as condições que podem influenciar na maneira como a bacia hidrográfica se comporta e em como a chuva pode interagir com a mesma, como características relacionadas ao relevo, comprimento total da rede de drenagem, densidade de drenagem, entre outros. Na Tabela 8, é possível verificar os valores correspondentes a alguns parâmetros importantes na bacia do estudo.

Tabela 8 - Resultados dos parâmetros fisiográficos da sub-bacia de estudo

Nome do parâmetro	Valor	Unidade
Área da bacia (A)	45,8	km <sup>2</sup>
Perímetro da bacia (P)	31,4	km
Comprimento do rio principal/talvegue (Lb)	11	km
Comprimento total da rede de drenagem (Lt)	48,13	km
Número total de segmentos de drenagem (Nt)	33	-
Nt (1ª ordem)	19	-

(continua)

(conclusão)

Nome do parâmetro	Valor	Unidade
Densidade de drenagem (Dd)	1,05	km/km <sup>2</sup>
Densidade de confluências (Dc)	0,35	-
Extensão média do escoamento superficial (Les)	0,24	km
Densidade de rios (Dr)	0,41	-
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,3	-
Índice de circularidade (Ic)	0,58	-
Índice de Conformação ou fator de forma (I)	0,38	-
Coefficiente de manutenção (Cm)	0,95	km <sup>2</sup> /km
Declividade média do Rio (Sm)	38,79	m/km

Fonte: A autora (2020).

A partir do cálculo dos parâmetros, é possível analisar que a bacia pode ser classificada como grande, haja visto que possui área total de 45,80 km<sup>2</sup> e, conforme Wisler e Bratter (1964 apud BORSATO; MARTONI; 2004), bacias com área inferior a 26 km<sup>2</sup> são classificadas como pequenas e áreas acima desse valor, classificadas como grandes. O comprimento do rio principal igual a 11 km, pode ser observado na Figura 16.

O índice de circularidade (Ic) igual a 0,58 pode indicar que a bacia tenha um formato circular, haja visto que quanto mais perto de 1 o valor estiver, mais próxima de circular a bacia será. Bacias circulares são mais propensas a enchentes em função da chuva que cai na bacia concentrar grandes volumes de água no rio principal e a distância em relação ao exutório não ser grande. Entretanto o fator de forma (I) igual a 0,38 indica que a bacia não possui grandes potencialidades em produzir picos de cheias.

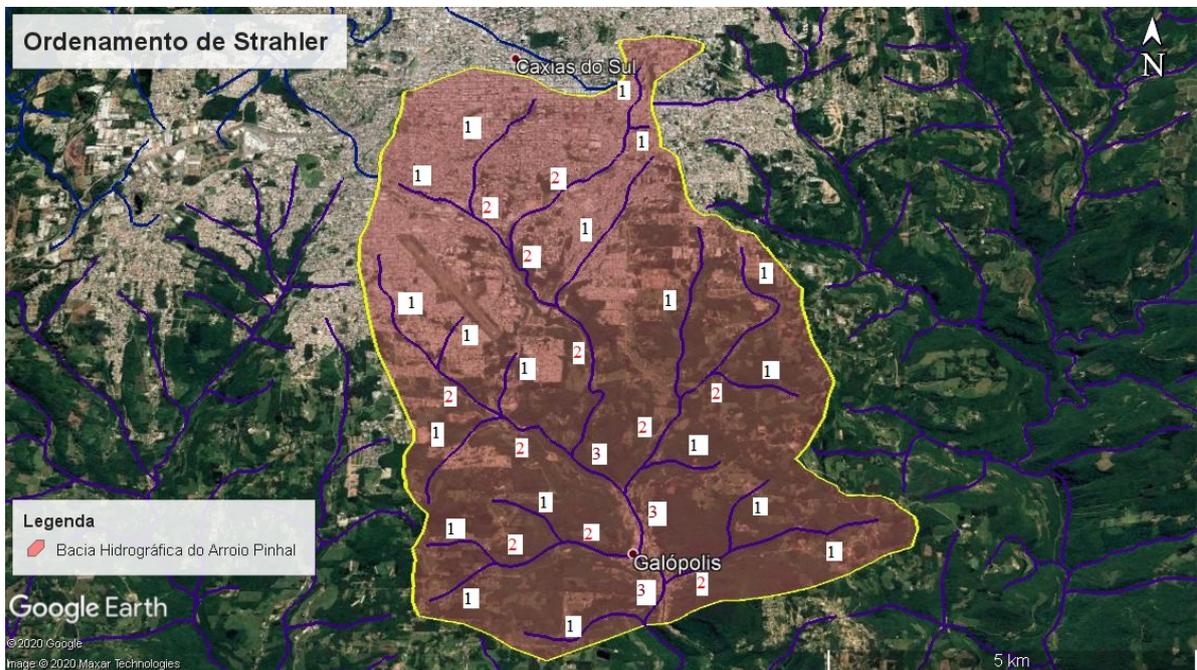
A declividade média do rio é uma característica que afeta diretamente o tempo de viagem da água pela bacia hidrográfica, altas declividades, como 38,19 km/km<sup>2</sup> podem significar um menor tempo para o escoamento da água até o exutório da bacia.

Quanto maior for o valor da densidade de drenagem (Dd), mais rápido a água será capaz de atingir o exutório da bacia, gerando assim hidrogramas com picos elevados e em tempos menores (PORTO; FILHO; SILVA, 1999). Esse parâmetro pode variar de 0,5 km/km<sup>2</sup> para bacias com baixa densidade e 3,5 km/km<sup>2</sup> ou mais para bacias bem drenadas (VILLELA; MATOS, 1976), dessa maneira pode-se concluir que a bacia em questão possui densidade de drenagem regular.

O coeficiente de compacidade (Kc) igual a 1,3 indica que a bacia possui tendência em ocasionar escoamentos rápidos visto que o valor é mais próximo de 1. O número total de segmentos de drenagem é igual a 33 e, por meio do ordenamento de Strahler (Figura 15), é

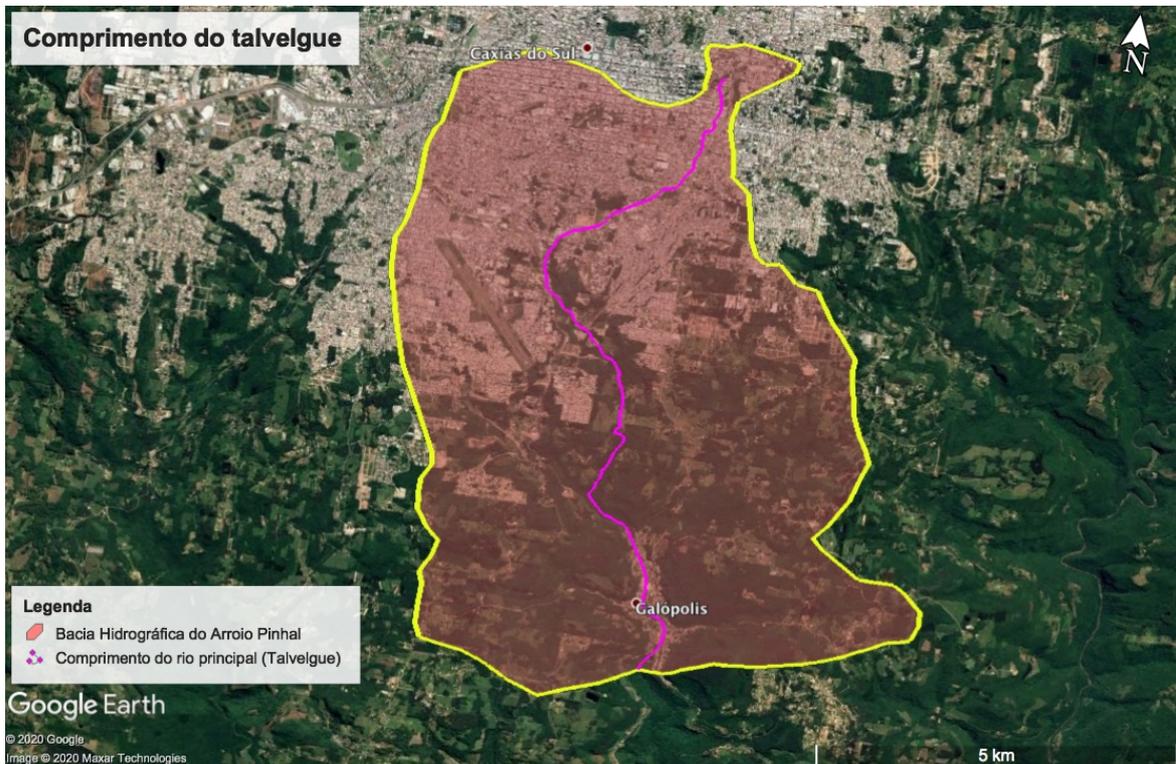
possível identificar que o número total de segmentos de drenagem de primeira ordem é 19, de segunda ordem 11 e terceira ordem 3, conseqüentemente a bacia possui ordenamento três.

Figura 15 - Ordenamento de Strahler



Fonte: A autora (2020).

Figura 16 - Comprimento do talvelgue



Fonte: A autora (2020).

#### 5.4 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Com o intuito de analisar a influência do tempo de concentração nos métodos de chuva excedente e hidrogramas, consideraram-se os métodos de cálculo de tempo de concentração disponíveis no *ABC6*. Os resultados obtidos de tempo de concentração em horas e em minutos estão apresentados na Tabela 9. É possível identificar uma alta variabilidade de valores, 60 a 259,8 minutos, isso pode ser explicado devido às condições iniciais pelas quais as fórmulas foram determinadas. A média dos tempos de concentração foi de 2,65 horas.

O menor tempo calculado foi pelo método de Kerby e o maior tempo pelo método do SCS. Esteves e Mendiondo (2003) obtiveram também o maior tempo no método do SCS mesmo realizando um ajuste em função da bacia ser urbanizada, isso pode ser explicado pela bacia dos dois estudos não serem completamente urbanizadas. Kerby apresentou o menor valor. O método é definido para bacias rurais com área inferior a  $0,05 \text{ km}^2$  e comprimento do talvegue menor que  $0,37 \text{ km}$ , haja visto que a bacia do estudo possui uma área consideravelmente maior de  $45,8 \text{ km}^2$  e comprimento do rio principal de  $11 \text{ km}$  o resultado pode se tornar incoerente.

Os métodos de Kirpich I e II apresentaram os mesmos resultados, assim optou-se por utilizar apenas o resultado de Kirpich II. Silveira (2005) constatou que o método, mesmo sendo definido para bacias de até  $0,5 \text{ km}^2$ , pode ser utilizado e fornecer bons resultados em bacias rurais de médio a grande porte com áreas entre  $150$  a  $12.000 \text{ km}^2$ . O equacionamento utiliza apenas  $L$  (comprimento do rio principal) e  $S$  (declividade) como variáveis, o que pode gerar uma maior segurança na fórmula visto que não considera outros parâmetros com maior variabilidade como rugosidade, intensidade de precipitação, entre outros.

De maneira similar, fórmulas que utilizam a área  $A$  como Dooge podem ter tendência de superestimar o tempo de concentração independentemente dos parâmetros pelas quais foram estabelecidas (Silveira, 2005). Em contraponto, Sampaio et al. (2016) observaram que o método de Dooge quando comparado aos métodos de Ventura, Passini e Giandotti foi o que menos apresentou um percentual de aumento do tempo de concentração.

O método da Onda cinemática foi o que mais se aproximou da média dos tempos de concentração, entretanto é adequado para pequenas bacias e possui tendência de superestimar o valor à medida que a área da bacia aumenta.

Tabela 9 – Parâmetros considerados e resultados do tempo de concentração

Método	Intervalo de discretização (min)	Duração da chuva (min)	FRA (fator de redução espacial)	Tempo de concentração	
				Horas	Minutos
Kerby	6	60	0,9	0,95	60
Kirpich II	9	88,8	0,91	1,48	88,8
Onda cinemática	14	136,8	0,91	2,28	136,8
Dooge	18	181,8	0,92	3,03	181,8
Bransby Willians	21	211,8	0,92	3,53	211,8
SCS	26	259,8	0,92	4,33	259,8

Fonte: A autora (2020).

### 5.5 NÚMERO DA CURVA – CN

Na Tabela 10, é possível visualizar o valor de CN encontrado, igual a 83. Esse valor pode ser considerado relativamente alto, visto que o parâmetro varia entre 0 e 100. Altos valores de CN indicam áreas impermeabilizadas e também alto potencial de escoamento superficial. Além disso, é possível afirmar que o valor de CN encontrado para as sub-áreas não urbanizada e vegetação é considerado alto também, e isso pode estar explicado pelo tipo de solo encontrado nos locais.

Tabela 10 - Resultados do parâmetro CN

Área de contribuição	Ocupação do solo	Valor (km <sup>2</sup> )	Condição de umidade do solo	Tipo de solo	Uso do solo	CN	CN final
Sub-área 1	Urbanizada	22,72	II	Grupo D	Residencial 65% impermeavel	92	
Sub-área 2	Não urbanizada	4,54	II	Grupo C	Espaços abertos, parques e jardins. Condições médias	79	<b>83</b>
Sub-área 3	Vegetação	18,54	II	Grupo C	Espaços abertos, parques e jardins. Condições boas	74	

Fonte: A autora (2020).

### 5.6 CHUVA EXCEDENTE

A seguir serão apresentados os resultados obtidos de chuva excedente pelos três métodos propostos: Green e Ampt, Horton e SCS, subdividindo-se a análise pelos tempos de

concentração analisados e primeiramente pelos hietogramas e após pelos volumes infiltrados e excedentes de cada método.

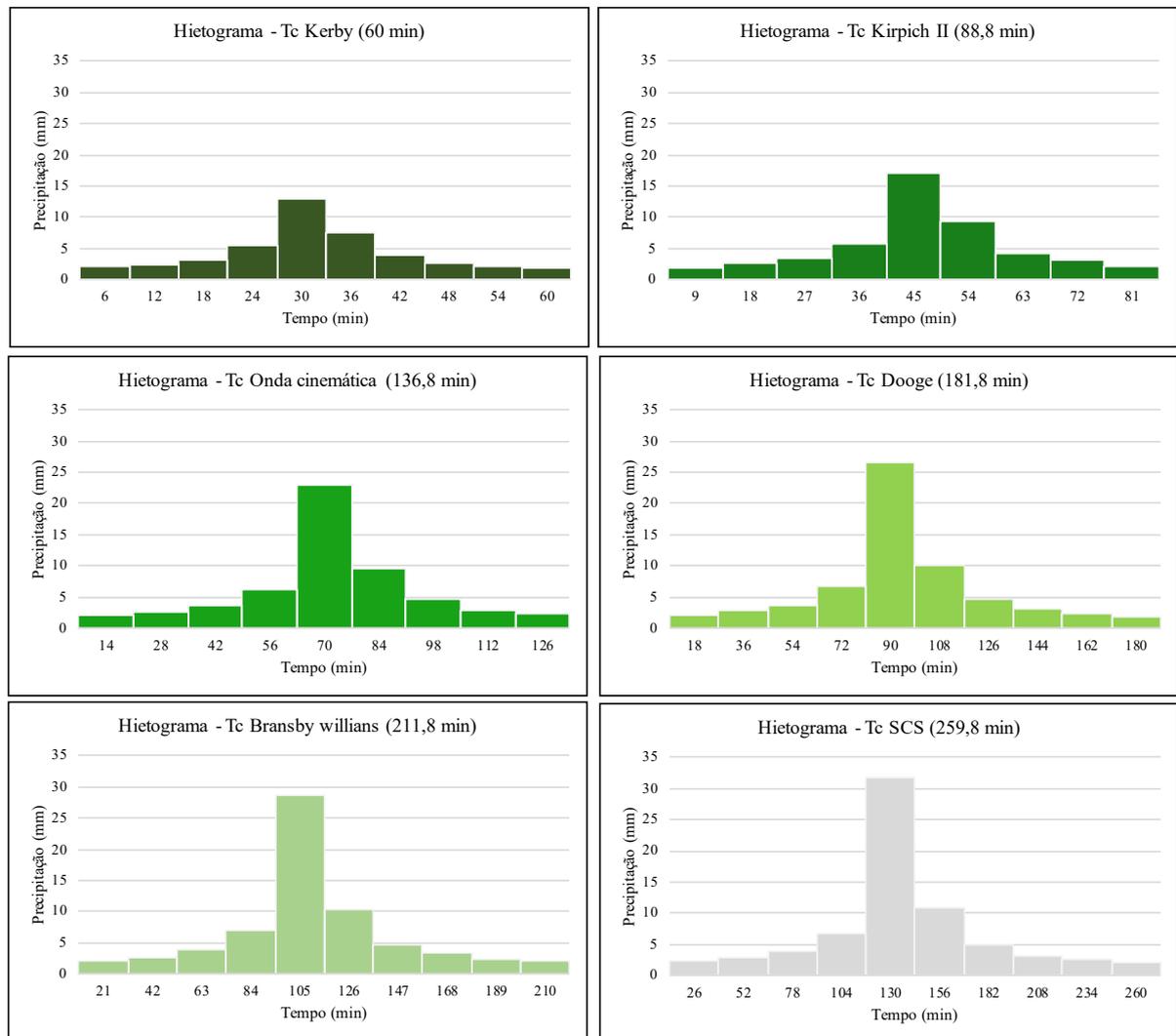
### 5.6.1 Hietogramas

Os hietogramas apresentaram o mesmo resultado quando aplicados aos três métodos estabelecidos de chuva excedente (Green e Ampt, Horton e SCS), diferenciando apenas seus volumes excedentes e infiltrados. Por esse motivo, apresentam-se na Figura 17 os hietogramas obtidos em apenas um dos métodos para cada tempo de concentração proposto no estudo. Analisando os hietogramas é possível inferir que:

- a) O intervalo de discretização variou conforme cada tempo de concentração aplicado, o intervalo aumentou conforme maior foi o tempo considerado, sendo 6 minutos para Kerby, 9 para Kirpich II, 14 para Onda cinemática, 18 para Dooge, 21 para Bransby Willians e 26 para SCS.
- b) A duração da chuva foi maior conforme aumentou o valor do tempo de concentração considerado, de 60 minutos para Kerby, 81 para Kirpich II, 126 para onda cinemática, 180 para Dooge, 210 para Bransby willians e 260 para SCS;
- c) Foram maiores os volumes totais no tempo de concentração do SCS com 71,4 mm e menores no tempo de concentração de Kerby com 44,18 mm conforme a Tabela 11;
- d) No tempo de concentração SCS, é possível verificar o maior volume precipitado no tempo de 130 minutos de 31,76 mm. Enquanto para Kerby a chuva crítica máxima é de apenas 12,9 mm no tempo de 30 minutos;
- e) Nota-se um aumento de 12% dos volumes totais infiltrados de Kirpich II em relação a Kerby, 29,4% em relação a onda cinemática, 45,4% para Dooge, 52,1% para Bransby willians e 61,6% para SCS.

Os parâmetros intervalo de discretização dos blocos, precipitação total alcançada e pico de precipitação apresentaram diferenças significativas conforme cada tempo de concentração analisado. Desta maneira, é possível afirmar que a escolha do tempo de concentração a ser adotado interfere no cálculo das chuvas intensas em uma bacia, portanto a definição adequada do tempo de concentração e a escolha do mesmo é de suma importância para não superestimar ou subestimar resultados de estudos na bacia hidrográfica.

Figura 17 - Hietogramas para diferentes tempos de concentração



Fonte: A autora (2020).

Tabela 11 - Volumes totais dos hietogramas conforme o tempo de concentração

Tempo de concentração	Volumes totais (mm)
Kerby	44,18
Kirpich II	49,48
Onda cinemática	57,17
Dooge	64,24
Bransby willians	67,21
SCS	71,4

Fonte: A autora (2020).

### 5.6.2 Volumes infiltrados e excedentes

A partir da análise dos resultados obtidos na Tabela 12 que mostra os volumes excedentes e infiltrados por diferentes métodos e tempos de concentração, é possível inferir que:

- a) O método de Green e Ampt apresentou, em todos os casos, os maiores volumes excedentes e os menores infiltrados. Isso pode ser explicado pela base metodológica de Green e Ampt, que parte de uma frente de umedecimento inicial do solo, como consequência, serão maiores os volumes escoados e menores os infiltrados;
- b) O método de Horton, em 66,6% dos casos de tempo de concentração (Kerby, Kirpich II, Onda cinemática e Dooge) apresentou os volumes excedentes e infiltrados totais intermediários. Entretanto, para o tempo de concentração de Bransby willians, observa-se que os volumes excedentes totais praticamente são iguais com SCS, de 29,66 mm para Horton e 29,76 mm para SCS. O mesmo se repete para os volumes infiltrados totais, com 37,55 mm para Horton e 37,45 mm para SCS;
- c) Para o tempo de concentração do SCS, nota-se um comportamento diferente. Os volumes excedentes totais são intermediários para SCS e menores para Horton. Já os volumes infiltrados totais são maiores para Horton e intermediários para SCS;
- d) O método do SCS apresentou em 66,6% dos casos os menores volumes excedentes totais e os maiores infiltrados totais;
- e) Nota-se que os volumes excedentes e infiltrados dos hietogramas aumentaram à medida que o tempo de concentração aumentou;
- f) É possível verificar uma chuva crítica máxima no tempo de concentração do SCS para o método de Green e Ampt com 48,44 mm enquanto para Kerby um valor de 33,53 mm. Dessa maneira, conclui-se que do tempo de concentração de SCS para o tempo de concentração de Kerby, tem-se uma chuva crítica 30,79% menor.

Tabela 12 - Resultados de volumes excedentes e infiltrados conforme os tempos de concentração.

Tempo de concentração	Excedentes totais (mm)			Infiltrados totais (mm)		
	Green e Ampt	Horton	SCS	Green e Ampt	Horton	SCS
Kerby	33,53	20,72	13,37	10,65	23,46	30,81
Kirpich II	37,15	23,42	16,85	12,33	26,06	32,63
Onda cinemática	41,74	26,15	22,24	15,43	31,02	34,93
Dooge	45,41	28,5	27,48	18,83	35,74	36,76
Bransby willians	46,8	29,66	29,76	20,41	37,55	37,45
SCS	48,44	31,61	33,05	22,96	39,79	38,35

Fonte: Adaptado de ABC6 (2020).

## 5.7 HIDROGRAMAS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos dos hidrogramas pelos três métodos propostos: Triangular do SCS, Santa Bárbara e Clark. Os hidrogramas foram obtidos considerando uma análise em comparação aos métodos da chuva excedente, ou seja, cada método de hidrograma foi calculado para os três métodos de chuva excedente. Na Tabela 13 é possível visualizar todos os valores de vazão de pico obtidos no estudo, subdivididos por tempo de concentração e método adotado. Além disso, na Tabela 14 é possível verificar uma análise das diferenças percentuais obtidas entre os tempos de concentração analisados para cada método de chuva excedente aplicado. Foi utilizado como valor de referência as vazões de pico obtidas pelo tempo de concentração de Kirpich II para todos os casos. A partir da análise dos resultados é possível inferir que:

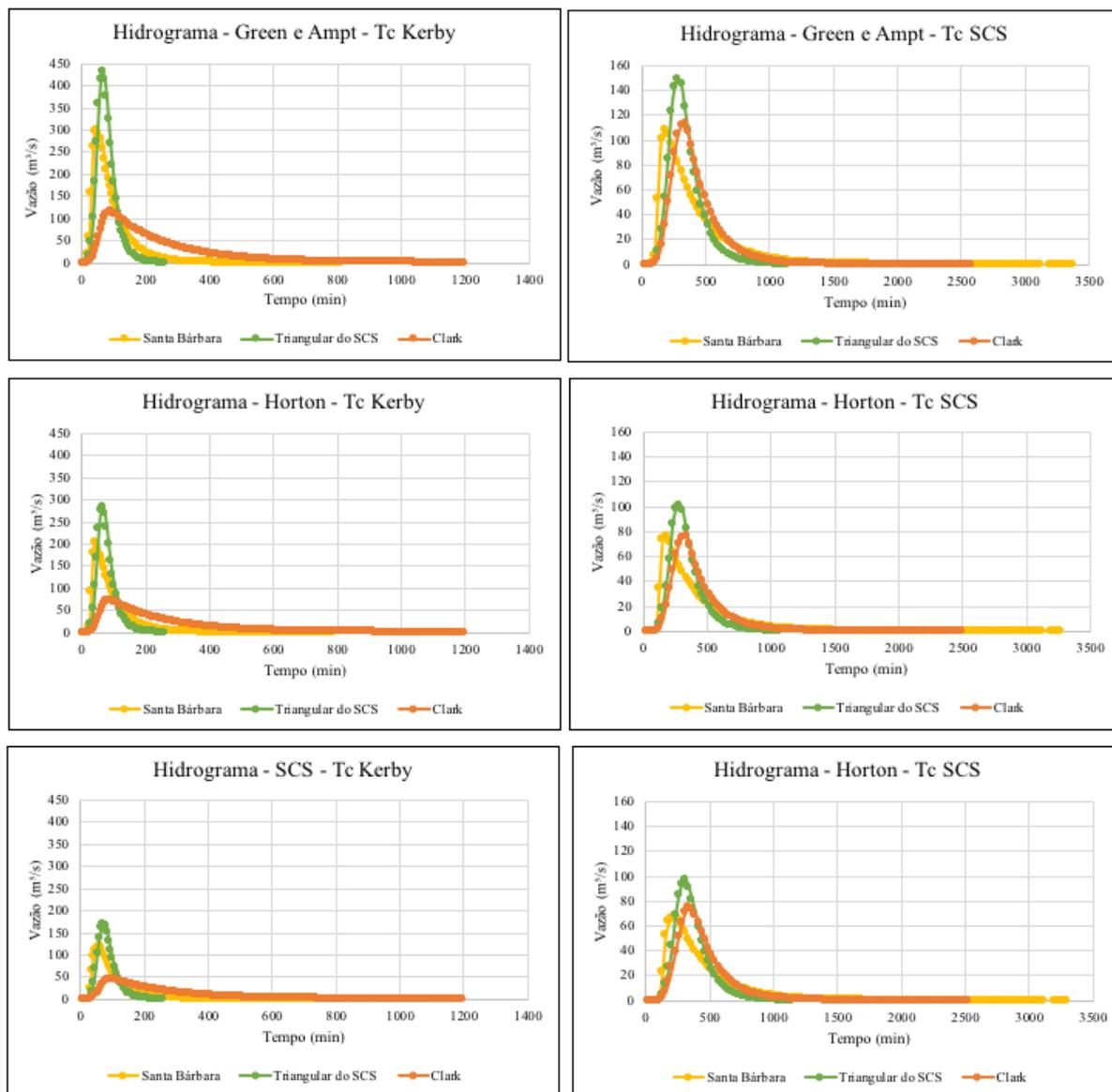
- a) A vazão de pico se encontra, para todos os casos, no método da chuva excedente de Green e Ampt e no método dos hidrogramas do Triangular do SCS. O maior valor de vazão de pico foi identificado para o tempo de concentração de Kerby com 430,3 m<sup>3</sup>/s no tempo de 66 minutos. É importante avaliar que esse valor de vazão de pico pode estar superestimado devido às características metodológicas do tempo de concentração de Kerby;
- b) Em 72,2% dos casos, os menores valores de vazão de pico foram encontrados no método de Clark. Isto pode ser explicado pelo método considerar o efeito das isócronas que dividem a área da bacia em sub-áreas, como decorrência disso serão menores os valores de vazão contribuídos;

- c) Para os 66,66% dos casos de tempo de concentração (Kerby, Kirpich II, Onda cinemática e Dooge) houve o mesmo comportamento: Triangular do SCS com maior pico no tempo intermediário, Santa Bárbara com picos intermediários no menor tempo e Clark no maior tempo com os menores picos;
- d) Para o tempo de concentração de Bransby Willians observa-se que em Horton o comportamento foi igual ao descrito em (c), entretanto para Green e Ampt e SCS nota-se que o método Triangular do SCS e Clark obtiveram no mesmo tempo vazões de pico e intermediárias, respectivamente. Santa Bárbara obteve para esse caso as menores vazões no menor tempo.
- e) Para o tempo de concentração de SCS nota-se que em Horton o comportamento foi igual ao descrito em (c). Em Green e Ampt e SCS a maior vazão de pico permaneceu no método Triangular do SCS, as intermediárias em Clark e menores em Santa Bárbara.

Na Figura 18, estão apresentados alguns dos hidrogramas obtidos no estudo, destacando-se de maior importância os obtidos com o menor tempo de concentração (Kerby) em que se obtiveram os maiores valores de vazão de pico e os obtidos com maior tempo de concentração (SCS) onde, em contrapartida, se encontraram os menores valores de vazão de pico.

Da mesma maneira que o presente estudo, Silveira (2010) concluiu que para as simulações em sua bacia hidrográfica, as vazões de pico geradas pelo método do Triangular do SCS foram maiores do que as geradas nos métodos de Clark e Santa Bárbara. Em contrapartida, foram maiores as vazões no método de Clark do que as de Santa Bárbara.

Figura 18 - Hidrogramas para os tempos de concentração extremos



Fonte: A autora (2020).

Tabela 13 - Resultados das vazões de pico para TR 10 anos

Tempo de concentração	Métodos de chuva excedente	Métodos de hidrogramas					
		Triangular do SCS		Santa Bárbara		Clark	
		Tempo de pico (min)	Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico (min)	Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico (min)	Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)
Kerby	Green e Ampt	66	430,3	48	300,13	90	114,96
	Horton	66	283,13	42	204,19	84	72,62
	SCS	72	170,35	60	121,17	96	46
Kirpich II	Green e Ampt	99	323,15	72	228,43	126	120,41
	Horton	99	212,44	63	155,52	126	77,32
	SCS	108	147,11	81	104,84	135	54,43
Onda cinemática	Green e Ampt	154	238,93	98	170,7	182	121,44
	Horton	154	155,6	98	115,45	182	77,92
	SCS	168	125,26	126	88,54	196	64,28
Dooge	Green e Ampt	198	196,35	126	140,72	270	114,64
	Horton	198	129,48	126	96,71	252	76,28
	SCS	216	114,47	162	78,41	270	69,75
Bransby willians	Green e Ampt	231	174,63	147	125,85	231	129,29
	Horton	231	116,06	147	87,29	294	74,59
	SCS	252	106,45	189	72,68	252	78,18
SCS	Green e Ampt	286	148,86	182	108,12	338	113,07
	Horton	286	101,3	182	76,6	338	75,65
	SCS	312	96,66	234	65,72	338	74,52

Fonte: A autora (2020).

Tabela 14 - Diferença percentual entre métodos

Métodos de chuva excedente	Tempo de concentração	Métodos de hidrogramas					
		Triangular do SCS		Santa Bárbara		Clark	
		Valor da vazão de pico	Diferença %	Valor da vazão de pico	Diferença %	Valor da vazão de pico	Diferença %
Green e Ampt	Kerby	430,3	33,16%	300,13	31,39%	114,96	-4,53%
	Kirpich II	323,15	-	228,43	-	120,41	-
	Onda cinemática	238,93	-26,06%	170,7	-25,27%	121,44	0,86%
	Dooge	196,35	-39,24%	140,72	-38,40%	114,64	-4,79%
	Bransby Willians	174,63	-45,96%	125,85	-44,91%	129,29	7,37%
	SCS	148,86	-53,93%	108,12	-52,67%	113,07	-6,10%
Horton	Kerby	283,13	33,28%	204,19	31,30%	72,62	-39,69%
	Kirpich II	212,44	-	155,52	-	77,32	-
	Onda cinemática	155,6	-26,76%	115,45	-25,77%	77,92	0,78%
	Dooge	129,48	-39,05%	96,71	-37,82%	76,28	-1,35%
	Bransby Willians	116,06	-45,37%	87,29	-43,87%	74,59	-3,53%
	SCS	101,3	-52,32%	76,6	-50,75%	75,65	-2,16%
SCS	Kerby	170,35	15,80%	121,17	15,58%	46	-15,49%
	Kirpich II	147,11	-	104,84	-	54,43	-
	Onda cinemática	125,26	-14,85%	88,54	-15,55%	64,28	18,10%
	Dooge	114,47	-22,19%	78,41	-25,21%	69,75	28,15%
	Bransby Willians	106,45	-27,64%	72,68	-30,68%	78,18	43,63%
	SCS	96,66	-34,29%	65,72	-37,31%	74,52	36,91%

Fonte: A autora (2020).

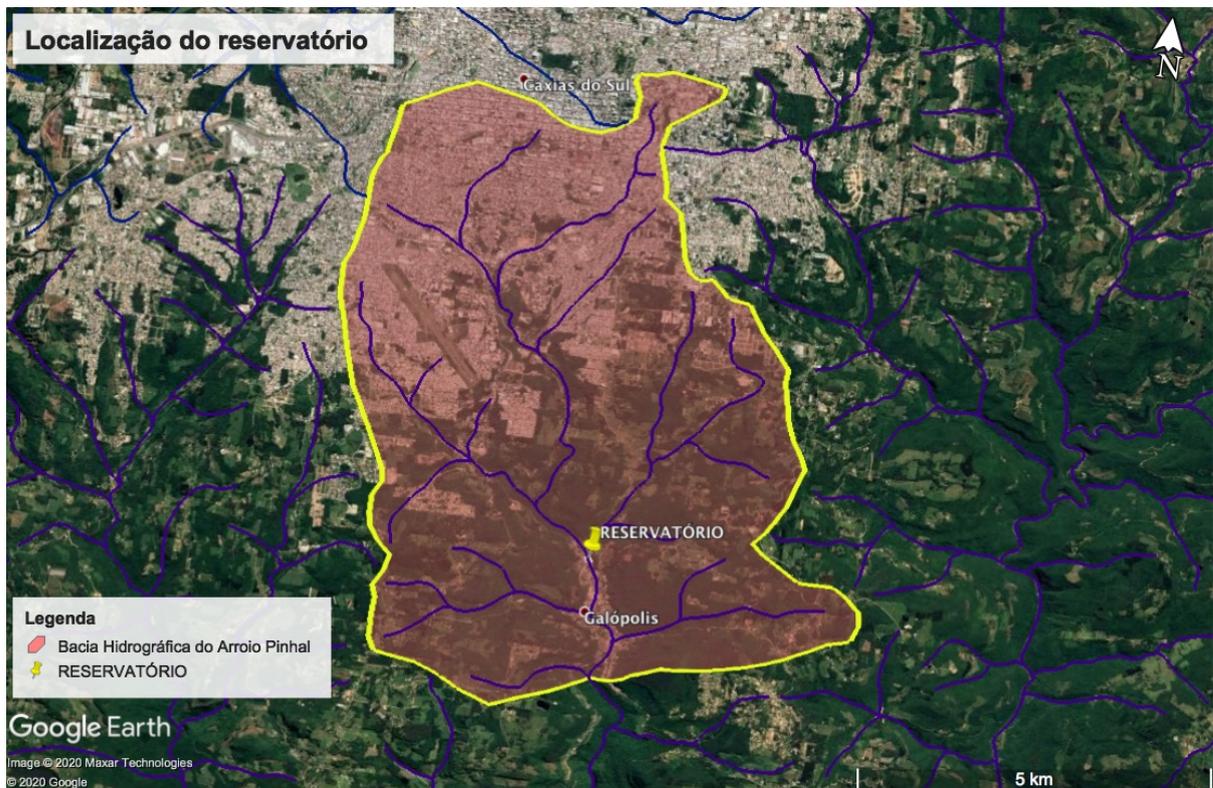
## 5.8 RESERVATÓRIO

Para a obra hidráulica de um reservatório de detenção, considerou-se o pior cenário de vazão de pico que foi encontrado no método Triangular do SCS para o método da chuva excedente de Green e Ampt no tempo de concentração de Kirpich II. Optou-se por trabalhar com Kirpich II por ser um dos métodos de tempo de concentração mais empregados e que melhor se adapta às características da bacia hidrográfica do estudo.

### 5.8.1 Localização do reservatório

O reservatório do estudo está localizado próximo ao exutório da bacia hidrográfica em um campo de futebol pré-existente no local. A sua localização pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 - Mapa de localização do reservatório

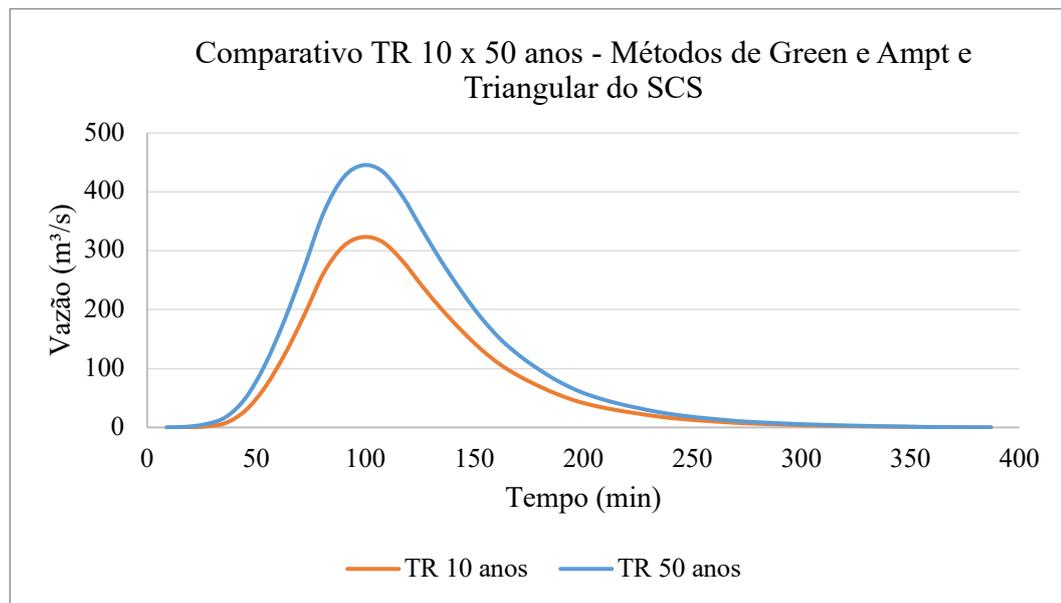


Fonte: A autora (2020).

### 5.8.2 Modelagem para TR de 50 anos

Considerando o reservatório de retenção uma obra de engenharia de maior porte, faz-se necessário considerar a modelagem do hidrograma de pior cenário, ou seja, no método Triangular do SCS para Green e Ampt com um tempo de retorno maior do que 10 anos. Assim sendo, na Figura 20, é possível observar um comparativo dos resultados obtidos para um tempo de retorno de 10 e 50 anos.

Figura 20 - Comparativo hidrogramas TR 10 anos x 50 anos



Fonte: A autora (2020).

É possível identificar que a vazão de pico aumentou consideravelmente para o tempo de retorno de 50 anos em relação ao tempo de 10 anos com um aumento de 37,73% do valor, passando de 323,15 m<sup>3</sup>/s para 445,09 m<sup>3</sup>/s, ambos valores no tempo de 99 minutos.

### 5.8.3 Amortecimento do hidrograma

Na Figura 21, é possível observar, em laranja, o hidrograma de pico, ou seja, o hidrograma de entrada do reservatório, e em azul o hidrograma amortecido, depois da implementação do reservatório. A tendência é de que o reservatório amortecia as vazões, entretanto nota-se que com a implementação de apenas um reservatório cujas medidas foram especificadas no item 4.3.5 deste trabalho, não seria capaz amortecer a vazão de pico gerada pela bacia hidrográfica. Dessa forma percebe-se que a recessão do hidrograma não foi mais

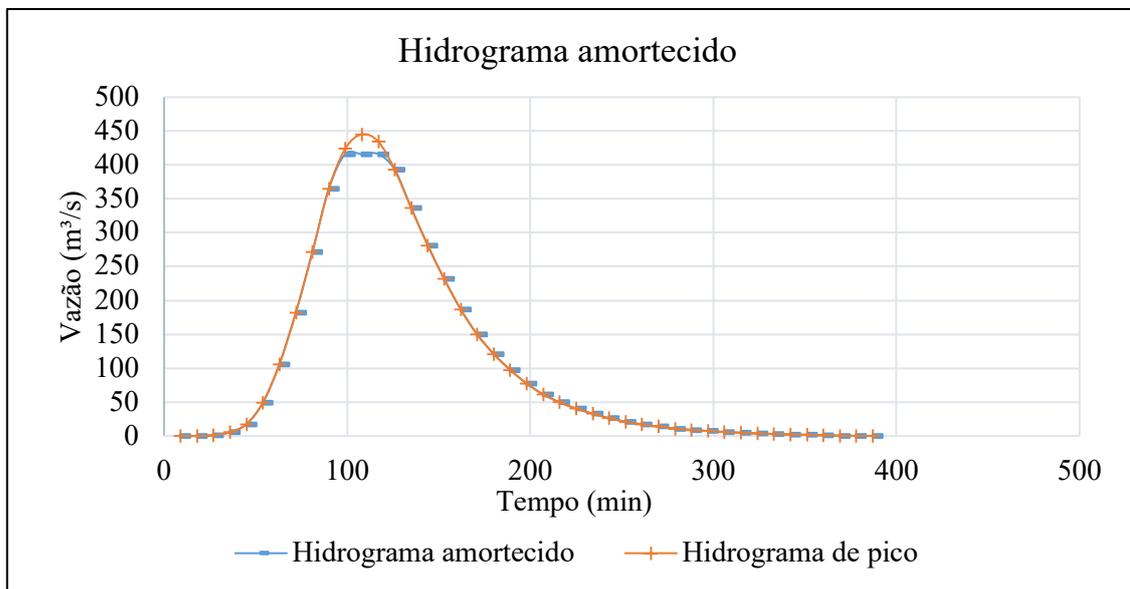
lenta e menor com a implementação do mesmo. Na Tabela 14, é possível identificar que a diferença seria mínima, de apenas 29,03 m<sup>3</sup>/s amortecidos na bacia hidrográfica, o que mostra a necessidade de que sejam construídos mais reservatórios em pequenas sub-bacias.

Tabela 15 - Vazão amortecida

Tempo (min)	Montante (m <sup>3</sup> /s)	Jusante (m <sup>3</sup> /s)
99	445,09	416,06

Fonte: A autora (2020).

Figura 21 - Hidrograma amortecido pelo reservatório proposto



Fonte: A autora (2020).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível identificar que o método Triangular do SCS apresentou, em todos os casos, os maiores picos de vazão. Dessa maneira, pode-se dizer que o método poderia ser utilizado com cautela por engenheiros civis e ambientais para projetar obras hidráulicas, haja visto que possui tendência de estimar altas vazões, como consequência proporcionar uma maior margem de segurança ao dimensionamento. Entretanto, é preciso analisar de forma coerente esses resultados para que não ocorra de a superestimação de obras hidráulicas sem necessidade.

Nota-se a expansão da urbanização da bacia hidrográfica ao longo dos anos, o que gera uma tendência de aumentar os níveis de vazão máxima. Dessa maneira, é necessário que ações sejam realizadas, haja visto que atualmente já ocorrem fenômenos de inundações e enchentes na bacia.

É possível verificar a importância dos estudos hidrológicos, pois são primordiais para que engenheiros civis e ambientais possam projetar de maneira coerente obras hidráulicas necessárias, de forma a melhorar o funcionamento da bacia hidrográfica e o conforto da população que reside nas mesmas.

Como sugestão para trabalhos futuros a respeito da bacia do presente estudo, algumas recomendações são necessárias, como:

- a) Realizar o mapeamento do uso do solo utilizando uma maior variabilidade do uso e ocupação;
- b) Utilizar um software que possibilite a sub-divisão da bacia hidrográfica em mais de três áreas diferentes em relação ao uso do solo;
- c) Reavaliar o parâmetro CN;
- d) Considerar mais de um reservatório para a análise do amortecimento no hidrograma;
- e) Analisar a viabilidade da implementação dos reservatórios.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ, L. N. G.; GARCEZ, A. A. **Hidrologia**. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 1988.

BARP, A. R. B. **Modelagem chuva-vazão em bacias hidrográficas com suporte em redes neurais artificiais**. 1999. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

BORSATO, Fabiano Hugo; MARTONI, Astrid Meira. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, Maringá, v. 26, n. 2, p. 273-285, jan. 2004.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CANÇADO, V. L. **Consequências econômicas das inundações e vulnerabilidade: Desenvolvimento de metodologia para avaliação do impacto nos domicílios e na cidade**. 2009. 394 f. Tese (Doutorado) - Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

CAXIAS DO SUL. PREFEITURA DE CAXIAS DO SUL. **Perfil Socioeconômico**. Disponível em: <https://caxias.rs.gov.br/cidade/perfil-socioeconomico>. Acesso em 13 jun. 2020.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Editora ABRH, 2013. 350 p.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. 5. ed. Porto Alegre: IPH UFRGS, 2011. 149 p.

CHRISTOFIDIS, H. V. **Drenagem urbana sustentável: Análise do uso do Retrofit**. 2010. 163 p. Dissertação (Mestrado) – Desenvolvimento sustentável. Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

ESTEVEES, Rafael Lucio; MENDIONDO, Eduardo Mario. **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE EQUAÇÕES E OBSERVAÇÕES DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM UMA BACIA URBANA DE SÃO CARLOS, SP.** *Abrh*, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 10-20, nov. 2003.

FARIA, N. O. **Estudo da impermeabilização, monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do barbado – Cuiabá/MT.** 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

GALVÍNCIO, Josiclêda Dominiciano; SOUSA, Francisco de Assis Salviano de; MOURA, Magna Soelma Beserra de. Uso de métodos empíricos para estimar vazão de pico no rio paraíba em caraúbas. *Revista de Geografia*, Recife, v. 22, n. 1, p. 80-92, jan. 2005.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. 291p.

HOEPFNER, A. C. **Estudo comparativo entre vazões de pico estimadas pelo método racional e pelo método do SCS para a bacia hidrográfica do rio bom retiro em Joinville-SC.** 2007. 57 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População em áreas de risco no Brasil.** Rio de Janeiro, 2018

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal Cidades.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/caxias-do-sul.html> Acesso em 13 jun. 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Populações em áreas de risco no Brasil.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=o-que-e> Acesso em 9 dez. 2020.

INDIO, C. **Agência Brasil.** 2018. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-06/numero-de-brasileiros-em-areas-de-risco-passa-de-8-milhoes-diz-ibge>. Acesso em: 12 abr. 2020.

**LABSID.** 2020. Disponível em: <http://www.labsid.eng.br>. Acesso em: 30 abr. 2020.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2. ed. Piracicaba: ISBN, 2008. 240p.

LIMA, G. L. Estimativa da infiltração da água no solo utilizando o modelo de Green e Ampt. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Agronomia, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, 2010.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUNARDI, M. **Uso do modelo de simulação ‘ABC6’ aplicado a dutovias para avaliação de áreas sujeitas a ocorrência de ondas de cheia e corridas de massa/detritos**: Estudo de caso na bacia do Ribeirão da Prata (SP). 2013. 79f. TCC (Graduação) – Curso de Geologia, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2013.

MENEZES, D. J. **Zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS**. 2014. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MINISTÉRIO DAS CIDADES/IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**.

Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

OLIVEIRA, Cristiano de Pádua M; PORTO, Rubem L; FILHO, Kamel Zahed; ROBERTO, Alexandre N. **ABC 6, UM SISTEMA DE SUPORTE A DECISÕES PARA ANÁLISE DE CHEIAS EM BACIAS COMPLEXAS**. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2016.

POLETO, C. **Bacias hidrográficas e recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Interciencia, 2014.

**PIONEIRO: Saiba por que o Arroio Pinhal virou uma ameaça para Galópolis**. Caxias do Sul, 07 maio 2018. Disponível em:

<http://pioneiro.clicrbs.com.br/rs/geral/noticia/2018/05/saiba-por-que-o-arroio-pinhal-se-tornou-uma-ameaca-para-galopolis-10331955.html>. Acesso em: 15 mar. 2020.

**PIONEIRO: Vídeo: Arroio Pinhal, em Galópolis, transborda após chuvarada em Caxias.** Caxias do Sul, 25 fevereiro 2020. Disponível em:

<http://pioneiro.clicrbs.com.br/rs/geral/noticia/2020/02/video-arroio-pinhal-em-galopolis-transborda-apos-chuvarada-em-caxias-12190275.html>. Acesso em: 15 mar. 2020.

PORTO, R. L. L.; Z. FILHO, K.; SILVA, R. M. **Bacias hidrográficas.** 1999. Escola Politécnica da USP. Disponível em: <[www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id\\_arq=3850](http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3850)>. Acesso em: 19 abril 2020.

PORTO, R. L. L.; FILHO, K.; MARCELLINI, S. S. **Escoamento Superficial.** 1999. Escola Politécnica da USP.

PINTO, Nelson L. de Souza. **Hidrologia Básica.** São Paulo: Blucher, 2017.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica:** Aplicação a bacias hidrográficas. 2004. 146 p. Tese (Doutorado) – Sensoriamento Remoto, INPE. São José dos Campos, 2004.

RHAMA. 2011. Disponível em: [http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/curvas-de-intensidade-de-precipitacao-duracao-e-frequencia/#wpautbox\\_about](http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/curvas-de-intensidade-de-precipitacao-duracao-e-frequencia/#wpautbox_about). Acesso em 20 out. 2020.

RIO GRANDE DO SUL. DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS. **Plano diretor de drenagem urbana.** Porto Alegre, 2005. 167p.

RIO GRANDE DO SUL. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. **Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Caí.** <https://www.sema.rs.gov.br/g030-bacia-hidrografica-do-rio-cai>. Acesso em 12 jun. 2020.

SAMPAIO, Amanda Sousa; SÁ, Pétrus Eduardo Feliciano de; BATISTA, Tatiane Lima; STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho. Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias rurais. **XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Fortaleza, v. 20, n. 1, p. 1-10, nov. 2016.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos.** 2004. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Arquitetura e urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **SEMA**. 2020. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>. Acesso em: 25 mar. 2020.

SILVA, R. R. P. **Simulações de onda de cheia na sub-bacia do Ribeirão Claro – SP**. 2015. 58f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2015.

SILVEIRA, G. M. **Análise de sensibilidade de hidrograma de projeto aos parâmetros de sua definição indireta**. 2010. 243 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Rbrh - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, mar. 2005.

TAVEIRA, B. D. A. **Hidro geografia e gestão de bacias**. Curitiba: Intersaberes, 2018.

TOMINAGA, L. K; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1. Ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2009. 197 p.

TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. 4. ed. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005. 270 p.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976. 245 p.

KIM, Viviane Jin Hee; GALBETTI, Marcus Vinícius; BRANDÃO, João Luiz Boccia; SCHALCH, Valdir. Análise de fórmulas de Tempo de Concentração (TC) de uma bacia em

urbanização: um estudo da bacia do mineirinho (são carlos-sp). **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 5, n. 8, p. 11202-11219, 2019. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n8-005>.