

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS LONDRINA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

João Victor Rocha dos Santos

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DE VAZÃO DE  
CHEIA PARA BACIAS URBANIZADAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA**

**2021**

João Victor Rocha dos Santos

## **COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DE VAZÃO DE CHEIA PARA BACIAS URBANIZADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Ricardo Costanzi.

**LONDRINA  
2021**



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



**JOÃO VICTOR ROCHA DOS SANTOS**

## **COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DE VAZÃO DE CHEIA PARA BACIAS URBANIZADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Ambiental e Sanitária da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16 de Dezembro de 2021

---

Professor Doutor Rafael Montanhini Soares de Oliveira  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Professor Doutor Bruno de Oliveira Freitas  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Professor Doutor Ricardo Nagamine Costanzi  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente a minha mãe, Ana Lucia Rocha dos Santos, a meu finado pai, Claudio Aparecido dos Santos, meu irmão Pedro Henrique Rocha dos Santos e minha finada avó Nair Francisquetti Rocha pelo apoio e amor incondicional que me foi dado durante a caminhada, e pelas palavras encorajadoras pra enfrentar e incentivar meus próximos passos. Eu amo vocês.

Obrigado aos meus amigos do meu bairro Eloy Chaves, da minha cidade natal Jundiaí, por estarem sempre ao meu lado. Pelas conversas, incentivos, broncas e momentos juntos aproveitados durante todo esse processo. A minha grande amiga Beatriz Samogim, que sei que posso contar com ela em qualquer situação da minha vida, e me deu apoio desde os momentos mais tristes aos mais felizes.

Não posso deixar de agradecer meus amigos da faculdade, que sem eles a caminhada teria sido muito mais difícil. Aos meus amigos e irmãos da República Toca da Raposa, com quem eu dividi teto e compartilhei experiências durante 5 anos e fizeram de todo esse processo mais feliz.

A todos os professores que me ensinaram muito durante todo o período da graduação, em especial ao meu orientador Ricardo Nagamine Costanzi por toda ajuda, motivação e dedicação a este trabalho.

## RESUMO

SANTOS, J. R. **Comparação entre métodos de cálculo para vazão de cheias para bacias urbanizadas**. 2021. 39p. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021

Enchente é um fenômeno natural que pode causar a ocupação de leitos de rios e causar graves problemas econômicos e sociais. Estimativas de vazões máximas são essenciais para o planejamento e adoção de medidas para minimização de impactos decorrentes da ocorrência de cheias. Existem diversos métodos disponíveis para obtenção de valores estimados para vazões máximas de projeto. O objetivo deste trabalho é analisar diferentes métodos para definição de vazões máximas em uma Bacia Hidrográfica urbana na cidade de Londrina-PR. Para estimativa de vazões de cheia foram considerados os seguintes métodos: Método Racional, Método I-PAI-WU, Método Ven Te Chow e Método SCS. As vazões foram estimadas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos. Os métodos Racional e I-PAI-WU apresentaram inicialmente valores superestimados em relação aos métodos Ven Te Chow e SCS que se mostraram mais coerentes.

Palavras-chave: Hidrologia. Vazão de pico. Método I-PAI-WU. Método Racional. Método SCS. Método Ven Te Chow.

## ABSTRACT

SANTOS, J. R. **Comparison between calculation methods for flood flow for urbanized basins**. 2021. 48p. TCC (Graduate in Environmental Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2021

Flood is a natural phenomenon that can cause the occupation of river beds and cause serious economic and social problems. Estimates of maximum flow are essential for planning and adopting measures to minimize impacts arising from the occurrence of floods. There are several methods available to obtain estimated values for maximum design flows. The objective of this work is to analyze different methods for defining maximum flows in an urban watershed in the city of Londrina-PR. To estimate flood flows, the following methods were considered: Rational Method, I-PAI-WU Method, Ven Te Chow Method and SCS Method. The flows were estimated for the return periods of 2, 5, 10, 20 and 50 years. The Rational and I-PAI-WU methods initially presented overestimated values in relation to the Ven Te Chow and SCS methods, which proved to be more coherent.

Key-words: Hydrology. Peak flow. I-PAI-WU Method. Rational Method. SCS method. Ven Te Chow Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ábaco para o coeficiente K utilizado no método <i>I-PAI-WU</i> .....	8
Figura 2: Delimitação da Bacia do Leme em relação ao município de Londrina. ....	13
Figura 3: Mapa de Declividade da Bacia do Leme .....	14
Figura 4: Mapa de Hipsometria da Bacia do Leme .....	15
Figura 5: Vazões de pico estimadas pelo Método Racional em diferentes Períodos de Retorno.....	20
Figura 6: Vazões de pico estimadas pelo Método I-PAI-WU em diferentes Períodos de Retorno.....	21
Figura 7: Vazões de pico estimadas pelo Método Ven Te Chow em diferentes Períodos de Retorno .....	22
Figura 8: Vazões de pico estimadas pelo Método SCS em diferentes Períodos de Retorno .....	23
Figura 9: Vazões de pico pelos tempos de retorno .....	23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Área total impermeável da Bacia do Leme.....	16
Tabela 2: Tempos de concentração pelos métodos de Kirpich, Picking e Ven Te Chow, e a média dos valores. ....	18



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
2.1	OBJETIVO GERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>3</b>
3.1	DRENAGEM URBANA	3
3.2	METODOLOGIAS DE CÁLCULO	4
3.2.1	Método I-PAI-WU	6
3.2.2	Método Racional	9
3.2.3	Método Ven Te Chow	9
3.2.4	Método SCS	12
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>13</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	13
4.2	APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO	15
4.2.1	Impermeabilidade da bacia	16
4.2.2	Comprimento do Talvegue	16
4.2.3	Declividade	17
4.2.4	Tempo de Concentração	17
4.2.5	Intensidade Pluviométrica	18
4.2.6	Cálculo das vazões de pico	18
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>19</b>
5.1	RESULTADO DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO RACIONAL	19
5.2	RESULTADO DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO I-PAI-WU	20
5.3	RESULTADO DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO VEN TE CHOW	21
5.4	RESULTADOS DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO SCS	22
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	23
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>26</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>27</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, o crescimento da maioria das cidades brasileiras foi consolidado ao redor de rios, tendo em vista a necessidade da utilização das águas no processo de evolução das sociedades urbanas.

Tais ocupações ocasionaram diversos problemas que atingem diretamente a sociedade, dentre elas as enchentes e inundações urbanas. Uma vez que a expansão urbana está diretamente ligada com o aumento do uso do solo, este fato teve impactos negativos para os sistemas de drenagem locais, visto que o processo de crescimento urbano ocorreu sem planejamento e infraestrutura adequada (Ártico e Cordeiro, 2014).

Segundo Tucci (2003), a cobertura vegetal é responsável por amortecer o impacto da chuva no solo, e sua retirada, somada a crescente impermeabilização, reduzem a sua capacidade de infiltração, e conseqüentemente, aumenta o escoamento superficial.

Assim, eventos de enchentes e inundações são comumente causadas pela diminuição de áreas de infiltração e conseqüente aumento das vazões nos corpos hídricos.

O estudo e aprimoramento dos sistemas de drenagem urbana têm papel fundamental para garantir às populações uma maior segurança quanto a riscos hidrológicos associados a impermeabilização do solo. Portanto, entender os sistemas de drenagem urbana e suas formas de hidrógrafas permite utilizar dados meteorológicos para a análise de cheias nos canais e rios urbanos.

Atualmente existem diversos modelos de cálculo para previsões de enchentes, no entanto, alguns métodos têm recebido diversas críticas quanto à capacidade de estabelecer critérios de projeto que descrevam de forma mais precisa fenômenos e situações hidrológicas reais.

Com o intuito analisar modelos simplificados utilizados por engenheiros em análises urbanas de micro e macro drenagem com suas respostas quanto a previsões de cheias nos corpos hídricos, propõe-se um estudo para comparar diferentes modelos matemáticos a fim de observar e avaliar os seus usos em um problema real.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O presente estudo tem por objetivo avaliar as metodologias de cálculo de vazão máxima simplificadas para bacias hidrográficas urbanizadas na área central de Londrina-PR.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Calcular valores de vazões de pico e hidrógrafas baseadas em metodologias difundidas para drenagem urbana;
- Comparar valores de hidrógrafas geradas para uma bacia hidrográfica urbana em Londrina-PR

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 DRENAGEM URBANA

Segundo Canholi (2014), as áreas impermeabilizadas e urbanizadas se desenvolveram perto das várzeas dos rios ou à beira-mar, uma vez que a população utilizava os recursos hídricos como fonte de transporte, alimento ou dessedentação. Dessa forma, o crescimento desenfreado das cidades tem grande impacto negativo à população e ao meio ambiente.

Tal fato está diretamente relacionado ao processo de urbanização que se dá sem planejamento ou com infraestrutura inadequada (ÁRTICO e CORDEIRO, 2014), resultando em alterações no ciclo hidrológico e nos sistemas de drenagem naturais, que são problemáticas causadas pelo uso e ocupação do solo de forma desordenada, como diz Santos *et al.* (2021).

Assim, as alterações na cobertura vegetal do solo e conseqüentemente a redução da área impermeável do mesmo, pode acarretar em sobrecargas no sistema de drenagem urbana e a possibilidade de ocorrência de cheias e inundações nas cidades urbanas (SILVA e POLETO, 2015).

Os problemas hidrológicos, na maioria das vezes em que ocorrem, ferem o bem estar da sociedade e do meio ambiente. Perdas materiais e humanas, qualidade da água e conseqüentemente a proliferação de vetores de doenças, carreamento de material sólido, além de erosões, são adversidades que podem ser provocadas pela falta de planejamento dos sistemas de drenagem.

Nesse sentido, destaca-se a grande necessidade de ações preventivas, de planejamento correto do uso e ocupação do solo e gerenciamento dos sistemas de drenagem urbana, a fim de evitar grandes problemas gerados por esta problemática.

## 3.2 METODOLOGIAS DE CÁLCULO

Para o dimensionamento de obras hidráulicas como bueiros, vertedouros, bem como outros projetos de conservação de solo e água, conforme Teixeira et al. (2011), é fundamental estimar a vazão máximas de uma área de drenagem.

Assim, encontra-se na literatura diversos métodos para a estimativa da vazão máxima de projeto, onde cada metodologia está fundamentada em alguns estudos e parâmetros físicos da bacia hidrográfica.

Uma variável comum a todos os métodos é a precipitação, em que, no caso de cálculo de vazões máximas, considera-se a variabilidade temporal dos eventos de precipitação para encontrar as intensidades máximas em uma bacia (TEIXEIRA et al., 2011).

Além disso, Tucci (2003) afirma que os métodos de estimativa de vazão máxima consideram tipo de uso do solo e relevo como variáveis envolvidas nos cálculos.

Gericke (2014), em um estudo realizado na África do Sul, descreveu que o tempo de concentração é o parâmetro mais frequente usado e necessário nas metodologias. Contudo, o autor ainda propõe é de suma importância que se investigue bem a origem desses parâmetros, uma vez que o uso de variáveis de tempo inadequadas, pode impactar em uma diferença de 10% nas estimativas e, em uma pequena bacia, isso pode ser crítico, resultando em implicações socioeconômicas ou inviabilizar um projeto.

O método Racional é muito utilizado em projetos de drenagem, contudo, este é um método simples que abrange bacias pequenas de até 2km<sup>2</sup>. Neste modelo, “a intensidade pode ser considerada constante para uma duração igual ao tempo de concentração da bacia” (FRANCO, 2004).

Dessa forma, os pesquisadores foram desenvolvendo novas metodologias e aprimorando-as para adaptar melhor cada uma a um tipo de projeto. O método I-PAI-WU abrange uma estrutura parecida com o método Racional, com adaptações para bacias maiores. Neste caso, os projetos desenvolvidos com base neste método, são cabíveis em bacias hidrográficas até 200km<sup>2</sup>.

Dentre os modelos hidrológicos, o Ven Te Chow é um método de transformação de chuva em vazão máxima. Conforme Bianchi et al. (2012), neste

método, o escoamento superficial é o maior responsável pelas máximas vazões nas bacias urbanizadas e, portanto, este utiliza da precipitação incidente, atribuída a um tempo de recorrência para fins de cálculo da vazão. Sendo assim, não são necessários dados fluviométricos na metodologia.

O método descrito acima também empregou o modelo do Soil Conservation Service (SCS) para a avaliação da chuva efetiva. Este, assim como no modelo de Ven Te Chow, tem como principal parâmetro o Curve Number "CN", que depende da classificação hidrológica do solo, das condições antecedentes de umidade e da cobertura do solo, como propõe Cunha et al. (2015).

No Brasil, entre os modelos hidrológicos, os mais utilizados estão o método Racional e SCS, tendo em vista a simplicidade dos cálculos (MARTINS, 2017). Paulino (2014) também coloca que:

"Além da sua fácil aplicação, no Brasil, o método SCS é indicado pelo Departamento de Água e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE) para o cálculo de vazões máximas e geração de hidrogramas para o dimensionamento de dispositivos hidráulicos sujeitos à outorga, em bacias com áreas superiores a 2 km<sup>2</sup>, quando não há dados históricos fluviométricos. Sendo assim, mesmo que se tenha preferência por outros métodos para a transformação chuva-vazão, é recomendado seguir as diretrizes do órgão outorgante."

Portanto, mesmo que outros métodos em alguns casos se tornem mais eficientes, há uma padronização em relação às metodologias utilizadas nas bacias hidrográficas brasileiras.

Em um estudo realizado por Patricio et al. (2021), foram comparadas as vazões máximas determinadas por diferentes métodos de cálculo para diferentes tempos de concentração em uma bacia hidrográfica no município de Sangão, em Santa Catarina. Os resultados apontaram que em comparação aos métodos I-PAI-WU, SCS e Ven Te Chow, o modelo Racional se manteve com valores superiores em todos os tempos de concentração, enquanto os outros métodos se mantiveram com valores próximos.

Nesse sentido, apesar do método Racional ser amplamente usado por sua simplicidade, esta, se torna problemático quando buscados valores mais assertivos, uma vez que no método há uma defasagem de parâmetros que podem influenciar no cálculo das vazões de pico. Patricio et al. (2021), ainda situa que "Como o método mencionado tende a superestimar a vazão para grandes áreas, alguns autores aplicam um coeficiente de redução do valor da vazão de pico".

Contudo, o estudo de Pj (2018), baseado na abordagem hipotética da geração da vazão de cheia para pequenas bacias urbanas, mostrou que o hidrograma gerado pelo método Racional pode ser considerado próximo ao hidrograma do modelo SCS. Dessa forma, mesmo que o Racional haja limitações em sua aplicação, o estudo mostrou uma eficiência de 85% no modelo para a estimativa de escoamento para bacias urbanas até 80ha.

Tendo em vista as diversas metodologias que se distinguem em condições e parâmetros utilizados, esta é mais uma das evidências da necessidade premente de abordá-las para determinar a vazão máxima de um projeto de forma adequada.

No que se segue, são apresentadas algumas metodologias de estudo para cálculo de vazão de cheia para bacias urbanizadas, que estão descritas nos tópicos abaixo.

### 3.2.1 Método I-PAI-WU

A metodologia I-PAI-WU é uma derivação do Método Racional. Para este, são utilizados cálculos manuais a fim de encontrar a vazão máxima em rios inseridos em bacias com área até 200km<sup>2</sup>, segundo Uehara (1969).

Para tal, alguns fatores são levados em conta no cálculo da vazão de pico da bacia, segundo a norma DP – H06 (1999) do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE/SP, tais como:

- Forma, área e declividade da bacia;
- Intensidade e distribuição da chuva crítica;
- Características da superfície da bacia (impermeabilização e utilização de grau de saturação do solo, depressões ou bacias de acumulação que diminuem os picos de cheias);
- Tempo de escoamento superficial;
- Tempo de Concentração
- Tempo de pico

Alguns destas variáveis são obtidas através de análises da bacia analisada, outros através da metodologia de cálculo. Desta forma, a equação 1 mostra o método I-PAI-WU.

$$Q = (0,278.C.I.A^{0,9}).K \quad (1)$$

Onde,

Q = vazão de pico, em m<sup>3</sup>/s

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

I = intensidade da chuva, em mm/h

A = área da bacia, em km<sup>2</sup>

K = coeficiente de distribuição espacial da chuva, adimensional

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional

Segundo Uehara (1969), no Método Racional admite-se que a chuva crítica, numa dada bacia hidrográfica, tenha uma duração igual ao tempo de concentração. Entretanto, em bacias de forma alongada, no sentido do talvegue, o tempo de concentração poderá ser superior ao tempo de pico.

Sendo assim, a chuva que cai na parte mais remota da bacia chegará tarde demais à seção estudada para contribuir para a vazão máxima. Desta forma, o coeficiente de forma da bacia é calculado através da equação 2:

$$C1 = \frac{4}{2+F} \quad (2)$$

Onde:

F = fator de forma da bacia, adimensional

O fator de forma da bacia "F" é dado pela equação 3:

$$F = \frac{L}{2 * \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0,5}} \quad (3)$$

Onde:

L = comprimento do talvegue, em km;

A = área da bacia, em km<sup>2</sup>

Assim, chega-se no valor do coeficiente de escoamento (C), através da equação 4:

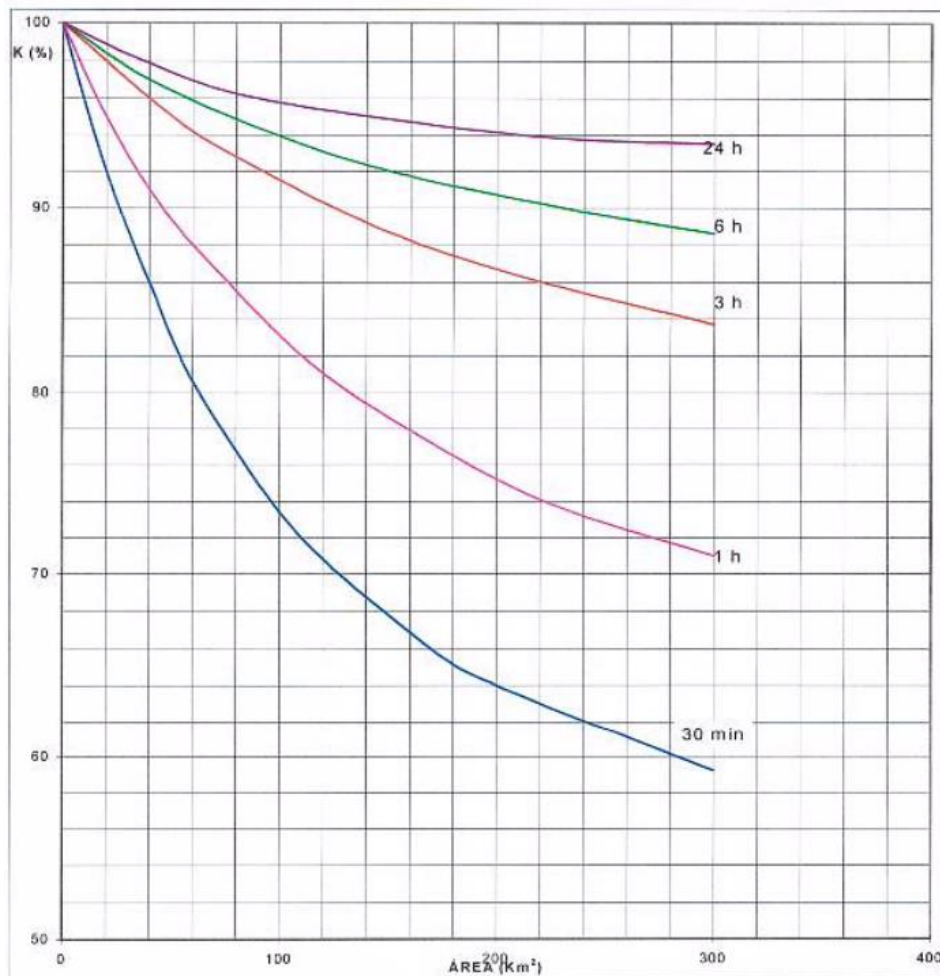
$$C = \frac{C2}{C1} * \frac{2}{1+F} \quad (4)$$



O método I-Pai-Wu utiliza-se do coeficiente de impermeabilidade da bacia ( $C_2$ ), que ocorre em função do grau de impermeabilidade da superfície e busca considerar esses fatores.

O coeficiente "K" é encontrado através do ábaco da Figura 1, que leva em consideração o tempo de concentração e a área da bacia, em  $\text{km}^2$ .

Figura 1: Ábaco para o coeficiente K utilizado no método I-PAI-WU



Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica- DAEE (1994).

Em conseqüente, deve-se calcular a declividade equivalente da bacia e o tempo de concentração. Ainda, no método I-PAI-WU é necessário encontrar a intensidade pluviométrica para que sejam selecionados os valores de vazão máxima do projeto. A intensidade da precipitação deve ser obtida com base nos dados de estações pluviométricas existentes em cada região.

Por fim, calcula-se a vazão máxima do projeto pela equação 5:

$$Q_{pico} = Q_b + Q \quad (5)$$

Onde:

$Q_{pico}$  = vazão de pico, máxima de projeto (m<sup>3</sup>/s);

$Q_b$  = vazão base (m<sup>3</sup>/s) - Como não há informação, adotou-se  $Q_b = 0,1 \cdot Q$ ;

$Q$  = vazão de cheia de projeto, determinada pela equação base do método de I-PAI-WU (m<sup>3</sup>/s)

### 3.2.2 Método Racional

Segundo Uehara (1969), o método racional é utilizado para bacias que não apresentam complexidade e que tenham até 2 km<sup>2</sup> de área de drenagem. O método racional é constantemente utilizado por conta da sua simplicidade, contudo, apesar de apresentar resultados satisfatórios, a metodologia é bastante criticada.

O método pode ser colocado sob a seguinte equação 6:

$$Q = 166,67 \cdot C \cdot i \cdot A \cdot D \quad (6)$$

Onde:

$Q$  = vazão de cheia (m<sup>3</sup>/s);

$i$  = intensidade pluviométrica (mm/h);

$C$  = coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

$A$  = área da bacia de contribuição (km<sup>2</sup>);

$D$  = coeficiente de distribuição da chuva (adimensional);

A determinação do coeficiente de escoamento superficial se faz de forma análoga ao do método I-PAI-WU.

Para fins de cálculo da intensidade pluviométrica, é necessário adotar um tempo de duração da chuva. Este tempo é colocado como igual o tempo de concentração da bacia estudada.

### 3.2.3 Método Ven Te Chow

O método Ven Te Chow, segundo TOMAZ (2012), é considerado um método pouco usado para cálculo de vazão máxima. Este método deve ser utilizado em bacias até 25km<sup>2</sup>, apesar de muitas vezes ser utilizado para bacias até 50km<sup>2</sup>.

A equação 7 do método Ven Te Chow usada pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1999) é:

$$Qp = Qb + 0,295 * \left(\frac{he}{t}\right) * A * Z \quad (7)$$

Onde:

$Qp$ : vazão no tempo "t" (m<sup>3</sup>/s)

$Qb$ : vazão de base na bacia (m<sup>3</sup>/s)

$he$ : chuva excedente (mm)

$t$ : duração da chuva excedente (h)

$A$ : área da bacia (km<sup>2</sup>)

$tp$ : tempo de retardamento (h)

$Z$ : fator de redução de pico, dado pela equação 8:

$$Z = 0,0037 + 0,8854 * \left(\frac{t}{tp}\right) - 0,02684 * \left(\frac{t}{tp}\right)^2 + 0,0378 * \left(\frac{t}{tp}\right)^3 \quad (8)$$

O tempo de retardamento "tp" conforme Chow em PMSP. 1998 é dado pela equação 9:

$$tp = 0,005055 * \left(\frac{L}{S^{0,5}}\right)^{0,64} \quad (9)$$

Onde:

$L$ = comprimento do talvegue (m)

$S$ =declividade média do talvegue (%)

$tp$  = tempo de ascensão (h)

Conforme SCS há uma relação entre  $tp$  e  $tc$  apresentada na equação 10:

$$tp = 0,6 tc \quad (10)$$

A chuva excedente deve ser calculada pelo método do número da curva CN do SCS. Para áreas urbanas existe sempre uma parcela do solo que é impermeável. A estimativa do número CN para área urbana se dá pela equação 11:

$$CNw = CNp * (I - f) + f. (98) \quad (11)$$

Onde:

CN<sub>w</sub> = número CN composto pela área urbana em estudo;

CN<sub>p</sub> = número CN da área permeável da bacia em estudo;

f = fração da área impermeável da bacia em estudo.

A equação 12 pode ser utilizada para estimar a chuva excedente pelo método

SCS:

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S} \quad (12)$$

Onde:

Q: chuva excedente (mm)

P: precipitação (mm)

Ia: abstração inicial (mm)

S: potencial máximo de retenção após começar a chuva excedente (mm)

A abstração inicial "Ia" é determinada pela equação 13:

$$Ia = 0,2S \quad (13)$$

Onde, substituindo o valor de "Ia", tem-se a equação 14:

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (14)$$

Onde:

$$S = \left( \frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (15)$$

### 3.2.4 Método SCS

Tucci (2005), considera que os processos hidrológicos que ocorrem na bacia são: precipitação, perdas iniciais, infiltração e escoamento superficial. Assim, a utilização do método SCS (Soil Conservation Service, 1975), recomenda a realização de cálculos para a determinação da propagação superficial pelo Hidrograma Unitário Triangular do SCS.

Assim como no método de Ven Te Chow, o modelo tem como base o cálculo da precipitação efetiva, descrita pela equação (14) e do potencial máximo de retenção após começar a chuva excedente (15).

No modelo SCS (1975), o valor da área impermeável "CN" é tabelado, com base no tipo de solo e características de cobertura, mas pode ser adaptado para bacias urbanizadas, utilizando a equação (11) do método Ven Te Chow.

A determinação da vazão de pico dos hidrogramas unitários é feita utilizando a equação (16)

$$Q = 0,208 * \frac{Pe * A}{Tp} \quad (16)$$

Onde:

Q: vazão de pico do hidrograma unitário, em m<sup>3</sup>/s

Pe: Precipitação excedente, em mm

A: área da bacia, em km<sup>2</sup>

Tp: tempo de ascensão do hidrograma unitário, em horas

O cálculo do tempo de ascensão dos hidrogramas unitários é efetuado utilizando a equação (17)

$$Tp = \left(\frac{D}{2}\right) + 0,6 * Tc \quad (17)$$

Onde:

Tp: é o tempo de ascensão, em horas

D: intervalo de discretização da chuva, em horas, sendo  $D = \frac{Tc}{7,5}$  (18)

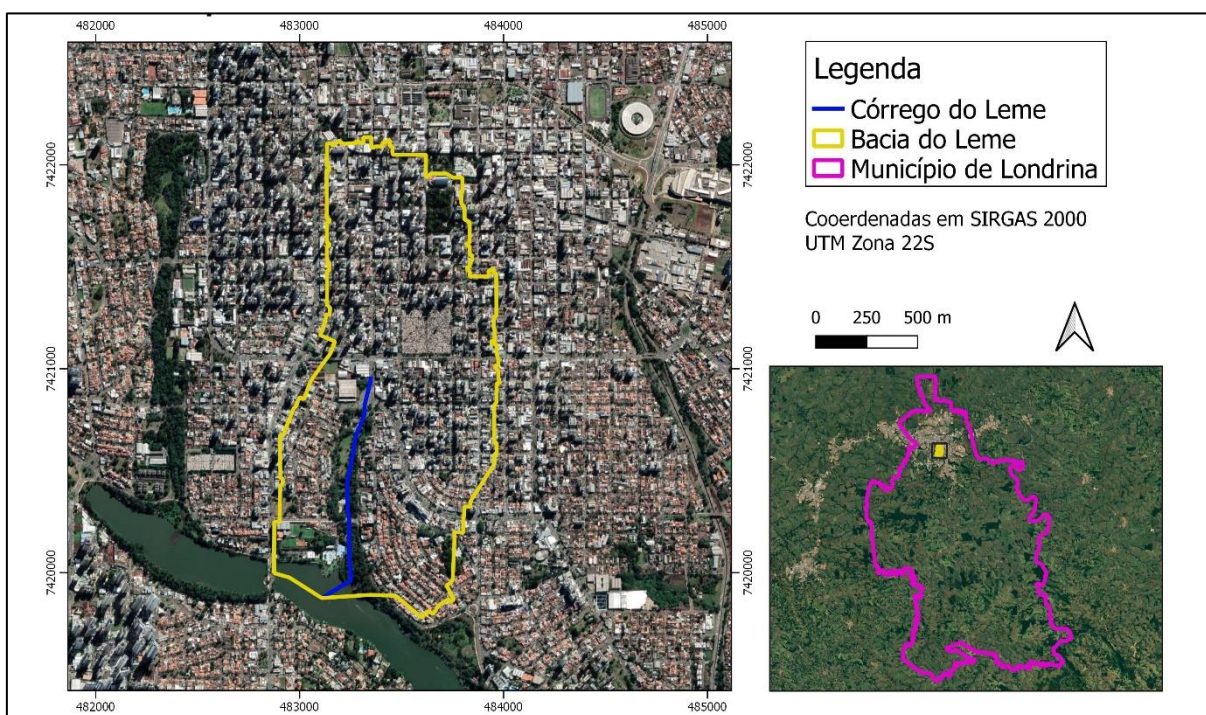
Tc: tempo de concentração, em horas

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Leme, onde foi realizado o estudo em questão encontra-se na área urbana da cidade de Londrina, Paraná. Esta, por sua vez apresenta uma área total de 1,842km<sup>2</sup> com predominância de áreas impermeáveis. O rio principal da bacia é o Córrego do Leme que apresenta 1,1174km de extensão e possui sua foz no Ribeirão Cambé. A Figura 2 representa a delimitação da bacia em relação ao município de Londrina.

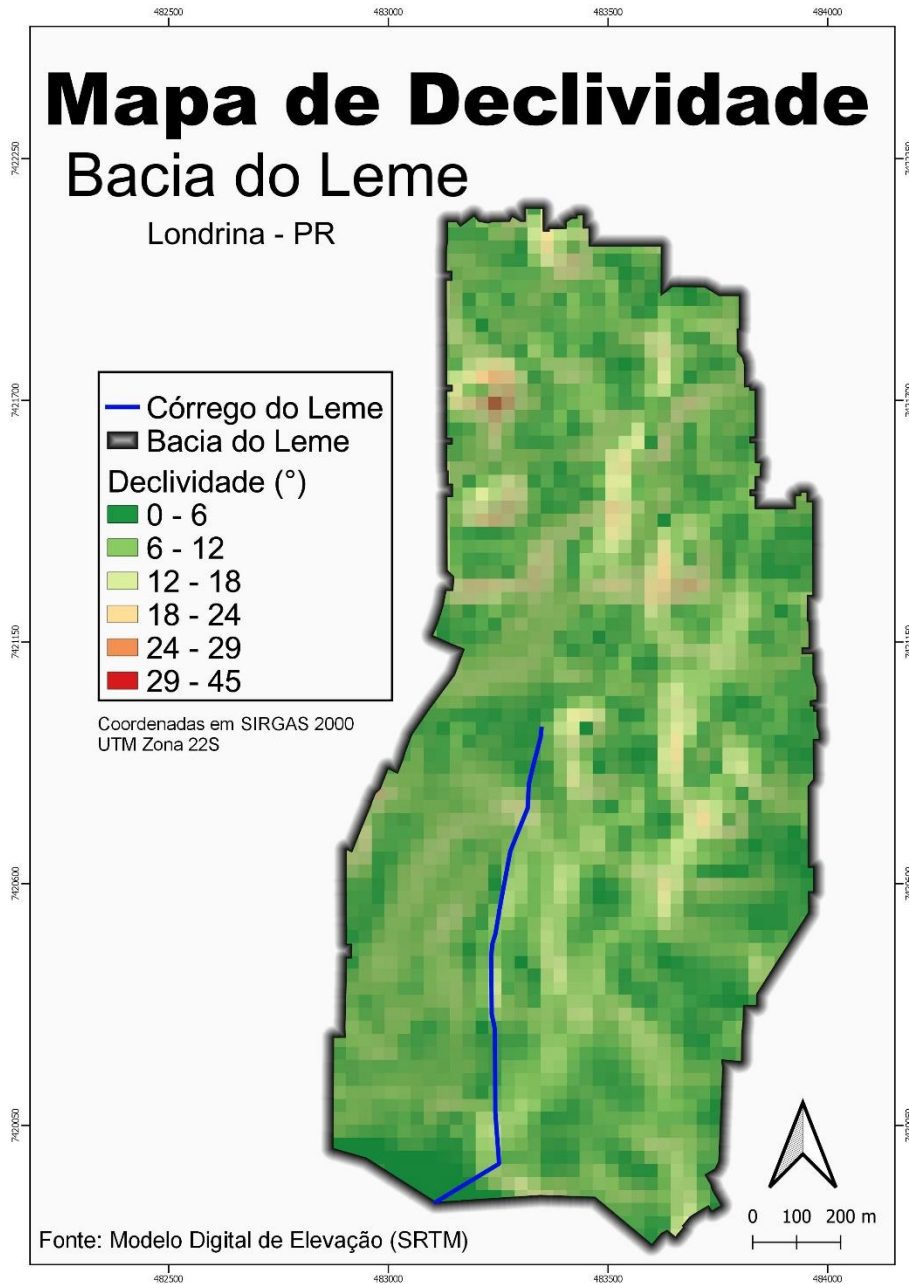
Figura 2: Delimitação da Bacia do Leme em relação ao município de Londrina.



Fonte: Autoria Própria

A declividade da bacia hidrográfica varia predominantemente entre 0° e 18°, chegando a 45° em pontos específicos. A amplitude topográfica da bacia é de 131 metros, partindo das cotas altimétricas de 500 a 631 m de altitude. Na Figura 3 e Figura 4 estão expostos respectivamente os mapas de Declividade e Hipsometria.

Figura 3: Mapa de Declividade da Bacia do Leme

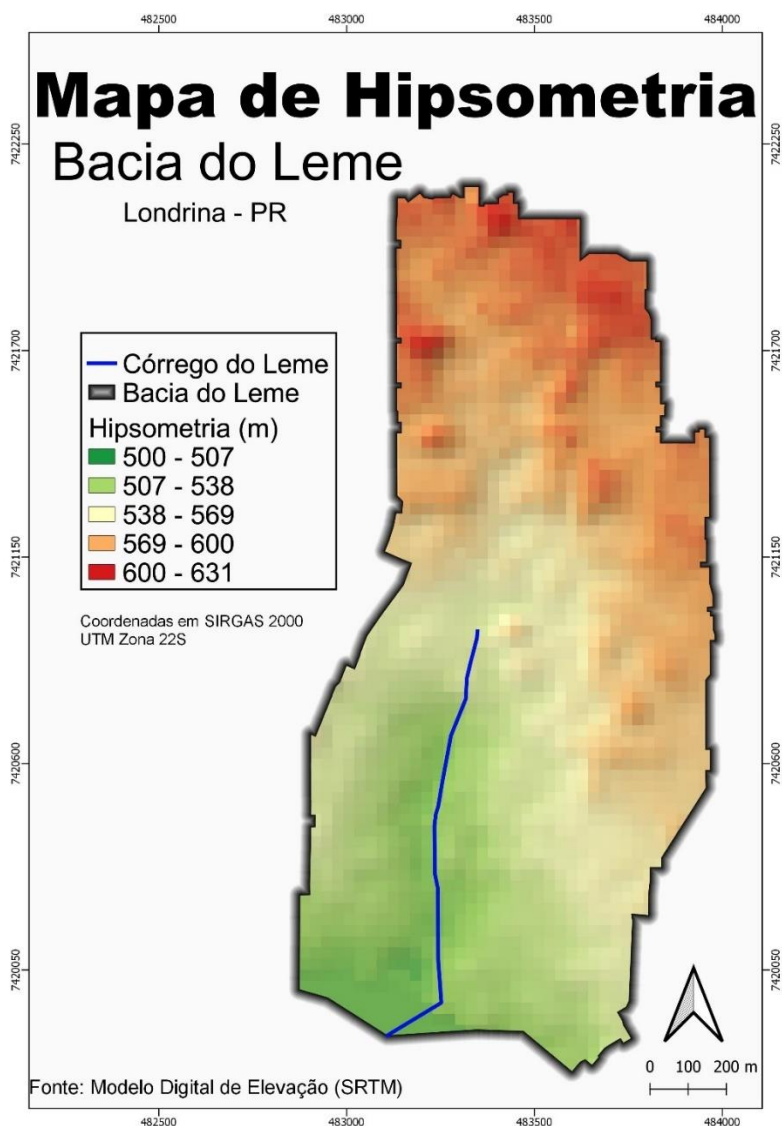


Fonte: Modelo Digital de Elevação (SRTM)

Fonte: Autoria Própria



Figura 4: Mapa de Hipsometria da Bacia do Leme



Fonte: Autoria Própria

As informações foram retiradas do banco de dados do SIGLON (Sistema de Georreferenciamento de Londrina) e do Modelo Digital de Elevação (SRTM). O programa de georreferenciamento utilizado para a realização das imagens foi o QGIS.

#### 4.2 APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO

Como estratégia metodológica para obtenção das estimativas de vazão máxima do córrego em questão, foram utilizadas as metodologias de dimensionamento apresentadas na literatura técnica disponível. Assim, foram selecionados métodos de literatura utilizados pela engenharia para a realização dos



cálculos, como citados no tópico 3.2. Para tal, alguns parâmetros físicos e morfológicos da bacia tiveram que ser determinados, tais quais, impermeabilidade da bacia, comprimento do talvegue, declividade, tempo de concentração e intensidade pluviométrica.

#### 4.2.1 Impermeabilidade da bacia

O grau de impermeabilização do solo depende do tipo de uso do solo, o grau de urbanização, da cobertura vegetal e do tipo de solo. Para isso, foram utilizadas imagens de satélite de LANDSAT-5 e o programa de georreferenciamento QGIS para o cálculo da área impermeável. O software utiliza o espectro de cores para a classificação do tipo de cobertura do solo. Dessa forma, foram amostradas dentro do software as áreas referentes a cobertura vegetal, telhados, arruamento e edificações, para assim realizar a classificação e o cálculo da área impermeável. A Tabela 1 indica as porcentagens calculadas para cada classe, e o valor da área total impermeável.

Tabela 1: Área total impermeável da Bacia do Leme

Cobertura do Solo	Porcentagem
Cobertura Vegetal	12,7
Telhados	28,4
Arruamento	19,2
Edificações	34,3
<b>ÁREA TOTAL IMPERMEÁVEL</b>	<b>81,9</b>

Fonte: Aatoria Própria

#### 4.2.2 Comprimento do Talvegue

O talvegue de uma bacia é o caminho formado por seus pontos mais profundos, representando assim, o encontro de duas vertentes, pelo qual as águas pluviais serão conduzidas. O comprimento do talvegue obtido por meio das curvas de nível foi igual a 2,155km.

#### 4.2.3 Declividade

A declividade do curso d'água principal, no talvegue, foi obtida pela equação 19 que leva em consideração o tempo de percurso da água ao longo da sua extensão longitudinal e a diferença de cotas do talvegue.

:

$$S = \frac{\Delta H}{L} \quad (19)$$

Onde

$\Delta H$  = desnível entre as extremidades da bacia (m);

$L$  = comprimento horizontal do talvegue (km);

$S$  = declividade de cada trecho (m/km).

#### 4.2.4 Tempo de Concentração

O cálculo do tempo de concentração ( $T_c$ ) foi feito a partir de três metodologias diferentes e consagradas na literatura técnica, e calculada uma média entre os métodos para realização dos cálculos matemáticos. Foi utilizada a metodologia de Kirpich, Picking e Ven Te Chow, demonstradas nas equações (20), (21) e (22), respectivamente:

$$\text{Kirpich: } t_c = 57 \times \left( \frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (20)$$

$$\text{Picking: } T_c = 0,0883 * L^{0,667} * S^{-0,333} \quad (21)$$

$$\text{Ven te Chow: } T_c = 0,160 * L^{0,64} * S^{-0,32} \quad (22)$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração (min);

$L$  = comprimento do talvegue (km);

$S$  = declividade equivalente do talvegue (m/Km);

Pode ser verificado na Tabela 2 os resultados encontrados para os cada método, e o valor da média adotada para realização dos cálculos matemáticos:

Tabela 2: Tempos de concentração pelos métodos de Kirpich, Picking e Ven Te Chow, e a média dos valores.

Modelos	Tempo de concentração (min)
Kirpich	26,81
Picking	27,55
Ven Te Chow	28,12
Média	27,49

Fonte: Aatoria Própria

#### 4.2.5 Intensidade Pluviométrica

A intensidade pluviométrica foi definida com base na equação geral proposta por Festi (2007), onde as constantes são definidas para cada cidade do Brasil, conforme em dados meteorológicos.

$$imax = \frac{K * Tr^m}{(t + t_0)^n} \quad (23)$$

Para a cidade de Londrina, Festi (2007) determinou os coeficientes K, m, t<sub>0</sub> e n como 3.132,56, 0,009, 30 e 0,939, respectivamente. O valor de "t" é referente ao tempo de concentração obtido.

#### 4.2.6 Cálculo das vazões de pico

Para o método racional, além dos parâmetros supracitados, foi utilizada a base metodológica com base na Equação 6, proposta por Uehara (1969). Em sequência, foi utilizada a Equação 1 para realização do cálculo de vazão máxima para o método I-PAI-WU, também proposta por Uehara (1969).

TOMAZ (2012), utilizou como base a Equação 7 para encontrar a vazão de pico pelo método Ven Te Chow. Dessa forma, o modelo matemático foi utilizado para a determinação da mesma.

Em sequência, os métodos do HU Unitário e o SCS, propostos por Tucci (2003) e Tucci (2005), respectivamente, utilizam as equações citadas anteriormente.

A Equação 16 foi utilizada para calcular a vazão de pico pela primeira metodologia, e por fim, a Equação 24 foi utilizada para calcular a vazão máxima pelo método SCS.

Os valores das vazões foram realizados com diferentes tipos de retorno, para melhor efeito de comparação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

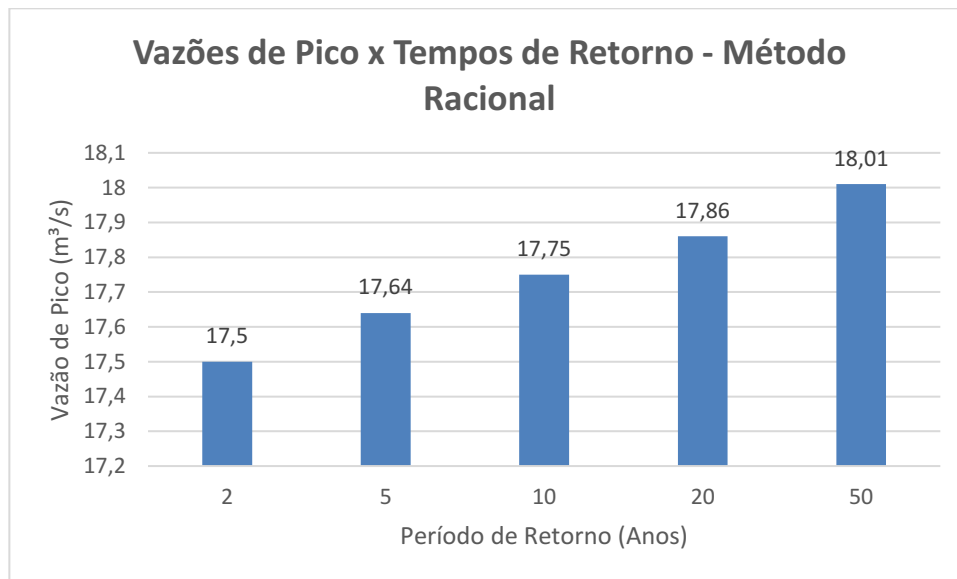
Após a coleta de todos os parâmetros necessários para o projeto e ao aplicar estes dados nas equações pode-se determinar as vazões máximas diferentes a cada método estudado. Foram utilizados os tempos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos para comparação dos resultados. A duração da chuva foi mantida constante em todos os métodos, sendo igual ao tempo de concentração. A intensidade pluviométrica obtida através da Equação (23) foi de 70,993 mm/h e a declividade (Equação 19) 0,03295 m/m.

### 5.1 RESULTADO DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO RACIONAL

Seguindo a metodologia descrita para o método, foi calculada a estimativa do coeficiente de impermeabilidade com base na classificação das áreas da bacia detalhada anteriormente. Também, foram utilizados os parâmetros de declividade equivalente e intensidade pluviométrica, que depende do tempo de concentração, calculada pela fórmula de Kirpich, descrita anteriormente. O tempo de retorno utilizado foi de 2 (dois) anos.

*Dessa forma, se fez a análise dos resultados, seguindo as equações do modelo matemático, das vazões máximas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos. Os valores encontrados são respectivamente 17,5m<sup>3</sup>/s, 17,64m<sup>3</sup>/s, 17,75m<sup>3</sup>/s,*

17,86m<sup>3</sup>/s, 18,01m<sup>3</sup>/s, e estão representados na **Figura 5**.**Figura 5:** Vazões de pico estimadas pelo Método Racional em diferentes Períodos de Retorno



Fonte: Autoria Própria

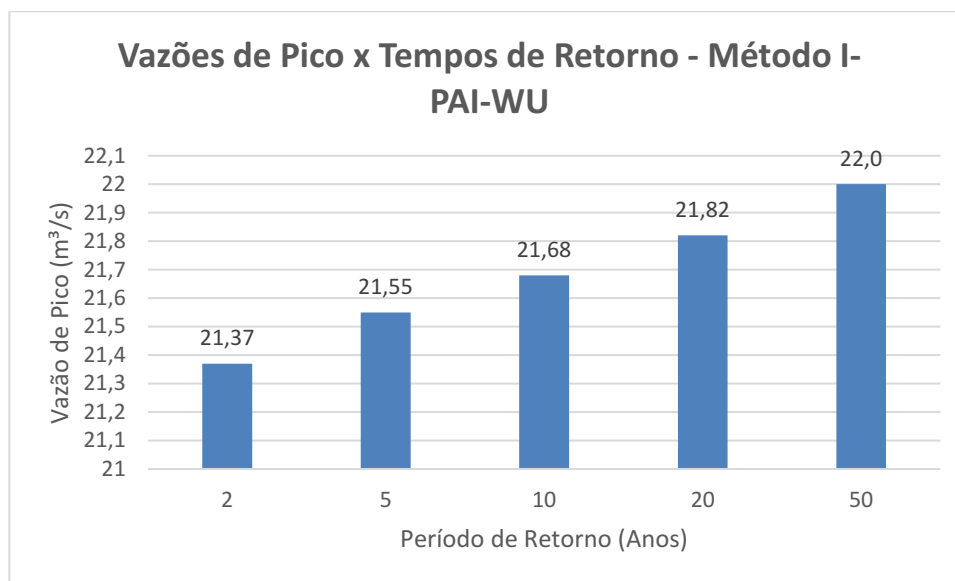
## 5.2 RESULTADO DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO I-PAI-WU

Tendo em vista o método I-PAI-WU sendo um aprimoramento do método Racional, os parâmetros inicialmente utilizados para cálculo da vazão máxima pelas metodologias são os mesmos.

Assim, conforme calculados anteriormente os parâmetros de declividade equivalente, coeficiente de impermeabilidade, intensidade pluviométrica e tempo de concentração, pudemos identificar o resultado de vazão de pico pelo método I-PAI-WU.

Dessa forma, se fez a análise dos resultados, seguindo as equações do modelo matemático, das vazões máximas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos. Os valores encontrados são respectivamente 21,37m<sup>3</sup>/s, 21,55m<sup>3</sup>/s, 21,68m<sup>3</sup>/s, 21,82m<sup>3</sup>/s e 22m<sup>3</sup>/s, e estão representados na Figura 6.

Figura 6: Vazões de pico estimadas pelo Método I-PAI-WU em diferentes Períodos de Retorno



Fonte: Autoria Própria

### 5.3 RESULTADO DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO VEN TE CHOW

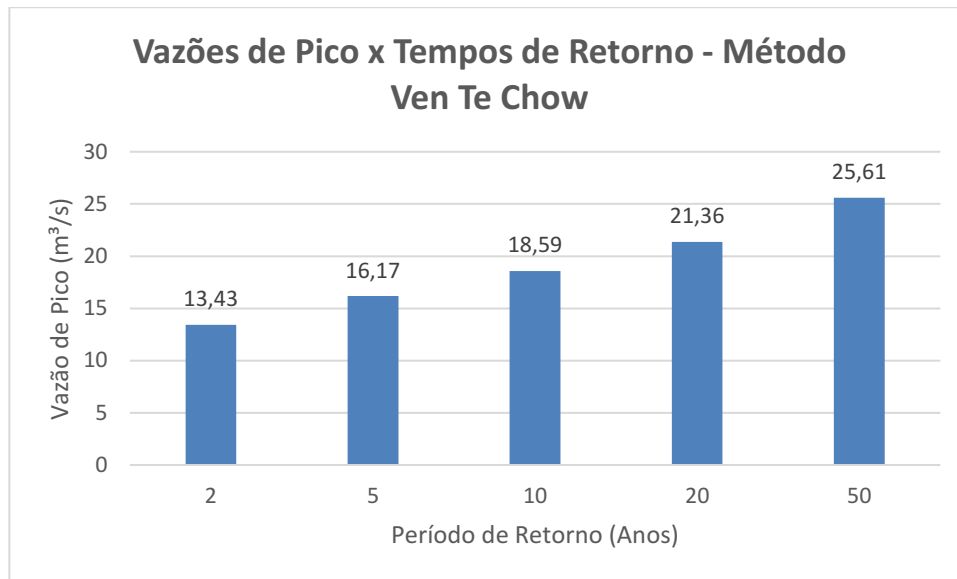
O método Ven Te Chow, diferente dos métodos citados anteriormente, utiliza parâmetros diferentes para cálculo da vazão máxima. O método tem como base o número de curva (CN), um parâmetro empírico usado na determinação do escoamento superficial direto a partir dos excessos de precipitações, sendo dependente das mudanças de uso e cobertura da superfície. Calculado pela Equação (11), o valor do CN foi de 91,16.

Na metodologia, aplica-se uma formulação para a obtenção do número de curva (CN) que depende da porcentagem de área impermeável e o número de curva tabelado para bacias urbanizadas.

O parâmetro é utilizado para a realização das demais fórmulas conseguintes para obtenção da intensidade da chuva, precipitação, chuva excedente e por fim, a vazão de pico.

Dessa forma, se fez a análise dos resultados, seguindo as equações do modelo matemático, das vazões máximas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos. Os valores encontrados são respectivamente 13,43m³/s, 16,17m³/s, 18,59m³/s, 21,36m³/s e 25,61m³/s, e estão representados na Figura 7.

Figura 7: Vazões de pico estimadas pelo Método Ven Te Chow em diferentes Períodos de Retorno



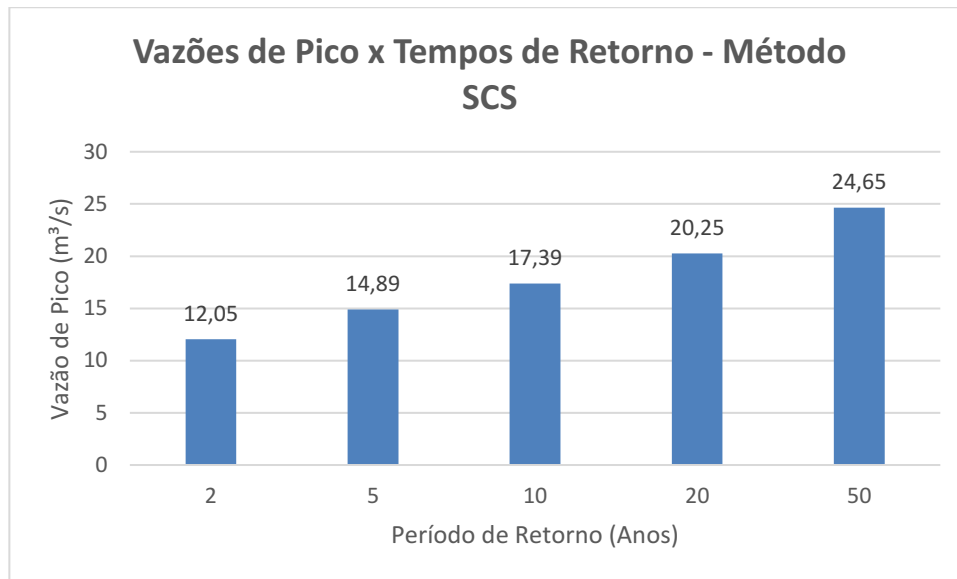
Fonte: Autoria Própria

#### 5.4 RESULTADOS DE VAZÃO MÁXIMA PELO MÉTODO SCS

Assim como no método Ven Te Chow, o método SCS utiliza como parâmetro principal de análise de resultados, o número de curva (CN). A vazão de pico depende da Precipitação efetiva, da área da bacia e do tempo de pico.

Dessa forma, se fez a análise dos resultados, seguindo as equações do modelo matemático, das vazões máximas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos. Os valores encontrados são respectivamente 12,05m³/s, 14,89m³/s, 17,39m³/s, 20,25m³/s, 24,65m³/s e estão representados na Figura 8.

Figura 8: Vazões de pico estimadas pelo Método SCS em diferentes Períodos de Retorno



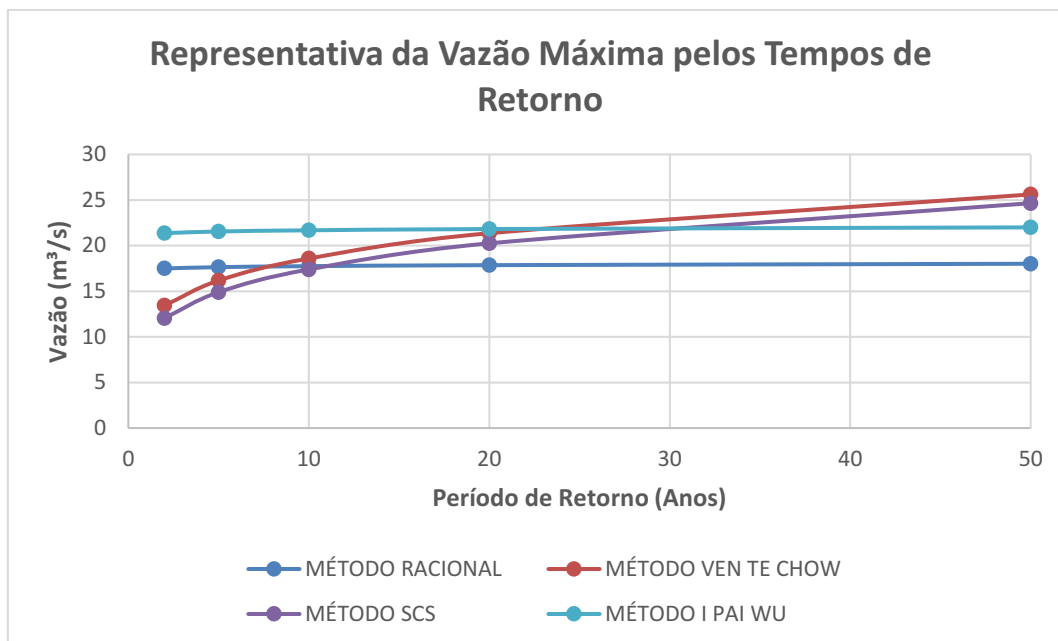
Fonte: Autoria Própria

## 5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Conforme os resultados obtidos anteriormente, nota-se que nos métodos Racional e I-PAI-WU os resultados de vazão máxima se mantiveram com os maiores valores nos cenários períodos de retorno mais baixos (até 10 anos), em comparação ao método Ven Te Chow e SCS, conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 9: Vazões de pico pelos tempos de retorno





Fonte: Autoria Própria

Isso se deve ao fato de o Método Racional simplificar alguns processos hidrológicos importantes, que faz com que no resultado final, o método tenda a superestimar a vazão máxima de pico (MARTINS, 2017). Um estudo realizado por Hoepfner (2007) também obteve resultados superestimados comparando o método Racional com demais métodos, para diferentes tempos de retorno.

Sendo assim, o método I-PAI-WU, por ser um aprimoramento do método racional, também resultou em vazões de pico mais altas. Contudo, tal fato é contraditório, tendo em vista seu maior detalhamento matemático e maior aproveitamento de processos hidrológicos para sua análise.

Nesse sentido, leva-se em consideração que, apesar de o método I-PAI-WU apresentar em sua construção matemática mais explicada, Uehara (1969) indica que o método utilizado é mais adequado para bacias maiores, com até 200km<sup>2</sup>.

Isso explica o fato da diferenciação dos valores, uma vez que, quanto maior a bacia, maior a possibilidade de detalhamento dos parâmetros hidrológicos da mesma e consequentemente melhor assertividade nos cálculos.

Contudo, o gráfico mostra que à medida em que se aumenta o tempo de retorno, os valores dos métodos Racional e I-PAI-WU se mantêm quase constante, enquanto os métodos Ven Te Chow e SCS tiveram uma crescente.

Uma vez que quanto maior o período de retorno, maior a precipitação acumulada com o passar dos anos, os métodos Ven Te Chow e SCS condizem com essa realidade, enquanto os métodos I-PAI-WU e Racional vão em contrapartida.

Assim, a análise mostra uma maior coerência quantificada dos dois últimos métodos analisados, tendo em vista o crescimento do volume escoado conforme o aumento dos períodos de retorno, além de uma vazão inicial mais baixa.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pela aplicação dos diferentes métodos matemáticos para estimativa de vazões máximas do projeto permitem a conclusão que a quantidade de parâmetros hidrológicos analisados em cada metodologia interfere diretamente nos resultados.

A utilização dos métodos com cálculos matemáticos mais simples gerou resultados menos coerentes quando comparados em diferentes períodos de retorno.

O emprego do método SCS e Ven Te Chow para bacias urbanas apresentou resultados mais coerentes, tendo em vista os parâmetros envolvidos nas operações.

Dessa forma, conclui-se que os métodos SCS e Ven Te Chow são as melhores aplicações para o cálculo de vazão de pico em pequenas bacias urbanizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁRTICO, B. C.; CORDEIRO, J. S. O estudo de áreas vulneráveis a enchentes: O caso de São José do Rio Preto – SP. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2014

BIANCHI, R. C.; RIZZI, N. E.; GUIMARÃES, R. Z.; SCHECHI, R. G. Estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do rio canguiri através do método de Ven Te Chow. **Revista RA´E GA 25**. P. 164-185. Departamento de Geografia – UFPR, Curitiba, 2012. Disponível em: <  
<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/28010/18642>>

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. **Revista Oficina de Textos**, São Paulo, v. 2, 2014. Disponível em <  
<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=BPAtCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP25&dq=drenagem+urbana&ots=9XmrOkRa55&sig=2aoFZ4Swjly-7uMLL9TXVz6Zyow#v=onepage&q=poletto&f=false>>

CUNHA, S. F.; SILVA, F. E. O.; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 20, p. 837-848, Porto Alegre, out./dez. 2015.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo). **Guia Prático de Pequenas Obras Hidráulicas**. Diretoria de Procedimentos de Outorga e Fiscalização. São Paulo – SP, 2005.

FRANCO, J. E. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional**. 2004. Tese (Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em: <  
[https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/085-Edu\\_Jose\\_Franco.pdf](https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/085-Edu_Jose_Franco.pdf)>

MARTINS, L.C. **Vazão máxima em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia – MG**. Uberlândia, 2017.

GERICKE, O.J; SMITHERS, J.C. Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. **Hydrological Sciences**

**Journal**, 59:11, 1935-1971, 2014. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2013.866712>>

PAULINO, P.F. **Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS para determinação de hidrogramas em bacias urbanas**. 2014, 126f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-26012015-154125/publico/Paloma\\_Fernandes\\_Paulino.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-26012015-154125/publico/Paloma_Fernandes_Paulino.pdf)>

PATRICIO, K.F; CADORIN, S.B; BACK, A.J. Métodos de estimativa de vazão máxima para projetos de macrodrenagem urbana. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil – CIVILTEC**. V.4, n.1. Universidade Estadual de Santa Catarina (UNESC), 2021. Disponível em: <<http://periodicos.unesc.net/engcivil/article/view/6171/5640>>

PJ, Jainet. Evaluation of the conceptual basis of the rational method. **International Journal of Hydrology**, v2. India, 2018. Disponível em: <<https://medcraveonline.com/IJH/IJH-02-00145.pdf>>

SANTOS, W. F.; PAIVA, E. C. R.; IRAÇABAL, J. A. J.; ÁGUAS, G. B., SILVA, T. A. C.; FARIA, L. F. D. **Coleção desafio das Engenharias: Engenharia Civil 2**. Cap. 4. Ponta Grossa – PR, Editora Atena, 2021.

SILVA, K. C.; POLETO, C. Mapeamento dos bairros suscetíveis à inundações no município de Jaú – SP. **Revista Tecnológica**, v. 24, n. 1, p. 95-104, 2015

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; SIQUEIRA, G. A.; BACELAR; L. C. S. D. Vazão máxima de projeto: metodologia para dimensionamento de bueiros em áreas agrícolas. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.17m p.49-56, Maio, 2011. Disponível em: <[http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art5\\_N17.pdf](http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art5_N17.pdf)>

THOMAZ, Plinio. Método de Ven Te Chow. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. Mai. 2012. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/read/22960320/65-1-capa-tulo-65-mactodo-de-ven-te-chow-pliniotomazcombr>>

TUCCI, C. E. M. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n.02, p.195–199, 2003

TUCCI, Carlos. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana. Vol. VI. **Instituto de Pesquisas Hidráulicas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, 2005. Disponível em: <  
[http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu\\_doc/manual\\_de\\_drenagem\\_ultima\\_versao.pdf](http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf)>

