

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS LAGOA DO SINO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA (CCN)

LAYSSA DE MOURA OLIVEIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA PREVISÃO DE
VAZÕES DE PICO NA BACIA DO RIO EMBU MIRIM
UTILIZANDO O MÉTODO DE I-PAI-WU**

BURI - SP
2023

LAYSSA DE MOURA OLIVEIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA PREVISÃO DE VAZÕES DE PICO NA BACIA DO
RIO EMBU MIRIM UTILIZANDO O MÉTODO DE I-PAI-WU**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental na Universidade
Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis
Rodrigues Pantoja Filho

Buri - SP
2023

Moura Oliveira, Layssa de

Modelagem hidrológica para previsão de vazões de pico na bacia do rio Embu Mirim utilizando o método de I-PA-WU. / Layssa de Moura Oliveira -- 2024.
41f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho
Banca Examinadora: Vinícius Rainer Boniolo, André Marcondes Andrade Toledo

Bibliografia

1. Bacia rio Embu Mirim. 2. Modelagem hidrológica. 3. I-PAI-WU. I. Moura Oliveira, Layssa de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da candidata **Layssa de Moura Oliveira**, realizada em 19/01/2024:

Documento assinado digitalmente
 **JORGE LUIS RODRIGUES PANTOJA FILHO**
Data: 25/01/2024 15:30:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho – Orientador(a)
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Documento assinado digitalmente
 **VINICIUS RAINER BONIOLO**
Data: 22/01/2024 09:25:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Vinícius Rainer Boniolo
Engenheiro Ambiental e Mestrando do Programa de Pós-Graduação Planejamento e Uso dos Recursos Renováveis (PPGPUR) Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Campus Sorocaba

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE MARCONDES ANDRADE TOLEDO**
Data: 25/01/2024 15:15:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Marcondes Andrade Toledo
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que tem feito por mim e por todas as bênçãos alcançadas.

Aos meus pais Claudio e Clarice por todo o suporte e abdições. As minhas irmãs, Lilian e Leticia por estarem ao meu lado desde sempre. Muito obrigada!

Ao meu amor, Raul Marcelo dos Santos Malaquias, pelos melhores 4 anos da minha vida e por todos os outros que ainda estão por vir. Por todo amor, companheirismo e compreensão comigo. Você faz parte dessa conquista. Te amo!

Aos meus padrinhos, Antônio e Andréa por se fazerem presentes independente da distância, por todo o amor e carinho desde que nasci, vocês me inspiram! Obrigada.

Aos amigos que a UFSCar me presenteou, João Pedro, Vinicius Moura, Kauê de Jesus, Denner Augusto, Gabriela Bonini, Monica Navarro, Leticia Rossi, Aline Lima, Luis Henrique, Yuri Bauer, Stephanie Oliveira e Luiz Miguel, obrigada pelas risadas, conselhos, incentivo e toda ajuda desde 2017. A graduação não seria a mesma sem vocês.

Ao Prof. Dr. Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho, por toda paciência e tempo dedicado a me orientar nesse trabalho e em toda a graduação. Sem você eu não seria a profissional que sou hoje. Muito obrigada, professor!

Agradeço a toda comunidade UFSCar - Lagoa do Sino, foram anos de muita aprendizagem dentro e fora da sala de aula. Eu saio extremamente feliz e agradecida do caminho que trilhei e por todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que eu chegasse a este momento.

RESUMO

No cenário de transformações climáticas, os recursos hídricos assumem um papel vital, ressaltando a necessidade premente de preservar, gerenciar e adaptar as fontes de água da humanidade para assegurar a sustentabilidade e o bem-estar das gerações vindouras. Dentro deste contexto, a modelagem hidrológica é essencial para compreender os padrões de escoamento e os riscos associados aos eventos extremos, como enchentes. Sendo assim, esse trabalho aborda a modelagem hidrológica na Bacia do Rio Embu Mirim, localizada no estado de São Paulo (UGRHI-06), com foco na previsão das intensidades críticas de precipitação e, conseqüentemente, das vazões de pico. A partir da utilização do método de I-PAI-WU, o qual é um aprimoramento do método racional para bacias entre 2 e 200 km², a pesquisa visa analisar e prever os fluxos de água máximos na região. O processo metodológico incluiu a delimitação da bacia utilizando ferramentas de geoprocessamento, a adoção do algoritmo de cálculo indicado para o modelo hidrológico adotado e a utilização de equações de chuva de diversas fontes para os municípios inseridos na bacia. Embora os resultados tenham indicado uma variação muito pequena nos valores de intensidade de precipitação para Itapecerica da Serra (acréscimo de 2%), para Embu das Artes verificou-se um aumento considerável (28%) nos valores da chuva crítica, o que demonstra uma alteração significativa no padrão de chuva para esta localidade. Conseqüentemente, os resultados para as vazões de pico seguiram a mesma tendência. Deve-se salientar que, nesta modelagem, foi considerado um cenário hipotético, no qual foi desprezada a presença de barragens, estruturas que regularizam a vazão de jusante. Por fim, o método de I-PAI-WU provou-se de simples aplicação, pois requer dados básicos, como a intensidade de precipitação, a área de drenagem, o coeficiente de escoamento e o fator de distribuição espacial da chuva, sendo indicado para bacias de pequeno e médio porte e para eventos chuvosos de curta duração.

Palavras-chave: bacia do Embu Mirim; modelagem hidrológica; intensidade de precipitação; I-PAI-WU.

ABSTRACT

In the scenario of climate transformations, water resources play a vital role, emphasizing the urgent need to preserve, manage, and adapt humanity's water sources to ensure sustainability and well-being for future generations. Within this context, hydrological modeling is essential to understand flow patterns and risks associated with extreme events such as floods. Accordingly, this study focuses on hydrological modeling in the Embu Mirim River Basin, located in the state of São Paulo (UGRHI-06), with a focus on predicting critical precipitation intensities and, consequently, peak flows. Using the I-PAI-WU method, an enhancement of the rational method for basins between 2 and 200 km², the research aims to analyze and predict maximum water flows in the region. The methodological process included basin delineation using geoprocessing tools, adopting the calculation algorithm specified for the chosen hydrological model, and utilizing rainfall equations from various sources for municipalities within the basin. Although the results indicated a very small variation in precipitation intensity values for Itapeçerica da Serra (an increase of 2%), a significant increase (28%) in critical rainfall values was observed for Embu das Artes, demonstrating a noteworthy alteration in the rainfall pattern for this locality. Consequently, the peak flow results followed the same trend. It is noteworthy that, in this modeling, a hypothetical scenario was considered, disregarding the presence of downstream flow-regulating structures such as dams. Finally, the I-PAI-WU method proved to be of simple application, requiring basic data such as precipitation intensity, drainage area, runoff coefficient, and spatial distribution factor of rainfall, making it suitable for small and medium-sized basins and short-duration rainfall events.

Keyword: Embu Mirim Basin; hydrological modeling; precipitation intensity; I-PAI-WU.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquematização de uma bacia hidrográfica.....	12
Figura 2: Regiões Hidrográficas Brasileiras.....	12
Figura 3: UGRHIs do estado de São Paulo.....	13
Figura 4: UGRHIs agrupadas por Região Hidrográficas do estado de São Paulo....	13
Figura 5: Sub-bacias da BAT.....	15
Figura 6: Diagrama das metodologias para estimativa de vazões de enchente.....	18
Figura 7: Representação de Vetor e Raster.....	20
Figura 8: Delimitação da Área de Estudo.....	22
Figura 9: Foz do rio Embu Mirim.....	23
Figura 10: Coeficiente de distribuição espacial da chuva (K).....	26
Figura 11: Plúvio 2.1.....	29
Figura 12: Declividade da sub-bacia.....	31
Figura 13: Uso e Ocupação do solo.....	32
Figura 14: Hidrograma típico de uma dinâmica natural e regularizada da vazão.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferenças entre as regiões hidrográficas brasileiras.....	13
Tabela 2: Parâmetros iniciais da sub-bacia do rio Embu Mirim.....	33
Tabela 3: Intensidades de chuva para Itapecerica da Serra.....	33
Tabela 4: Intensidades de chuvas para Embu das Artes.....	34
Tabela 5: Vazões de cheia com T: 75 anos.....	35

LISTA DE SIGLAS

CNRH: Conselho Nacional de Recursos Hídricos

UGRHIs: Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos

BAT: Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

RMSP: Região Metropolitana de São Paulo

HU: Hidrograma Unitário

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo

EUA: Estados Unidos da América

SIG: Sistema de Informação Geográfica

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

FBDS: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável

UFV: Universidade Federal de Viçosa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	11
2.1	Geral.....	11
2.2	Específicos.....	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
3.1	Bacias Hidrográficas.....	12
3.1.1	Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.....	15
3.2	Modelos Hidrológicos para Estimativa de Vazões de Escoamento.....	16
3.3	Método de I-Pai-Wu.....	19
3.4	Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	20
4	METODOLOGIA.....	22
4.1	Área de Estudo.....	22
4.2	Delineamento Matemático.....	24
4.3	Definição e Obtenção de Dados.....	27
4.3.1	Delimitação da área.....	28
4.3.2	Uso e Ocupação do solo.....	28
4.3.3	Declividade Equivalente.....	28
4.3.4	Intensidade da Chuva.....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1	Mapas de Declividade e Uso e Ocupação de solo.....	31
5.2	Intensidade de Chuva.....	33
5.3	Vazões de Cheia.....	35
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

O movimento das águas na superfície da Terra se dá principalmente pela geomorfologia das áreas de captação de precipitação, ou seja, das bacias hidrográficas. Segundo Palaretti (2019), bacias hidrográficas são áreas geográficas delimitadas pela topografia onde todas as águas superficiais e subterrâneas convergem para um único ponto, como um rio principal. As bacias hidrográficas hoje desempenham um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos no Brasil, é através da delimitação e estudo delas que o estado consegue assegurar uma melhor manutenção do ciclo da água e o fornecimento desta para ecossistemas naturais, abastecimento de comunidades, bem como para o uso na agricultura e indústria.

O gerenciamento hídrico é complexo e requer conhecimento e trabalho sobre todo um sistema de elementos ativos e passivos que interagem entre si e constituem o que chamamos de meio ambiente. De maneira a aprimorar essa gestão foram criados os Comitês de Bacias Hidrográficas, que em conjunto desempenham o papel de fortalecer a sustentabilidade do recurso hídrico, além de debater e propor soluções para as principais problemáticas envolvendo as águas brasileiras (SÃO PAULO, 2023).

Uma gestão atenta e comprometida é essencial para minimizar eventos que são diretamente influenciados pela forma como a água escoar e é gerenciada nas áreas de drenagem, como é o caso das vazões de enchente, que trazem impactos negativos para toda uma comunidade causando perdas econômicas e ambientais, danos ao desenvolvimento de uma região e por vezes vidas humanas.

De maneira a diminuir tais impactos, são planejadas medidas de controle de enchentes, baseadas muitas vezes em modelagens hidrológicas, essa ferramenta determina elementos hidrológicos a partir de modelos matemáticos probabilísticos baseados em estudos topográficos da área e características inerentes a bacia hidrográfica. Dessa forma, a modelagem hidrológica se mostra de grande valor na gestão e sustentabilidade do recurso hídrico, uma vez que fornece previsões do comportamento da água na bacia, dados de escoamento e vazão e, por consequência, uma estimativa detalhada do balanço hídrico (MELO NETO, 2014).

Muitas são as pesquisas e projetos sobre a dinâmica chuva – vazão, isso porque o estudo de vazões é imprescindível para um correto dimensionamento para

uma série de obras hidráulicas, como bueiros, aduelas, drenos, pontilhões, obras contra enchentes e erosões hídricas, além de galerias pluviais e vertedores de barragem (OLIVEIRA, 2005). De modo geral a modelagem hidrológica atuará como fonte principal de dados necessários para a elaboração de medidas de controle estruturais e não estruturais.

O Método de I-PAI-WU é um modelo hidrológico bastante difundido e utilizado, por se tratar de uma atualização de métodos de cálculo de vazão anteriores que foram aprimorados. Ele é comumente utilizado para projetos de macrodrenagem em bacias de até 200 km² e é considerado um método mais preciso pois considera variáveis importantes no desenvolvimento de uma cheia, como sua forma e distribuição espacial da chuva (DAEE, 1999).

Diante disso, esse trabalho possui o intuito de utilizar o Método de I-PAI-WU no cálculo de vazão de enchentes para a bacia hidrográfica do rio Embu Mirim, localizado na região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Dessa maneira, gerar dados que vão servir de subsídios para o dimensionamento de obras hidráulicas de drenagem e/ou impermeabilização, projetos de viabilidade e planejamento urbano, bem como auxiliar nas tomadas de decisões e políticas públicas de controle de enchentes.

2 OBJETIVO

2.1 GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em utilizar de modelagem hidrológica para determinar as vazões de pico de enchentes na bacia do rio Embu Mirim.

2.2 ESPECÍFICOS

No que diz respeito aos objetivos específicos deste trabalho podemos citar:

- Delimitar através de técnicas de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e uso do software QGIS, a bacia de estudo bem como sua declividade;
- Determinação do coeficiente espacial de distribuição de chuva;
- Realizar a modelagem hidrológica aplicando o método de I-PAI-WU;
- Calcular e discutir as vazões de pico para diferentes base de dados.

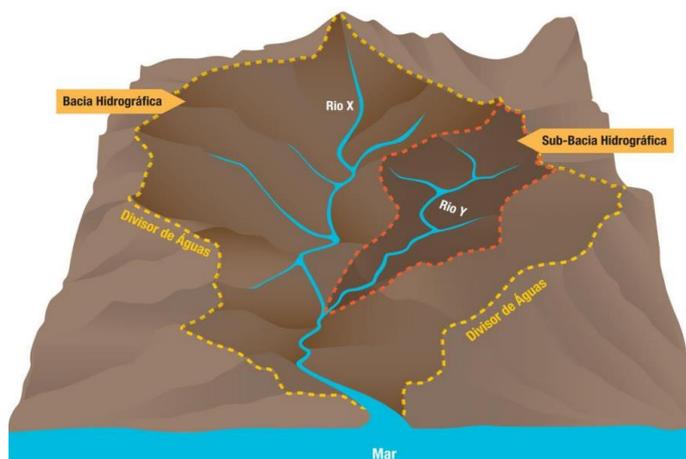
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Bacias Hidrográficas

O termo Bacia Hidrográfica pode ser definido como um conjunto de terras que captam naturalmente a água de precipitação através de superfícies vertentes, que formam uma rede de drenagem composta por cursos de água que convergem até um único ponto de saída, o seu exutório (TUCCI, 1997). O fenômeno referente a esse fluxo superficial de rios e seus afluentes, se dá a partir das conformações topográficas da área da bacia (DINGMAN, 2008).

Desse modo, as águas superficiais escoam para as superfícies mais baixas do terreno, formando riachos que descem e juntam-se a outros, conseqüentemente aumentando seus volumes e formando os primeiros rios, estes vão recebendo água de outros tributários, formando rios maiores que desembocam em represas, mares e no oceano (BARELLA, 2001).

Figura 1: Esquemática de uma bacia hidrográfica



Fonte: EEL – USP (2018)¹

Atualmente o Brasil é dividido em 12 principais Regiões Hidrográficas Brasileiras (Figura 2), definidas através do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) pela Resolução N^o 32, de 15 de outubro de 2003, com a finalidade de orientar, fundamentar e implementar o Plano Nacional de Recursos Hídricos, através de uma base organizacional de dados referenciados por bacia e visando também a integração das informações em recursos hídricos.

¹ USP. Escola de Engenharia de Lorena. Hidrologia I SHS – 411. 2021. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7573445/mod_resource/content/2/Aula%2001%20e%2002%20-%20Hidrologia%20e%20Ciclo%20Hidrolo%CC%81gico%20-%202021.pdf> Acesso em: 05 Nov. 2023.

Figura 2: Regiões Hidrográficas Brasileiras



Fonte: CNRH (2003)²

Essa divisão em regiões é justificada pelas diferenças existentes no território brasileiro, conforme evidencia a Tabela 1, principalmente no que diz respeito a ecossistemas, aspectos econômicos, sociais e culturais.

Tabela 1: Diferenças entre as regiões hidrográficas brasileiras

Região Hidrográfica	Vazão média (m ³ /s)	Densidade demográfica 1.000 hab/km ²	Taxa de urbanização (%)
Região Hidrográfica Amazônica	131.947	2	67%
Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia	13.624	8	74%
Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental	2.683	19	57%
Região Hidrográfica do Parnaíba	753	11	62%
Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental	779	75	76%
Região Hidrográfica do São Francisco	2.850	20	74%
Região Hidrográfica Atlântico Leste	1.492	36	70%
Região Hidrográfica Atlântico Sudeste	3.179	118	90%
Região Hidrográfica Atlântico Sul	4.174	62	85%
Região Hidrográfica do Uruguai	4.121	22	68%
Região Hidrográfica do Paraná	11.452	62	91%
Região Hidrográfica do Paraguai	2.368	5	85%

Fonte: MMA (2007)³

² CNRH. Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003. Anexo I. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Brasília.2003. Disponível em:<<https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2032.pdf>> Acesso em: 05 nov. 2023.

³ MMA. *GEO Brasil: Recursos Hídricos* Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2007. Disponível em: <<https://www.ceivap.org.br/estudos/GEO-Brasil-Recursos-Hidricos.pdf>> Acesso em: 05 nov. 2023

Dessa forma os estados brasileiros, para fins de gestão e de maneira a conciliar as necessidades de administração dos recursos hídricos específicos da área, fizeram suas divisões em unidades (Figura 3), as chamadas Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs).

Figura 3: UGRHs do estado de São Paulo



Fonte: SigRH (2023)

Entretanto, pensando de maneira hidrológica, muitos estados como é o caso de São Paulo possuem rios de grande extensão, que podem sobrepassar a divisão estabelecida pelas UGRHs e principalmente não abranger a área total das bacias hidrográficas. Pensando nisso, ficou estabelecido as Regiões Hidrográficas que contemplam toda extensão da bacia e conseqüentemente os impactos que a montante provoca na jusante, a Figura 4 representa a divisão feita no estado de São Paulo a partir do Plano Estadual de Recursos Hídricos (2007)⁴.

Figura 4: UGRHs agrupadas por Região Hidrográficas do estado de São Paulo



Fonte: SigRH (2023)

⁴ Plano Estadual de Recursos Hídricos. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 2004 / 2007. Disponível em: < <https://sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/CRH/1133/perh.pdf> > Acesso em: 05 nov. 2023.

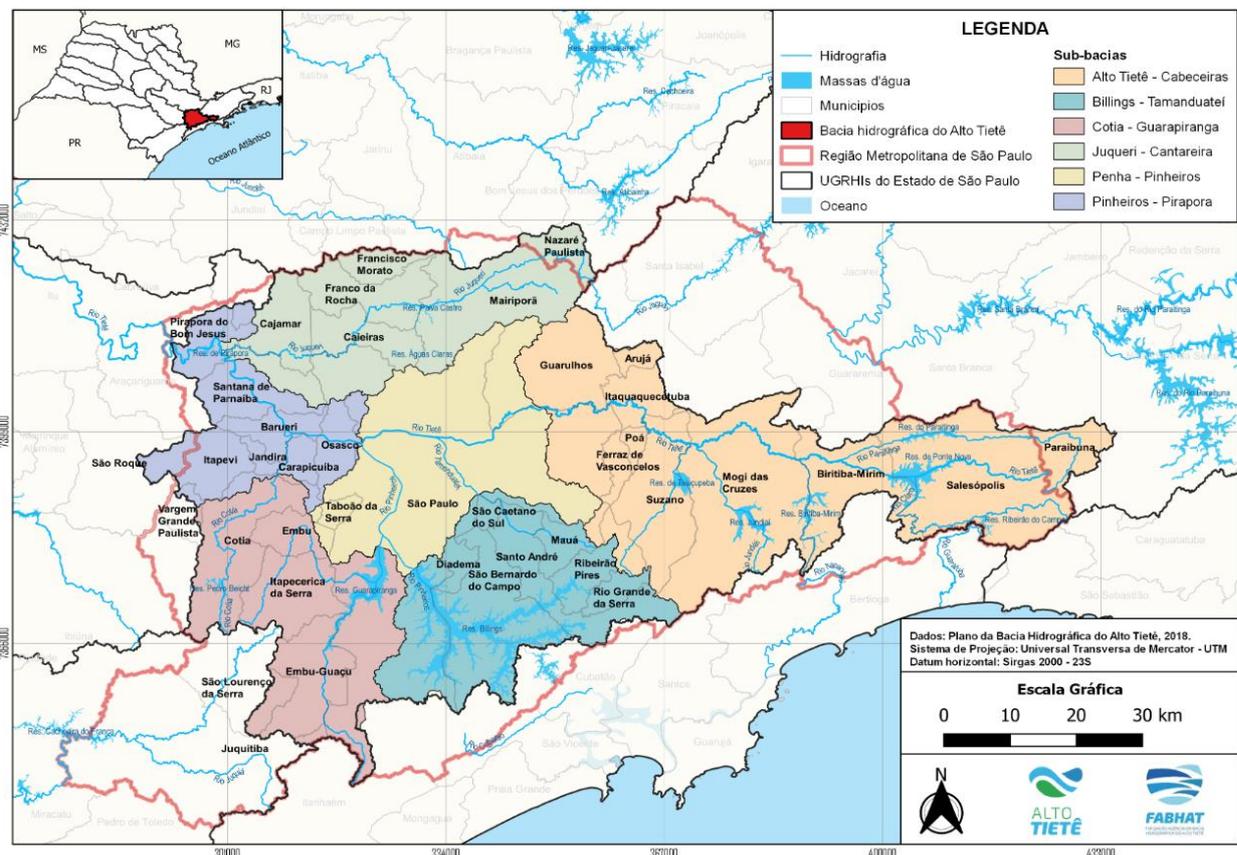
3.1.1 Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

O estado de São Paulo tem seu território dividido em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), com suas respectivas bacias hidrográficas que englobam 645 municípios, tal divisão foi baseada em critérios hidrológicos, ambientais, socioeconômicos e administrativos, pensando nas diferentes demandas intrínsecas de cada região com o intuito de garantir água de qualidade e em quantidade suficiente para esta e futuras gerações (SigRH, 2023).

A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT) corresponde a UGRHI – 06, a qual possui 5.775,12 km² e 20.954.990 habitantes e coincide em grande parte com a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Dentre os principais rios pode-se citar o Tietê, Paraitinga, Biritiba Mirim, Jundiá, Guaiú, Grande ou Jurubatuba, Pequeno, Embu-Guaçu, Embu Mirim, Cotia, Juqueri, Pinheiros, Tamanduateí e Aricanduva (FABHAT, 2018).

Devido a sua grande extensão a BAT é dividida em 6 sub-bacias principais, conforme Figura 5, que foram definidas a partir de suas características topográficas e hidrológicas.

Figura 5: Sub-bacias da BAT



Fonte: SigRH (2023)

Cada uma dessas divisões e unidades de gerenciamento foram criadas de maneira a aprimorar a gestão de recursos hídricos e criar os Comitês de Bacias Hidrográficas, que em conjunto desempenham o papel de fortalecer a sustentabilidade do recurso hídrico, debater melhorias e propor soluções para as principais problemáticas envolvendo as bacias (SigRH, 2023).

3.2 Modelos Hidrológicos para Estimativa de Vazões de Escoamento

A simulação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas pode ser feita através das chamadas modelagens, essa ferramenta auxilia no entendimento de processos complexos do mundo real, através de operações lógicas computacionais ou por meio de conjuntos de equações simultâneas (WHEATER; SOROOSHIAN; SHARMA, 2007). A modelagem se mostra como uma grande aliada na gestão dos recursos hídricos, pois permite a previsão do regime fluvial e conseqüentemente as vazões de escoamento dessas bacias.

Segundo Hollanda (2015), modelos hidrológicos se apresentam como uma solução de baixo custo e economia de tempo no que diz respeito a potenciais impactos das ações humanas no regime hídrico de bacias hidrográficas, uma vez que eles avaliam, simulam e preveem os danos causados por eventos de precipitação, podendo, dessa forma, auxiliar no planejamento, manejo e tomada de decisões relacionadas aos recursos hídricos em uma bacia.

As determinações das vazões de escoamento são obtidas por vários métodos, de acordo com as características físicas das bacias estudadas. O Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (2005)⁵ diz que o fator determinante para a escolha do método é a área de drenagem, onde bacias com áreas inferiores a 50 km² o mais adequado é utilizar os chamados métodos indiretos, que se baseiam em dados de intensidade, duração e frequência de chuvas, e para bacias maiores utilizar métodos diretos.

Entre os métodos indiretos podemos citar o Método Racional, Ven Te Chow e o I-Pai-Wu. O Método Racional datado de 1889 pelo irlandês Mulvaney é um dos métodos mais utilizados para estimativa de vazão, por ter uma metodologia bastante simples e ser o pioneiro a apresentar estruturas que vão além das experimentações

⁵ Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Estudos Hidrológicos. São Paulo. 2005. Disponível em: < http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/IP-DE-H00-001_A.pdf> Acesso em: 11 nov. 2023.

e observações que se tinha nos Estados Unidos e Europa na época (TOMAZ, 2013).

No Método Racional a determinação da vazão máxima de escoamento superficial acontece a partir de dados de chuva para bacias de pequeno porte, e parte do princípio de que uma chuva de intensidade uniforme e constante será igual ao tempo de concentração (GENOVEZ, 1991). Entretanto, segundo Goldenfum e Tucci (1998) o método racional ignora a complexidade real do processo de escoamento superficial, despreza tanto o armazenamento de água na bacia quanto a intensidade da precipitação e coeficiente de escoamento durante ela, dessa forma, o método não consegue caracterizar o volume de cheias e a distribuição temporal das vazões.

O Método Racional Modificado apresentou diversos ajustes e propostas de modificação, buscando diminuir os fatores que acabam gerando erro e deixando-o mais robusto que o Método Racional. Segundo Fritsch (2013), uma das modificações é a possibilidade de estender a utilização do método para áreas entre 50 e 100 km², incluindo bacias de médio porte, entretanto apresenta a mesma deficiência no que diz respeito a distribuição das chuvas na bacia, pois não prevê um fator de correção para esse problema.

Já no Método Ven Te Chow, a chuva excedente ou escoamento superficial, é o maior responsável pelas vazões de cheias em bacias urbanas de pequeno porte. Ele possibilita analisar áreas sem dados fluviométricos, no cálculo das vazões de pico decorrentes da precipitação incidente, atribui-se um tempo de retorno, estabelecendo, dessa forma, uma relação com o risco hidrológico para vazão de projetos na previsão de enchentes (BIANCHI, 2012). Contudo, assim como no Método Racional, ele não possui um fator que corrige a distribuição de chuva ao longo da bacia, o que pode provocar erros no dimensionamento para bacias com grande área de drenagem.

Como método direto pode-se citar o Hidrograma Unitário (HU), inicialmente proposto por Sherman (1932) como uma função-resposta linear da bacia hidrográfica a uma chuva efetiva unitária. Dessa maneira uma chuva efetiva de mesmo tempo de duração da chuva unitária irá construir um hidrograma com mesmo tempo de base do Hidrograma Unitário, além de vazões proporcionais à razão com a chuva unitária.

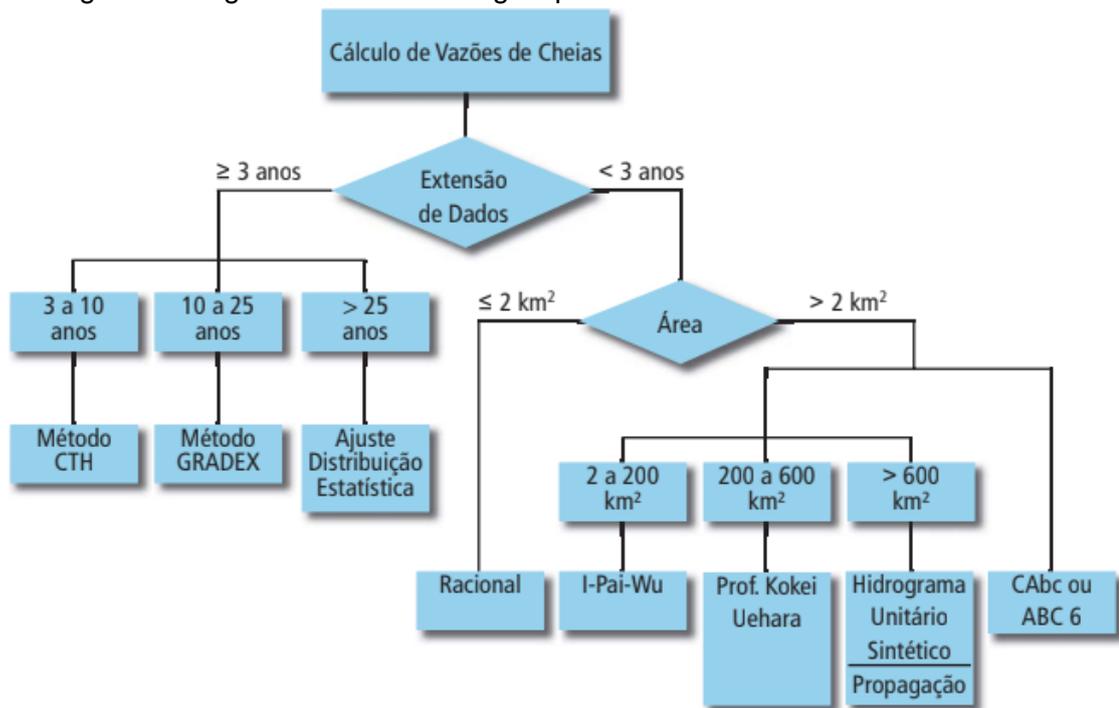
Após a ideia de HU de Sherman atingir popularidade, veio o surgimento dos primeiros HUs, como é o caso dos Hidrogramas Unitários Sintéticos. Segundo Chow,

Maidment e Mays (1988) podemos agrupar as propostas de HUs Sintéticos em 3 principais grupos: os baseados diretamente em características como vazão de pico, retardo e tempo de pico dentro outros dados estimados através de características físicas da bacia, os baseados pelo armazenamento na bacia hidrográfica através de modelos conceituais e os decorrentes da validade da adimensionalização de vazões e tempo do hidrograma, com a intenção de universalizar a aplicação do método.

De maneira geral os modelos de criação de HUs se baseiam na criação de um hidrograma de chuva-vazão a partir de informações mensuráveis da fisiografia de uma bacia, nele se relacionam parâmetros como a estimativa da chuva efetiva, determinação dos escoamentos superficial e subterrâneo, previsão de vazões e finalmente a determinação das ordenadas do hidrograma unitário (BARBOSA, 2001).

Dito isso, segundo o Departamento de águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE) recomenda-se que para os estudos hidrológicos que visem estimar as vazões de enchente, sejam usadas as seguintes metodologias apresentadas na Figura 6.

Figura 6: Diagrama das metodologias para estimativa de vazões de enchente



Fonte: Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas⁶

⁶ Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas. DAEE. Diretoria de Procedimento de Outorga e Fiscalização. São Paulo. 2005. Disponível em: < https://drive.google.com/file/d/1O72tEQXIYWfJJQ6sk_nuRv5xctvfQ9IM/view > Acesso em: 12 nov. 2023.

3.3 Método de I-Pai-Wu

Segundo Wu (1964), o propósito desse método consiste em determinar a forma geral de hidrogramas para bacias hidrográficas pequenas, através da utilização de uma expressão matemática contendo parâmetros específicos correlacionados com características físicas identificáveis e de fácil obtenção na bacia hidrográfica.

O método iniciou-se como uma proposta de análise dos dados de 21 bacias hidrográficas pequenas do estado de Indiana (EUA), para obtenção das relações entre a forma dos hidrogramas e algumas características das bacias. O piloto apresentou boas previsibilidades e foi rapidamente difundido e analisado sob as mais diversas condições (TOMAZ, 2013).

Ele é considerado um aperfeiçoamento do Método Racional, pois leva em consideração fatores intervenientes da bacia como a sua forma, os efeitos da distribuição espacial da chuva e o armazenamento dela, sendo essas, variáveis de grande importância no desenvolvimento e estudos de uma cheia. O método pode ser aplicado em bacias com área de drenagem de até 200 km² (DAEE, 1999).

Além disso, ao contrário do que se vê no Método Racional, no qual se admite o tempo de duração igual ao de concentração em uma chuva crítica, o I-Pai-Wu entende que bacias de forma alongada podem apresentar tempo de concentração maior que o tempo de pico (FRITSCH, 2013).

A seguinte equação (I) é usada para obter a vazão máxima (Q_m) pelo Método de I-Pai-Wu:

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

Onde:

C : Coeficiente de escoamento superficial;

I : Intensidade de chuva (mm/min);

A : Área da bacia (km²);

K : Coeficiente de distribuição espacial da chuva.

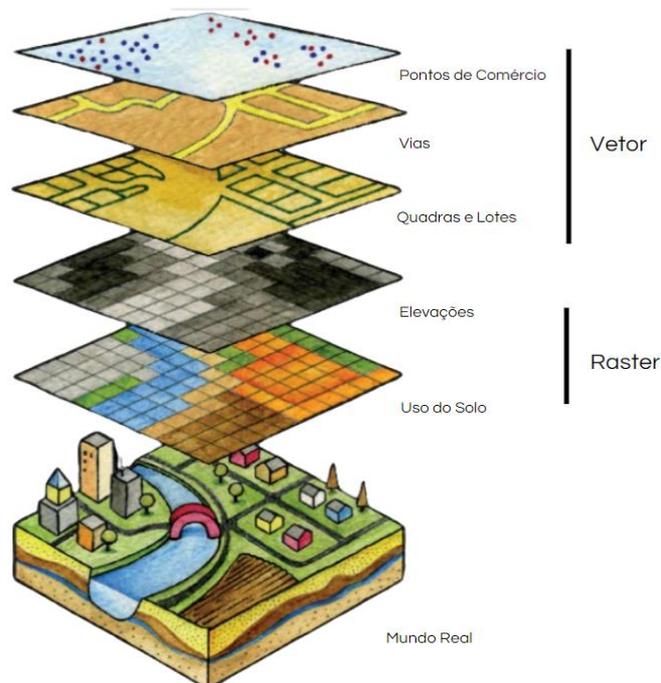
3.4 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) reúne dados, ferramentas, softwares, *peoplewares* e metodologias que permitem a aquisição, armazenamento e processamento de informações geoespaciais. Isso resulta na criação de bancos de dados que agilizam o monitoramento, organização e a definição de estratégias e planejamento das atividades humanas no meio ambiente (ROSA, 2005).

Os dados geoespaciais podem ser adquiridos de maneira primária, ou seja, através de levantamentos de campo, ou de maneira secundária através do processamento computacional de dados primários. A representação desses dados pode ocorrer de duas formas: raster ou vetor (ROSA, 2005).

O vetor, também conhecidos como shapefiles, podem ser pontos, linhas ou polígonos, os quais abrangem, em sua maioria, uma tabela com atributos referentes a representação que se deseja compartilhar. Já o raster é o que se chama de estrutura matricial, é composto por pixels, células ou quadrados que exprimem valores referentes a área em análise. Juntas, essas informações são usualmente apresentadas como mapas (SCHMIDT, 2016).

Figura 7: Representação de Vetor e Raster



Fonte: Adaptado de DAU – PUC⁷

⁷ PUC. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Aula 9. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dau.puc-rio.br/arquivos/arq1342/arq1342.aula.09.2.4.pdf>> Acesso em: 11 nov. 2023.

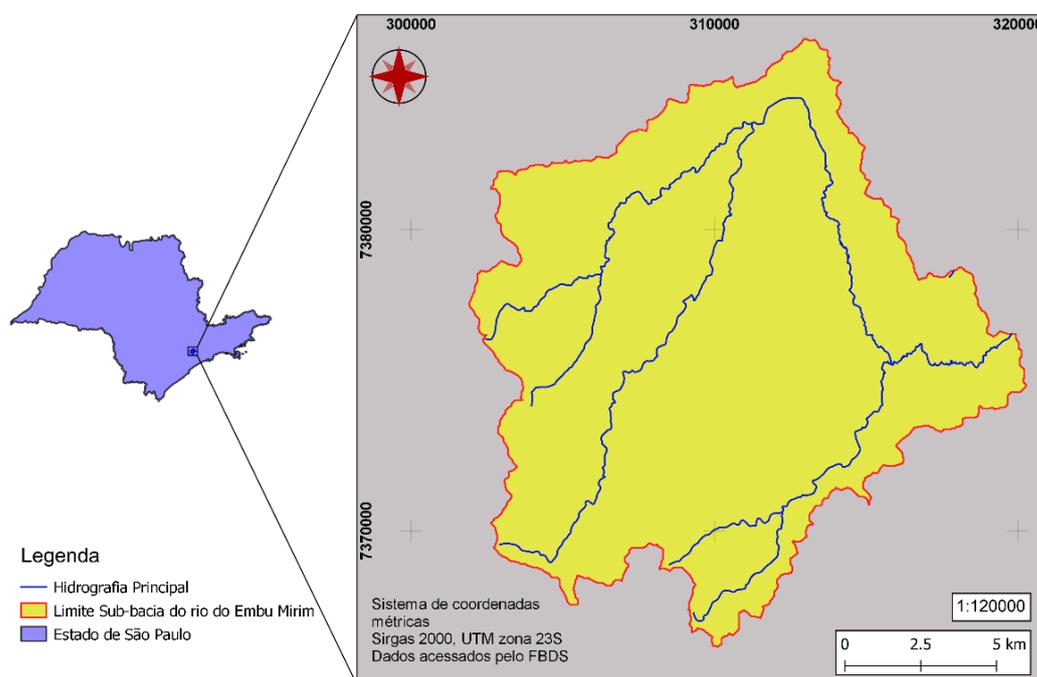
A combinação dos dados obtidos em formato raster ou shapefile e seu processamento, pode ser realizado em softwares como o ArcGIS e QGIS. A partir deles, é possível visualizar e realizar diversas análises espaciais, como por exemplo, a interpretação de mapas temáticos referentes a um determinado processo hidrológico. Posteriormente pode-se utilizar as informações obtidas através dos mapas em qualquer processo decisório (SANTOS, 2014).

4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado na Sub-bacia do rio Embu Mirim, conforme apresenta a Figura 8, localizada no estado de São Paulo. Essa sub-bacia tem as suas nascentes originadas no município de Embu das Artes – SP a partir de ribeirões e córregos envoltos, atravessa o município de Itapequerica da Serra – SP e avança em direção à zona sul de São Paulo, no distrito do Jardim Ângela onde desagua na Represa Guarapiranga.

Figura 8: Delimitação da Área de Estudo



Fonte: Autoria Própria, 2023

A Sub-bacia do rio Embu Mirim faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 06 – Alto Tietê e está inserida na Sub-bacia Cotia – Guarapiranga, que conta com mais 23 unidades hidrográficas dentro da sua jurisdição. A bacia contempla em sua maior parte o município de Embu das Artes que possui 250.691 habitantes e o município de Itapequerica da Serra com 158.522 habitantes (IBGE, 2022)

Por estar inserida na Região Metropolitana de São Paulo e possuir foz em municípios próximos a capital paulista, é uma bacia que apresenta pontos com elevada densidade populacional e usos muito diversificados, mas também irá apresentar áreas de densa formação vegetal, uma vez que abrange bairros mais

distantes da capital e correspondentes a áreas de proteção dos mananciais, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Foz do rio Embu Mirim



Fonte: Fabio Schunck, 2016⁸

Podemos categorizar seu relevo como sendo composto predominantemente por colinas e pequenos morros isolados em conjunto com extensas planícies fluviais do rio Embu Mirim e afluentes. Quanto as altitudes, estas podem variar de 750 a 850 metros e vão diminuindo à medida que o rio segue em direção ao sul da bacia, dando forma a uma espécie de barreira que circunda o rio Embu Mirim e o faz ser direcionado para a represa de Guarapiranga (EMBU DAS ARTES, 2008).

Quanto aos aspectos ambientais, toda a bacia encontra-se na chamada Reserva da Biosfera do Cinturão Verde da Cidade de São Paulo, reconhecida pela UNESCO em 1994 como parte integrante da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, bioma em que a sub-bacia do rio Embu Mirim está inserida. Do ponto de vista da vegetação podemos classificá-la como uma área de Floresta Pluvial Atlântica Secundária, pluvial devido a abundância de chuvas na região e secundária devido o histórico de explorações durante o processo de ocupação do território (ITAPECERICA DA SERRA, 2020).

⁸ Fabio Chunck. Avifauna do Parque Ecológico do Guarapiranga e sua importância para conservação das aves da Região Metropolitana de São Paulo. ResearchGate. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312044935_Avifauna_do_Parque_Ecologico_do_Guarapiranga_e_sua_importancia_para_a_conservacao_das_aves_da_Regiao_Metropolitana_de_Sao_Paulo> Acesso em: 12 nov. 2023.

Segundo o Plano Diretor de Turismo do Município de Itapeceira da Serra (2020), sendo este o município mais expressivo dentro da bacia, o clima caracteriza-se como subtropical, com verões abafados e ar seco, e inverno ameno e subseco, podendo apresentar características de Clima Tropical de Altitude tipo Cwa⁹. A temperatura média anual fica em torno dos 18°C, e o índice pluviométrico anual é de aproximadamente 1.400 mm.

4.2 Delineamento Matemático

Para o cálculo da vazão em bacias hidrográficas, é necessário considerar a área da bacia de estudo. Por se tratar de uma bacia de aproximadamente 189 km² de área, foi utilizado o Método de I-Pai-Wu, principalmente também pela sua maior precisão de resultados para bacias de médio porte.

De acordo com as Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos da Prefeitura do Município de São Paulo (1999)¹⁰ o método de I-Pai-Wu segue o seguinte roteiro de cálculo:

- Determinar o divisor de águas da bacia que contribui para a seção em estudo;
- Calcular a área de drenagem correspondente (A), usualmente através de planimetria;
- Determinar a declividade equivalente através do processo gráfico, ou através da equação (II):

$$S = \left[\frac{\sum L}{\frac{L_1}{\sqrt{J_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{J_2}} + \dots + \frac{L_N}{\sqrt{J_N}}} \right] \quad (II)$$

Onde:

L: km

J: m/m

S: m/m, para transformar em m/km, deve-se multiplicar por 1000.

⁹ O Clima Tropical tipo Cwa categoriza-se como C: clima temperado; w: invernos secos e a: verões quentes e úmidos.

¹⁰ Prefeitura do Município de São Paulo. Diretrizes de Projeto de Hidráulica e Drenagem. São Paulo. 1999. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/DRENAGEM%20URBANA/dh-h06_diretrizes_de_projeto_para_estudos_hidrologicos_metodo_de_i_pai_wu.pdf> Acesso em: 11 nov. 2023.

d) Determinar o fator de forma (F) da bacia hidrográfica através da equação (III):

$$F = \frac{L}{2\left(\frac{A}{\pi}\right)^{1/2}} \quad (\text{III})$$

Onde:

L : Comprimento do talvegue do rio (km);

A : Área da bacia de contribuição (km²)

e) Calcular o tempo de concentração através da equação (IV):

$$tc = 57\left(\frac{L^2}{S}\right)^{0,365} \quad (\text{IV})$$

Onde:

tc : Tempo de concentração (min);

L : Comprimento do talvegue do rio (km);

S : Declividade equivalente (m/km).

f) Calcular as porcentagens (P) de áreas com coeficientes $C2$ indicados, e calcular o valor ponderado de $C2$, através da equação (V):

$$C2 = \frac{C2_1 \cdot A1 + C2_2 \cdot A2 + \dots + C2_N \cdot A_N}{\sum A_i} \quad (\text{V})$$

g) Determinar a intensidade da chuva crítica, através das equações de chuva, que podem ser encontradas nos Atlas Pluviométricos do Brasil do Ministério de Minas e Energia (2017)¹¹.

h) Determinar o coeficiente de distribuição espacial da chuva (K), que é função da área de drenagem (em km²) e do tempo de concentração (em horas) através do gráfico apresentado na Figura 10.

i) Determinar o coeficiente ($C1$), através do coeficiente de forma da bacia (F):

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

j) Calcular o coeficiente (C), através da equação (VII):

$$C = \frac{2}{1+F} \cdot \frac{C2}{C1} \quad (\text{VII})$$

¹¹ Atlas Pluviométrico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. Porto Alegre. 2017. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22122/1/SP_EmbuDasArtes_Relatorio_IDF_2017.pdf> Acesso em: 12 nov. 2023.

k) Calcular o volume total do hidrograma (V), através da equação (VIII):

$$V = (0,278 \cdot C2 \cdot i \cdot t_c \cdot 3600 \cdot A^{0,9} \cdot K) \cdot 1,5 \quad \text{(VIII)}$$

Onde:

i: Intensidade da chuva (mm/h);

t_c : Tempo de Concentração (h);

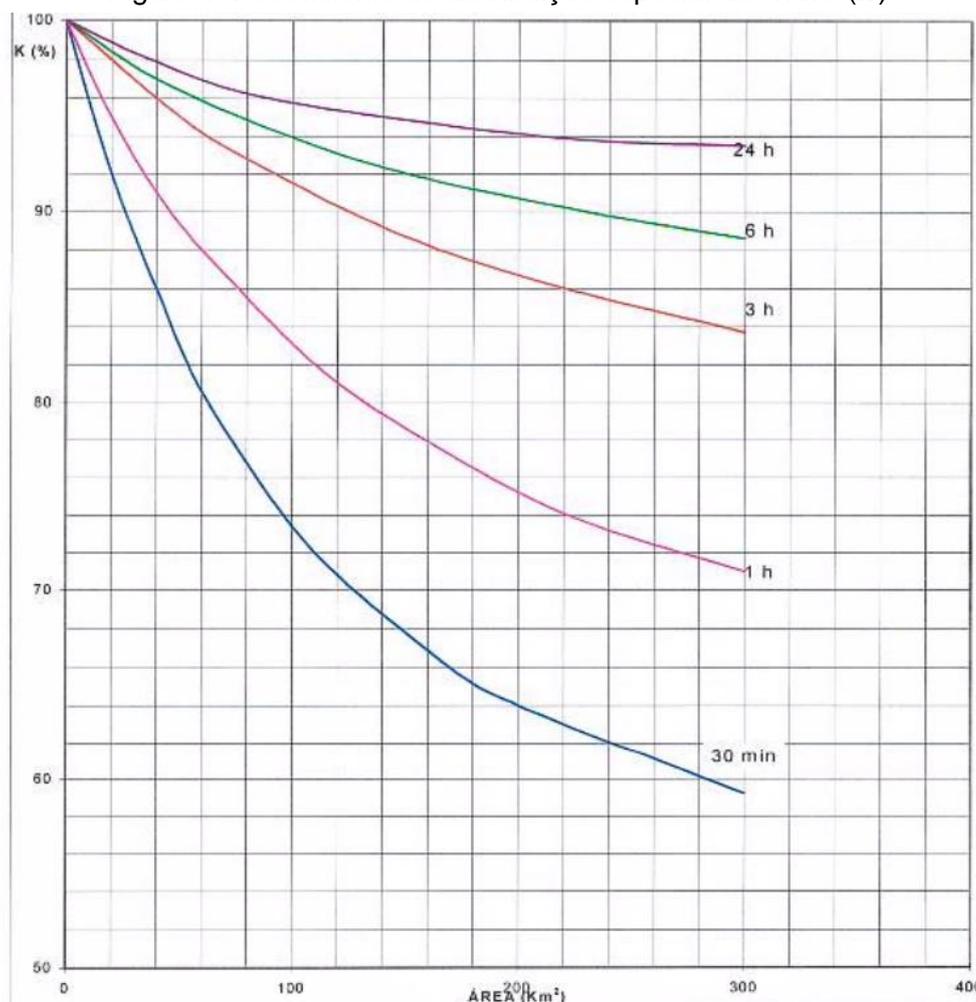
A: Área da bacia de contribuição (km²);

C2: Coeficiente volumétrico de escoamento;

K: Coeficiente de distribuição espacial da chuva.

Para o coeficiente de distribuição espacial da chuva usa-se o gráfico representado na Figura 10:

Figura 10: Coeficiente de distribuição espacial da chuva (K)



Fonte: Prefeitura Municipal de São Paulo (1999)

l) Calcular a vazão de cheia (Q), através da equação (IX):

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A^{0,9} \cdot K \quad (\text{IX})$$

Onde:

Q: Vazão de cheia (m³/s);

i: Intensidade da chuva (mm/h);

A: Área da bacia de contribuição (km²);

K: Coeficiente de distribuição espacial da chuva;

C: Coeficiente da bacia.

m) Para o cálculo de vazão de pico, ou seja, a vazão máxima de projeto (Q_p), acrescenta-se uma vazão de base (Q_b), da ordem de 10% da vazão de cheia.

$$Q_b = 0,10 \cdot Q \quad (\text{X})$$

$$Q_p = Q_b + Q \quad (\text{XI})$$

O método foi calculado de acordo com o roteiro apresentado através do software Microsoft Excel, bem como o tratamento dos dados obtidos para a simulação das vazões.

4.3 Definição e Obtenção de Dados

Em posse das informações de delimitação e uso e ocupação do solo da bacia de estudo adquiridos através do software QGIS 3.10 A Coruña e com o intuito de tornar o desenvolvimento do cálculo o mais próximo possível da realidade, foi levado em consideração dados e valores dos dois principais municípios que comportam a bacia, são eles: Embu das Artes e Itapecerica da Serra.

As informações quantitativas e equações apresentadas durante esse estudo, foram extraídas de órgãos oficiais como o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), a Superintendência de Projetos e Obras do município de São Paulo, o Ministério de Minas e Energia, a Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS), bem como as Prefeituras dos municípios de Itapecerica da Serra e Embu das Artes.

4.3.1 Delimitação de Área

Após a determinação do divisor de águas da bacia que contribuí para a seção de interesse do presente estudo, foi possível a delimitação da sub-bacia do rio Embu Mirim. Através do software QGIS 3.10 A Coruña e dos dados disponíveis no FBDS obteve-se a área de drenagem da bacia e construção do mapa da área de estudo, que foi demonstrada anteriormente na figura 9.

4.3.2 Uso e Ocupação do solo

Uma vez delimitada a bacia, para a realização do estudo também foi feito o mapa de uso e cobertura do solo da área de interesse. Foi utilizado o software QGIS 3.10 A Coruña e os dados foram extraídos da coleção 10 do MapBiomas com mapas datados de cobertura e uso da terra para o período de 2022.

4.3.3 Declividade Equivalente

A declividade da bacia está diretamente ligada ao movimento dos cursos d'água dentro dela, portanto, exerce grande influência sobre a velocidade de escoamento superficial, pois quanto maior for a declividade do terreno, mais alto são os valores de velocidade de escoamento, o tempo de concentração é menor e maior as perspectivas de picos de enchente (UFRRJ, 2006).

Para a obtenção da declividade da bacia (Figura 12) foi utilizado o software QGIS 3.10 Coruña e os dados do Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil (TOPODATA), bem como a utilização da classificação da EMBRAPA, em posse do modelo digital de elevação e a partir da função “estatísticas zonais” do software foi calculada a declividade média em graus da área de estudo.

4.3.4 Intensidade da Chuva

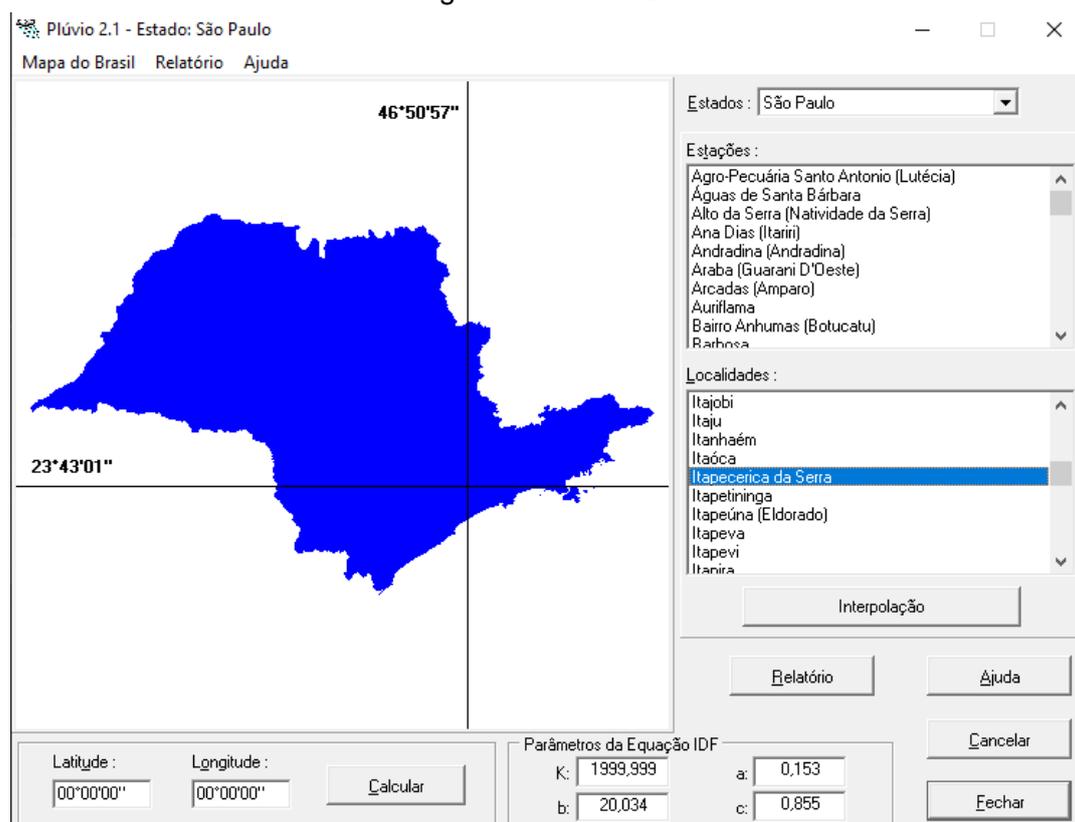
As chuvas intensas se formam a partir de um conjunto de chuvas originadas de uma mesma perturbação meteorológica, sua intensidade é sempre maior do que um valor já pré-estabelecido, ou seja, o valor da chuva mínima. As chuvas intensas podem durar desde minutos até alguma dezena de hora (PRUSKI, 2006).

Os valores de intensidade dessas chuvas se dão a partir das chamadas equações de chuvas intensas, elas irão auxiliar na medição do escoamento superficial em cenários onde não se possui dados medidos de vazão, ou em situações específicas em que a bacia hidrográfica esteja passando por mudanças

(OLIVEIRA, 2008).

Para o cálculo da intensidade das chuvas foram utilizadas duas principais base de dados, os Atlas Pluviométricos do Brasil fornecido pelo Ministério de Minas e Energia, para os municípios de Embu das Artes e Itapeçerica da Serra, e o software Plúvio 2.1 representado na Figura 11, que é um compilador de dados pluviométricos datados de 1999, disponibilizado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Figura 11: Plúvio 2.1



Fonte: UFV, 2006¹²

O Plúvio 2.1 é um software que tem como objetivo apresentar dados de estações pluviométricas e a partir dessas informações obter os parâmetros da Equação de Intensidade Duração e Frequência, o que permite o cálculo e obtenção do valor de intensidade de chuva para determinado município do país através da seguinte equação (XII):

$$i = \frac{k \cdot T^a}{(tc+b)^c} \quad (\text{XII})$$

¹² UFV. Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos. **Plúvio 2.1: Chuvas intensas para o Brasil**. 2006. Disponível em: < <https://www.gprh.ufv.br/?area=softwares> > Acesso em: 20 nov. 2023.

No Atlas Pluviométrico do Brasil (2017)¹³ para Embu das Artes, foram apresentadas informações de equação baseada nos dados diários de precipitação coletados em pluviômetro e assumindo um tempo de retorno de até 100 anos. A equação (XIII) para o município de Embu das Artes vem da estação Cachoeira da Graça, e seus parâmetros são os seguintes:

$$i = \frac{1432T^{0,1681}}{(t+15,7)^{0,8531}} \quad (\text{XIII})$$

Já no Atlas Pluviométrico do Brasil (2013)¹⁴ para Itapecerica da Serra, foram apresentadas informações de equação baseada nos dados obtidos no Banco de Dados Pluviográficos do Estado de São Paulo, a partir do site do DAEE, para a estação Mombaca. A equação (XIV) para o município de Itapecerica da Serra assume tempo de retorno (T) de até 75 anos e seus parâmetros são os seguintes:

$$i = \frac{1778,2T^{0,1695}}{(t+16)^{0,8541}} \quad (\text{XIV})$$

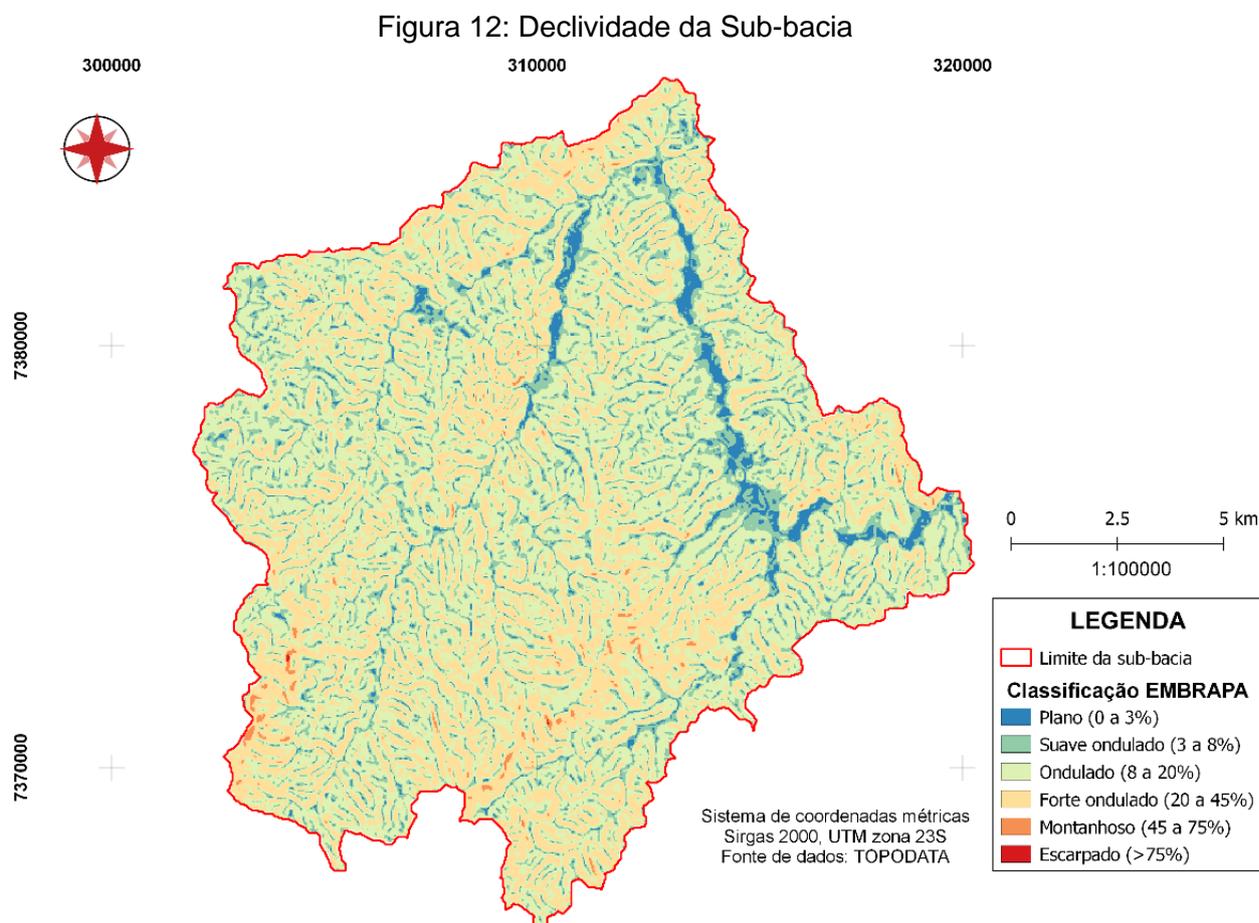
¹³ Atlas Pluviométrico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Equações Intensidade-Duração-Frequência: Embu das Artes.** Porto Alegre. 2017. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22122/1/SP_EmbuDasArtes_Relatorio_IDF_2017.pdf> Acesso em: 20 nov. 2023.

¹⁴ Atlas Pluviométrico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Equações Intensidade-Duração-Frequência: Itapecerica da Serra.** Belo Horizonte. 2013. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/23532/1/sp_itapecerica_da_serra_relatorio_idf_2013.pdf> Acesso em: 20 nov. 2023.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mapas de Declividade e Uso e Ocupação de solo

Para a obtenção de declividade da área de estudo necessária para o cálculo do método de I-PAI-WU, foi construído o mapa de declividade da sub-bacia, demonstrado na Figura 12 abaixo:



Fonte: Autoria Própria, 2023

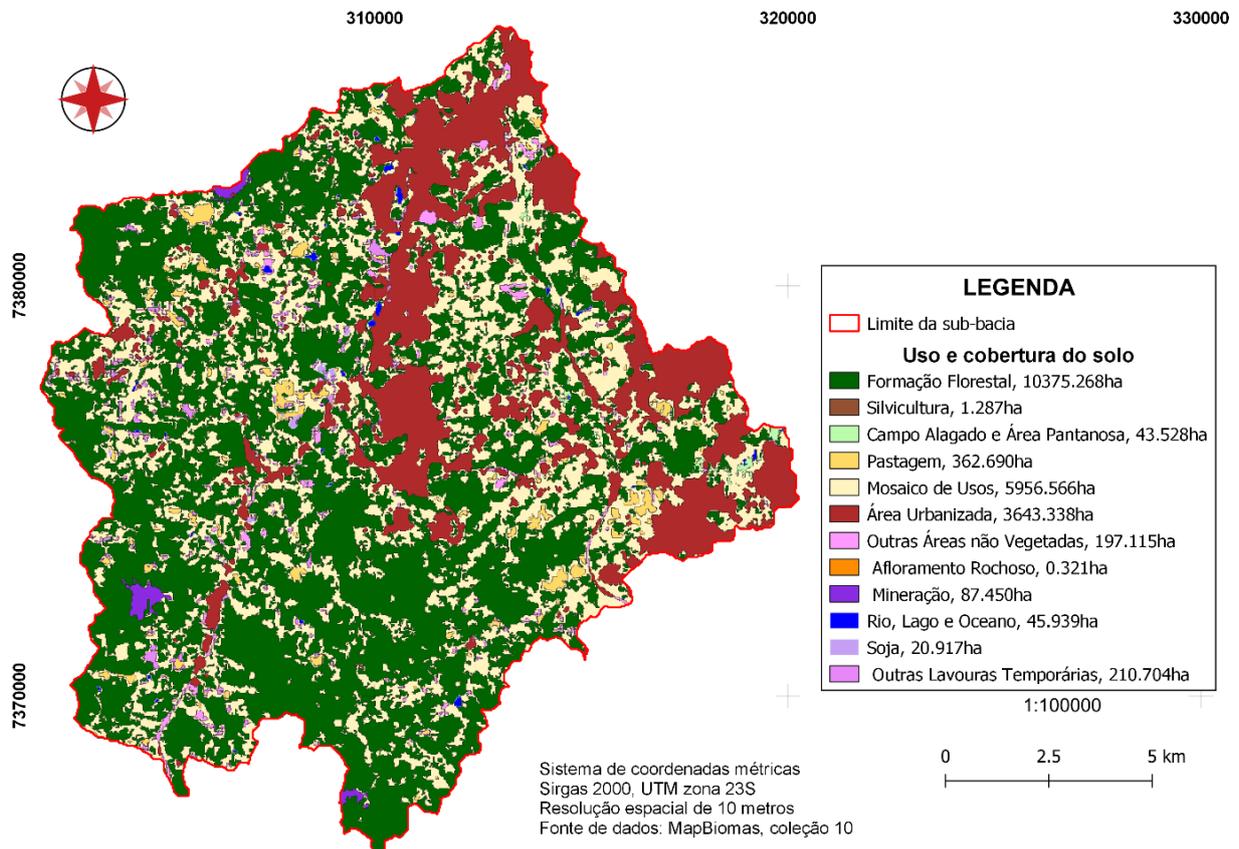
É importante ressaltar que para o método de I-PAI-WU se faz necessário uma declividade em m/m, nesse caso foi utilizada a seguinte razão trigonométrica para converter tais unidades de medida:

$$d: t g \alpha = \frac{DV}{DH}$$

Já a construção do mapa de uso e ocupação do solo da bacia, demonstrado na Figura 13, confirmou a constatação de que embora seja uma bacia localizada na região Metropolitana do estado de São Paulo, ela possui áreas de densa formação de vegetação e, portanto, representa em grande parte de sua área total terrenos com formação florestal.

É interessante ressaltar também que as áreas urbanizadas e consequentemente com elevada densidade populacional, coincidem com o trecho entorno que se segue o rio Embu Mirim, o que sugere que as comunidades foram se criando no envolto do rio e crescendo a partir do seu curso d'água.

Figura 13: Uso e Ocupação do solo da bacia



Fonte: Aatoria Própria, 2023

Nos tópicos que se sucedem, apresentam-se os dados adquiridos durante o cálculo do Método de I-PAI-WU junto das devidas discussões, tendo em vista os resultados obtidos.

Na Tabela 2 a seguir, temos os dados iniciais das principais características da bacia de estudo, adquiridas através da modelagem matemática e da criação dos mapas.

Tabela 2: Parâmetros iniciais da sub-bacia do Rio Embu Mirim

Parâmetro	Valores	Unidade de medida
Área de drenagem (A)	189,00	km ²
Declividade (S)	160,80	m/km
Comprimento do Talvegue (L)	19,00	km
Fator de Forma (F)	1,22	-
Tempo de Concentração (tc)	76,57	min
Coeficiente de Forma (C1)	1,240	-
Coeficiente de Forma (C2)	0,35	-
Coeficiente da Bacia (C)	0,25	-
Distribuição Espacial de Chuva (K)	0,76	-

Fonte: Autoria Própria, 2023

5.2 Intensidades de Chuva

As intensidades das chuvas sofreram alterações de acordo com a fonte utilizada (Atlas e Plúvio) e estas variam de modo proporcional ao tempo de retorno, uma vez que é função deste, cabendo esclarecer que o tempo de retorno é uma medida estatística que expressa a probabilidade de um evento de chuva de determinada magnitude ocorrer em um dado período de tempo.

As Tabelas 3 e 4 representam os valores de intensidade das chuvas para os municípios de Embu das Artes e Itapeçerica da Serra, respectivamente, para os tempos de retorno 100, 75, 50 e 25 anos, vale destacar que para Itapeçerica, a equação de chuva consultada só admite tempos de retorno até 75 anos.

Tabela 3: Intensidades de chuva para Itapeçerica da Serra

Tempo de Retorno (T)	Intensidades (mm/h)	
	Atlas	Plúvio
75 anos	77,31	77,76
50 anos	72,17	73,08
25 anos	64,17	65,73

Fonte: Autoria Própria, 2023

Tabela 4: Intensidades de chuva para Embu das Artes

Tempo de Retorno (T)	Intensidades (mm/h)	
	Atlas	Plúvio
100 anos	65,42	84,35
75 anos	62,34	79,84
50 anos	58,23	73,89
25 anos	51,83	64,73

Fonte: Autoria Própria, 2023

É possível observar uma diferença considerável nas intensidades de chuva de Embu das Artes, quando comparadas as bases de dados utilizadas, com o software Plúvio. Há um aumento expressivo dessa intensidade de chuva, enquanto o valor obtido pela equação do Atlas Pluviométrico apresenta um número consideravelmente menor.

Essa diferença de intensidade pode ser lida como uma aparente mudança no padrão de chuvas em Embu das Artes, mudança essa que pode ser justificada, principalmente, pelo fato de que a base de dados do software Plúvio é datada de 1999. enquanto o Atlas Pluviométrico é uma publicação de 2017. Entende-se, portanto, que num período de 18 anos a dinâmica de chuvas no município se alterou. O que pode explicar este fenômeno é que as mudanças climáticas globais podem alterar padrões climáticos e redistribuir a precipitação em escala local, o que pode resultar em variações na intensidade de precipitação em certas localidades ao longo do tempo.

Diferentemente do município vizinho, no caso de Itapeverica da Serra essa diferença é muito pouco observada, pois os valores não variam consideravelmente de uma base de dados para outra, valendo, ainda, ressaltar que, no caso de Itapeverica da Serra, o Atlas Pluviométrico é datado de 2013; dessa forma, entende-se que não houve grandes mudanças no padrão de chuvas do município durante cerca de 14 anos. Portanto, uma base de dados mais atualizada poderia indicar uma tendência semelhante a Embu das Artes.

Os resultados obtidos para a chuva crítica podem servir como subsídios para projetistas de estruturas hidráulicas na região de estudo. Componentes típicos dos sistemas de drenagem urbana, como sarjetas, bueiros, galerias de águas pluviais,

dentre outras, possuem um tempo de retorno associado, o qual reflete a sua capacidade de lidar com diferentes intensidades de precipitação. Estes dispositivos são projetados para atender a certos critérios de segurança e eficiência, considerando as características hidrológicas da região em que estão localizadas.

Apenas a título de exemplo, bueiros podem ser dimensionados para acomodar um determinado tempo de retorno, representando a frequência com que eventos de chuva intensa podem ocorrer. Por outro lado, galerias de águas pluviais possuem tempos de retorno específicos, influenciados pelas características da bacia hidrográfica, padrões de chuva locais e requisitos de escoamento urbano.

Reforça-se que deve ser levado em consideração que as equações de chuva não são eternas, tendo em vista que estas são montadas a partir da coleta de dados climáticos históricos na região de interesse. Sendo assim, é preciso ter atenção e considerar os cenários futuros climáticos ao realizar avaliações e modelagem hidrológica, incluindo o desenvolvimento destas equações. Isto é importante, pois permite uma adaptação às mudanças climáticas para planejar a desenvolver a infraestrutura, avaliação de riscos e vulnerabilidades associados a eventos extremos, planejamento sustentável e eficiente dos recursos hídricos, projeção de tendências hidrológicas, estudos de impactos e adaptação etc.

5.3 Vazões de Cheia

Os valores de vazão de cheia obtidos através do Método I-PAI-WU estão dispostos na Tabela 5 abaixo, para termos de comparação e melhor análise de vazão na bacia hidrográfica de estudo, foi admitido o maior tempo de retorno (T) possível (limitado pelas equações de chuva utilizadas) para ambas as equações de Intensidade Duração e Frequência, nesse caso o de 75 anos.

Tabela 5: Vazões de cheia com T: 75 anos

Municípios	Vazões (m ³ /s)	
	Atlas	Plúvio
Itapecerica da Serra	463,61	466,29
Embu das Artes	373,82	478,77

Fonte: Autoria Própria, 2023

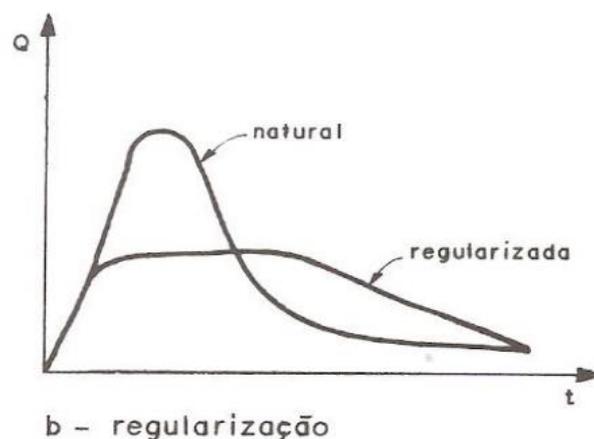
Analisando os valores obtidos para vazão de cheia nos dois municípios podemos identificar a influência da intensidade de chuva nos resultados de vazão, e novamente a discrepância entre as informações obtidas pelo Atlas Pluviométrico e o software Plúvio para o município de Embu das Artes.

Tal fato é esperado, uma vez que os outros elementos que compõem a equação final de I-PAI-WU, como a área de drenagem, o coeficiente de escoamento superficial e o coeficiente de distribuição espacial de chuva não variaram, por se tratar da mesma bacia. Sendo assim, a vazão de cheia é função exclusiva somente da intensidade de precipitação neste caso.

Cabe ressaltar, ainda, que foi desconsiderada a presença de barramentos ao longo da bacia. Estas estruturas regularizam a vazão de jusante. Barragens são estruturas projetadas para armazenar água durante períodos de chuva intensa e liberá-la de maneira gradativa ao longo do tempo, o que pode resultar em uma redução significativa na vazão de pico no exutório (a depender da quantidade desses dispositivos dentro da bacia e de sua localização), pois a liberação controlada evita picos repentinos de escoamento. Ou seja, a vazão de pico apresentada pode ter sido superestimada, mas ainda assim serve para demonstrar o comportamento da vazão crítica em um cenário hipotético. Uma análise mais aprofundada sobre esta questão pode ser realizada para ajustes quando da realização de projetos de drenagem urbana, por exemplo, bastando, para isso, delimitar as áreas das sub bacias a partir do reposicionamento do exutório destas.

Na figura 14 a seguir, pode-se perceber que um reservatório para regularização de vazão tende a reduzir o pico e distribuir o volume, enquanto que a ausência destes no interior da bacia tende a aumentar o pico.

Figura 14: Hidrograma típico de uma dinâmica natural e regularizada da vazão.



Fonte: TUCCI, 2004

Tendo isto em mente, pode-se entender com isso que, para estudos de vazão e planejamento urbano, a utilização de uma base dados atualizada será indispensável para projetos hidráulicos e principalmente drenagem urbana, pois nesse caso, se for utilizado os dados fornecidos pelo Plúvio 2.1 qualquer projeto de drenagem será superdimensionado, acarretando gastos desnecessários e obras muito maiores e mais complexas do que realmente deveriam ser.

O superdimensionamento de estruturas hidráulicas de drenagem urbana, que consiste em dimensionar essas estruturas para capacidades muito superiores às necessidades reais, pode levar a vários problemas e desafios, tais como: custos elevados, uso ineficiente de recursos, impactos ambientais, manutenções complexas, ineficácia operacional, dentre outras.

Em uma análise mais profunda podemos observar também que a recíproca pode ser verdadeira, onde a utilização de uma base de dados mais antiga acarreta o subdimensionamento de obras hidráulicas e de drenagem urbana e, portanto, pode provocar grandes enchentes e inundações além de diversos outros problemas de escoamento, principalmente em área urbanizadas.

O subdimensionamento dos componentes envolvidos nos sistemas de drenagem produz problemas relacionados à incapacidade dessas estruturas de lidar adequadamente com o volume de água durante eventos de chuva. Pode-se citar dentro deste contexto: maior risco para enchentes e inundações, riscos à segurança, aumento da vulnerabilidade diante do cenário de mudanças climáticas, dentre outros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de I-PAI-WU se mostrou uma ótima modelagem para obtenção de vazões de cheia para a sub-bacia hidrográfica do rio Embu Mirim, é um método bastante estudado e revisado de simples obtenção de dados e por considerar uma gama de parâmetros sobre as características da bacia, temos nos resultados a segurança de um valor o mais próximo possível da realidade.

Analisando as vazões obtidas nesse trabalho ficou clara a direta ligação das equações de chuvas intensas, e conseqüentemente seus valores, no cálculo de obtenção de vazões de cheia. A base de dados utilizada afeta os resultados e conseqüentemente todo projeto que futuramente pode vir a se basear nesses valores.

Por isso, se faz necessário sempre a utilização de dados recentes e de qualidade para uma modelagem mais segura e fidedigna. Referências de órgãos oficiais e utilização de softwares mais novos trazem melhores resultados de chuva – vazão. Dito isso, também cabe citar o olhar atento desses órgãos para revisões periódicas das equações de chuva no país, pois já se percebe diferença em um espaço de tempo de 18 anos.

Por fim, espera-se que esse trabalho possa servir como base para estudos futuros de planejamento urbano, drenagem e/ou impermeabilização, bem como processos de tomadas de decisão e políticas públicas para toda região que envolve a sub-bacia do rio Embu Mirim.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, A. M. Modelo de Previsão de Vazão Baseado no Hidrograma Unitário. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 165, out./dez. 2001. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/39/a7c88f5ecbd8d63c8a1ee1047f80bf1c_c311c32d0c16dddc1da15db0c100a9e7.pdf. Acesso em: 16 nov. 2023.

BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BIANCHI, R. DE 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'EGA**, v. 25, p. 164–185, 2012.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.

DAEE. **Diretrizes de projeto para estudos hidrologicos: Método Racional**. São Paulo Departamento de água e Energia Elétrica, 1999.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estudos Hidrológicos**. São Paulo, 2006.

EMBU DAS ARTES. **Atlas socioambiental de Embu** (coordenação Marcos Antonio Melo, Maria Isabel Franco). Embu: Prefeitura da Estância Turística de Embu, 2008. Disponível em: https://www.somapalavraeforma.com.br/wp-content/uploads/2016/11/atlas_embu_2009_baixa.pdf. Acesso em: 16. nov. 2023.

FRITSCH, F. E. D. **Influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro, Pato Branco – PR**. 2013. UTFPR.

GENOVEZ, A. M. **Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do Estado de São Paulo**. Tese - Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1991.

GOLDENFUM, J.A.; TUCCI, C.E.M. **Hidrologia de águas superficiais**. 3. ed. Brasília: ABEAS, 1998.

HOLLANDA, M.P.; CECÍLIO, R.A.; CAMPANHARO, W.A.; ZANETTI, S.S.; GARCIA, G.O. Avaliação do TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 489–496, 2015

IBGE - Instituto Brasileiro e Geografia e Estatística (Brasil). **Cidades e Estados**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp.html>. Acesso em: 16 nov. 2023.

ITAPECERICA DA SERRA. Prefeitura Municipal de Itapecerica da Serra. **Plano Diretor de Turismo do Município de Itapecerica da Serra**. PDTur - Itapecerica, 2020. Disponível em: https://www.al.sp.gov.br/spl/2020/09/Propositura/1000334589_1000390115_Propositura.pdf. Acesso em: 05. dez. 2023

MELO NETO, J.O. et al. (2014). Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.19, n.1, p.177-188, Jan./Mar.

OLIVEIRA, L.F.C. Estimativa de chuvas intensas para o Estado de Goiás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1. p.22-33, 2008.

OLIVEIRA, L.F.C. et al. Intensidade-duração-frequência de chuvas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, n.35, p.13-18, 2005.

PRUSKI, F.F. **Hídros. Dimensionamento de sistemas hidroagrícolas**. Viçosa: Editora UFV. 2006. 259 p.

ROSA, Roberto. **Geotecnologias na geografia aplicada**. Revista do Departamento de Geografia, 16 (2005) 81-90. Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47288/51024>>.

SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. (2014). **Aplicação do modelo SWAT para a estimativa da produção de sedimentos na bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco**. XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Conference Paper, dez. 2014.

SCHMIDT, Tanara. **Seleção de área e dimensionamento de aterro sanitário para o consórcio público intermunicipal para assuntos estratégicos do G8 – CIPAE G8**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 15 dez. 2016.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method, *Eng. News Rec.*, v. 108, n. 14, p. 501-506, 1932.

SigRH. Governo do Estado de São Paulo. Divisão Hidrográfica. São Paulo. 2023. Disponível em: <<https://sigrh.sp.gov.br/divisaohidrografica>> Acesso em: 11 nov. 2023.

TOMAZ, P. Capítulo 2 - Método Racional. Em: **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. 1. ed. São Paulo: [s.n.]. v. 1p. 349, 2013

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação** 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

UFRRJ. **Hidrologia**: Capítulo 3, Bacia Hidrográfica. Rio de Janeiro, 2006. 22p.

WHEATER, H. S.; SOROOSHIAN, S.; SHARMA, H. D. **Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

WU, I. PAI. *Hydrology of small watersheds in Indiana and Hydrodynamics of overland flow*. Lafayette: [s. n.], 1963.