



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MÔNICA FERREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE TEMPO DE CONCENTRAÇÃO E SUA
INFLUÊNCIA NO CÁLCULO DA VAZÃO EM MICROBACIAS URBANAS**

TERESINA

2025

MÔNICA FERREIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE TEMPO DE CONCENTRAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA
NO CÁLCULO DA VAZÃO EM MICROBACIAS

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção do
diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil
do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí, Campus Teresina Zona Sul.

Orientador: Prof. Me. Israel de Oliveira Costa

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva, Mônica Ferreira da

S586a Avaliação de métodos de tempo de concentração e sua influência no cálculo da vazão em microbacias urbanas / Mônica Ferreira da Silva. - 2025.

86 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul, 2025.

Orientador : Prof Me. Israel de Oliveira Costa.

1. Drenagem urbana. 2. Inundações. 3. Tempo de concentração. I.Título.

CDD - 624

MÔNICA FERREIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE TEMPO DE CONCENTRAÇÃO E SUA INFLUÊNCIA
NO CÁLCULO DA VAZÃO EM MICROBACIAS

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção do
diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil
do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí, Campus Teresina Zona Sul

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Israel de Oliveira Costa (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ailton Soares Freire
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Kelson De Sousa Leite
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

À minha mãe, família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar e me fortalecer diante dos desafios enfrentados ao longo deste curso. Minha profunda gratidão à minha mãe Cleonice, e as tias Lucileide e Jacinta (in memoriam), que mesmo à distância, sempre me apoiaram nos momentos difíceis e compreenderam minha ausência enquanto me dedicava ao estudo.

Agradeço também ao meu companheiro de vida, Marcos José e a minha família pelo apoio. Meu reconhecimento especial ao meu orientador, Prof. Me. Israel Costa, e ao Prof. Dr. Ailton Freire, cujo auxílio foi fundamental para a realização deste trabalho.

Por fim, sou grata aos colegas e ex-colegas de turma que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada, André Lopes, Luís Paulo, e aos demais que de várias maneiras contribuíram para esta jornada. Também agradeço ao Prof. Algacir e a Lêda Ravena por suas contribuições.

“Confie no SENHOR de todo o teu coração e não te
estribes no teu próprio entendimento [...] Os que
confiam no SENHOR serão como o monte de Sião.”

Sl. 125, 1, p. 693; Pv. 3, 5, p.705.

RESUMO

O tempo de concentração é um parâmetro essencial na estimativa de vazões de pico em projetos hidrológicos, amplamente usado para se obter determinados valores nos cálculos de chuvas e hidrogramas. Representa o tempo necessário para que a água percorra toda a extensão da bacia hidrográfica, desde o ponto mais distante até o exutório. Esse parâmetro é influenciado por fatores como declividade, rugosidade do canal, comprimento do talvegue, uso e ocupação do solo e percentual de área impermeável. Compreender o comportamento da bacia em relação ao tempo de concentração é essencial para prevenir e mitigar os efeitos de desastres naturais. Apesar do seu impacto, é um desafio determinar o seu valor e encontrar a fórmula correta para se aplicar, ademais há uma dificuldade em se obter informações confiáveis sobre tais métodos. Existem diversas fórmulas para calcular o tempo de concentração, cada uma com a suas particularidades.

A presente monografia tem como objetivo comparar distintos métodos de cálculo do tempo de concentração em microbacias urbanas e avaliar como essas variações interferem nas vazões calculadas em uma microbacia específica. Este trabalho analisou 10 fórmulas recomendadas pelo Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem do DNIT, pelo Manual de Drenagem Urbana de Teresina e Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. Essas fórmulas foram aplicadas em uma microbacia urbana de Teresina, PD14, levando em consideração suas especificidades geográficas e hidrológicas.

O método usado para calcular a vazão foi utilizado a fim de estimar vazões de projeto por meio do software HEC-HMS, levando em consideração dados fisiográficos da bacia, em parte executados com dados do INPE e IBGE e auxílio do QGIS versão 3.28.8. Observou uma alta taxa de dispersão entre os métodos de cálculo do tempo de concentração, que podem levar a superdimensionamentos, subdimensionamento ou ao dimensionamento ideal.

Palavras-chave: Drenagem urbana; inundações; tempo de concentração.

ABSTRACT

Concentration time is an essential parameter in the estimation of peak flows in hydrological projects, widely used to obtain certain values in rainfall and hydrograph calculations. It represents the time required for the water to travel the entire length of the hydrographic basin, from the farthest point to the outlet. This parameter is influenced by factors such as slope, channel roughness, length of the thalweg, land use and occupation and percentage of impermeable area. Understanding the behavior of the basin in relation to concentration time is essential to prevent and mitigate the effects of natural disasters. Despite its impact, it is a challenge to determine its value and find the correct formula to apply, and there is a difficulty in obtaining reliable information about such methods. There are several formulas to calculate concentration time, each with its own particularities.

The objective of this monograph is to compare different methods of calculating the concentration time in urban watersheds and to evaluate how these variations interfere with the calculated flows in a specific watershed. This work analyzed 10 formulas recommended by the Manual of Basic Hydrology for Drainage Structures of DNIT, by the Manual of Urban Drainage of Teresina and Master Plan of Urban Drainage of Teresina. These formulas were applied in an urban watershed of Teresina, PD14, taking into account its geographical and hydrological specificities.

The method used to calculate the flow was used in order to estimate project flows by means of the HEC-HMS software, taking into account physiographic data of the basin, partially executed with data from INPE and IBGE and the aid of QGIS version 3.28.8. Observed a high rate of dispersion among the methods of calculating concentration time, which can lead to oversizing, undersizing or optimal sizing.

Keywords: Urban drainage; flooding; concentration of time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Tempo de concentração em uma bacia hidrográfica.....	14
Figura 2 – Interferência de fatores no tempo de concentração.....	14
Figura 3 - Mapa de uso e ocupação solo de Teresina – Piauí.....	17
Figura 4 - Sobreposição da sub-bacia PD14 no zoneamento de Teresina-PI.....	19
Figura 5 - Organograma influência do tempo de concentração.....	21
Figura 6 - Hidrograma Unitário Adimensional e Triangular.....	22
Figura 7 - Localização da sub-bacia PD14.....	29
Figura 8 - Sub-bacia PD14.....	29
Figura 9 - Principais macrobacias urbanas de Teresina - PI.....	31
Figura 10 - Rua Visconde da Parnaíba (Bairro Horto Florestal).....	32
Figura 11 - Alagamento em frente a um shopping na Av. Raul Lopes.....	33
Figura 12 - Alagamento nas margens do Rio Poti.....	33
Figura 13 - Alagamento na Zona leste de Teresina.....	34
Figura 14 - Modelo numérico do terreno da Sub-bacia PD14.....	36
Figura 15 – MDE Sub-bacia PD14.....	37
Figura 16 - Grupo hidrológico Sub-bacia PD14.....	40
Figura 17 - Processo de classificação do solo na sub-bacia PD14.....	40
Figura 18 - Processo de classificação usado na sub-bacia.....	42
Figura 19 - Mapa de uso e ocupação da terra na Sub-bacia PD 14.....	43
Figura 20 - Área permeável e impermeável da Sub-bacia PD 14.....	44
Figura 21 - Zoneamento e Sub-bacia PD 14.....	50
Figura 22- Parâmetro Curve Number do PDDUr.....	52
Figura 23 - Interface HEC-HMS.....	55
Figura 24 - Hietograma de projeto para chuva de 30 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de FAA - Método dos Blocos Alternados.....	57
Figura 25 - Hietograma de projeto para chuva de 32 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de George Ribeiro - Método dos Blocos Alternados.....	58
Figura 26 - Hietograma de projeto para chuva de 124 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Giandotti - Método dos Blocos Alternados.....	58
Figura 27 - Hietograma de projeto para chuva de 46 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Kirpich - Método dos Blocos Alternados.....	58
Figura 28 - Hietograma de projeto para chuva de 68 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos,	

Tempo de concentração fórmula de Kirpich Modificada - Método dos Blocos Alternados	59
Figura 29 - Hietograma de projeto para chuva de 112 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Pasini - Método dos Blocos Alternados	59
Figura 30 - Hietograma de projeto para chuva de 44 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Picking - Método dos Blocos Alternados	59
Figura 31 - Hietograma de projeto para chuva de 14 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Schaake - Método dos Blocos Alternados	60
Figura 32 - Hietograma de projeto para chuva de 108 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Ventura - Método dos Blocos Alternados	60
Figura 33 - Hietograma de projeto para chuva de 14 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Ventura - Método dos Blocos Alternados	60
Figura 34 - Gráfico do hietograma - Tc FAA	61
Figura 35 - Sumário da simulação - Tc FAA	61
Figura 36 - Gráfico simulação para Tr=10 anos - Tc FAA	62
Figura 37 - Gráfico do hietograma - Tc George Ribeiro	62
Figura 38 - Sumário da simulação - Tc George Ribeiro	63
Figura 39 - Gráfico simulação para Tr=10 anos - Tc George Ribeiro	63
Figura 40 - Gráfico do hietograma - Tc Giandotti	64
Figura 41 - Sumário da simulação - Tc Giandotti	64
Figura 42 - Gráfico simulação para Tr=10 anos - Tc Giandotti	65
Figura 43 - Gráfico do hietograma - Tc Kirpich	65
Figura 44 - Sumário da simulação – Tc Kirpich	66
Figura 45 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc Kirpich	66
Figura 46 - Gráfico do hietograma – Tc Kirpich Modificada	67
Figura 47 - Sumário da simulação – Tc Kirpich Modificada	67
Figura 48 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc Kirpich Modificada	68
Figura 49 - Gráfico do hietograma – Tc Pasini	68
Figura 50 - Sumário da simulação – Tc Pasini	69
Figura 51 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc Pasini	69
Figura 52 - Gráfico do hietograma – Tc Picking	70
Figura 53 - Sumário da simulação – Tc Picking	70
Figura 54 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc Picking	71
Figura 55 - Gráfico do hietograma – Tc Schaake	71
Figura 56 - Sumário da simulação – Tc Schaake	72

Figura 57 - Gráfico simulação para $T_r=10$ anos – Tc Schaake.....	72
Figura 58 - Gráfico do hietograma – Tc SCS Lag.....	73
Figura 59 - Sumário da simulação – Tc SCS Lag.....	73
Figura 60 - Gráfico simulação para $T_r=10$ anos – Tc SCS Lag.....	74
Figura 61 - Gráfico do hietograma – Tc Ventura.....	74
Figura 62 - Sumário da simulação – Tc Ventura.....	75
Figura 63 – Variação do tempo de concentração de acordo com a metodologia de cálculo	76
Figura 64 - Variação da vazão de pico de acordo com a metodologia de cálculo do tempo de concentração	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Causas e efeitos da urbanização	12
Tabela 2 - Fórmulas de tempo de concentração testadas Fórmulas de tempo de concentração testadas	18
Tabela 3 - Condições de umidade antecedente do solo para estimativa do CN	24
Tabela 4 - Nebulosidade registrada na estação meteorológica em Teresina.....	41
Tabela 5 - Área (%) de uso e cobertura do solo na Sub-bacia.....	43
Tabela 6 - Informações fisiográficas da PD14 usadas para auxiliar na determinação do tempo de concentração	44
Tabela 7 - Referencial bibliográfico	45
Tabela 8 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas	50
Tabela 9 - Cálculo CN da Sub-bacia PD14	51
Tabela 10 - Parâmetros para cálculo de vazão de pico e Modelagem do escoamento	53
Tabela 11 - Tempo de concentração calculado	55
Tabela 12 - Quadro resumo resultado das simulações.....	75
Tabela 13 - Análise do tempo de concentração	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipologia do solo em Teresina.....	37
Quadro 2 - Correlação entre as classes de solos da Classificação Brasileira e os grupos de solos do SCS.....	38
Quadro 3 - CN de acordo com o uso ou ocupação do solo	51
Quadro 4 - Chuva de projeto Tc Schaake	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CN	Curve Number
DMAPU	Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HEC-HAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
HUT	Hidrograma unitário Triangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
INEMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
IPCC	Intergovernmental Panel On Climate Change
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PDDUr	Plano Diretor de Drenagem Urbana
PDOT	Plano Diretor de Ordenamento Territorial
PMT	Prefeitura Municipal de Teresina
QGIS	Quantum GIS
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema integrado de Georreferenciamento
SNIS	Sistema Nacional de informações sobre Saneamento
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
ZCIT	Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ	Fator de condutância
%	Porcentagem
Δ	Variação
σ	Desvio padrão
$\bar{x}$	Média aritmética
x_i	Soma de todas as observações
x_n	Elementos
Σ	Somatório
T_c	Tempo de concentração
T_r	Tempo de retorno
i	Intensidade de precipitação
A	Área
km^2	Quilometro quadrado
L	Comprimento do talvegue
S	Declividade
A_{imp}	Fração de área impermeável
min	Minutos
h	Horas
Q_p	Vazão de pico
m^3/s	Metro cúbico por segundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.2 OBJETIVO	11
1.2.1 OBJETIVO GERAL	11
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE MICROBACIAS	11
2.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (T_c)	13
2.2.1 DECLIVIDADE	14
2.2.2 RUGOSIDADE DO CANAL	15
2.2.3 TALVEGUE	15
2.2.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	16
2.2.5 ÁREA IMPERMEÁVEL	17
2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	18
2.4 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO NA VAZÃO	20
2.5 VAZÃO DE PROJETO PELO MÉTODO DO HIDROGRAMA TRIANGULAR SINTÉTICO	21
2.5.1 MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO	23
2.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA EM MICROBACIAS E GEOPROCESSAMENTO	23
2.6.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA	23
2.6.2 SOFTWARE HEC-HMS	25
2.6.3 GEOPROCESSAMENTO	26
2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	26
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
3.1 METODOLOGIA	28
3.2 ÁREA DE ESTUDO	28
3.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DA MICROBACIA	30
3.3.1 CARACTERIZAÇÃO AS SUB-BACIA	30
3.3.2 CLASSIFICAÇÃO DO CLIMA DA ÁREA DE ESTUDO	34
3.3.3 CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO DA ÁREA DE ESTUDO	35
3.3.4 TIPOS DE SOLO NA ÁREA EM ESTUDO	37
3.3.5 RELEVÂNCIAS DAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS	44
3.3.6 CURVE NUMBER(CN) PELO MÉTODO SCS	49
3.3.7 DADOS DE PRECIPITAÇÃO	52
3.8 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA HEC-HMS	53

4 RESULTADOS	55
4.1 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	55
4.2 HIDROGRAMAS DAS VAZÕES	56
4.2.1 HIETOGRAMA BLOCOS ALTERNADOS.....	56
4.2.2 IMPACTO DAS VAZÕES DE PICO CALCULADAS	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A população mundial cresceu significativamente nos últimos anos, no ano de 2000, aproximadamente 6,1 bilhões de pessoas, em 2023 esse número passou a ser 8,045 bilhões. As projeções populacionais indicam que o crescimento continuará, atingindo um pico de 10,3 bilhões de habitantes no futuro próximo de 50 ou 60 anos, superando a população estimada para o ano de 2024 que era de 8,2 bilhões (ONU, 2024).

Em 1950, a população brasileira era estimada em cerca de 53 milhões de pessoas, aumentando para aproximadamente 174 milhões no ano 2000. Esse crescimento foi impulsionado principalmente pela transição demográfica que começou a ocorrer no período, com redução das taxas de mortalidade precedendo a queda nas taxas de natalidade. O Brasil está entre os países da América Latina que devem chegar ao pico populacional por volta do ano de 2040 (ONU, 2024).

Com o crescimento populacional, surgem diversas necessidades, entre elas a demanda por novas moradias, vias e outras infraestruturas, levando assim a um aumento na área impermeável do solo. Compreender a evolução populacional e sua expressão no espaço urbano é fundamental para políticas públicas, como as de mobilidade e infraestrutura (Givisez et al., 2008). Segundo Maricato e Cunha (2002), o crescimento populacional intensifica a demanda por habitações, que frequentemente leva ao desordenamento urbano, isso porque as cidades, a princípio, foram concebidas principalmente para corresponder interesses político-econômicos e de dominação, impactando negativamente a organização do espaço urbano (Guilherme; Oliveira; Laranja, 2020). No Brasil, o desordenamento urbano é uma questão histórica, que evidencia o impacto da expansão desorganizada das cidades na infraestrutura e na qualidade de vida das populações. Este crescimento da impermeabilização do solo impacta diretamente a capacidade de infiltração e na rápida concentração do escoamento, aumentando o risco de inundações e sobrecarregando os sistemas de drenagem (Tucci, 2007).

Consequente ao desordenamento urbano, surgiram os planos diretores a fim de enfrentar os desafios decorrentes desse processo. O plano diretor é uma lei municipal que regula todo o território do município, estabelecendo diretrizes que indicam o funcionamento, crescimento e desenvolvimento (PDDrU de Teresina, 2020). A concepção de planos diretores de drenagem urbana é uma estratégia imensamente indicada e constitui estratégia primordial para a aquisição

de boas soluções de drenagem urbana (Tucci, 2001). Os planos diretores garantem o ordenamento do uso do solo e o desenvolvimento sustentável das cidades. No Brasil, seu surgimento está relacionado à Constituição Federal de 1988 e ao Estatuto da Cidade (Lei 10.257/2001), que instituíram diretrizes para cidades com mais de 20 mil habitantes. Teresina foi a primeira capital do Brasil a ser planejada no ano de 1852. No final da década de 1960 foi elaborado o primeiro plano diretor da capital piauiense, o Plano de Desenvolvimento Local Integrado (PDLI), seguido por outros planos até o atual Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDrU), elaborado em 2010.

O PPDDrU de Teresina é fundamental na mitigação dos riscos de inundações em microbacias urbanas. As infraestruturas no âmbito da drenagem urbana são projetadas com finalidade a garantir a segurança da população durante eventos de enchentes específicos, ainda que exista a possibilidade de que essas estruturas não sejam capazes de suportar eventos de enchente mais intensos do que aqueles para os quais foram projetadas. Dessa forma, torna-se imprescindível o planejamento e a execução de projetos de drenagem urbana na mitigação de impactos das chuvas em áreas urbanizadas, prevenindo alagamentos e garantindo a segurança da população. Na elaboração desses projetos há diversos critérios a serem considerados. Um aspecto crucial nesse cenário é a estimativa do tempo de concentração. Existem diversos métodos para calcular o tempo de concentração (T_c) em áreas urbanas, Silveira (2005) analisa diferentes fórmulas para estimar o tempo de concentração em bacias urbanas, destacando a relevância de considerar as características específicas de cada região.

Os estudos hidrológicos são fundamentados na análise das quase repetições dos padrões de precipitação, embora a sequência histórica observada no passado não se repita exatamente no futuro, suas principais tendências permanecem consistentes (Pinto et al., 1976).

Em área urbanas e rurais, a redução do tempo de concentração influencia diretamente a vazão, visto que escoamentos mais rápidos resultam em picos de vazão mais intensos. A aplicação de métodos de cálculo para o tempo de concentração torna-se, assim, essencial para a engenharia hidrológica e o planejamento urbano. Estudos como o de Oliveira (2013) e Silveira (2005) destacam que o tempo de concentração varia conforme as características físicas da bacia e o tipo de ocupação do solo, e que diferentes métodos de cálculo podem apresentar variações consideráveis nas estimativas de vazão em bacias urbanas. Neste contexto, a seleção do método adequado torna-se crucial, dado que uma estimativa imprecisa pode levar a superestimções ou subestimções das vazões de projeto, comprometendo a eficiência e a segurança das infraestruturas hidráulicas, resultando em projetos de infraestrutura inadequados e crescimento

da suscetibilidade a eventos extremos.

A seleção da capital piauiense, Teresina, ocorreu em razão da sua localização geográfica, “entre” rios. Ademais, o município exerce uma forte influência sobre cidades adjacentes e está se desenvolvendo como um aglomerado com características metropolitanas, devido ao peso das atividades relacionadas à sua função político-administrativa (Rodrigues Neto; Lima, 2019).

1.2 OBJETIVO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo comparar e avaliar diferentes métodos de cálculo do tempo de concentração na Sub-bacia PD14 e analisar como essas variações influenciam as vazões calculadas em uma determinada microbacia.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar e comparar métodos de tempo de concentração (T_c);
- Identificar o método que apresenta melhor ajuste à realidade da microbacia em estudo, levando em consideração especificidades geográficas e hidrológicas, por meio de análise estatística: média aritmética, variância, desvio padrão e coeficiente de variação;
- Contribuir para a gestão de recursos hídricos urbanos, oferecendo uma base para escolhas mais precisas na modelagem hidrológicas

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE MICROBACIAS

O desordenamento urbano traz diversos desafios para a própria sociedade, inclusive para os sistemas de drenagem pluvial, pois influencia a capacidade de infiltração e no período de concentração do fluxo, potencializando o risco de inundações e excedendo a capacidade operacional dos sistemas de drenagem. O uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas sem o prévio planejamento podem levar a

inundações (Teresina, 2020).

Tabela 1 - Causas e efeitos da urbanização

Causas	Efeitos
Impermeabilização	Maiores picos e vazões
Redes de drenagem	Maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água
	Entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgoto deficientes	Degradação da qualidade da água
	Doenças de veiculação hídrica
	Inundações
Desmatamento e	Maiores picos e volumes
Desenvolvimento Indisciplinado	Mais erosão
	Assoreamento em canais e galerias
	Maiores prejuízos
Ocupação de várzeas	Maiores picos
	Maiores custos de utilidades públicas

Fonte: Adaptado de Tucci, 2001

A partir da análise de microbacias hidrográficas é possível avaliar o estado de conservação de nascentes e a qualidade da água, além de auxiliar no planejamento do uso do solo. Estudos como o de Pieroni et al. (2019) enfatizam a importância de analisar o estado de conservação das nascentes em microbacias, fornecendo subsídios para ações de preservação. Além disso, a caracterização de microbacias por meio de geotecnologias, conforme discutido por Santos, Galvão e Roberts (2008), contribui para um melhor entendimento das dinâmicas ambientais e do uso da terra. O manejo integrado em microbacias hidrográficas, abordado por Santana (2003), enfatiza estratégias para o uso sustentável dos recursos naturais, garantindo a sustentabilidade hídrica e ambiental.

O estudo de microbacias envolve o conhecimento do ciclo hidrológico, seus componentes e as respectivas interações. Os filósofos gregos fizeram tentativas equivocadas de explicar o ciclo hidrológico, mas foi somente Marcus Vitruvius Pollio (100 a.C.) que apresentou conceitos aproximados do entendimento atual desse ciclo (Tucci, 1993). Segundo Silveira (1993), “O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre”. Compreender adequadamente o ciclo hidrológico natural é fundamental para identificar de forma precisa os impactos provocados pelo processo de urbanização.

A morfometria de bacia desempenha um papel essencial no ciclo hidrológico,

impactando diretamente os aspectos relativos à infiltração, à evapotranspiração e ao escoamento superficial e subsuperficial (Rodrigues et al., 2008).

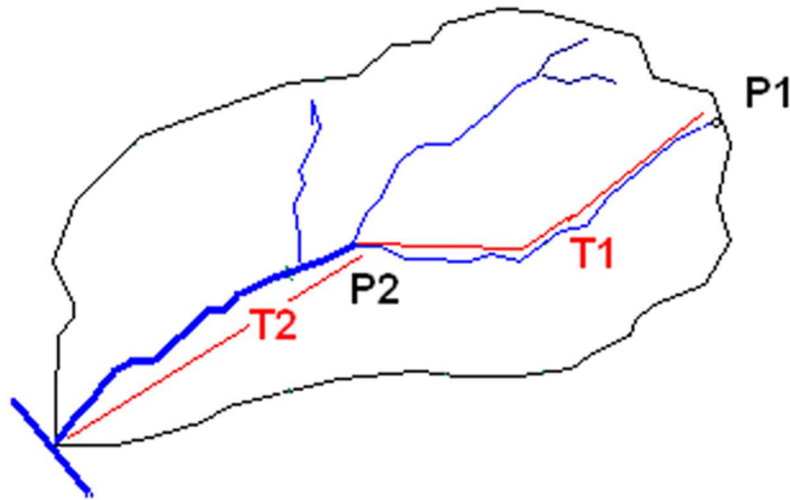
As microbacias hidrográficas dispõem de características físicas e hidrológicas elementar para entender sua dinâmica. A área, o perímetro, a declividade e o uso do solo influenciam o escoamento, infiltração e erosão. A densidade de drenagem, o índice de circularidade e a relação de relevo afetam a rapidez e a eficiência da resposta hidrológica a chuvas. Tucci e Santos (1993), ressaltam a importância dessas características para modelagem hidrológica, planejamento e manejo sustentável dos recursos hídricos, garantindo conservação ambiental e mitigação de impactos.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDUr) elaborado em 2010, é um manual elaborado pela equipe da PMT, cujo objetivo é orientar ações e políticas públicas voltadas para a gestão eficiente das águas pluviais na cidade, através de metodologias padronizadas e reconhecidas, visando diminuir o tempo de avaliação e minimizar subjetividades nos resultados técnicos (Teresina, 2010).

2.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (T_c)

O tempo de concentração (t_c) é um parâmetro hidrológico que surge da premissa que a bacia hidrográfica responde à precipitação como um sistema linear na geração do escoamento superficial direto (ESD) (Silveira, 2005). Com base nessa premissa, o tempo de concentração é definido como o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo no exutório. Pinto et al. (1976) define como o espaço de tempo para que toda a área de drenagem passe a contribuir na seção analisada. Sob essa condição teórica de resposta linear, o t_c , representa o tempo necessário para que se atinja o equilíbrio hidrológico, caracterizado pelo regime permanente entre uma chuva efetiva de intensidade constante e o ESD correspondente (Silveira, 2005). Segundo o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDUr) (Teresina, 2010) é o tempo que uma gota de chuva, que atinge a região mais extrema da bacia hidrográfica, leva para chegar ao exutório. A Figura 1 mostra esse ciclo, se uma gota de água cair no ponto P1 e houver escoamento, a água seguirá pelas áreas mais inclinadas até o curso d'água principal ponto P2 e, dali, fluirá pelo rio até a saída da bacia hidrográfica.

Figura 1- Tempo de concentração em uma bacia hidrográfica

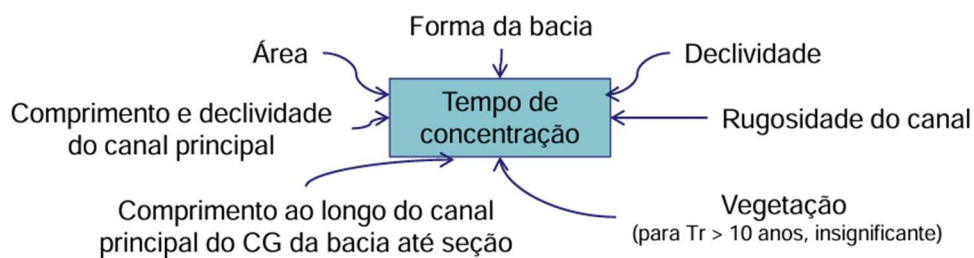


Fonte: Teresina, 2010

É um parâmetro essencial para a definição de vazões de pico em bacias urbanas (Pereira, 2007), e para a modelagem hidrológica, por permite a análise de enchentes e o dimensionamento de sistemas de drenagem (Medeiros, 2010).

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica sofre influência de diversos fatores físicos e ambientais, declividade, rugosidade, tipo de solo, uso e ocupação do solo, forma da bacia e comprimento e sinuosidade dos cursos de água (Figura 2) (Gonçalves, 2015).

Figura 2 – Interferência de fatores no tempo de concentração



Fonte: Kishi, 2019

2.2.1 DECLIVIDADE

A declividade do terreno afeta diretamente a velocidade do escoamento superficial, pois a velocidade é limitada pela declividade do terreno (Barbosa, 2004). Terrenos com maior inclinação tendem a acelerar o fluxo da água, um menor T_c . Em contrapartida, regiões com declividades suaves retardam ocasionando o escoamento, elevando o T_c . Silveira (2005) destaca a importância desse parâmetro para a estimativa

do Tc.

No contexto do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDUr), a declividade das bacias hidrográficas é um fator primordial para o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas e a eficácia das medidas de controle de cheias, por exemplo, no dimensionamento dos reservatórios de retenção. Medidas referente a inclinação do solo em relação a superfície. Diversos fatores são avaliados através da declividade, bem como o risco de erosão e a velocidade de escoamento (Teresina, 2010).

2.2.2 RUGOSIDADE DO CANAL

A rugosidade em hidrologia refere-se à resistência que a superfície de um canal ou leito de rio oferece ao escoamento da água. Essa resistência é influenciada por fatores como a textura do leito, presença de vegetação, irregularidades e obstáculos naturais ou artificiais. Negri e Fill (2023) realizam um estudo em 14 bacias hidrográficas e na metodologia analisaram a correlação entre fatores morfométricos, a fim de identificar padrões de relação com foco no coeficiente de rugosidade da bacia, já que permite a síntese da geometria espacial tridimensional da bacia hidrográfica.

Conforme Tucci (1980 *apud* Lyra et al., 2010) a escassez de informações detalhadas, além da dificuldade em estimar com precisão a rugosidade do canal, compromete a confiabilidade das simulações hidrodinâmicas. O coeficiente de rugosidade de Manning frequentemente é aplicado na modelagem hidrológica de cursos d'água (Ab. Ghani et al., 2007 *apud* Lyra et al., 2010).

2.2.3 TALVEGUE

O termo "talvegue" é bastante usado em hidrologia para designar a linha que marca a parte mais profunda de um vale ou leito de rio, indicando o percurso natural do escoamento das águas. Essa linha representa a direção principal do fluxo e coincide com a área de maior velocidade da correnteza. A palavra tem origem no alemão "thalweg", que se traduz como "caminho do vale". Corresponde à superfície inclinada do terreno, de uma margem de rio ou da face de uma represa (Piroli, 2022).

De acordo com Tucci (2009), o talvegue é considerado "a linha de maior profundidade dentro de um vale ou leito de rio, onde a água flui com maior

intensidade". Silveira (2011) reforça a importância do talvegue em sistemas de drenagem urbana, observando que "a correta identificação do talvegue é fundamental para o dimensionamento de coletores pluviais e para o controle de enchentes e alagamentos", conseqüentemente o comprimento dos talvegues interfere no tempo de concentração da bacia.

2.2.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

No sistema de infiltração a água passa por uma parcela de terra denominada zona de aeração, constituída de vazios que são preenchidos parcialmente por água e por ar, parte da água infiltrada no solo alimenta os seres vivos, evapora ou continua o movimento descendente (Iritani e Ezaki, 2008). Porém quando o terreno passa por ações antrópicas, esse processo da natureza sofre interferência.

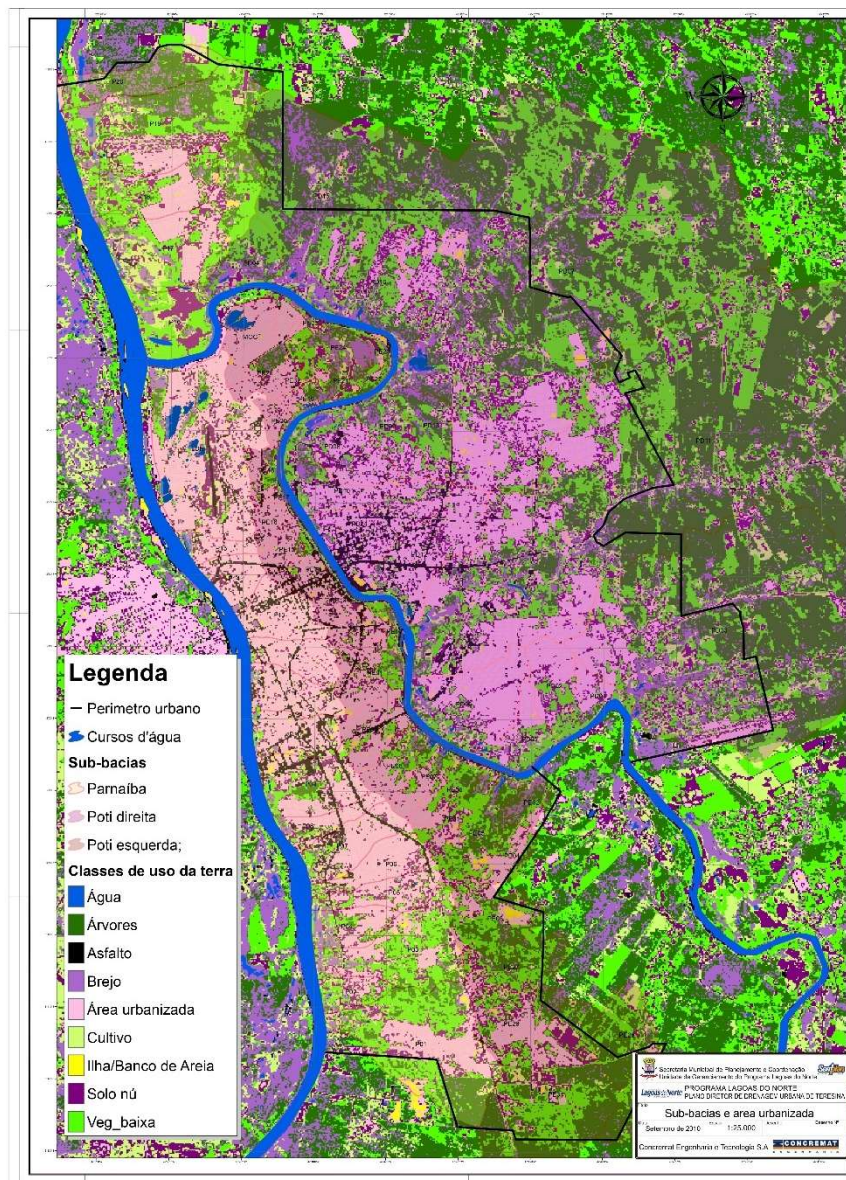
As dinâmicas hidrológicas são fortemente condicionadas ao grau de impermeabilidade do solo (Teresina, 2010). As atividades humanas alteram as características naturais da bacia, impactando o escoamento superficial. Áreas urbanizadas com alta impermeabilização reduzem a infiltração e aumentam o escoamento, diminuindo o Tc. Portanto, é relevante que o poder público regulamente o uso e ocupação do solo, principalmente em regiões sujeitas a inundações (Teresina, 2010).

Vanzela, Hernandez e Franco (2010) por meio do estudo realizado no Córrego Três Barras em Marinópolis, atestaram que áreas ocupadas por matas e com pastagens de pouca intensidade propiciam um crescimento da vazão específica e o aprimoramento de certas características da qualidade da água, o inverso ocorre quando se tem áreas urbanizadas.

O cenário de uso e ocupação do solo são parâmetros essenciais que servem como base para a simulação chuva-vazão, já que os hidrogramas de projeto são influenciados tipo e grau de impermeabilização do solo (Teresina 2010). Existem diversas formas de classificar a cobertura e uso do solo, Calil, Oliveira e Kliemann (2012) fazem essa classificação da seguinte forma: vegetação (VR, VC), reflorestamento (R/F), pastagem (PC), agricultura (AT, AM), área urbanizada (AU) e área de proteção permanente. Já Vaeza et al. (2011): áreas impermeáveis dentro das quadras, áreas permeáveis dentro das quadras, vegetação rasteira, ruas e calçadas,

florestas, telhados e lagoas. O Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDUr) (Teresina 2010), no mapa de uso e ocupação da terra de Teresina (Figura 3), a cobertura do solo é classificada em diferentes categorias, incluindo: água, árvores, asfalto, brejo, área urbanizada, cultivo, ilha/banco de areia, solo nu e vegetação baixa.

Figura 3 - Mapa de uso e ocupação solo de Teresina – Piauí



Fonte: Teresina, 2010

2.2.5 ÁREA IMPERMEÁVEL

A área impermeável de uma bacia hidrográfica é a porção do solo que não permite a infiltração da água da chuva. Nas áreas urbanizadas, a substituição de superfícies naturais por pavimentos e edificações reduz a infiltração da água no solo

contribuindo para o aumento da área impermeável de uma determinada região. As áreas impermeáveis em bacias hidrográficas proporcionam expressiva aumento no escoamento superficial (Tucci, 2007, 2009).

Superfícies impermeáveis, como asfalto e concreto, reduzem a rugosidade do terreno, permitindo que a água escoe rapidamente e diminuindo o tempo de resposta hidrológica. Segundo pesquisas realizadas no Brasil em áreas urbanas, bacias com alta taxa de impermeabilização, o tempo de concentração pode ser reduzido pela metade em comparação a uma bacia com características naturais (Silveira et al., 2016).

2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Como enfatiza Silva (1998), a análise comparativa entre métodos permite identificar aqueles que apresentam melhor ajuste à realidade das bacias brasileiras, considerando suas especificidades geográficas e hidrológicas. Existem diversas fórmulas para se estimar o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica que podem resultar em valores divergentes, dependendo das variáveis e dos parâmetros considerados em cada método. Em 2005, Silveira em um estudo, avaliou o desempenho de 23 fórmulas de Tempo de Concentração em bacias urbanas e rurais.

Tabela 2 - Fórmulas de tempo de concentração testadas

Nome	Equação
Izzard	$T_c = 85,5(i/3628 + Cr)i^{-0,667}L^{0,33}S^{-0,333}$
Kerby-Hathaway	$T_c = 0,619N^{0,47}L^{0,47}S^{-0,235}$
Onda Cinemática	$T_c = 7,35n^{0,6}i^{-0,4}L^{0,6}S^{-0,3}$
FAA	$T_c = 0,37(1,1 - C)L^{0,5}S^{-0,333}$
Kirpich	$T_c = 0,0663L^{0,77}S^{-0,385}$
SCS Lag	$T_c = 0,057(1000/CN-9)^{0,7}L^{0,8}S^{-0,5}$
Simas-Hawkins	$T_c = 0,322A^{0,594}L^{-0,594}S^{-0,150}S_{scs}^{0,313}$
Ven te Chow	$T_c = 0,160L^{0,64}S^{-0,32}$
Dooge	$T_c = 0,365A^{0,41}S^{-0,17}$
Johnstone	$T_c = 0,462L^{0,5}S^{-0,25}$
Corps Engineers	$T_c = 0,191L^{0,76}S^{-0,19}$
Giandotti	$T_c = 0,0559(4,0A^{0,5} + 1,5L)L^{-0,5}S^{-0,5}$
Pasini	$T_c = 0,107A^{0,333}L^{0,333}S^{-0,5}$
Ventura	$T_c = 0,127A^{0,5}S^{-0,5}$
Picking	$T_c = 0,0883L^{0,667}S^{-0,333}$
DNOS	$T_c = 0,419k^{-1}A^{0,3}L^{0,2}S^{-0,4}$
George Ribeiro	$T_c = 0,222(1,05-0,2p)^{-1}LS^{-0,04}$
Schaake et. al	$T_c = 0,0828L^{0,24}S^{-0,16}A_{imp}^{-0,26}$
McCuen et. al	$T_c = 2,25i^{-0,7164}L^{0,5552}S^{-0,2070}$

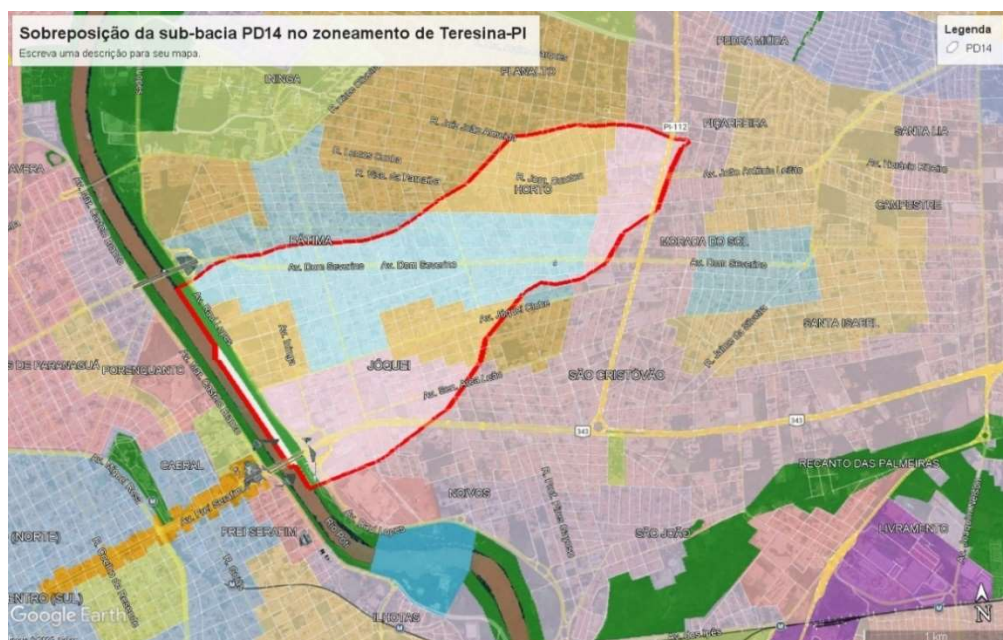
Carter	$T_c = 0,0977L^{0,6}S^{-0,3}$
Eagleson	$T_c = 0,274nR^{-0,67}LS^{-0,5}$
Desbordes	$T_c = 0,0869A^{0,3039}S^{-0,3832}A_{imp}^{-0,4523}$
Espey-Winslow	$T_c = 00,343\Phi L^{0,29}S^{-0,145}A_{imp}$

Fonte: Silveira, 2005

Em 2005 o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) através do Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem analisou 15 fórmulas para calcular o tempo de concentração (Brasil, 2005). Nessa avaliação se destacaram 06 fórmulas que são recomendadas pelo órgão, Kirpch, Kirpch Modificada, DNOS, George Ribeiro, Pasini e Ventura, tais fórmulas foram analisadas em diferentes bacias de pequeno, médio e grande porte.

De acordo com a Lei nº 5.481/2019 e Lei Complementar Nº 5.807 de 2022 do Plano Diretor de Ordenamento Territorial de Teresina (PDOT), que estabelecem as regras para o zoneamento, parcelamento e uso do solo urbano no município de Teresina, além de outras disposições, a microbacia em estudo está situada na Macrozona de Desenvolvimento (MZD), Macrozona de Ocupação Moderada (MOM), e na Macrozona de Interesse ambiental (MZIA) (Figura 4), em suma zona urbana de Teresina, logo foram testadas neste trabalho, em sua maioria fórmulas que possuem aplicabilidade em microbacias urbanas.

Figura 4 - Sobreposição da sub-bacia PD14 no zoneamento de Teresina-PI



Fonte: Google Earth, 2025

Este trabalho investigará o desempenho de 10 métodos para se obter tempo de concentração e seu impacto no cálculo da vazão. As fórmulas para o tempo de

concentração são baseadas nas diretrizes do PDDUr (Teresina, 2010), no Manual de Drenagem do PDDUr (Teresina, 2011), Silveira (2005), Azevedo Netto e Villela (1969), Pinto et. al (1970), Tucci (1993) e no Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem do DNIT (Brasil, 2005). Estudos anteriores demonstraram que os métodos descritos nestes dois últimos documentos apresentaram resultados satisfatórios, mesmo quando aplicados em bacias diferentes daquelas para as quais foram originalmente desenvolvidos.

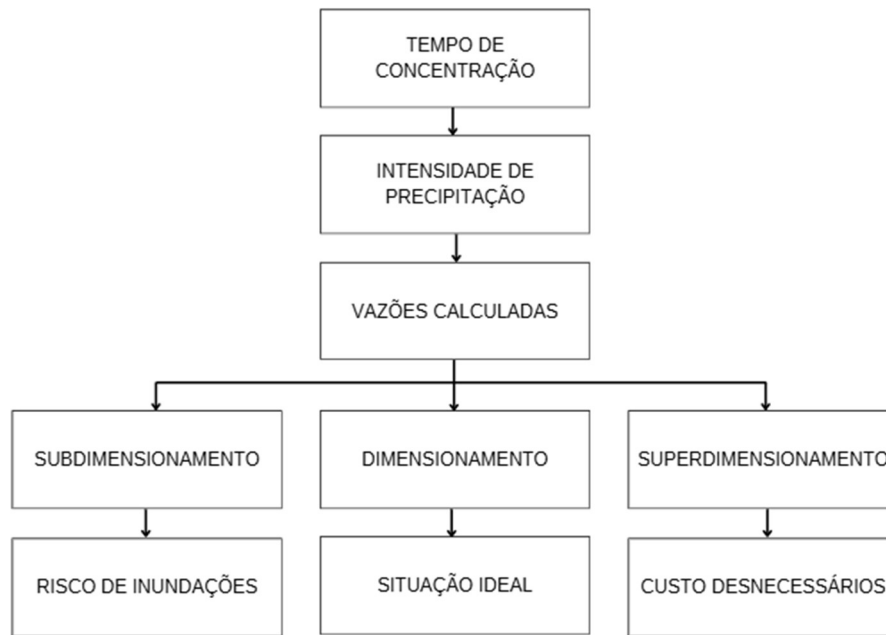
2.4 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO NA VAZÃO

O tempo de concentração interfere diretamente o cálculo da vazão de pico, que é a vazão máxima durante uma precipitação. A relação entre o tempo de concentração e a vazão é inversamente proporcional, ou seja, um tempo de concentração curto indica que a bacia reage de forma rápida aos eventos de precipitação, o que por sua vez gera uma concentração rápida do escoamento superficial e por fim uma vazão de pico mais elevada. Já o tempo de concentração longo indica que a bacia responde de forma mais lenta, proporcionando assim que uma parcela de água infiltre ou evapore, ocasionando uma vazão de pico menor.

A variação nos valores de tempo de concentração em bacias hidrográficas desempenha um papel crucial na gestão de recursos hídricos e no controle de inundações (Figura 5). Alterações nesse parâmetro podem modificar significativamente a resposta hidrológica de uma bacia, afetando a previsão de vazões de pico e a eficácia de estruturas de drenagem que por sua vez podem ser subdimensionadas ou superdimensionadas. Por exemplo, um aumento no tempo de concentração pode indicar uma resposta mais lenta da bacia a eventos de precipitação, potencialmente reduzindo o risco de inundações repentinas, caso o t_c real da bacia seja menor do que o t_c usado para o dimensionamento os dispositivos dimensionados não conseguirão suportar a vazão, resultando em inundações e até mesmo em desastres. Por outro lado, uma diminuição pode levar a respostas mais rápidas, aumentando o risco de inundações que se não for calculado de forma adequada pode levar a adoção de alternativas que levem os dispositivos de drenagem ao superdimensionamento, gerando assim uso e gestão de recursos inadequados. Portanto, compreender e monitorar a variabilidade do tempo de concentração é essencial para o planejamento e

implementação de medidas eficazes de controle de inundações e para a alocação sustentável dos recursos hídricos. Estudos indicam que a variabilidade climática gera impactos em todo o sistema de recursos hídricos, demandando adaptações e ajustes nos instrumentos e práticas de gestão.

Figura 5 - Organograma influência do tempo de concentração



Fonte: Autor, 2025

2.5 VAZÃO DE PROJETO PELO MÉTODO DO HIDROGRAMA TRIANGULAR SINTÉTICO

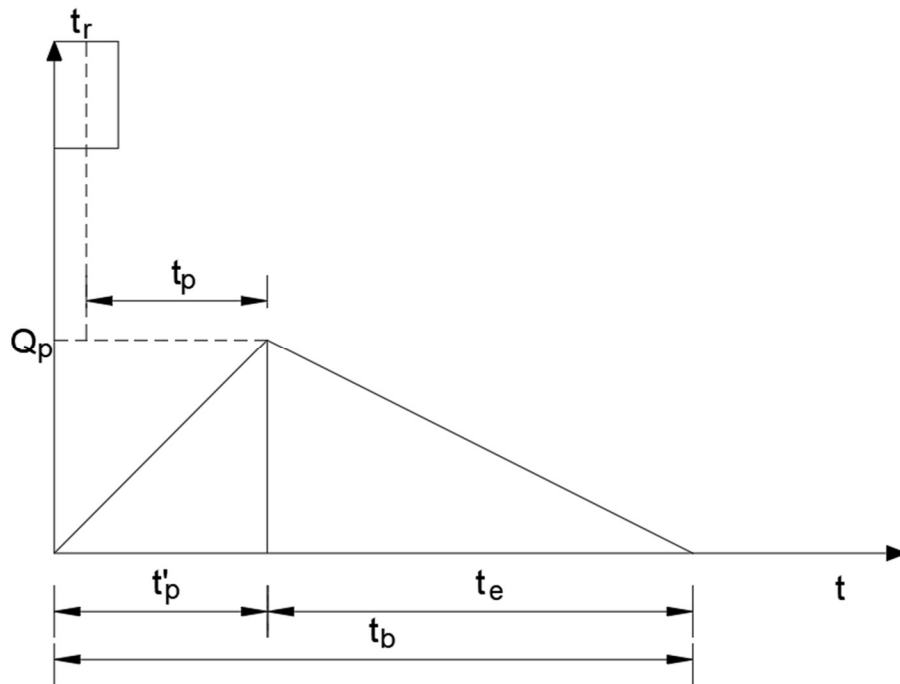
O método Hidrograma Unitário Triangular Sintético foi desenvolvido com o objetivo de estimar vazões de projeto, em decorrência da inexistência de dados hidrológicos em determinadas regiões, a configuração final do HU é influenciada pelas características fisiográficas da bacia. A área, declividade, canal, rede de drenagem e forma da bacia são parâmetros que exercem essa influência. Método de Snyder, Método sintético triangular ou SCS, Método de Commons, Método de Getty e Mctughs, Espey, Clark, são alguns dos diversos métodos para obtenção do HU sintético (Kishi, 2022).

Nas bacias urbanas brasileiras é comum encontrar bacias hidrográficas com ausência de informações, geralmente são empregados métodos determinísticos, como o Racional, Racional modificado e Curve Number (CN) ou SCS (*Soil Conservation*

Service) (Collischonn e Dornelles, 2021). O método racional é normalmente aplicado em bacias urbanas com área de drenagem limitada por tamanho, alguns autores recomendam trabalhar bacias de até 3 km², ou quando o tempo de concentração for inferior a uma hora (Porto, 1993). Segundo Tucci (2001) o método racional é amplamente empregado na estimativa da vazão máxima de projeto para pequenas bacias com área inferior a 2 km².

O método da CN (SCS) é amplamente utilizado e recomendado para bacias com áreas acima de 2 km², podendo ser aplicado em bacias de até 2.600 km² (McCuen, 1982; Genovez, 2001). O SCS sugere substituir o hidrograma adimensional curvilíneo por um hidrograma triangular, cuja forma se ajusta de maneira satisfatória ao original, conforme Figura 6.

Figura 6 - Hidrograma Unitário Adimensional e Triangular



Fonte: Adaptado de Tucci, 1993

A área do triângulo é equivalente ao volume unitário escoado superficialmente, o tempo de pico t'_p (h) é 60% do tempo de tempo de concentração T_c (h):

$$Q = \left(\frac{Q_p t_p}{2} \right) + \left(\frac{Q_p t_e}{2} \right) \quad (1)$$

$$t'_p = 0,6 T_c$$

O tempo de ascensão do hidrograma t'_p (h) pode ser aproximado somando o tempo de pico t_p (h) com metade da duração da chuva t_r (h), como segue:

$$t'_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (2)$$

O tempo de base t_b (h) é o período desde o início do evento chuvoso até o fim do escoamento superficial no exutório da bacia:

$$t_b = 2,67t'_p \quad (3)$$

A vazão de pico Q_p (m³/s) é dada por:

$$Q_p = \frac{2,08A}{t'_p} \quad (4)$$

onde:

Q_p vazão de pico (m³/s);

A: área (km²);

t'_p : tempo de ascensão do hidrograma (h).

2.5.1 MEDIDAS DE PRECIPITAÇÃO

Toda superfície capaz de reter a água da chuva pode ser utilizada para medir a quantidade de precipitação em um determinado local. Ao dividir o volume total de chuva acumulado pelo tempo de duração do evento, é possível determinar a intensidade dessa precipitação. A duração do evento é igual ao tempo de concentração.

$$i_m = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (5)$$

A intensidade de precipitação é expressa em milímetros por hora (mm/h). Um valor médio no tempo e no espaço (PINTO et. al, 2008). A intensidade média de precipitação, correspondente à duração igual ao tempo de concentração da bacia, pode ser determinada utilizando as curvas de intensidade-duração-frequência, considerando o tempo de recorrência desejado para o cálculo da vazão. A equação geral das curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para Teresina/PI foi igualmente estabelecida conforme as diretrizes do PDDUr de Teresina.

2.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA EM MICROBACIAS E GEOPROCESSAMENTO

2.6.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Na representação de chuva-vazão em microbacias que possuem áreas superiores a 2 km² o PDDUr recomenda a utilização de metodologias usadas em vários

estudos, são dois modelos hidrológicos: na determinação da precipitação efetiva o SCS/TR55, 1986, e para a propagação do escoamento o método do Hidrogramas Unitário Sintético do SCS (HUS-SCS, 1957) método do SCS (Teresina, 2010).

O método SCS trata-se de um modelo empírico que possibilita estimar o volume e a distribuição do escoamento superficial, composto basicamente por duas parcelas: a) estimativa da Chuva excedente; b) cálculo do hidrograma de escoamento superficial (Sartori, Genovez e Neto, 2005). Em consequência torna-se uma ferramenta de grande valia na hidrologia. Esse método foi desenvolvido no Estados Unidos, ou seja, dependendo da região no qual for empregado pode se ter variações no clima, o que pode levar a generalizações.

a) Chuva excedente

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \text{ para } P > 0,2S \quad (6)$$

Onde:

Q: volume do escoamento superficial ou Chuva excedente (mm).

P: precipitação (mm).

S: potencial máximo de retenção (mm).

0,2S: perdas iniciais por interceptação, infiltração e retenção superficial.

O potencial máximo de retenção (S) depende do número da curva de escoamento superficial (CN), tal relação está expressa na seguinte fórmula:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

Os volumes escoados superficialmente em uma bacia sofrem influência direta do grau de permeabilidade do solo, quanto maior esse grau maior serão as vazões. O CN é o único parâmetro usado para determinar o escoamento superficial no método TR 55 do SCS. O método disponibiliza valores tabelados para o Número da Curva (CN), que variam de acordo com o grau de impermeabilização, tipo de solo e condição de umidade antecedente do solo. O modelo do SCS leva em consideração três condições de umidade antecedente, AMC I, AMC II, AMC III. Esse teor reflete no volume de água que será transformada em escoamento superficial (Teresina, 2010).

Tabela 3 - Condições de umidade antecedente do solo para estimativa do CN

AMC	Características do solo
I	Solo seco, porém, não o suficiente para o ponto de murchamento das plantas
II	Solo com “umidade ideal” nas condições antecedentes à ocorrência de uma enchente máxima anual

2.6.2 SOFTWARE HEC-HMS

O HEC-HMS (The Hydrologic Modeling System) é um software de livre acesso, ou seja, gratuito, foi desenvolvido para o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC). Alguns softwares desenvolvidos no HEC são disponibilizados ao público. O HEC-HMS foi projetado para simular processos hidrológicos de bacias com regimes fluviais caracterizados pela presença de numerosos de afluentes e subafluente (bacias hidrográficas dendríticas), conta com um conjunto de ferramentas que auxilia nos processos tradicionais de análise hidrológica e ainda na simulação de evapotranspiração, derretimento de neve e contabilidade de umidade do solo. Usado para modelagem de fluxo e sedimentos em bacias hidrográficas, contribuindo assim com o planejamento e gestão de recursos hídricos (HEC, 2024).

Software de modelagem versátil, com capacidade para representar diferentes bacias hidrográficas. É primordial que se conheça bem a bacia estudada para que se obtenha êxito nas simulações e resultados esperados. Em geral, existem várias abordagens disponíveis para representar esses fluxos matemáticos das simulações, permitindo uma escolha que melhor se ajuste às características específicas do sistema analisado. Cada modelo matemático integrado ao programa é projetado para ser mais eficiente e preciso em ambientes distintos e sob condições específicas, garantindo flexibilidade na aplicação (Maia, 2021 *apud* Fema, 2008).

Atualmente no site da US Army Corps of Engineers existem 02 versões mais atualizadas do HEC-HMS, a versão beta 4.13 e a versão estável 4.12. Optar por versões estáveis recomendado para que se assegure o funcionamento esperado do software, minimizando riscos e garantindo a integridade dos dados e operações. Em programas gratuitos normalmente os usuários são tratados como codesenvolvedores são incentivados a contribuir com melhorias no software, incluindo novas funcionalidades, correções de código e relatórios sobre possíveis erros (Valentim e Más-Basnuevo, 2015).

2.6.3 GEOPROCESSAMENTO

O geoprocessamento tornou-se uma ferramenta crucial no estudo e manejo de bacias hidrográficas, proporcionando uma abordagem integrada para análise espacial e gestão ambiental. Aliado ao SIG permite avaliar com exatidão áreas de expansão urbana, possibilitando a identificação e da vulnerabilidade socioambiental com base em critérios que podem ser mensurados (Umbelino et al., 2007).

Nessa abordagem geoprocessamento é essencial para o estudo hidrológico, contribui com delimitação de bacias, relevo, uso e ocupação do solo, cursos d'água e outros. Conforme Souza et al. (2019), "a análise geoespacial permite identificar áreas críticas de erosão, determinar o potencial de assoreamento de rios e planejar o uso sustentável dos recursos hídricos."

2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Estatística é uma área da Matemática dedicada ao estudo de métodos de obtenção, coleta, organização, apresentação, descrição, análise e interpretação de dados numéricos variáveis (Houaiss e Villar, 2009). Esses dados podem se referir tanto a populações quanto a conjuntos específicos de elementos, servindo como base para tomadas de decisões fundamentadas.

A análise estatística desempenha um papel crucial na avaliação da relevância de tendências em séries temporais, assegurando que as decisões sobre a gestão dos recursos hídricos sejam fundamentadas em informações confiáveis e análises consistentes (SANTOS et. al, 2016).

Neste estudo foram empregadas algumas medidas descritivas básicas da Estatística Descritiva, incluindo medidas de posição e de dispersão.

2.6.1 Medidas de posição empregadas

a) Média aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (8)$$

onde:

$\bar{x}$: média aritmética.

n: número de observações de um determinado grupo.

x_i : soma de todas as observações.

x_n : os elementos.

2.6.2 Medidas de Medidas de dispersão ou de variabilidade empregadas

a) Medida de dispersão absoluta

- Variância (S^2):

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (9)$$

onde:

S: variância.

$\bar{x}$: média aritmética.

n: número de observações de um determinado grupo.

x_i : soma de todas as observações.

x_n : os elementos.

- Desvio padrão (σ ou S):

$$\sigma = \sqrt{S^2} \quad (10)$$

onde:

σ : desvio padrão.

S: variância.

b) Medida de dispersão relativa

- Coeficiente de variação/coeficiente de variação de Pearson (CV):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad (11)$$

onde:

CV: coeficiente de variação.

σ : desvio padrão.

$\bar{x}$: média aritmética.

Baixa dispersão – $CV < 15\%$.

Média dispersão – $15\% < CV < 30\%$.

Alta dispersão – $CV > 30\%$.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

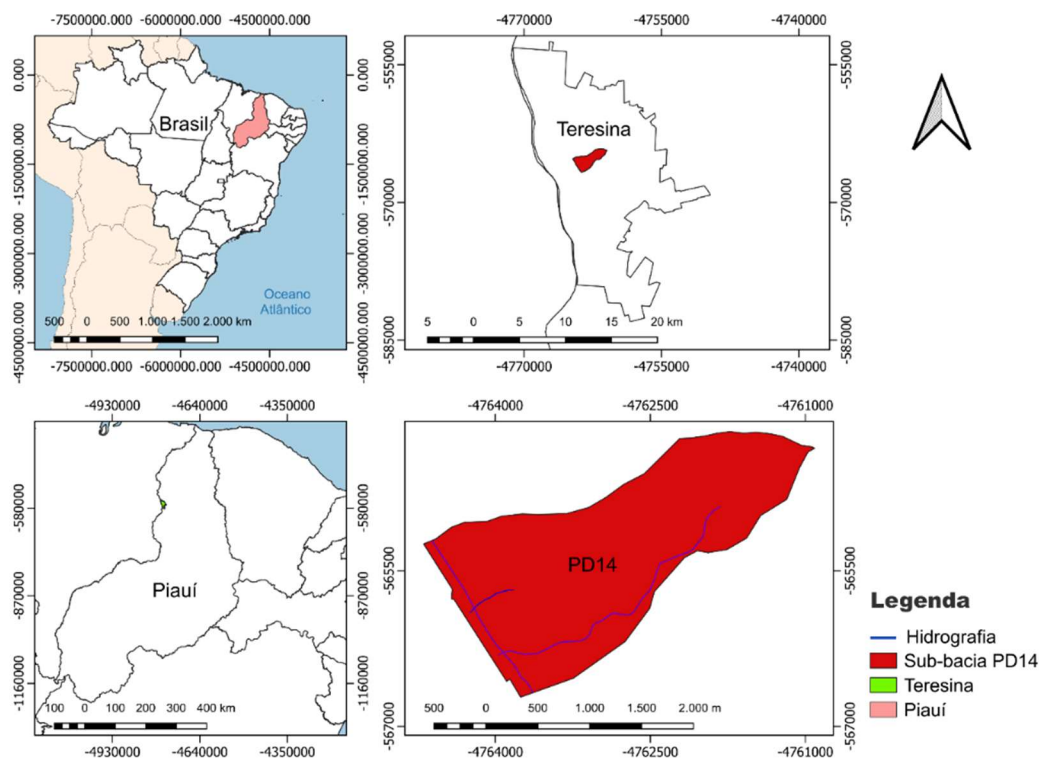
3.1 METODOLOGIA

A metodologia adotada para desenvolver esta pesquisa consiste na seleção criteriosa de fontes bibliográficas relevantes, como livros, artigos científicos e relatórios técnicos, que abordam o tema. Tais fontes passaram por uma análise sistemática, relacionada com a necessidade de atingir os objetivos da pesquisa.

3.2 ÁREA DE ESTUDO

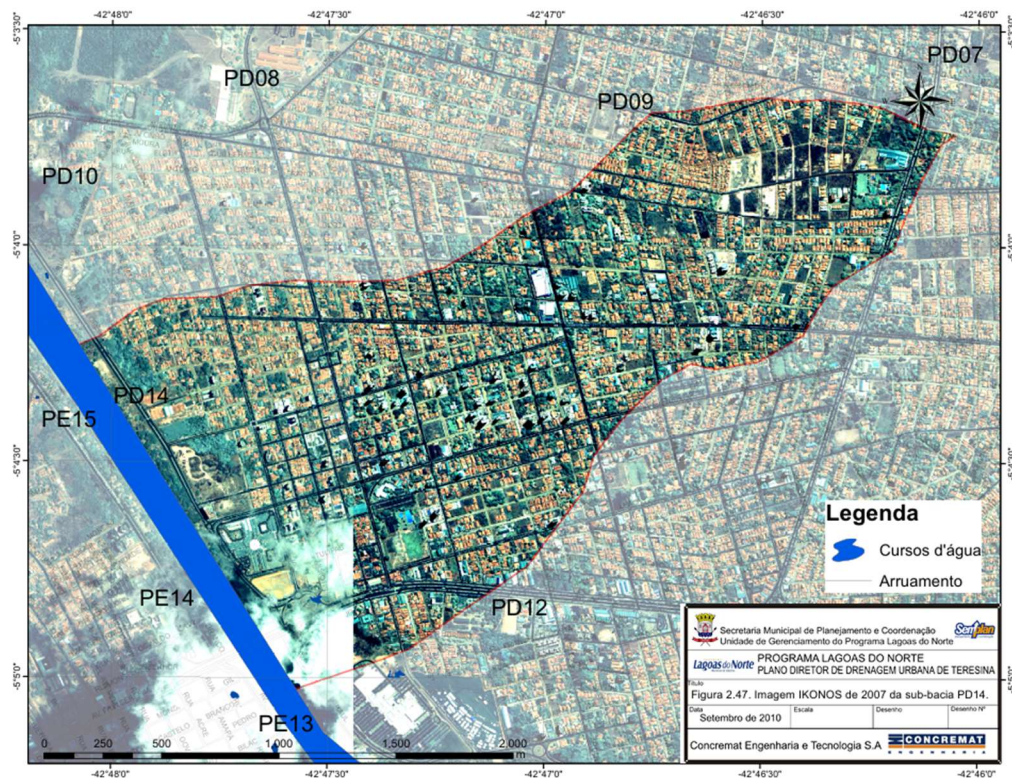
Este estudo avaliou uma microbacia hidrográfica, a sub-bacia PD14, em Teresina, Piauí, é uma das subdivisões hidrográficas que compõem a bacia do rio Poti. As sub-bacias urbanas de Teresina são classificadas de acordo com sua posição em relação ao rio Poti em “PD” e “PE”, aquelas situadas na margem direita e esquerda do rio Poti, respectivamente. Área de drenagem da sub-bacia em 4,25 km².

Figura 7 - Localização da sub-bacia PD14



Fonte: Elaborado a partir de dados das bases cartográficas e hidrológicas do IBGE e Plano Diretor de Drenagem Urbana (PPDUR) de Teresina, 2025

Figura 8 - Sub-bacia PD14



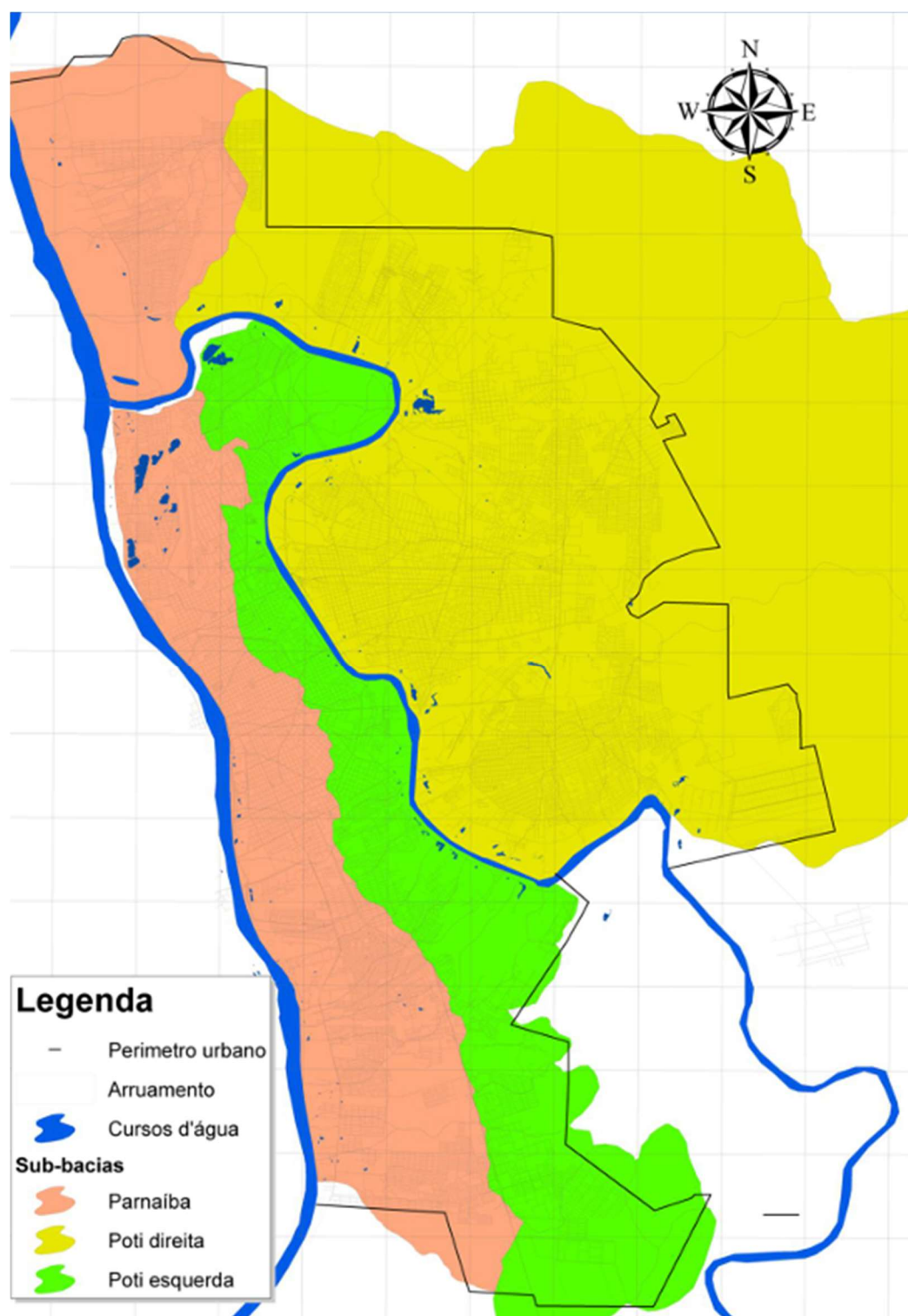
Fonte: Teresina, 2010

3.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DA MICROBACIA

3.3.1 CARACTERIZAÇÃO DA SUB-BACIA

As sub-bacias de drenagem foram delimitadas pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana tendo em vista a relação entre características físicas, os recursos hídricos e os aspectos políticos e socioeconômicos. Essas sub-bacias fazem parte de três grandes macrobacias de escoamento das águas pluviais, contribuição direta ao rio Parnaíba, cujo nome da macrobacia é o mesmo do rio, contribuições direta ao rio Poti, Poti direita e Poti esquerda. A microbacia em estudo, como mencionado anteriormente faz parte do conjunto do Poti direta, juntamente com a bacia PD12, a PD14 apresenta vários problemas com relação ao sistema de drenagem manifesta maior incidência de eventos de inundações (Teresina, 2010).

Figura 9 - Principais macrobacias urbanas de Teresina - PI



Fonte: Teresina, 2010

A microbacia PD14 é uma área favorável a alagamentos, algumas regiões são mais afetadas, bem como as imediações do rio Poti, na extensão da Av. Raul Lopes, desde o cruzamento da Av. João XXIII até a Av. Júlio Mendes. Possui grandes taxas de ocupação próxima ao rio, o que configura área de risco. Há outros locais mais afastados das margens do

rio que também são acometidas pelos alagamentos, Av. Ipê (mais de 200 m de distância do rio), Av. Nossa Senhora de Fátima principalmente no cruzamento com a Rua Afrísio Lobão. O causador deste problema é a falta de sistema de micro e macrodrenagem (Teresina, 2010). A ineficiência da drenagem urbana contribui para a poluição dos hídricos, ademais abriga microrganismos patogênicos (Lermen et. al, 2020).

Consoante diagnóstico do DMAPU (Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas) (SNIS, 2022) em 2022 522,4 mil pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas em decorrência de eventos hidrológicos impactantes. A ausência de infraestrutura de drenagem adequada acarreta impactos socioeconômicos significativos, incluindo prejuízos financeiros expressivos e riscos à integridade e à vida humana.

Nas figuras a seguir são registros de alagamentos na microbacia PD14 em diversos pontos, há pontos em que é visível parte dos prejuízos relacionados aos alagamentos

Figura 10 - Rua Visconde da Parnaíba (Bairro Horto Florestal)



Fonte: Conecta Piauí, 2025

Figura 11 - Alagamento em frente a um shopping na Av. Raul Lopes



Fonte: Teresina, 2010

Figura 12 - Alagamento nas margens do Rio Poti



Fonte: Teresina, 2010

Na figura 13 há registros fotográficos datados de fevereiro de 2025, isso demonstra que a problemática persiste, ainda após 15 anos da divulgação do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. A imagem 01 foi capturada no cruzamento da Rua Anfrísio Lobão com Rua Miosótis bairro Jóquei, imagem 02 e 04, alagamento no cruzamento da Av. Elias João Tajra com Rua Miosótis no bairro de Fátima, o ponto da imagem 03 é na Rua Hónorio Parente.

Figura 13 - Alagamento na Zona leste de Teresina



Fonte: Autor, 2025

3.3.2 CLASSIFICAÇÃO DO CLIMA DA ÁREA DE ESTUDO

A partir dos anos 1980, a existência de evidências científicas acerca da possibilidade de mudanças climáticas globais tem despertado um interesse cada vez maior tanto do público em geral quanto da comunidade científica. Em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Diante de ações antropogênicas, há fatores imutáveis ao longo de milênios. Porém, tais ações desempenham um papel na modificação dos padrões climáticos (Oliveira, Silva e Henriques, 2009). Segundo o IPCC, o aquecimento causado pela atividade humana resultou em um aumento médio de aproximadamente 1°C (com uma faixa de probabilidade entre 0,8°C e 1,2°C) acima dos níveis pré-industriais em 2017.

Vários fenômenos naturais extremos estão relacionados à atmosfera, apresentando diferentes quantidades e intensidades, como enchentes, secas, geadas, descargas elétricas,

tornados e outros. Tais eventos podem agravar precipitações concentradas (Eckhardt et. al, 2008).

De maneira geral todas as mudanças antrópicas alteram o meio ambiente, entre as regiões que mais serão afetadas pelas mudanças climáticas no Brasil, está o semiárido, o Instituto de Pesquisa Espacial (INPE) aponta através dos cenários futuros que a temperatura poderá aumentar de 1,5-2,5 °C e em até 3-5,5 °C, até o final do século XXI (Lima, Cavalcante e Marin, 2011). Segundo Teresina (2010), o Nordeste brasileiro é uma região semiárida com variação média de temperatura entre 20 e 28° C, apresenta grande variabilidade temporal e espacial da precipitação anual e alta taxa de evaporação.

No Piauí, a variabilidade interanual das chuvas é predominantemente influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (Teresina, 2010 *apud* Nury et al., 1997).

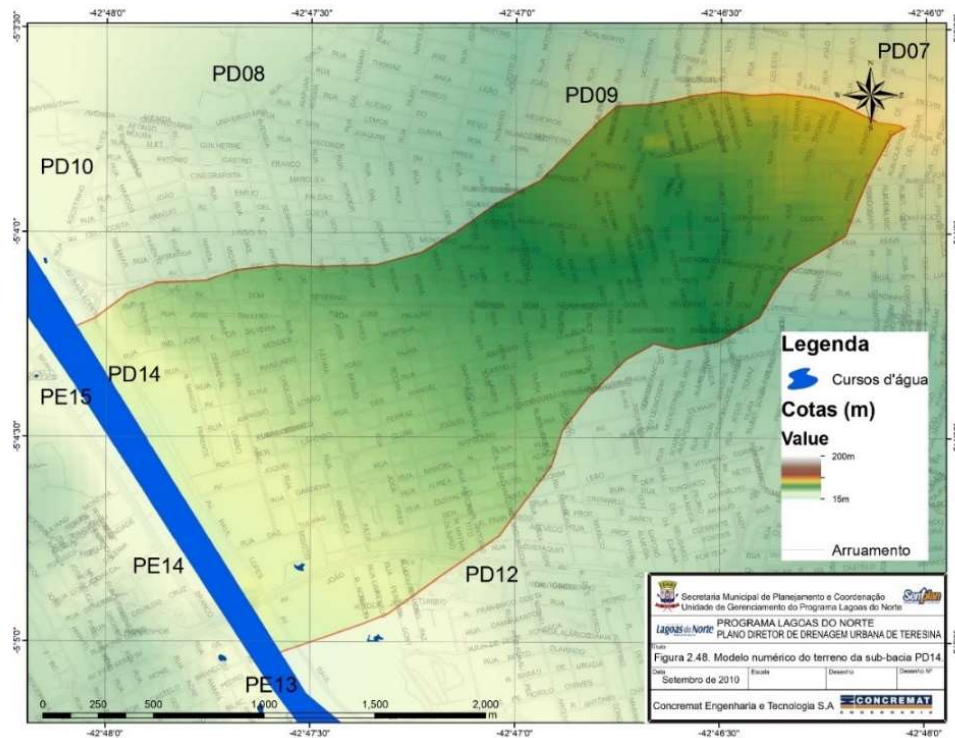
Teresina é popularmente conhecida como “cidade quente”, esse fato ocorre em razão da sua localização geográfica que lhe confere aspectos peculiares em relação a umidade do ar e ao sistema de chuvas, à ausência de ventos e às altas temperaturas durante o ano todo. Conforme o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) no relatório de dados históricos anuais em 2024 a capital piauiense, alcançou a temperatura média de 25° C e 71% de umidade do ar.

3.3.3 CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO DA ÁREA DE ESTUDO

As características de cheias que acontecem nas bacias urbanas, em parte são consequências do relevo, uma vez que a velocidade do escoamento depende diretamente das declividades. O modelo numérico do terreno da Sub-bacia PD14, assim como as demais foi produzido pela Prefeitura Municipal de Teresina (PMT), considerados dados de topografia das cartas 1:5.000 da PMT, com referências ao *datum* vertical de Imbituba, comparados com dados geodésicos da rede de referência local. Também foram usados dados de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão do IBGE e altimetria da missão SRTM da NASA. Esses dados foram integrados em um banco de dados compatível com ArcGIS 9.2 para análise detalhada (Teresina, 2010).

Teresina possui no seu relevo morros alongados, espigões, porém a maior parte da área tem um relevo predominantemente plano, leste, onde há vários morros e as maiores altitudes. O relevo da Sub-bacia PD14 é um gradiente topográfico bastante suave como mostra a Figura 14, com variação de cotas de 105 m (cabeceira) aos 45 m (foz) (Teresina, 2010).

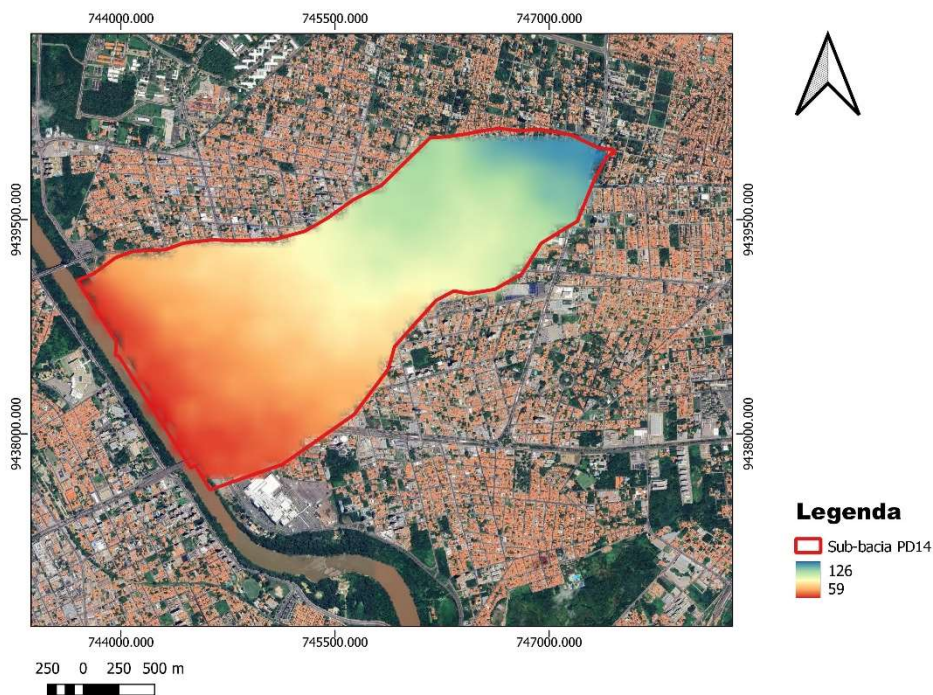
Figura 14 - Modelo numérico do terreno da Sub-bacia PD14



Fonte: Teresina, 2010

O Modelo Digital de Elevação (MDE) representa a superfície terrestre em formato digital, destacando as variações de elevação do terreno. No QGIS (Quantum GIS) software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto, é possível gerar um MDE a partir de dados de elevação, como arquivos raster ou nuvens de pontos. Na figura 15, o resultado de classificação através do plugin dzetsaka executada no QGIS versão 3.28.8, foi gerada a partir de informações do IBGE, processo similar ao executado pelo PPDUr apresentado na Figura 14.

Figura 15 – MDE Sub-bacia PD14



Fonte: Elaborado a partir de dados do IBGE, 2025

3.3.4 TIPOS DE SOLO NA ÁREA EM ESTUDO

A distribuição espacial dos solos foi executada de acordo com o PDDUr de Teresina, que se baseia no SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos). A tipologia do solo é apresentada de acordo com a metodologia do SCS, usado para incorporação do tipo de solo às simulações (Teresina, 2010).

O SiBCS, desenvolvido pela Embrapa, organiza os tipos de solos do Brasil com base em características físicas, químicas e morfológicas. Em Teresina, os principais solos identificados são o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Podzólico Vermelho-Amarelo, porém existem outros solos presentes na região, incluem os Alissolos, Latossolos Amarelos, diferenciados dos Latossolos Vermelho-Amarelos pela coloração causada pela goethita, Neossolos Flúvicos, Chernossolos. A zona urbana, devido à ocupação intensa, não foi mapeada detalhadamente (Teresina, 2010).

Quadro 1 - Tipologia do solo em Teresina

Tipo de Solo	Características Principais	Localização
Latossolo Vermelho-Amarelo	Textura média, profundo, bem drenado, baixa fertilidade, forte acidez, presença de alumínio.	Áreas planas próximas ao rio Parnaíba.

Podzólico Vermelho-Amarelo	Solos rasos, forte acidez, baixa fertilidade, sujeitos à erosão, textura média.	Relevos movimentados do município.
Alissolos	Horizonte B textural, baixa fertilidade, fortemente ácido, textura variada, drenagem moderada a imperfeita.	Áreas de transição floresta/caatinga.
Latossolo Amarelo	Profundidade variável, textura de média a argilosa, baixa fertilidade, coloração amarela devido à goethita.	Regiões do Cerrado e áreas de transição.
Neossolo Flúvico	Solos jovens, pouco desenvolvidos, encontrados em áreas aluviais, textura heterogênea, boa fertilidade.	Vales e margens dos cursos d'água.
Chernossolo (Brunizém Avermelhado)	Solos moderadamente profundos a rasos, alta fertilidade, baixa acidez, boa saturação de bases.	Áreas de relevo acidentado.
Solo Urbano	Área ocupada por construções e infraestrutura urbana, não mapeada detalhadamente pela Embrapa/Sudene.	Regiões densamente urbanizadas.

Fonte: Adaptado de Teresina, 2010

Quadro 2 - Correlação entre as classes de solos da Classificação Brasileira e os grupos de solos do SCS

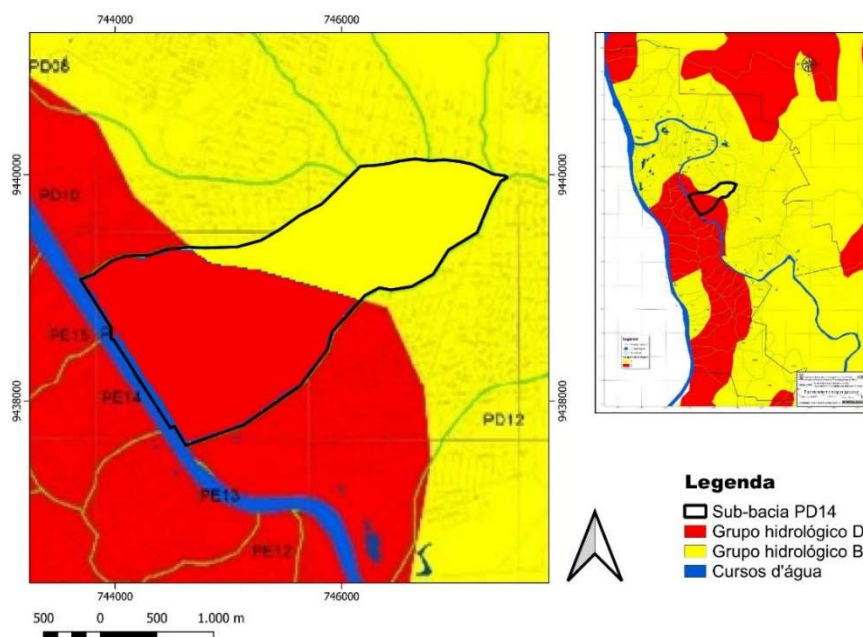
TIPO DE SOLO - CLASSIFICAÇÃO BRASILEIRA	TIPO DE SOLO HIDROLÓGICO – SCS
LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.	Grupo Hidrológico A
LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.	Grupo Hidrológico B

ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.	Grupo Hidrológico C
NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.	Grupo Hidrológico D

Fonte: Teresina, 2010

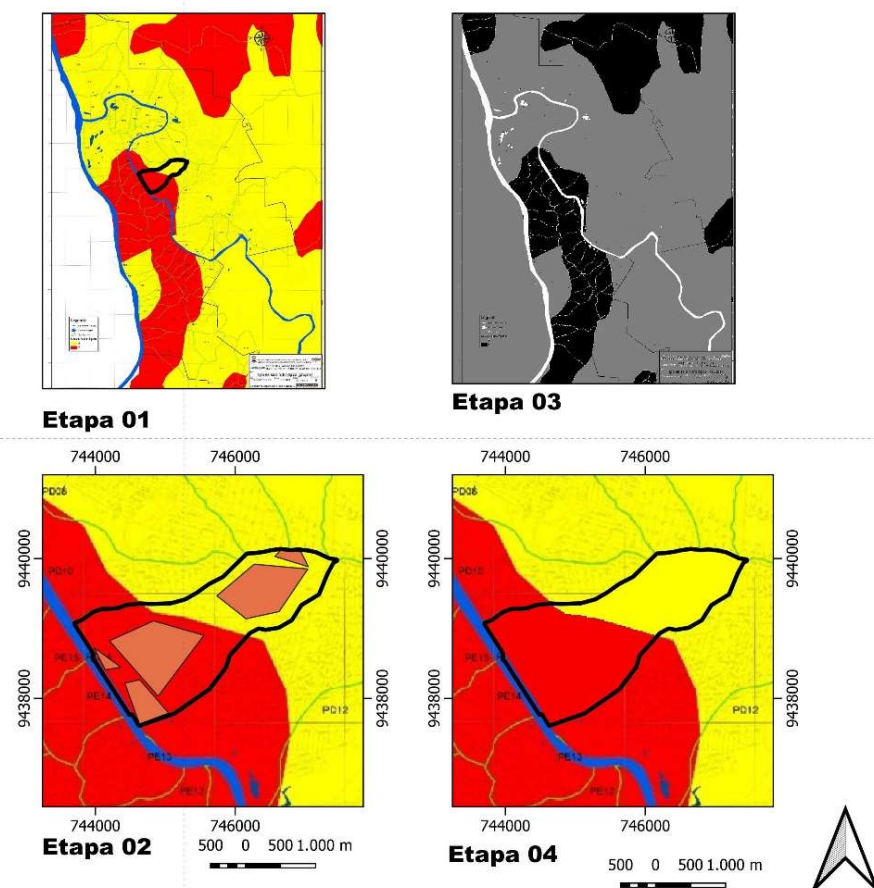
A identificação do solo da área em estudo foi executada no software QGIS, por meio de uma classificação supervisionada do mapa temático de Teresina (lado direito da Figura 16), fornecido pelo PPDUr. A imagem do mapa temático foi georreferenciada através do shapefile da sub-bacia disponibilizado pela PMT (etapa 01 da Figura 17), posteriormente a imagem foi classificada usando o plugin dzetsaka (etapas 02 e 03 da Figura 17) e por último executou-se o recorte da área apenas da sub-bacia e a verificação das taxas de solos. A classificação (lado esquerdo da Figura 16), constatou que 43,75% solo pertence ao grupo hidrológico B e 53,59% ao D, os outros 2,66% curso d'água.

Figura 16 - Grupo hidrológico Sub-bacia PD14



Fonte: Elaborado a partir de dados do PPDUr de Teresina (2010), 2025

Figura 17 - Processo de classificação do solo na sub-bacia PD14



Fonte: Elaborado a partir de dados do PPDUr de Teresina (2010), 2025

3.3.4 USO E COBERTURA DO SOLO NA SUB-BACIA EM ESTUDO

A figura empregada para o mapeamento do uso e ocupação da terra na Sub-bacia PD14 foi obtida no Banco de Imagens da Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial - INPE (INPE, 2024), foi capturada através do satélite CBERS4A, câmera WPM, resolução espacial de 2 m, por meio de 5 bandas espectrais. A cena em questão é referente a 24 de maio de 2024, pois representa de forma satisfatória o uso e cobertura do solo da região sem grande interferência de precipitação conforme o estudo de Lima et. al (2020) e nebulosidade (Tabela 4).

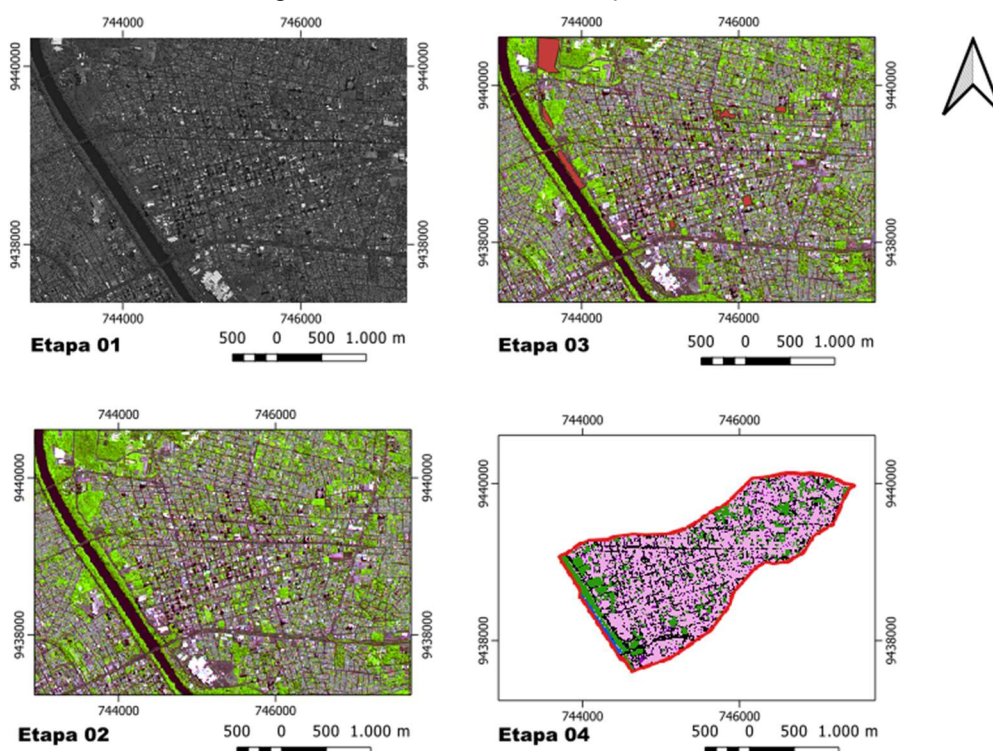
Tabela 4 - Nebulosidade registrada na estação meteorológica em Teresina

Mês	Nebulosidade (0 -10)
Janeiro	6,8
Fevereiro	6,7
Março	4,6
Abril	3,3
Maio	2,9
Junho	3,3
Julho	2,9
Agosto	2,9
Setembro	3,3
Outubro	4,3
Novembro	4,9
Dezembro	5,8

Fonte: Adaptado de Lima et. al, 2020

O software QGIS de Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto, foi utilizado como recurso para realizar a classificação supervisionada aplicando o plugin dzetsaka desenvolvido por Nicolas Karasiak, o mesmo usado para encontrar a taxa de cada grupo hidrológico apresentado anteriormente. O processo de classificação é basicamente a criação de uma camada vetorial que define as regiões de interesse (ROIs), representando diferentes classes de uso ou cobertura da terra. Essas ROIs são usadas para treinar o classificador, que faz uma associação entre os pixels da imagem raster e os agrupa em classes com base em suas características espectrais (GitHub, 2019).

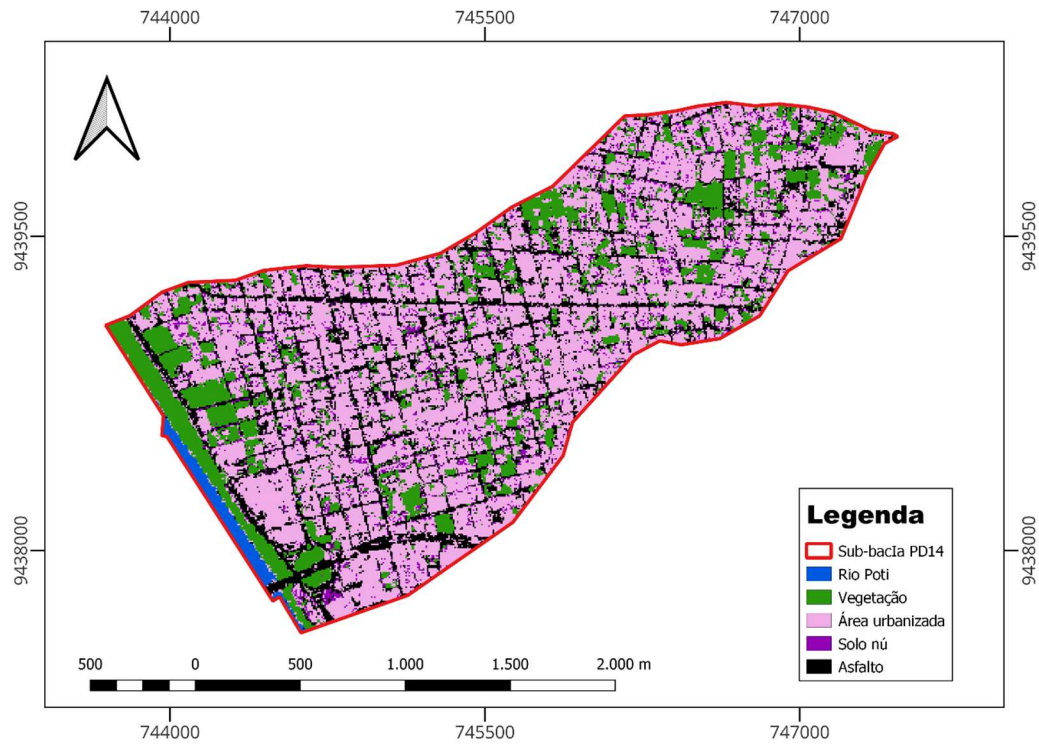
Figura 18 - Processo de classificação usado na sub-bacia



Fonte: Elaborado a partir de dados das bases cartográficas do INPE (2024) e informações do PPDUr de Teresina (2010), 2025

As etapas de classificação apresentadas na Figura 18, consiste resumidamente em 04 etapas, na primeira etapa fez-se uma imagem mesclada a partir de bandas recortadas a fim de reduzir a área a ser classificada, já que o foco é na PD14, cada banda representando um intervalo de espectro eletromagnético, na etapa seguinte foi efetuado uma composição colorida, na terceira fase desempenhou-se a classificação supervisionada com o auxílio da ferramenta dzetsaka e no último nível, o recorte dessas imagens de satélite com base em shapefile.

Figura 19 - Mapa de uso e ocupação da terra na Sub-bacia PD 14



Fonte: Elaborado a partir de dados das bases cartográficas do INPE (2024) e informações PPDUr de Teresina (2010), 2025

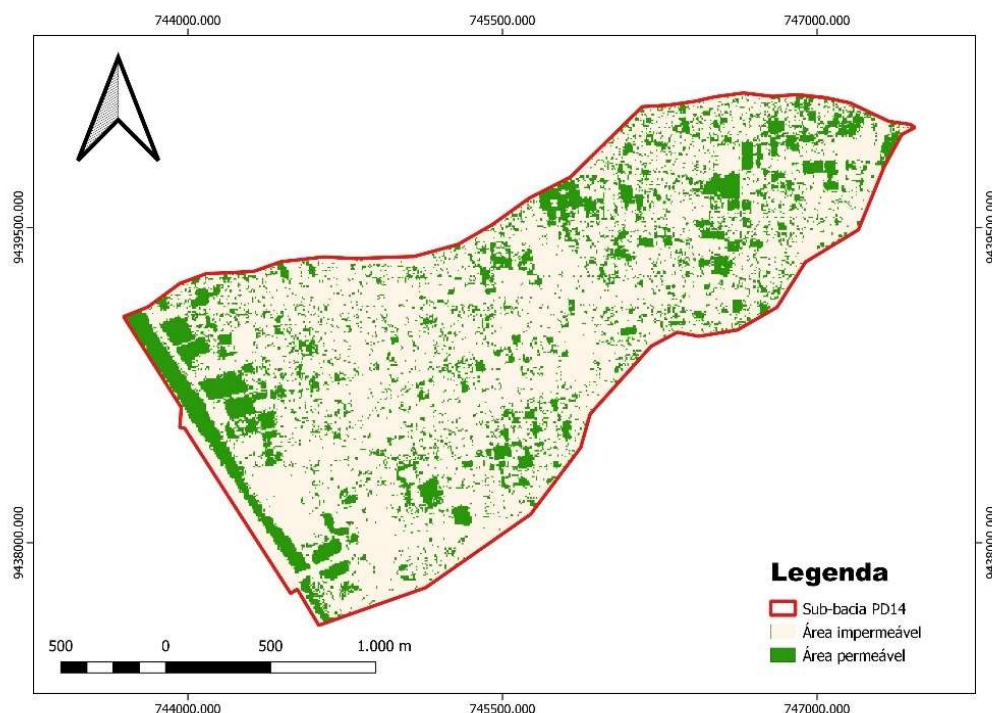
Tabela 5 - Área (%) de uso e cobertura do solo na Sub-bacia

Uso do solo	%
Rio Poti	1,51
Vegetação	17,38
Área urbanizada	55,85
Solo nu	5,34
Asfalto	19,92

Fonte: Autor, 2025

Após o procedimento de categorização do uso e ocupação da terra realizou-se a segregação de áreas permeáveis e impermeáveis. A sub-bacia possui uma área de 4,25 km², desse total 3,28 km² área impermeável (77,28%) e 0,97 km² de área permeável (22,72%).

Figura 20 - Área permeável e impermeável da Sub-bacia PD 14



Fonte: Elaborado a partir de dados das bases cartográficas do INPE (2024) e informações PPDUr de Teresina (2010), 2025

3.3.5 RELEVÂNCIAS DAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS

A compreensão detalhada das características de uma bacia é essencial para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Os dados fisiográficos apresentados a seguir, foram coletados a partir dos dados fornecidos pelo PDDUr de Teresina e instituições governamentais, bem como IBGE e INPE, esses dados em boa parte usados em modelagens do autor com auxílio do Software QGIS.

Tabela 6 - Informações fisiográficas da PD14 usadas para auxiliar na determinação do tempo de concentração

Características físicas	Unidade	Valor
Área	m ²	4250193,40
Área Impermeável (Aimp)	m ²	3284549,46
Área Permeável (Aperm)	m ²	965643,94
Área Impermeável (Aimp)	%	77,28%
Área Permeável (Aperm)	%	22,72%
Perímetro (P)	m	9828,34
Comprimento do talvegue principal (L)	Km	3256,50
Cota de montante (Cm)	m	124,16

Cota de jusante (Cj)	m	61,34
Desnível (ΔH)	m	62,82
Declividade da bacia (S)	m/m	0,01929
CN	-	89,70

Fonte: Autor, 2025

3.4 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Neste trabalho serão analisadas 10 fórmulas do tempo de concentração, tendo como principal fonte de pesquisa e recomendações o Manual do PDDUr (Teresina, 2011), PDDUr (Teresina, 2010), Silveira (2005) e Manual de Drenagem DNIT (Brasil, 2005). Os métodos trabalhados em razão da sua aplicabilidade em bacias, porém há um percentual das fórmulas testadas que não atendem a alguns pré-requisitos de aplicação, como a área ou tipo de bacia, urbanizada ou rural, contudo, obtiveram bons resultados em bacias que divergem das bacias originalmente testadas. As fórmulas testadas são: Federal Aviation Administration (FAA), George Ribeiro, Giandotti, Kirpich, Kirpich Modificada, Pasini, Picking, Ventura, Schaake et. al, SCS Lag.

Tabela 7 - Referencial bibliográfico

Nome	Equação	Referencial bibliográfico
Federal Aviation Administration (FAA)	$T_c = 22,73(1,1 - C)L^{0,50}S^{-0,33}$	Tucci (1993), Silveira (2005)
George Ribeiro	$T_c = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p_r)(100I)^{0,4}}$	Azevedo Netto e Villela (1969), Brasil (2005)
Giandotti	$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}}$	Brasil (2005)
Kirpich	$T_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	Tucci (1976), Brasil (2005)
Kirpich Modificada	$T_c = 1,42 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	Brasil (2005)
Pasini	$T_c = \frac{0,107^3 \sqrt{AL}}{\sqrt{I}}$	Brasil (2005)
Picking	$T_c = 5,3 \left(\frac{L^2}{I} \right)^{\frac{1}{3}}$	Pinto et. al (1976)
Schaake et. al	$T_c = \frac{4,968L^{0,24}}{S^{0,16}A_{imp}^{0,26}}$	Teresina (2010) <i>apud</i> Schaake (1967)
SCS Lag	$T_c = 3,42L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} S^{-0,5}$	Tucci (1993)

$$T_c = 0,127 \sqrt{\frac{A}{I}}$$

Fonte: Autor, 2025

a) Federal Aviation Administration (FAA)

Desenvolvida em bacia(s) dos EUA, para a drenagem de aeroportos, não se encontrou registro de outras características no qual foi desenvolvida. A bacia-base é do tipo parcela.

$$T_c = 22,73(1,1 - C)L^{0,50}S^{-0,33} \quad (12)$$

com os seguintes parâmetros:

T_c : tempo de concentração (min);

L : comprimento do curso d'água (km);

S : declividade (m/m).

b) George Ribeiro

Desenvolvida em bacias-base rurais menores que 19000 km², no entanto teve bom desempenho em diferentes tamanhos de bacias na avaliação do DNIT (Brasil, 2005).

$$T_c = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p_r)(100I)^{0,4}} \quad (13)$$

com os seguintes parâmetros:

T_c : tempo de concentração (min);

L : comprimento do curso d'água (km);

I : declividade (m/m);

p_r : parâmetro dado pela porção da bacia coberta por vegetação.

c) Giandotti

Baseada em bacias rurais localizadas na Itália, mas não foram especificadas características como área, declividade e talvegue. Demonstra eficácia, em bacias de grande porte (Brasil, 2005).

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}} \quad (14)$$

com os seguintes parâmetros:

Tc: tempo de concentração (h);

A: área da bacia (km²);

L: comprimento do curso d'água em (km);

H: desnível máximo em (m).

d) Kirpich

Publicada no “California Culverts Practice”, foi desenvolvida para bacias menores que 0,8 km², porém teve bom desempenho tanto para bacias pequenas, como para bacias médias e grandes (Brasil, 2005).

$$T_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (15)$$

com os seguintes parâmetros:

Tc: tempo de concentração (h);

L: comprimento do curso d'água (km);

H: desnível máximo em (m).

e) Kirpich Modificada

O método foi desenvolvido a partir de estudos em bacias hidrográficas italianas e é aplicável a bacias de diferentes tamanhos.

$$T_c = 1,42 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (16)$$

com os seguintes parâmetros:

Tc: tempo de concentração (h);

L: comprimento do curso d'água em (km);

H: desnível máximo em (m).

f) Pasini

A equação foi elaborada com base em bacias hidrográficas rurais da Itália, porém não há informações detalhadas sobre sua área, inclinação ou talvegue. Mesmo assim, os resultados obtidos na avaliação feita pelo DNIT (Brasil, 2005) foram satisfatórios, independentemente da dimensão da bacia.

$$T_c = \frac{0,107 \sqrt[3]{AL}}{\sqrt{I}} \quad (17)$$

com os seguintes parâmetros:

T_c : tempo de concentração (h);

A: área da bacia (km²);

L: comprimento do curso d'água principal (km);

I: declividade média do talvegue (m/m).

g) Picking

Pinto et. al, 1976 não deixa claro as características da(s) bacia(s) que fundamentaram a fórmula. Lança 2000 apresentou uma variação da fórmula dada em horas.

$$T_c = 5,3 \left(\frac{L^2}{I} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

com os seguintes parâmetros:

T_c : é o tempo de concentração (min);

L: comprimento do talvegue (km);

S: é a declividade (m/m).

h) Schaake et. al

Elaborada com base em 19 bacias hidrográficas urbanas do EUA, com áreas inferiores a 0,7 km². inclinação ou talvegue. Mesmo assim, os resultados obtidos na avaliação feita pelo DNIT (Brasil, 2005) foram satisfatórios, independentemente da dimensão da bacia.

$$T_C = \frac{4,968 L^{0,24}}{S^{0,16} A_{imp}^{0,26}} \quad (19)$$

com os seguintes parâmetros:

T_C : é o tempo de concentração (min);

L: comprimento do talvegue (km);

S: é a declividade (m/m);

A_{imp} : é a fração de área impermeável.

i) SCS Lag

$$T_c = 3,42L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} S^{-0,5} \quad (20)$$

com os seguintes parâmetros:

T_c : tempo de concentração para a segunda fórmula (h);

L : comprimento do talvegue (km);

S : é a declividade (m/m);

CN : Curver Number.

j) Ventura

A fórmula foi desenvolvida com base em bacias rurais italianas, porém não há especificações detalhadas sobre área, declividade ou talvegue. Ainda assim, ela apresentou bons resultados, independentemente do tamanho da bacia (DNIT, 2005).

$$T_c = 0,127 \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (21)$$

com os seguintes parâmetros:

T_c : tempo de concentração (h);

A : área da bacia (km²);

I : declividade (m/m).

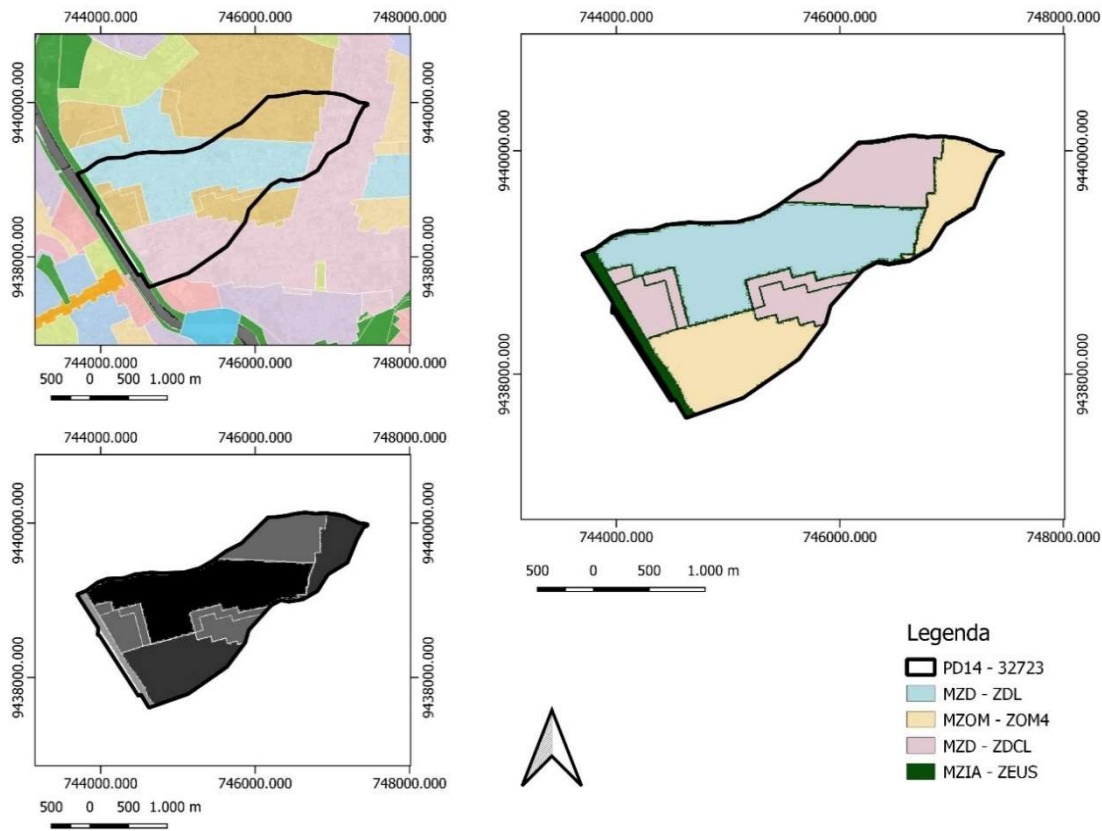
3.3.6 CURVE NUMBER(CN) PELO METÓDO SCS

O CN foi determinado por meio de médias ponderadas, tanto das áreas de uso e cobertura, como pelo percentual do solo. Isso porque a PD14, como já mencionado anteriormente é uma região urbanizada, possui 03 macrozonas determinadas pelo PDOT, A Macrozona de Ocupação Moderada – MOM, Macrozona de Desenvolvimento MZD e a Macrozona de Interesse Ambiental – MZIA. De acordo com a Lei complementar Nº 5.481, de 20 de dezembro de 2019, A MOM tem uso majoritariamente residencial, MZD é a parcela do território urbano de Teresina que se apresenta majoritariamente ocupada, com concentração de comércio, já a MZIA possui vegetação, essa área não é recomendada para habitações e comércios, por apresentar suscetibilidade aos alagamentos e inundações, além da preservação

do leito do Rio Poti, no caso da região destacada da Sub-bacia PD14.

Na figura 21 é demonstrado o procedimento executado para quantificar as áreas pertencentes a cada zona, o processo foi o mesmo executado no item 3.3.3 (Figura 17) e parcialmente semelhante ao item 3.3.4 (Figura 18). Após a classificação, a identificação do CN de cada tipo de uso/cobertura do solo e suas respectivas parcelas na sub-bacia (Quadro 3), em seguida a média ponderada de acordo com o tipo de solo B e D, na etapa seguinte a média ponderada de acordo com o percentual de cada solo presente na área de estudo, fornecendo assim o valor final de CN (Tabela 10).

Figura 21 - Zoneamento e Sub-bacia PD 14



Fonte: Elaborado a partir de dados do PPDUR de Teresina (2010), 2025

Tabela 8 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas

UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais: cobertura ruim	45	66	77	83
Cobertura boa	25	55	70	77

Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80
com relva de 50 a 75% da área		49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais	lotes de				
(m ²) % média impermeável		77	85	90	92
<500	65				
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas:					
asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: Teresina, 2011.

Quadro 3 - CN de acordo com o uso ou ocupação do solo

Utilização ou cobertura do solo	%	CN por grupo hidrológico	
		B	D
Zonas residenciais	67,97	85	92
Zonas comerciais e de escritórios	28,25	92	95
Bosques ou zonas florestais: cobertura ruim	3,78	66	83

Fonte: Autor, 2025

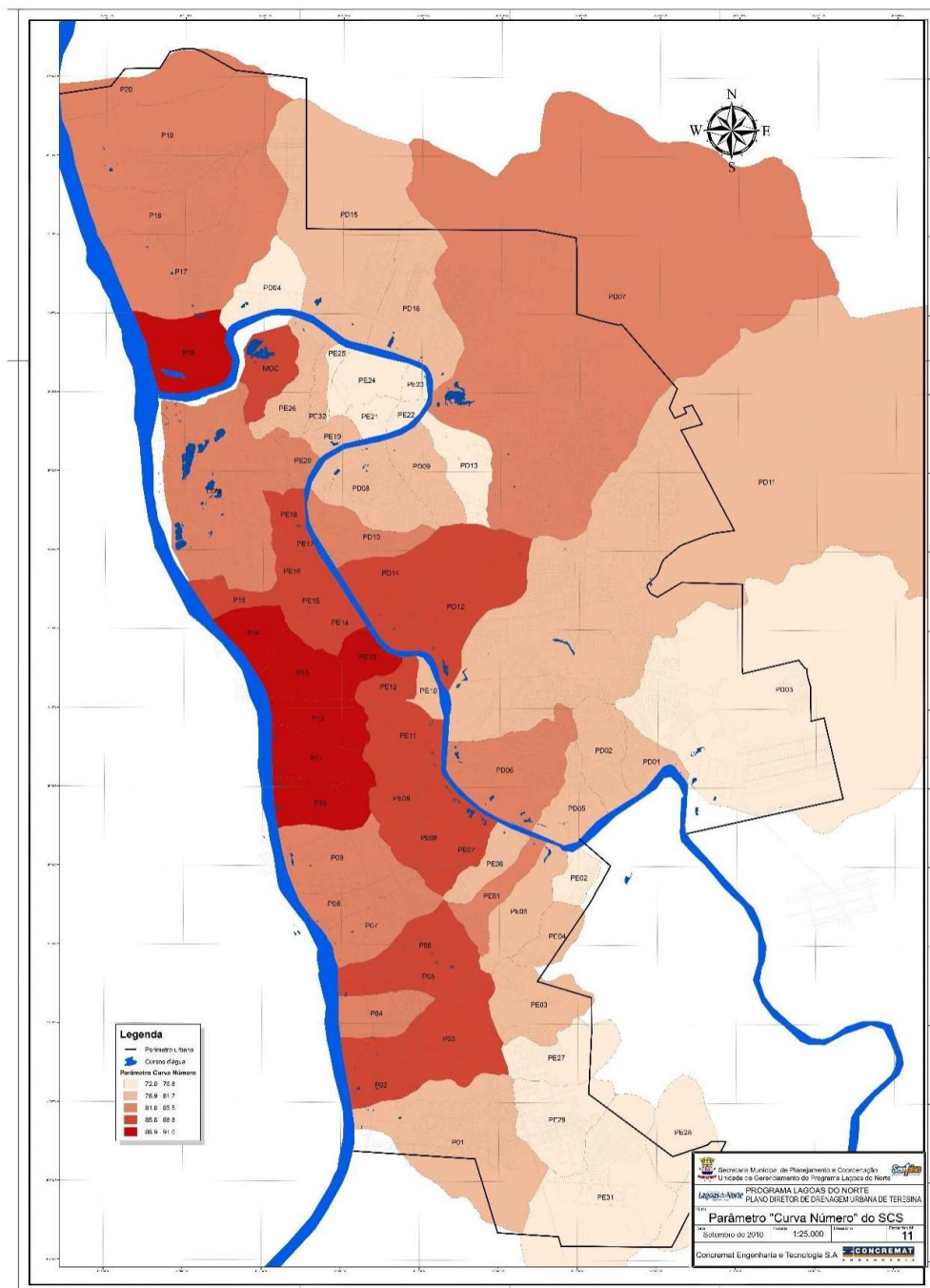
O CN considerado não está dentro do intervalo de 85,6 e 88,8 apontados pelo mapa temático do PDDUr (Figura 21). Sousa e et al. (2021) em seu estudo onde avaliou o uso de telhados verde para o controle de águas pluviais na mesma sub-bacia estimou superior a esse intervalo, um CN médio de 88,97.

Tabela 9 - Cálculo CN da Sub-bacia PD14

Grupo Hidrológico	CN ponderado/ grupo hidrológico	CN ponderado
B (43,75%)	86,26	89,70
D (53,59%)	92,51	

Fonte: Autor, 2025

Figura 22- Parâmetro Curve Number do PDDUr



Fonte: Teresina, 2010

3.3.7 DADOS DE PRECIPITAÇÃO

A equação geral das curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para Teresina/PI foi estabelecida com base no PDDUr de Teresina e empregada na definição do hietograma de entrada do modelo chuva-vazão para a área analisada:

$$i = \frac{1194,273T^{0,1738}}{(t+10)^{0,7457}} \quad (22)$$

onde:

i : a intensidade da chuva (mm/h);

T: o período de retorno em anos;

t : o tempo de concentração da bacia (min).

Chuva de projeto pelo método dos blocos alternados utilizando IDF de Teresina/PI. O método dos blocos alternados é uma técnica utilizada na hidrologia para distribuir temporalmente a precipitação em hietogramas de projeto, visando representar eventos pluviométricos de forma mais realista. Esse procedimento divide o total precipitado em períodos específicos, de acordo com a duração do evento (Abreu, Sobrinha, Brandão, 2017).

3.8 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA HEC-HMS

A simulação hidrológica no software HEC-HMS foi executada após a obtenção dos hietogramas por meio dos blocos alternados, as simulações foram executadas para as 10 fórmulas do tempo de concentração objeto de análise deste trabalho, considerando o tempo de retorno de 10 anos. Tempo de retorno se refere ao espaço de tempo em anos onde há a probabilidade de ocorrer um evento de grande magnitude. Geralmente, os períodos de retornos adotadas para a microdrenagem é de 10 anos. No quadro abaixo são apresentados os principais dados de entradas usados para simular a resposta hidrológica na PD14.

Tabela 10 - Parâmetros para cálculo de vazão de pico e Modelagem do escoamento

Metódo	Área (m ²)	Área (Km ²)	Tc calculado (min)	Tc adotado (min)	Lag Time (min)	CN	% Imp	S (mm)	IA (mm)
Federal Aviation Administration (FAA)	4250193,40	4,25	30,18	30,00	18,11	89,70	77,28%	29,17	5,83
George Ribeiro	4250193,40	4,25	31,22	32,00	18,73	89,70	77,28%	29,17	5,83
Giandotti	4250193,40	4,25	124,26	124,00	74,55	89,70	77,28%	29,17	5,83
Kirpich	4250193,40	4,25	45,27	46,00	27,16	89,70	77,28%	29,17	5,83
Kirpich Modificada	4250193,40	4,25	67,67	68,00	40,60	89,70	77,28%	29,17	5,83
Pasini	4250193,40	4,25	111,01	112,00	66,61	89,70	77,28%	29,17	5,83
Picking	4250193,40	4,25	43,41	44,00	26,05	89,70	77,28%	29,17	5,83
Schaake et. al	4250193,40	4,25	13,26	14,00	7,96	89,70	77,28%	29,17	5,83
SCS Lag	4250193,40	4,25	108,12	108,00	64,87	89,70	77,28%	29,17	5,83

Ventura	4250193,40	4,25	13,98	14,00	8,39	89,70	77,28%	29,17	5,83
---------	------------	------	-------	-------	------	-------	--------	-------	------

Fonte: Autor, 2025

com os seguintes parâmetros:

Tc calculado: tempo de concentração calculado de acordo com a fórmula (min);

Tc calculado: tempo de concentração dado para a modelagem (min);

Lag Time: tempo de retardo do escoamento superficial;

CN: Curve Number;

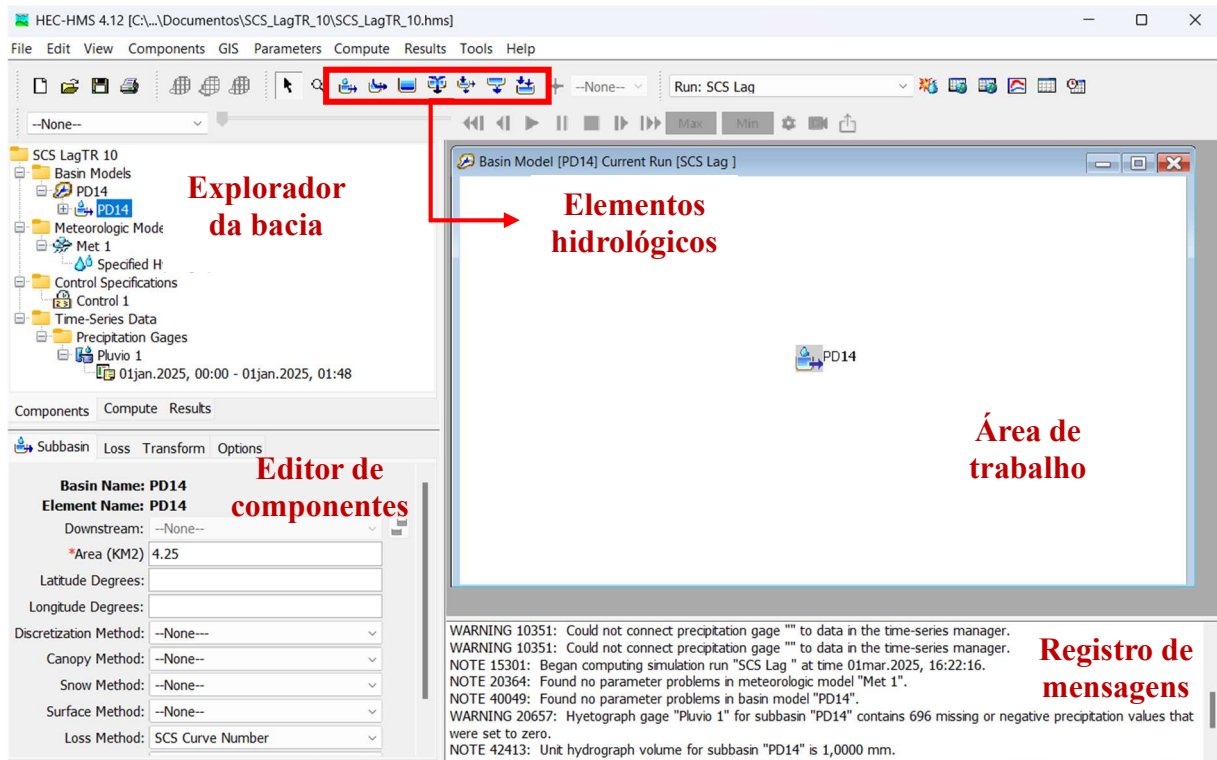
%Imp: percentual impermeável;

S: retenção potencial máxima (mm);

IA: abstração inicial apontado pelo método do SCS (mm).

No HEC-HMS a interface do usuário é composta por uma barra de menus, uma barra de ferramentas e cinco painéis essenciais (Figura 23). O explorador da bacia permite acesso rápido a todos os componentes do projeto. É possível navegar entre o modelo da bacia, estações de precipitação e modelo climático sem precisar retornar ao menu. Ao selecionar um componente, são exibidos seus subcomponentes e elementos hidrológicos associados. Na parte superior da Figura 23 em destaque estão os elementos hidrológicos, Sub-bacia (Subbasin), Canal (Reach), Reservatório (Reservoir), Junta (Junction), Desvio (Diversion), Fonte (Source) e Saída (Sink). No editor de componentes é possível especificar os elementos dos componentes, como por exemplo a área da sub-bacia. A área de trabalho é a região onde será inserido o(s) elemento(s) hidrológico(s). E no registro de mensagens o software entrega mensagens de avisos, sucesso ou erro nos procedimentos.

Figura 23 - Interface HEC-HMS



Fonte: Autor, 2025

4 RESULTADOS

4.1 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Na Tabela 11 estão destacados os 10 métodos de cálculo do T_c , em horas e minutos, com suas respectivas fórmulas. O menor valor encontrado foi 13,26 minutos de Schaake et. al, é quase 10 vezes menor que o maior T_c , 124,26 minutos de Giandotti.

Tabela 11 - Tempo de concentração calculado

Nome	Equação	T_c (h)	T_c (min)
Federal Aviation Administration (FAA)	$T_c = 22,73(1,1 - C)L^{0,50}S^{-0,33}$	0,50	30,18
George Ribeiro	$T_c = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p_r)(100I)^{0,4}}$	0,52	31,22
Giandotti	$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}}$	2,07	124,26
Kirpich	$T_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	0,75	45,27

Kirpich Modificada	$T_c = 1,42 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	1,13	67,67
Pasini	$T_c = \frac{0,107^3 \sqrt{AL}}{\sqrt{I}}$	1,85	111,01
Picking	$T_c = 5,3 \left(\frac{L^2}{I} \right)^{\frac{1}{3}}$	0,72	43,41
Schaake et. al	$T_c = \frac{4,968L^{0,24}}{S^{0,16}A_{imp}^{0,26}}$	0,22	13,26
SCS Lag	$T_c = 3,42L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} S^{-0,5}$	1,80	108,12
Ventura	$T_c = 0,127 \sqrt{\frac{A}{I}}$	0,23	13,98

Fonte: Autor, 2025

É possível identificar métodos com valores para o T_c bem próximos como Schaake e Ventura, FAA e George Ribeiro, Kirpich e Picking, Pasini e SCS Lag, com diferenças respectivos em minutos de 0,72; 1,04; 1,86 e 2,89. Há também T_c 's que não apresentam aproximação de outros valores, é o caso do Giandotti e Kirpich Modificada.

4.2 HIDROGRAMAS DAS VAZÕES

4.2.1 HIETOGRAMA BLOCOS ALTERNADOS

Em todas as fórmulas de cálculo do T_c foi gerado uma tabela com precipitação acumulada, precipitação desacomulada e precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados, gerada a partir da IDF de Teresina, conforme a Quadro 4, com a determinação da chuva de projeto, o produto dessas tabelas são os hietogramas.

Quadro 4 - Chuva de projeto Tc Schaake

Método: Schaake							
Duração (min)	14,00	Intervalo de tempo (min):	2,00	Nº de Intervalos:	7	Tempo de retorno (anos)	10
Tempo (min)	I (mm/h)	Pacum (mm)	Pdesac (mm)	Ordem Crescente	Ordem Alternada	Prearr (mm)	
2	279,356	9,312	9,312	1	7	3,743	
4	249,021	16,601	7,290	2	5	4,282	
6	225,419	22,542	5,941	3	3	5,941	
8	206,465	27,529	4,987	4	1	9,312	
10	190,865	31,811	4,282	5	2	7,290	
12	177,770	35,554	3,743	6	4	4,987	
14	166,602	38,874	3,320	7	6	3,320	

Fonte: Autor, 2025

onde:

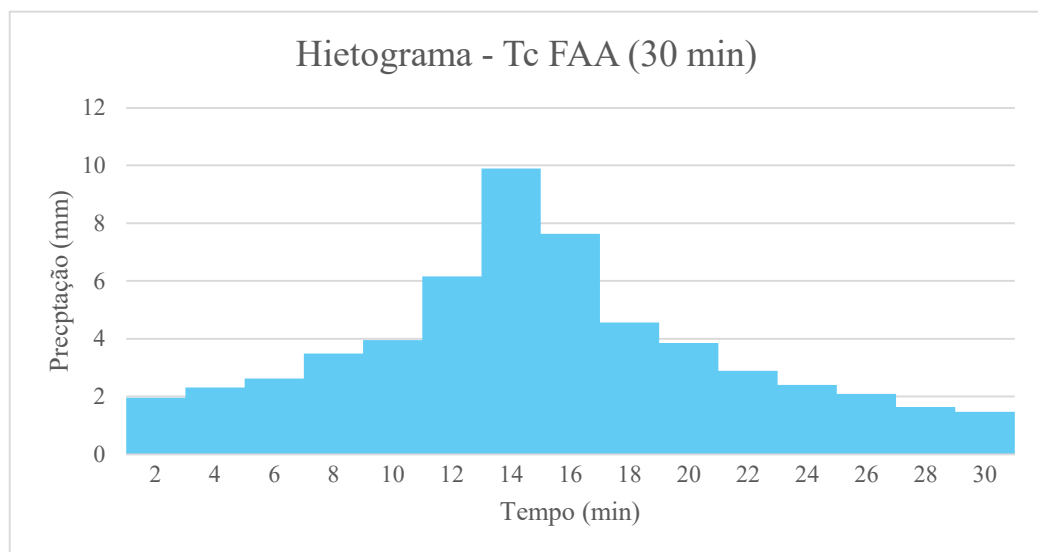
I: intensidade pela fórmula IDF de Teresina/PI (mm/h);

Pacum: precipitação acumulada (mm);

Pdesac: precipitação desacomulada (mm);

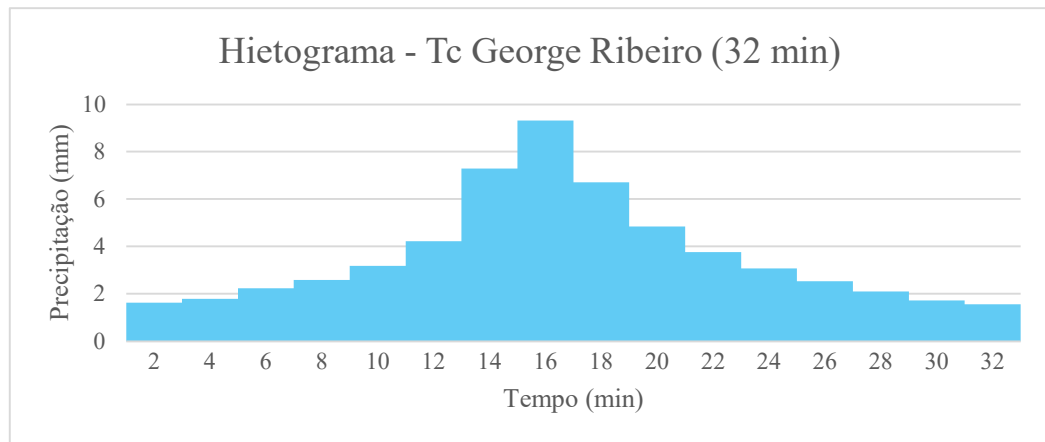
Prearr: precipitação rearrumada conforme o método dos blocos alternados.

Figura 24 - Hietograma de projeto para chuva de 30 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de FAA - Método dos Blocos Alternados



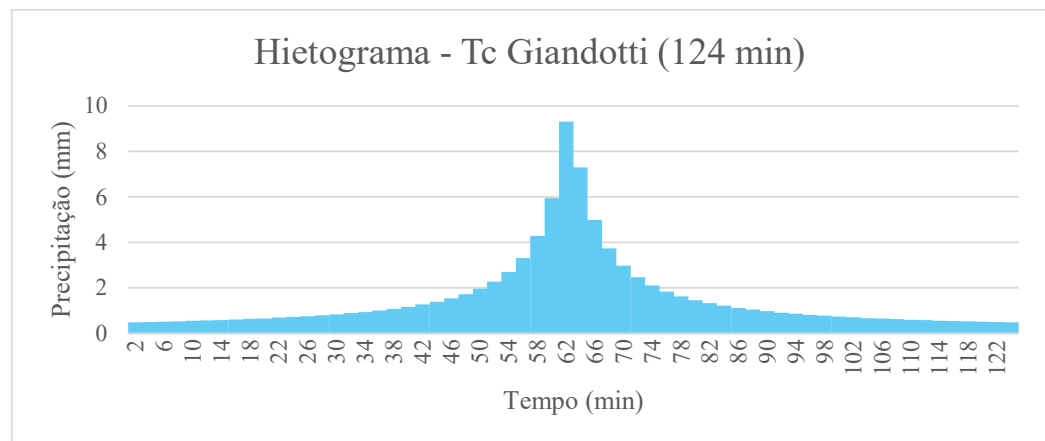
Fonte: Autor, 2025

Figura 25 - Hietograma de projeto para chuva de 32 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de George Ribeiro - Método dos Blocos Alternados



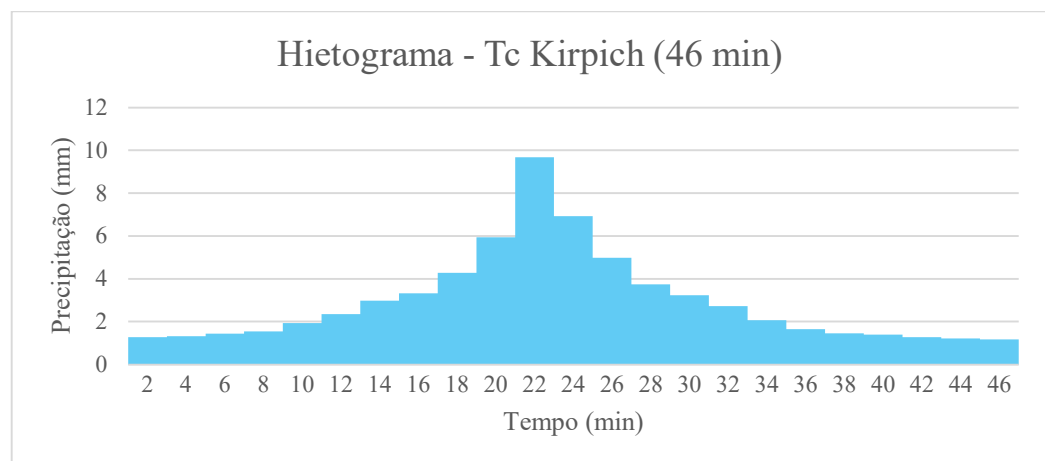
Fonte: Autor, 2025

Figura 26 - Hietograma de projeto para chuva de 124 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Giandotti - Método dos Blocos Alternados



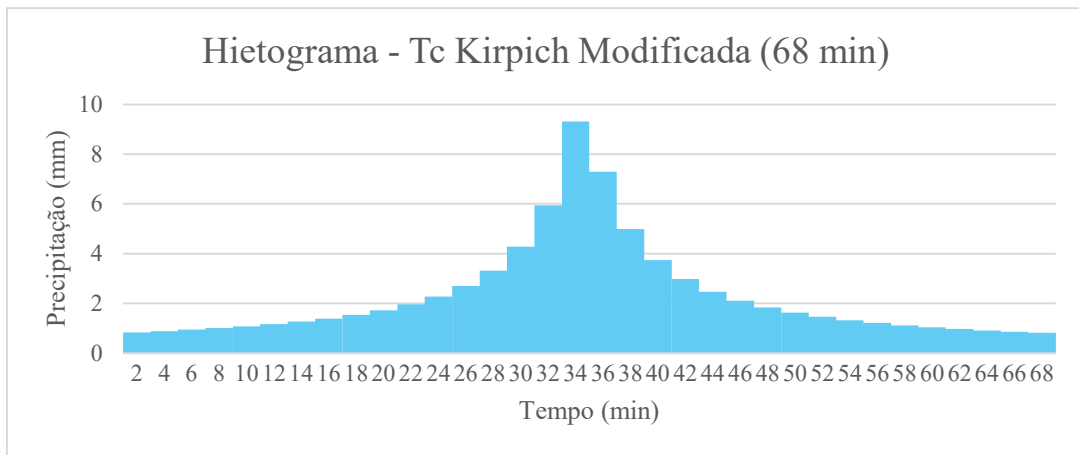
Fonte: Autor, 2025

Figura 27 - Hietograma de projeto para chuva de 46 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Kirpich - Método dos Blocos Alternados



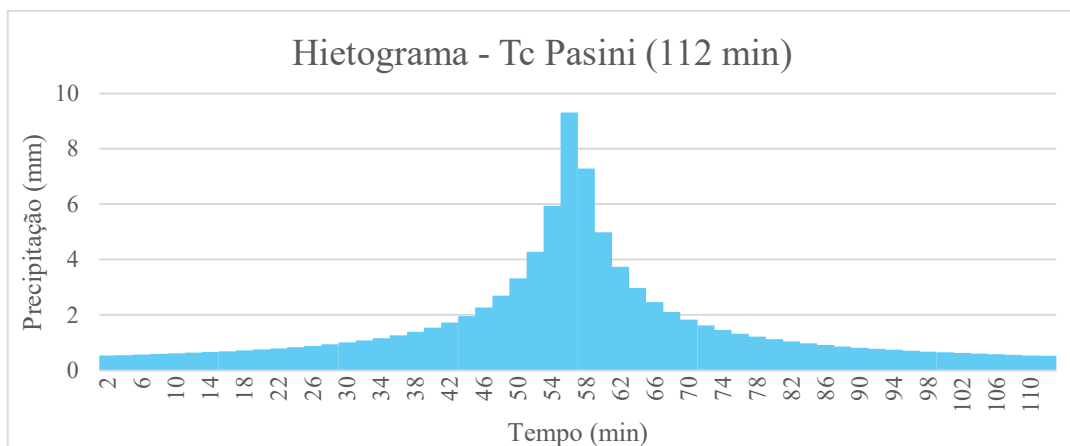
Fonte: Autor, 2025

Figura 28 - Hietograma de projeto para chuva de 68 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Kirpich Modificada - Método dos Blocos Alternados



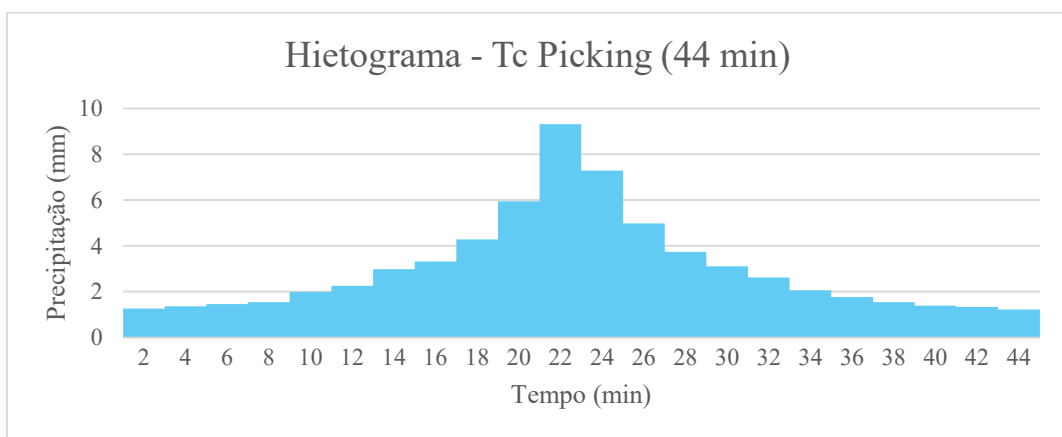
Fonte: Autor, 2025

Figura 29 - Hietograma de projeto para chuva de 112 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Pasini - Método dos Blocos Alternados



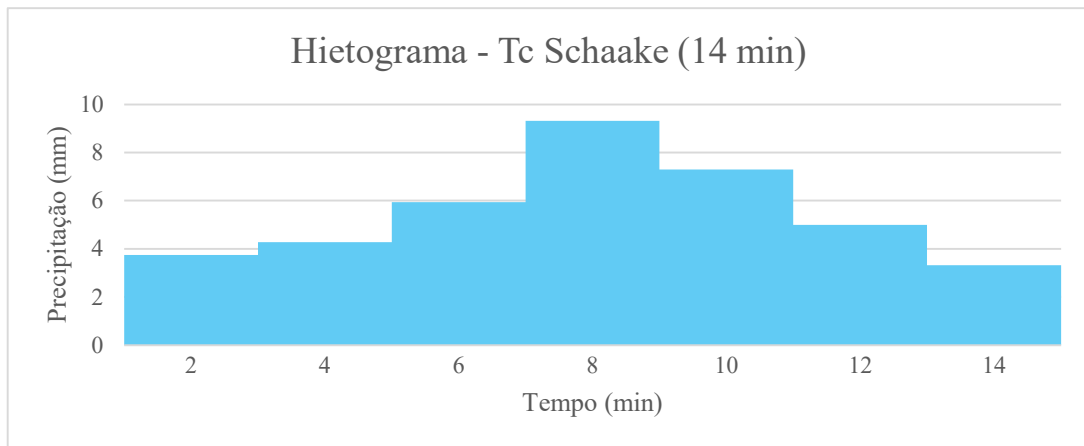
Fonte: Autor, 2025

Figura 30 - Hietograma de projeto para chuva de 44 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Picking - Método dos Blocos Alternados



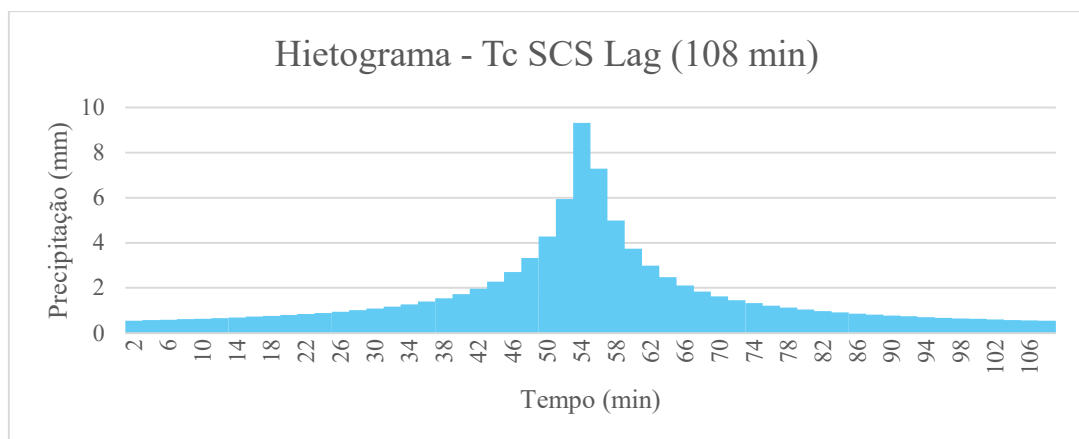
Fonte: Autor, 2025

Figura 31 - Hietograma de projeto para chuva de 14 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Schaake - Método dos Blocos Alternados



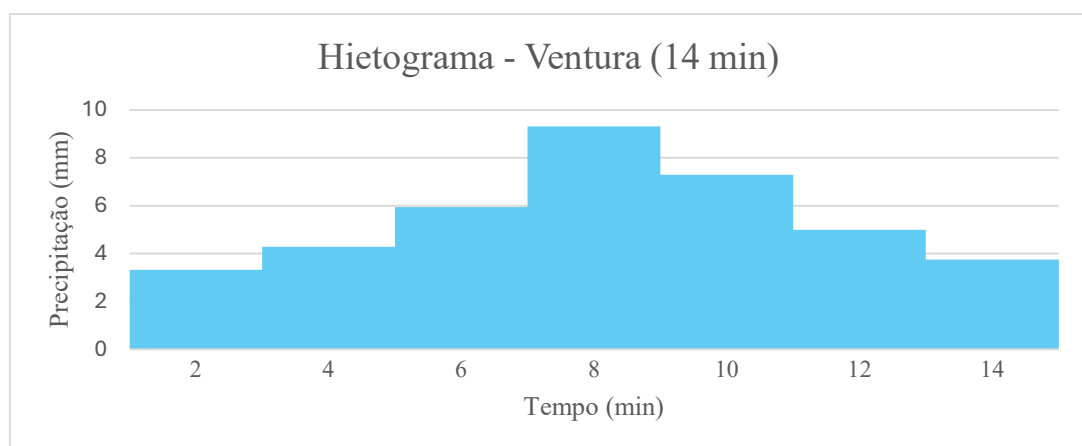
Fonte: Autor, 2025

Figura 32 - Hietograma de projeto para chuva de 108 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Ventura - Método dos Blocos Alternados



Fonte: Autor, 2025

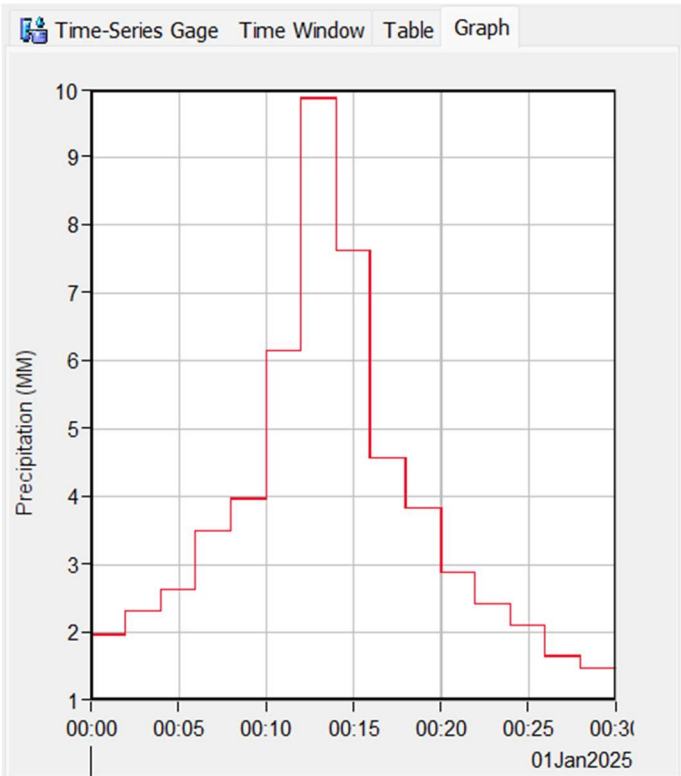
Figura 33 - Hietograma de projeto para chuva de 14 minutos, Tempo de Retorno de 10 anos, Tempo de concentração fórmula de Ventura - Método dos Blocos Alternados



Fonte: Autor, 2025

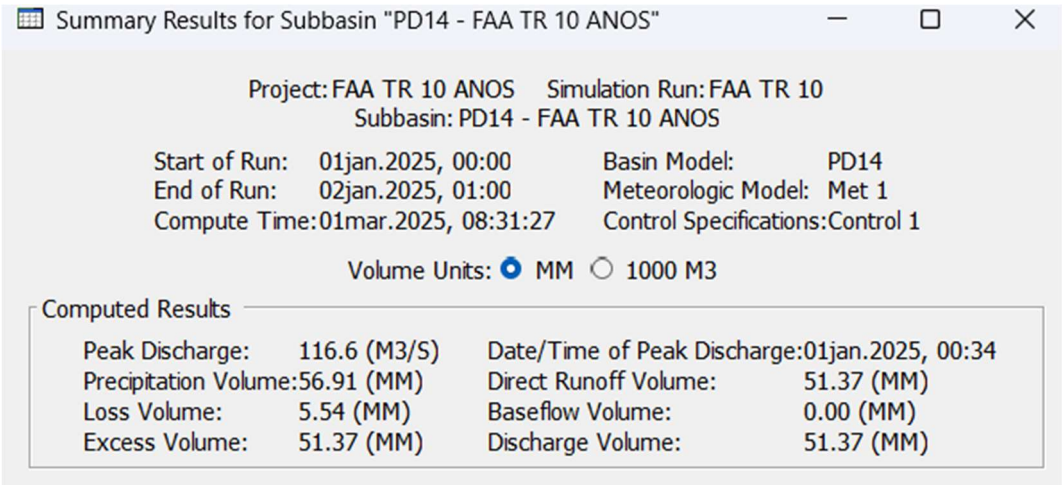
4.2.2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NO SOFTWARE HEC-HMS

Figura 34 - Gráfico do hietograma - Tc FAA



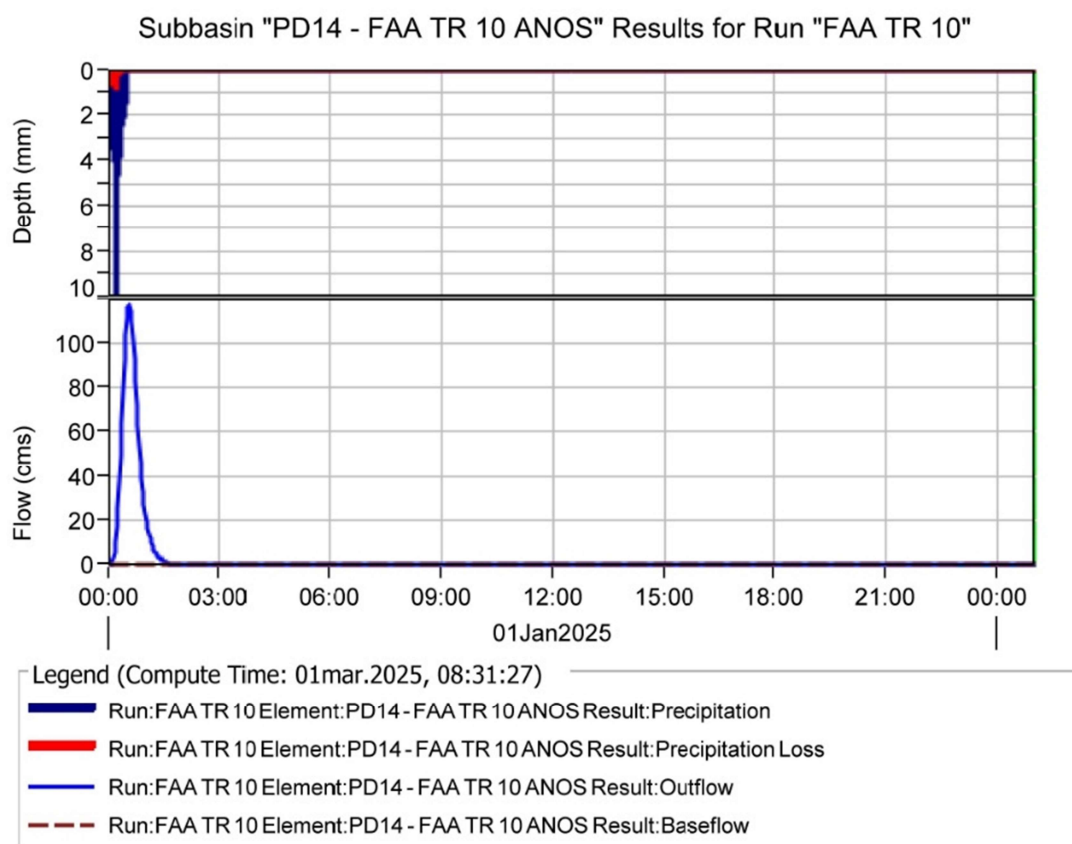
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 35 - Sumário da simulação - Tc FAA



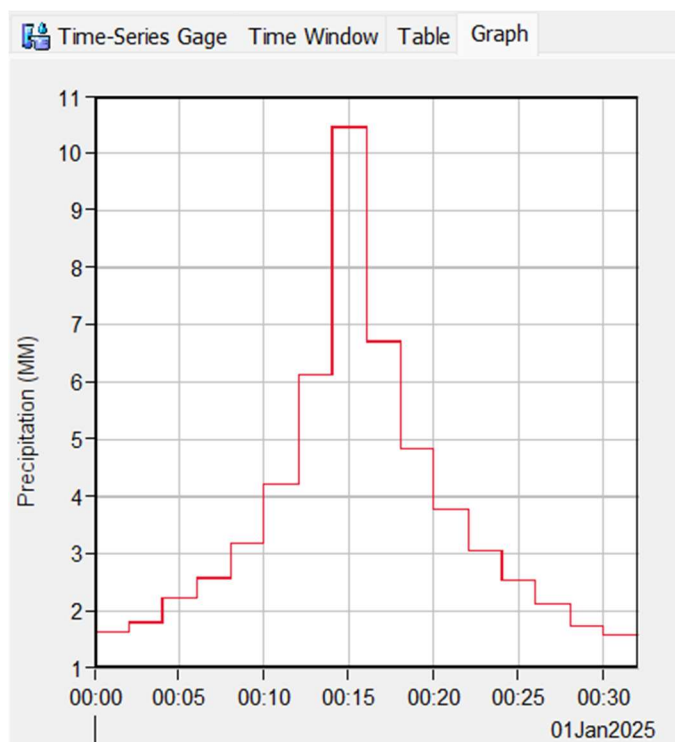
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 36 - Gráfico simulação para $Tr=10$ anos - T_c FAA



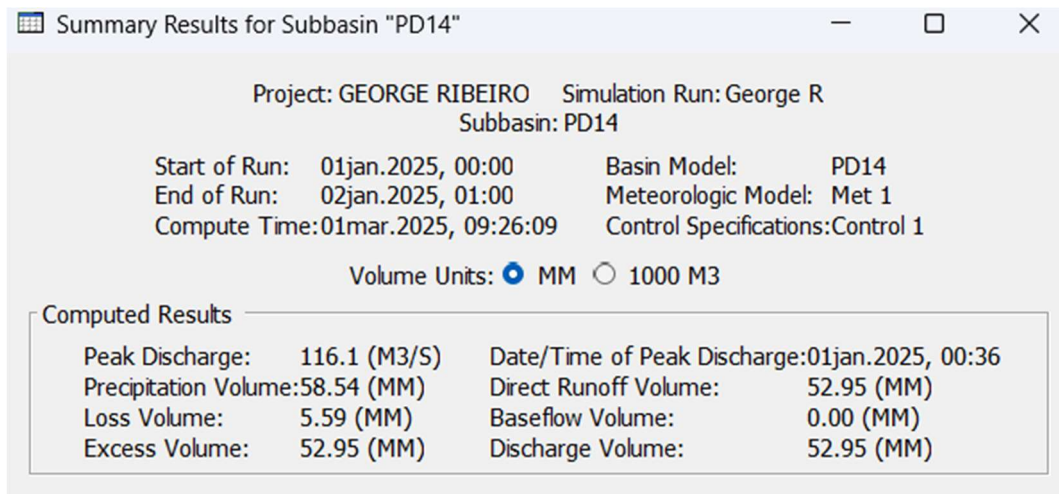
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 37 - Gráfico do hietograma - T_c George Ribeiro



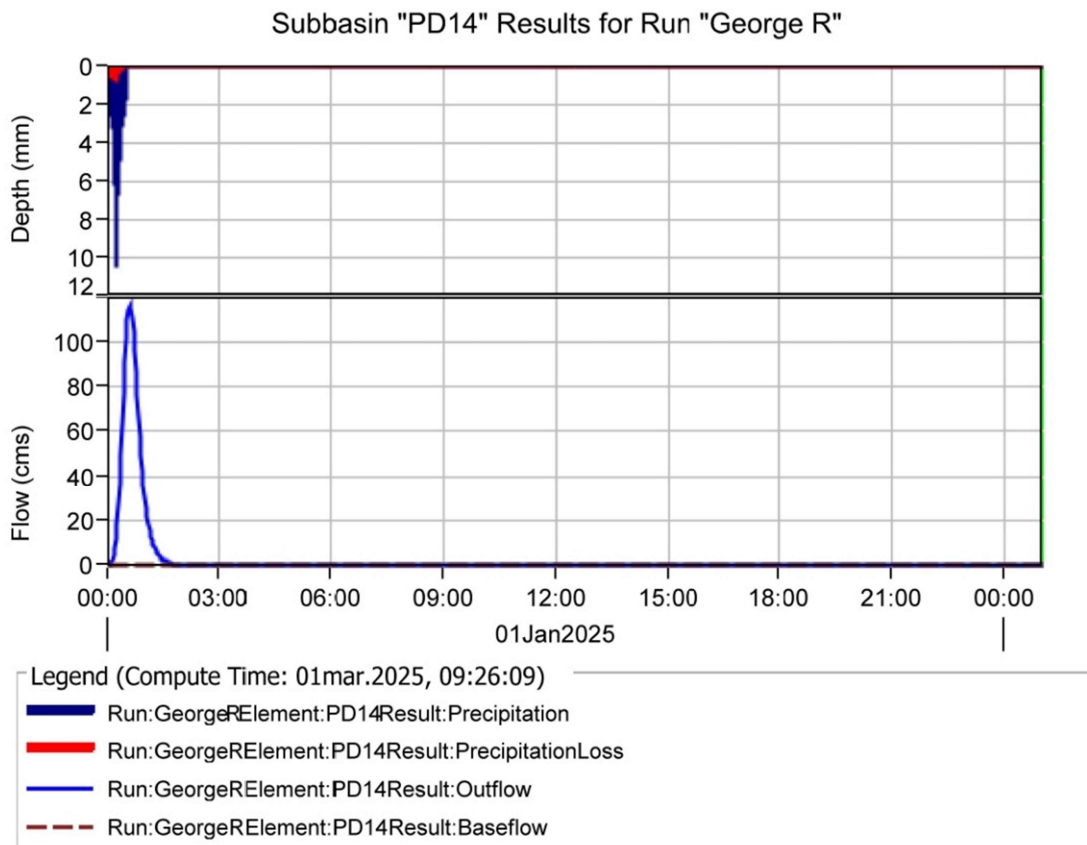
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 38 - Sumário da simulação - Tc George Ribeiro



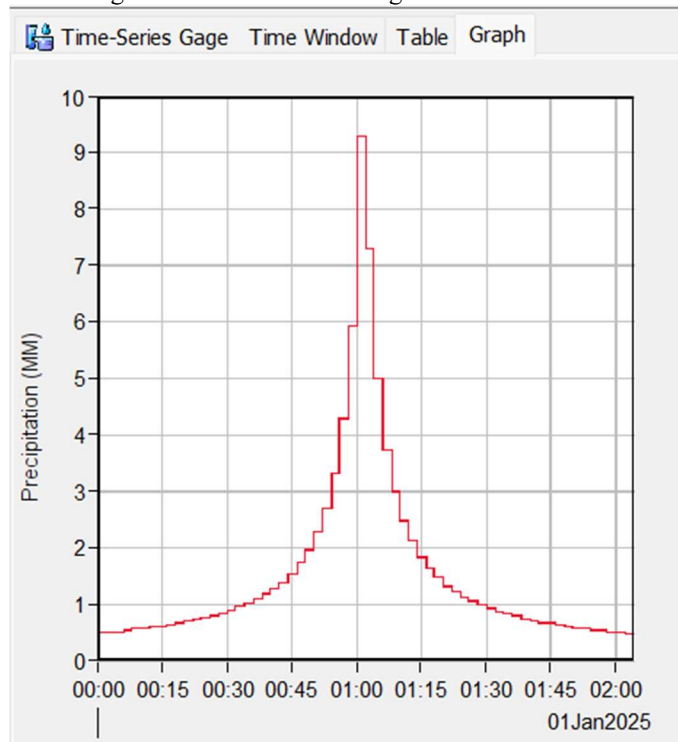
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 39 - Gráfico simulação para Tr=10 anos - Tc George Ribeiro



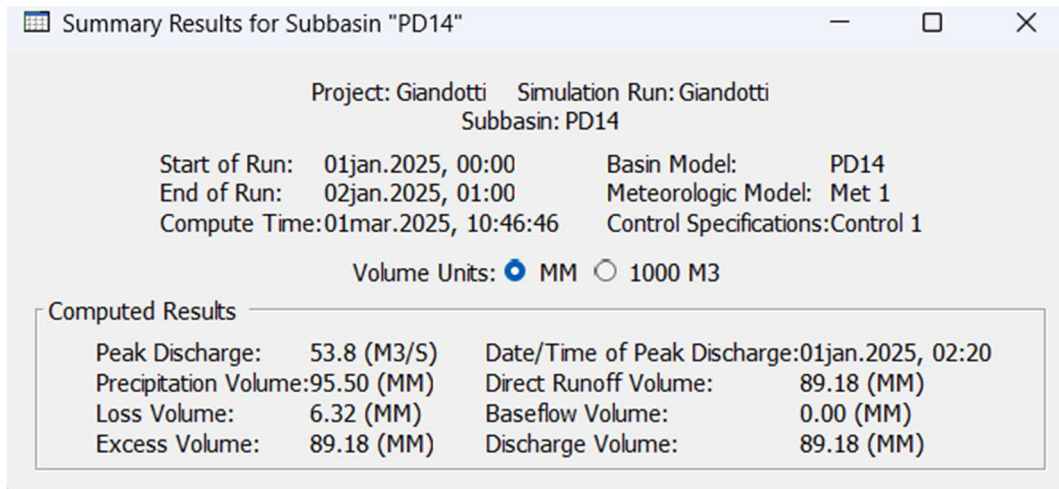
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 40 - Gráfico do hietograma - Tc Giandotti



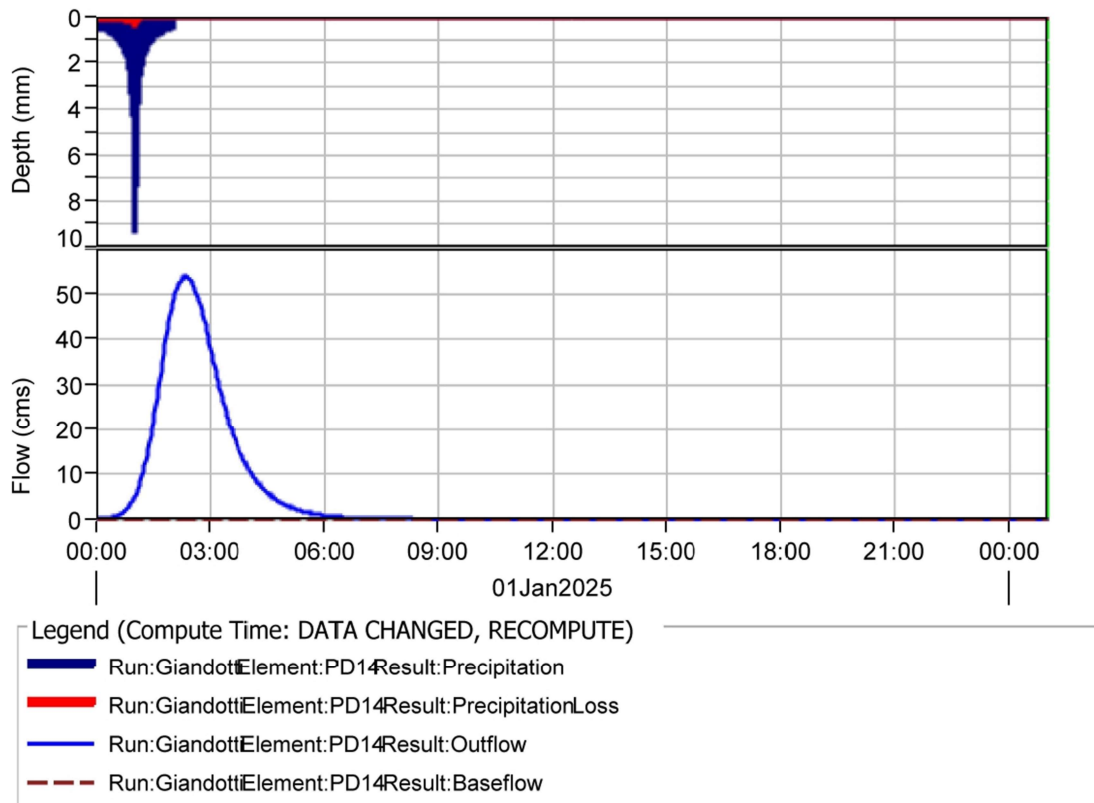
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 41 - Sumário da simulação - Tc Giandotti



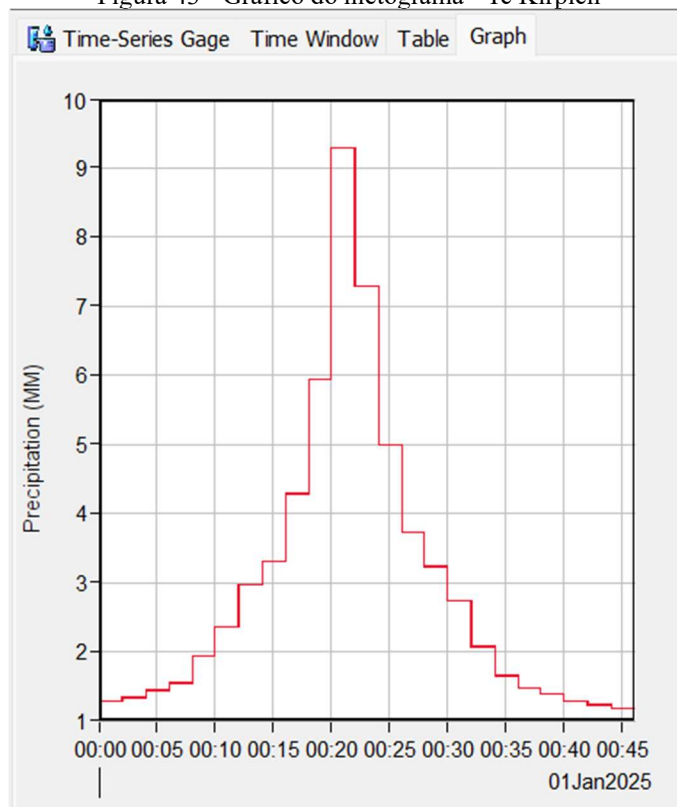
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 42 - Gráfico simulação para $T_r=10$ anos - Tc Giandotti
Subbasin "PD14" Results for Run "Giandotti"



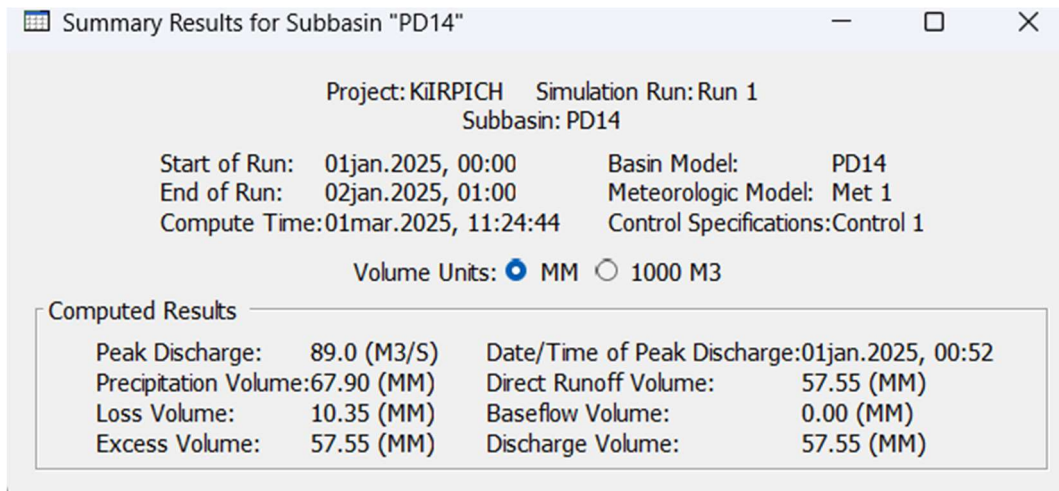
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 43 - Gráfico do hietograma - Tc Kirpich



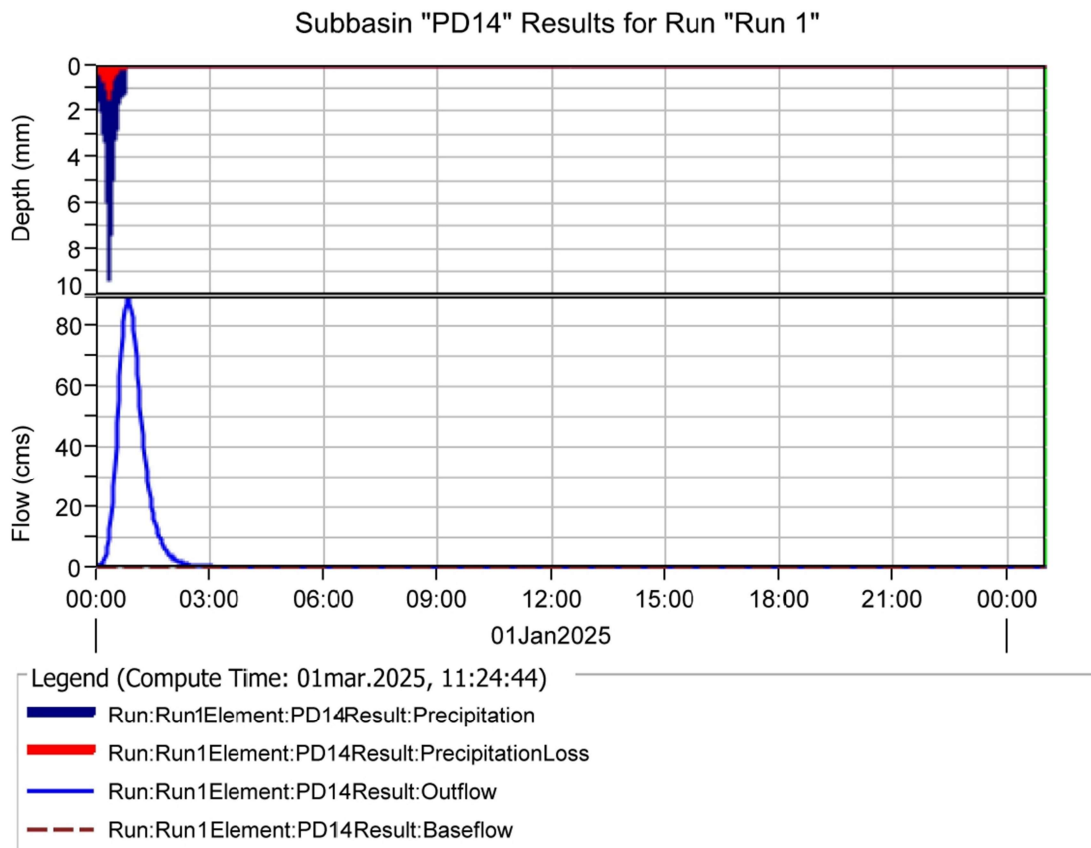
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 44 - Sumário da simulação – Tc Kirpich



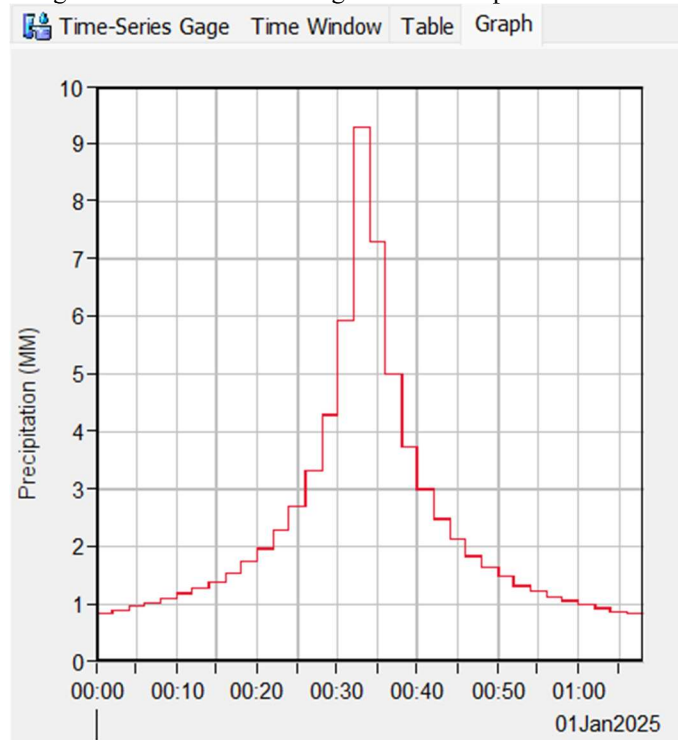
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 45 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc Kirpich



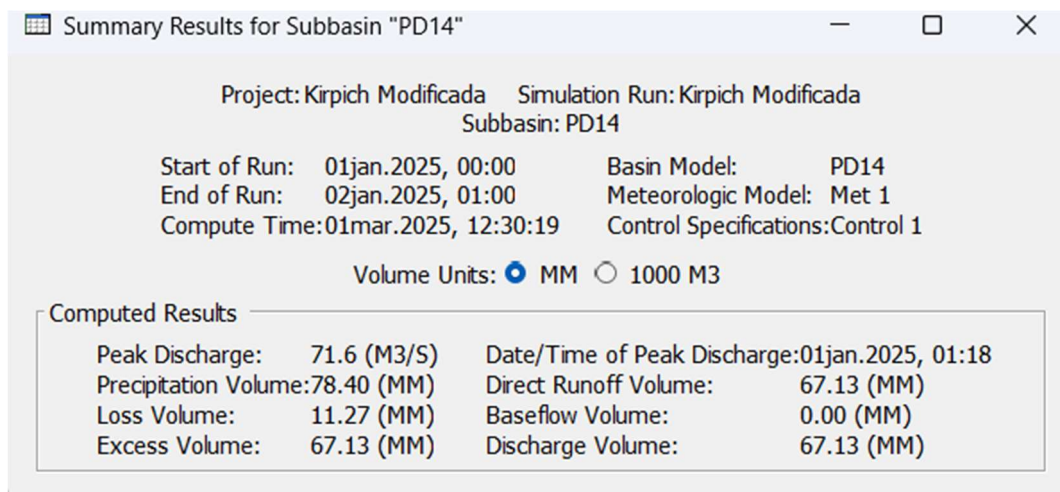
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 46 - Gráfico do hietograma – Tc Kirpich Modificada



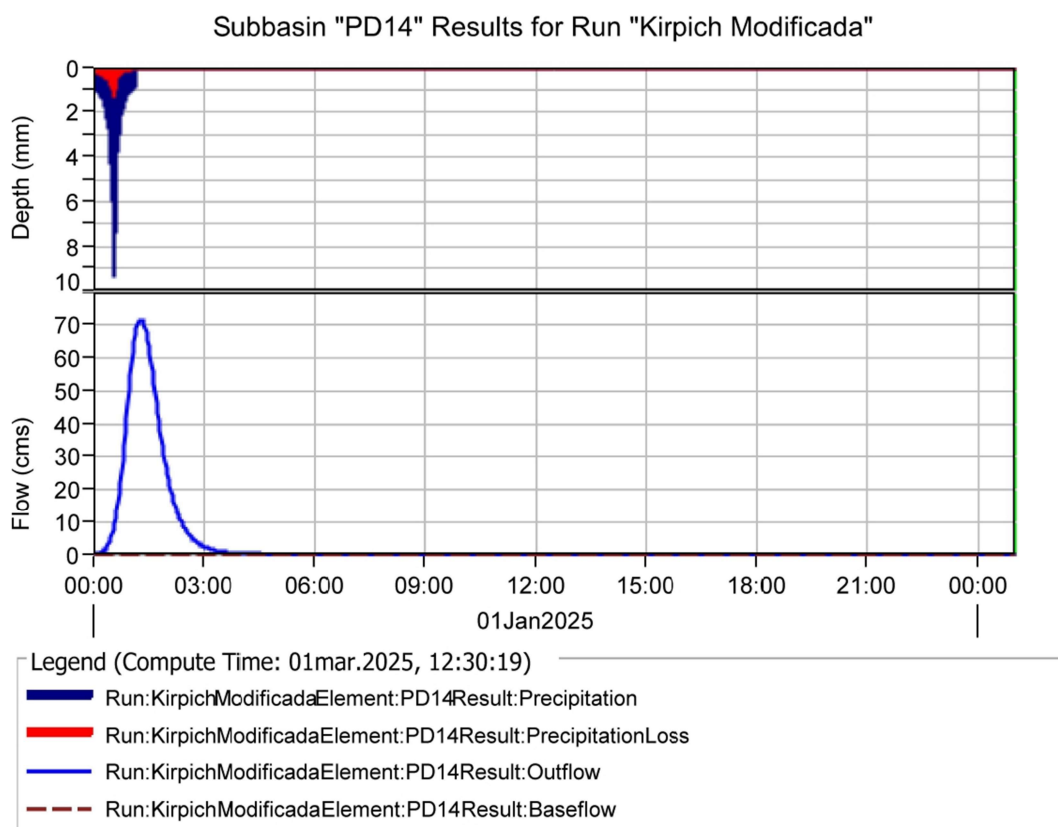
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 47 - Sumário da simulação – Tc Kirpich Modificada



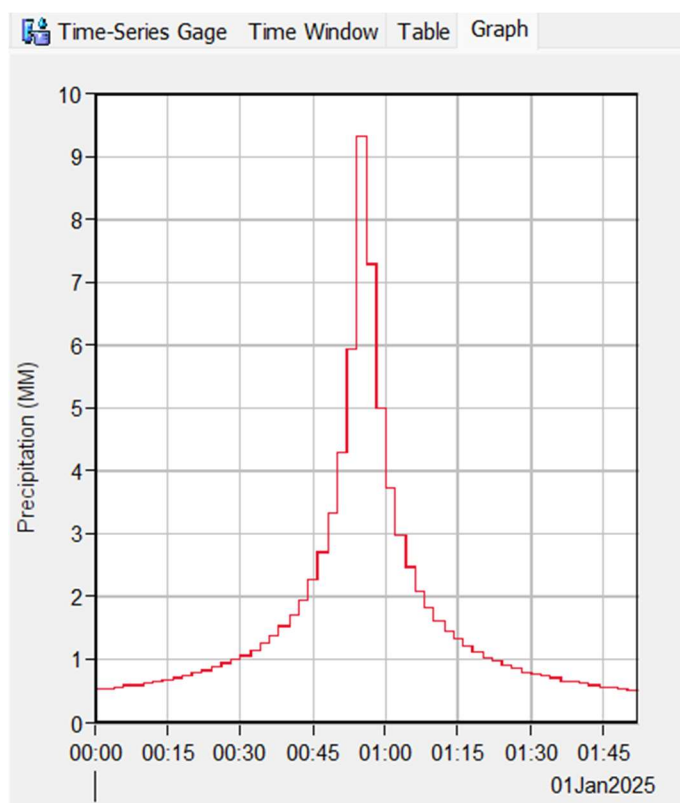
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 48 - Gráfico simulação para $T_r=10$ anos – Tc Kirpich Modificada



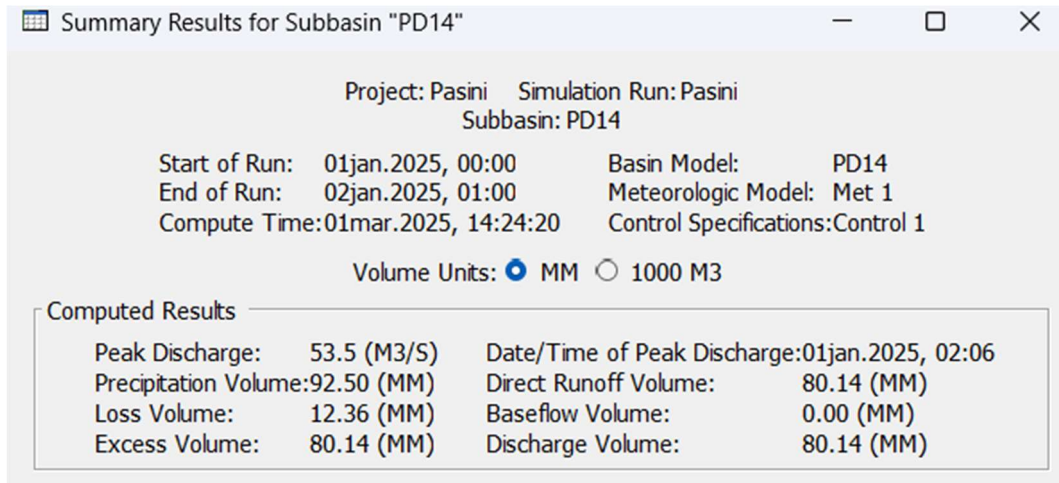
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 49 - Gráfico do hietograma – Tc Pasini



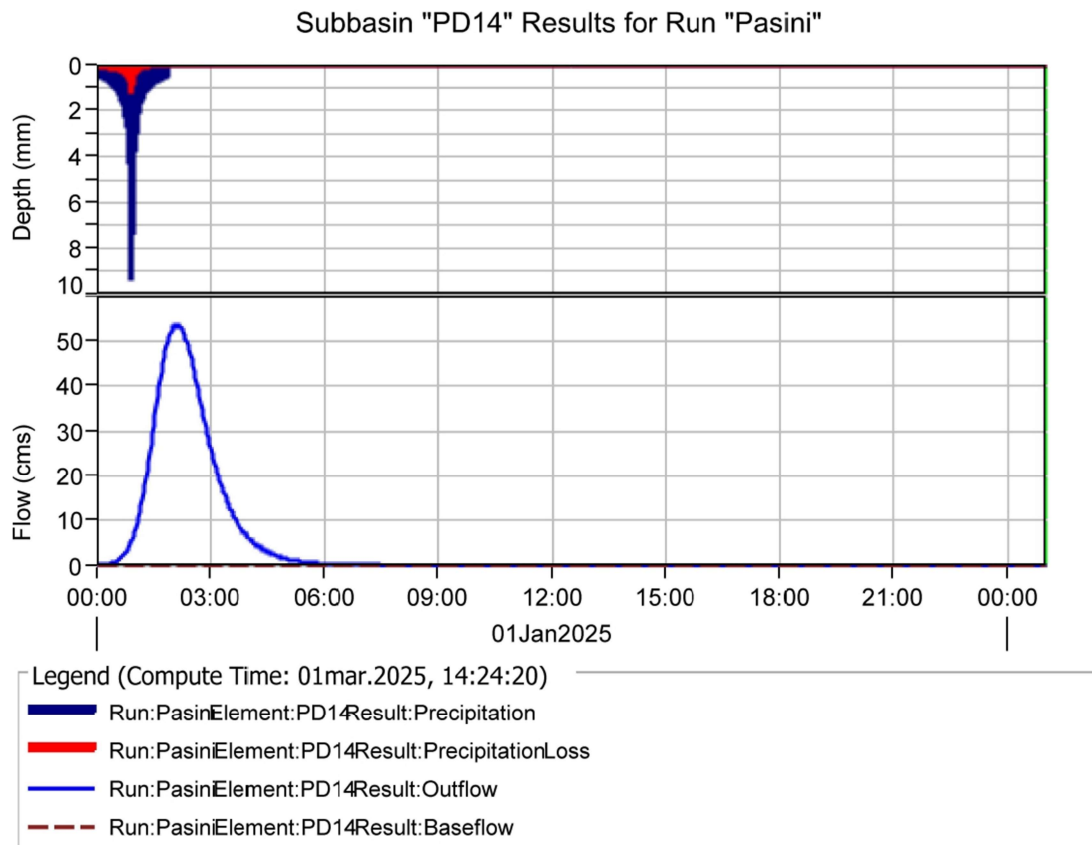
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 50 - Sumário da simulação – Tc Pasini



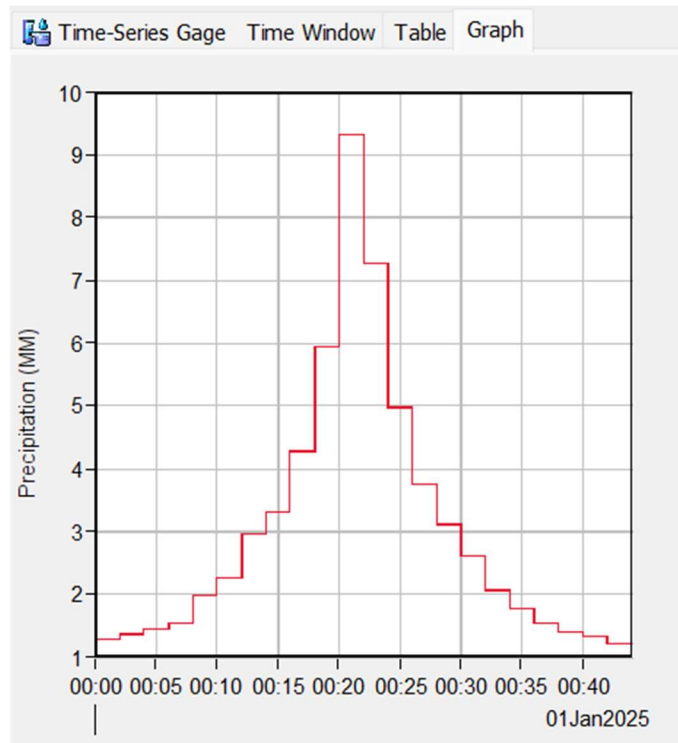
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 51 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc Pasini



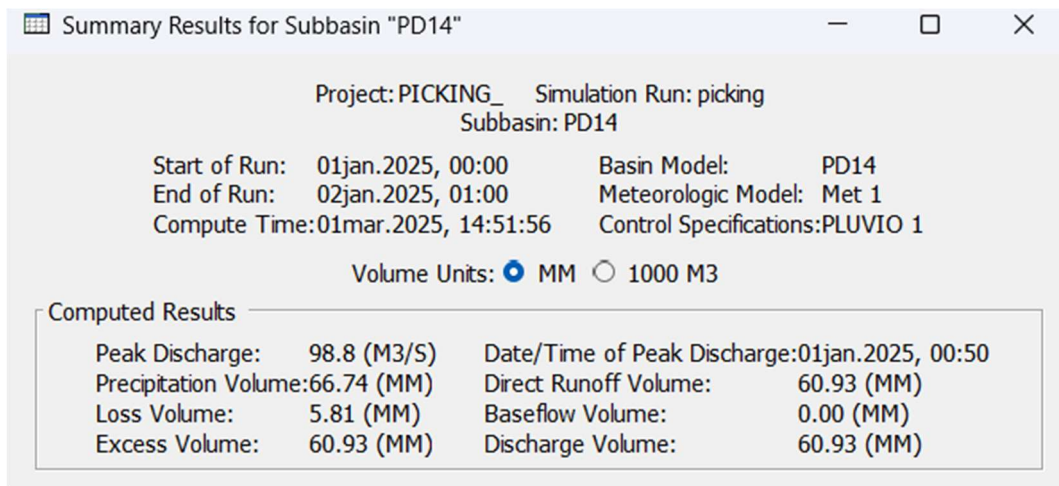
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 52 - Gráfico do hietograma – Tc Picking



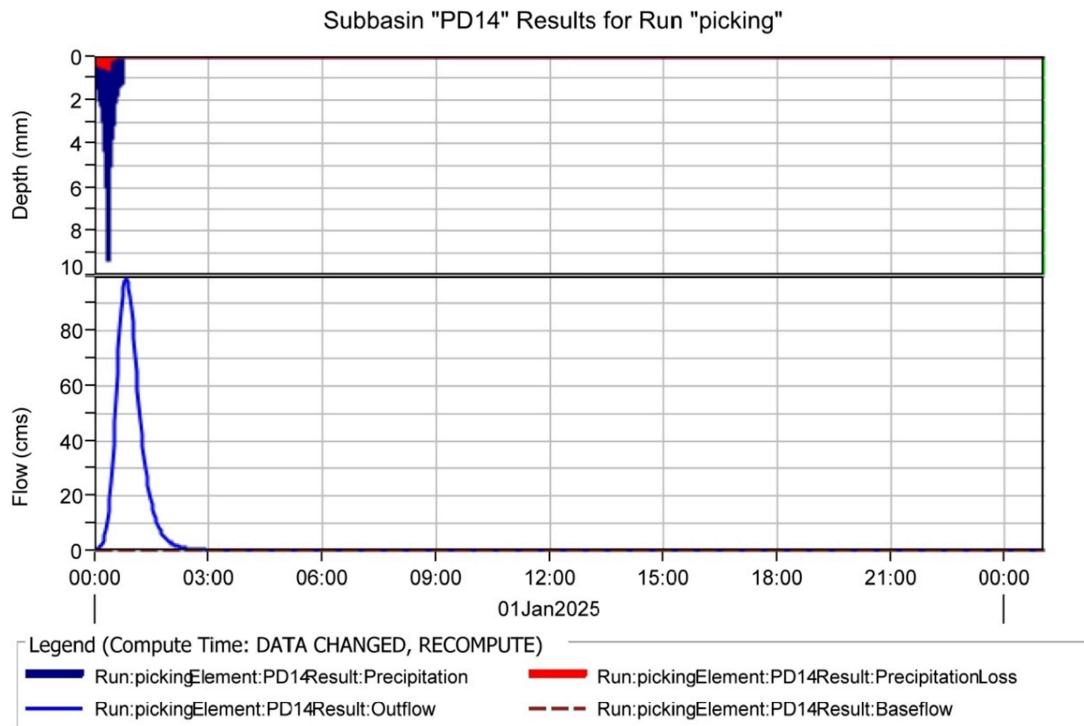
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 53 - Sumário da simulação – Tc Picking



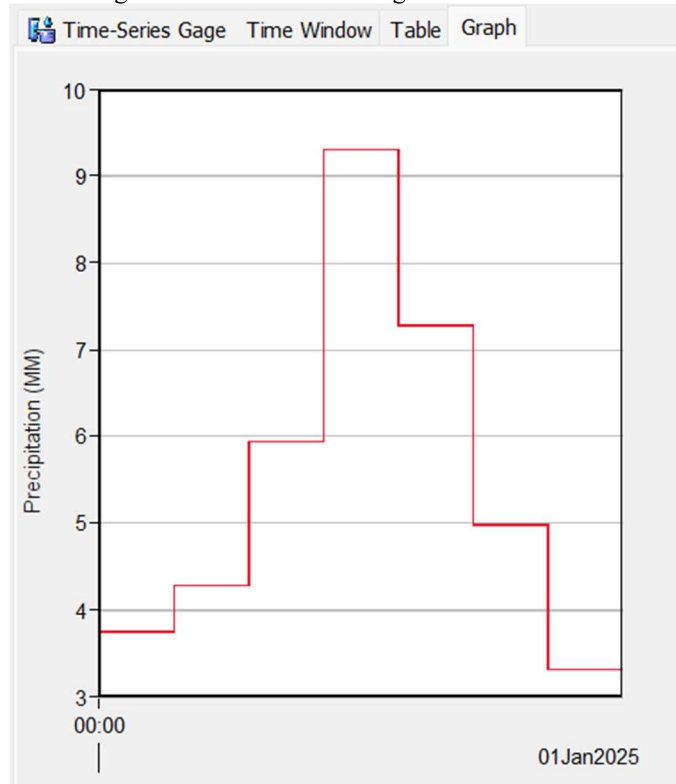
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 54 - Gráfico simulação para $T_r=10$ anos – Tc Picking



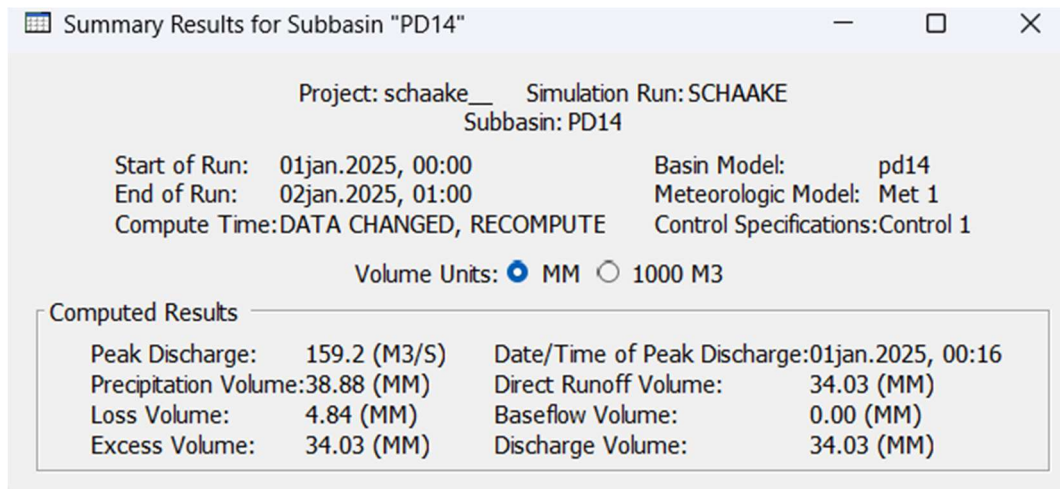
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 55 - Gráfico do hietograma – Tc Schaake



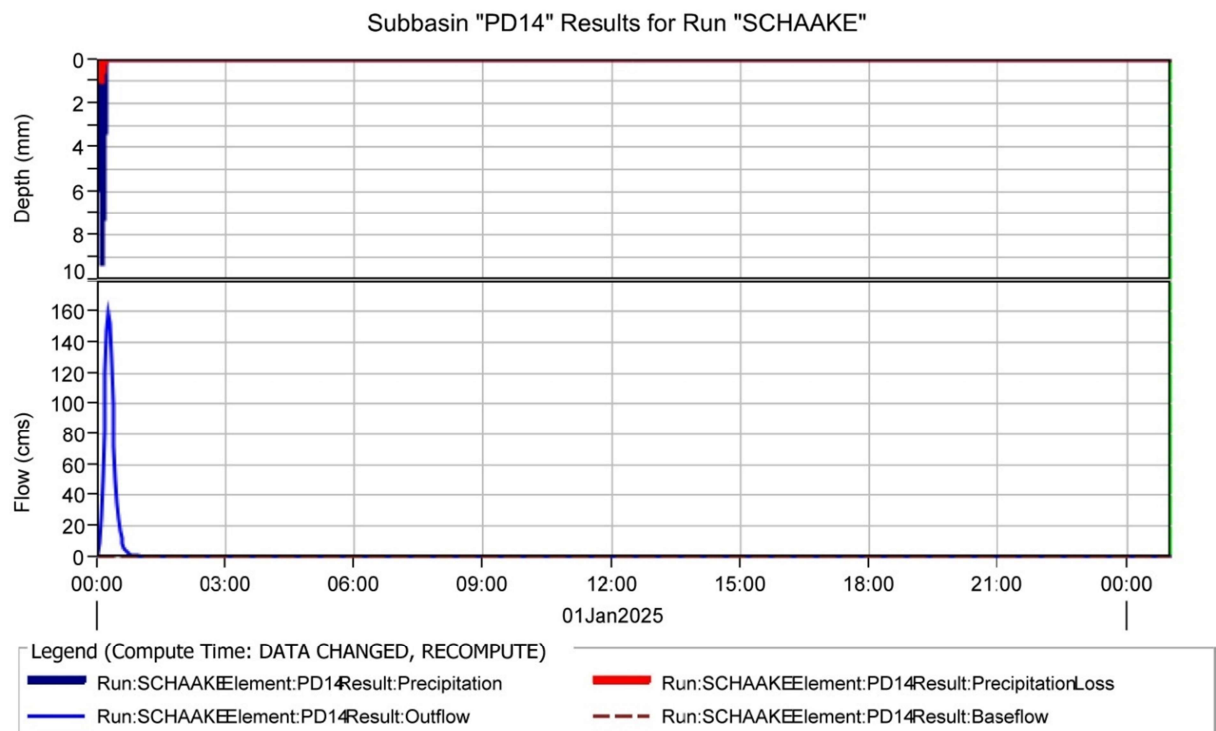
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 56 - Sumário da simulação – Tc Schaake



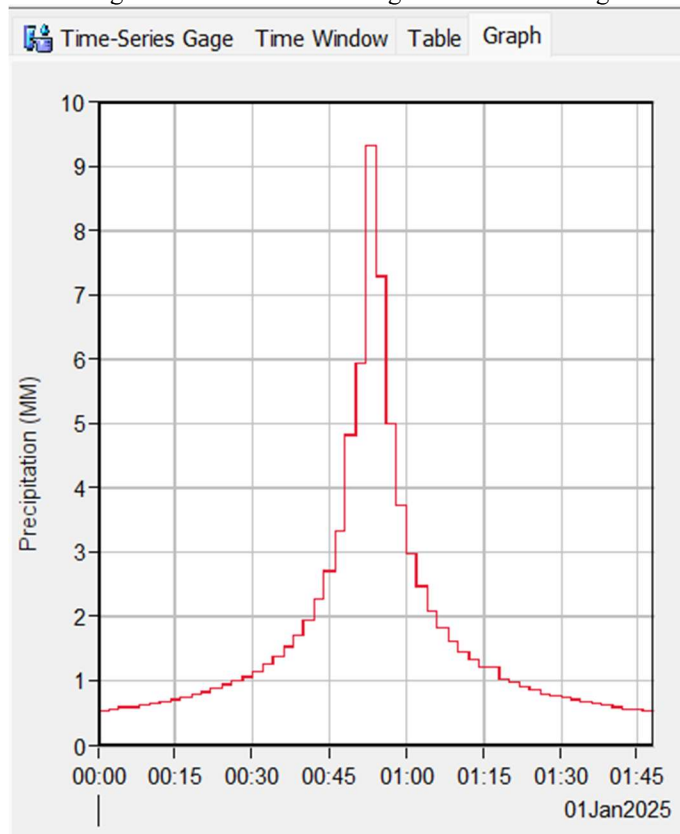
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 57 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc Schaake



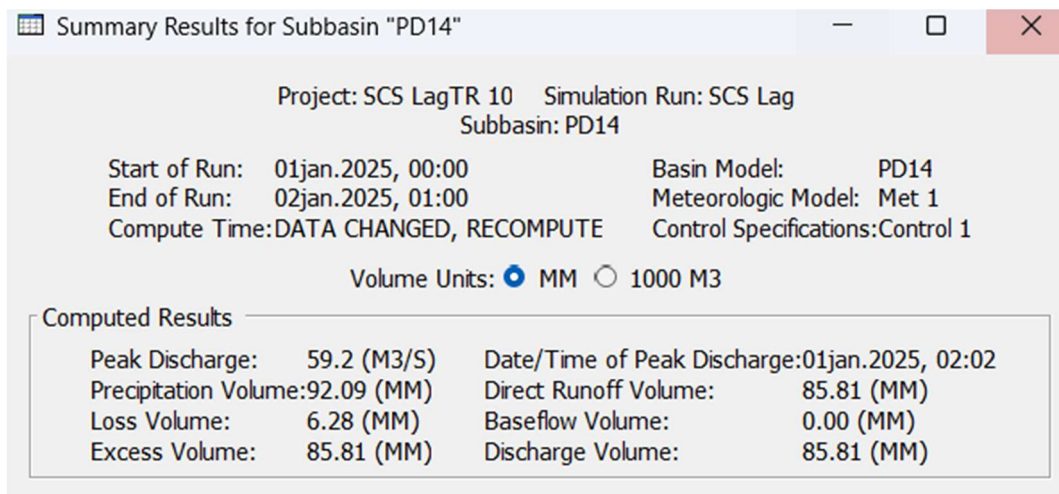
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 58 - Gráfico do hietograma – Tc SCS Lag



Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

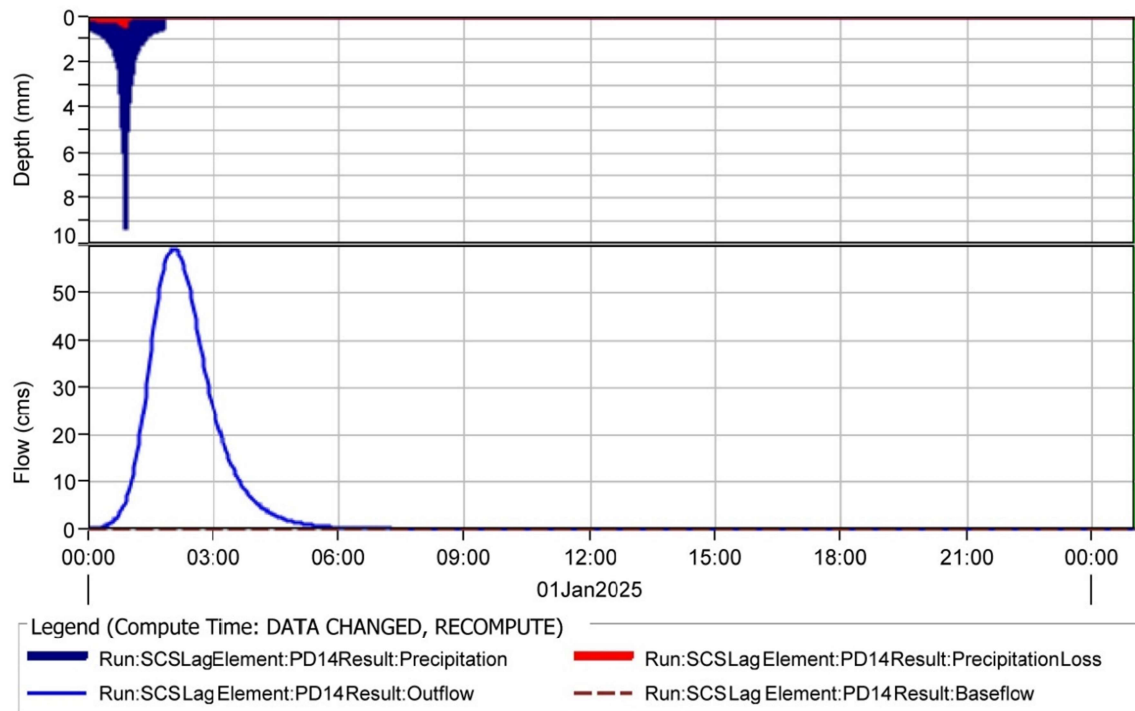
Figura 59 - Sumário da simulação – Tc SCS Lag



Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

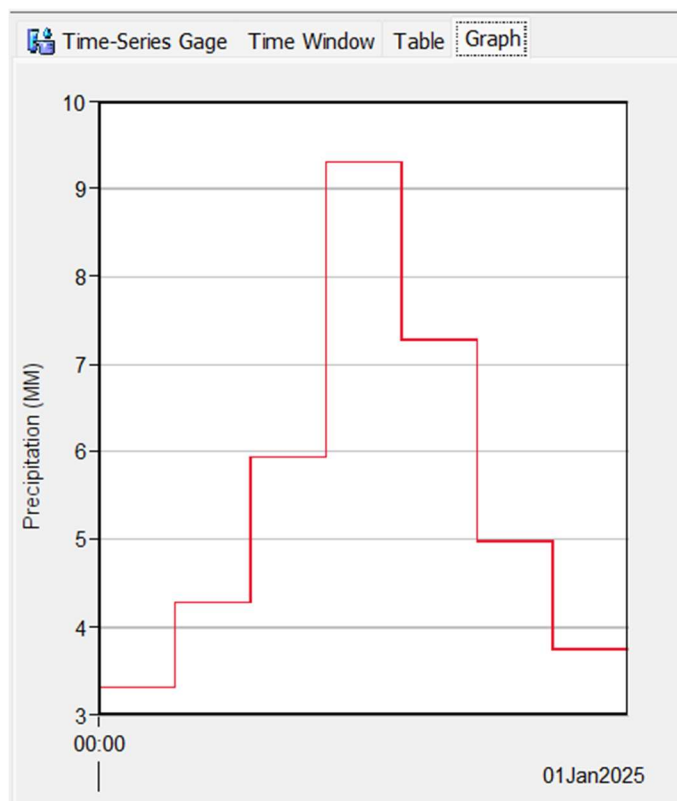
Figura 60 - Gráfico simulação para Tr=10 anos – Tc SCS Lag

Subbasin "PD14" Results for Run "SCS Lag "



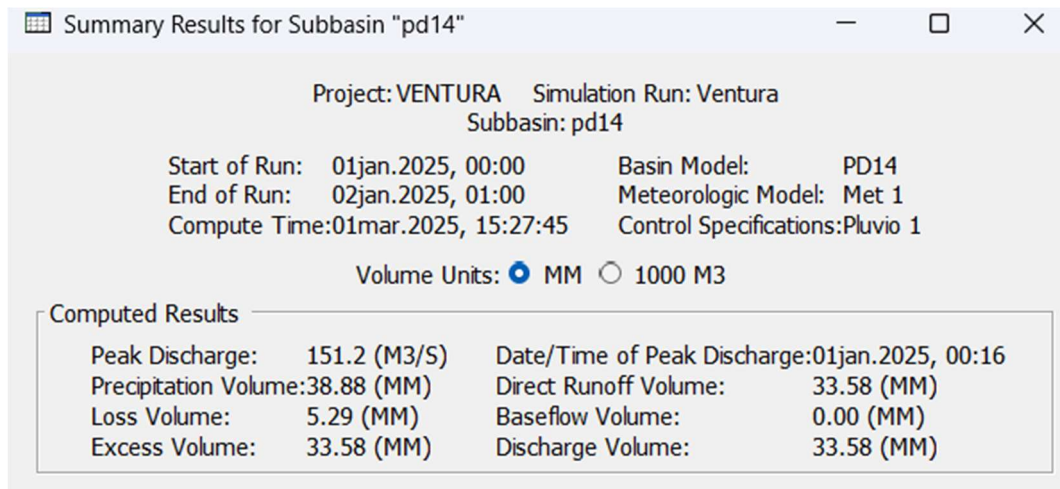
Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 61 - Gráfico do hietograma – Tc Ventura



Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Figura 62 - Sumário da simulação – Tc Ventura



Fonte: HEC-HMS Versão 4.12, 2025

Tabela 12 - Quadro resumo resultado das simulações

Método	Tc calculado (min)	Tc simulação (min)	Vazão de pico (m³/s)	Precipitação (mm)
Federal Aviation Administration (FAA)	30,18	30,00	116,60	56,91
George Ribeiro	31,22	32,00	116,10	58,54
Giandotti	124,26	124,00	53,80	95,5
Kirpich	45,27	46,00	89,00	67,9
Kirpich Modificada	67,67	68,00	71,60	78,4
Pasini	111,01	112,00	53,50	92,5
Picking	43,41	44,00	98,80	66,74
Schaake et. al	13,26	14,00	159,20	38,88
SCS Lag	108,12	108,00	59,20	92,09
Ventura	13,98	14,00	151,20	38,88

Fonte: Autor, 2025

Figura 63 – Variação do tempo de concentração de acordo com a metodologia de cálculo

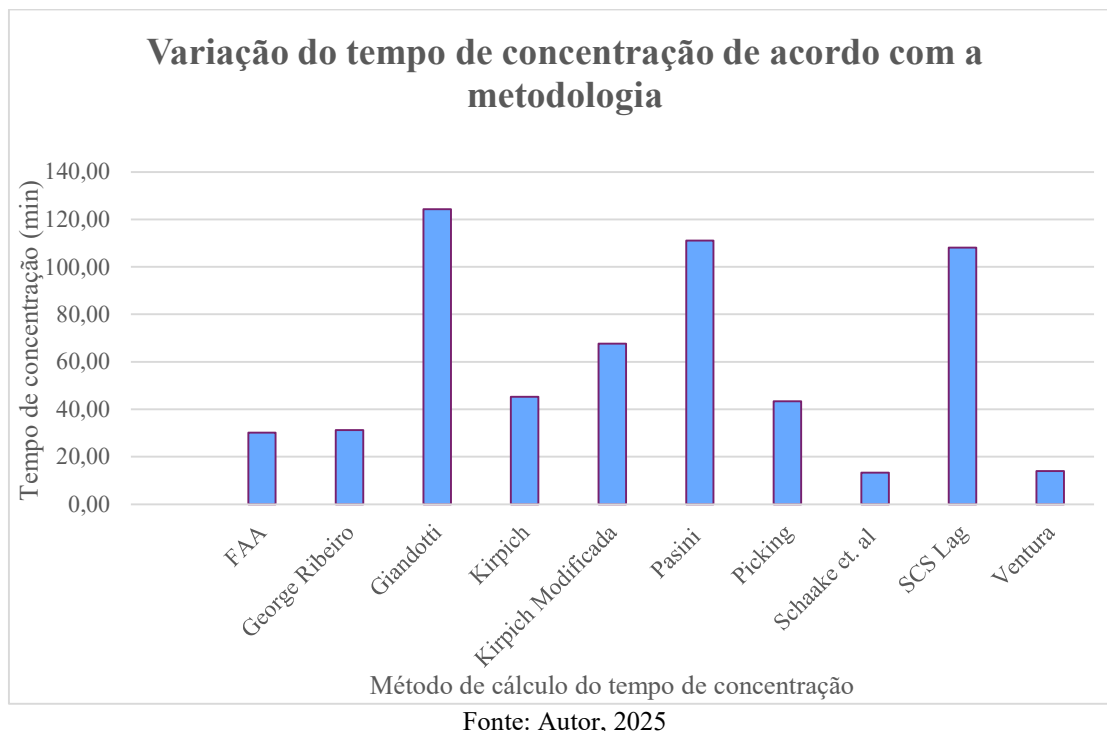


Figura 64 - Variação da vazão de pico de acordo com a metodologia de cálculo do tempo de concentração



É possível perceber pela análise que quanto maior o tempo de concentração, menor é a vazão. A relação inversa entre o tempo de concentração e a vazão máxima em uma bacia

hidrográfica é amplamente reconhecida na hidrologia, validando assim os resultados obtidos. Os maiores tempos de concentração obtido, foram através dos métodos Giandotti com T_c de 124,26 minutos e Pasini 111 minutos, forneceram vazões de pico de 53,80 m³/s, 53,50m³/s, respectivamente. Já Schaake et. al e Ventura concederam as menores vazões, 159,20 m³ e 151,20 m³/s, em razão de seus tempos de concentração serem inferiores aos demais métodos. As vazões de pico de George Ribeiro e FAA, Kirpich e Picking, entregaram valores próximos entre si, assim como para os T_c 's. Kirpich Modificada seguindo a linha do T_c não se aproximou de nenhum outro método, ficando apenas como um valor intermediário entre Q_p mínima e máxima.

4.2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 13 - Análise do tempo de concentração

Análise	Média aritmética	Variância	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
1	58,84	1733,74	41,64	70,77
2	29,55	190,01	13,78	46,64
3	34,94	62,78	7,36	21,06

Fonte: Autor, 2025

Em uma primeira análise entre as 10 fórmulas, FAA, George Ribeiro, Giandotti, Kirpich, Kirpich Modificada, Pasini, Picking, Ventura, Schaake et. al, SCS Lag. Proporcionou uma média aritmética de 58,84 minutos, variância de 1733,74 indicando assim que o alto grau de dispersão dos valores no conjunto de dados em relação à sua média. Quanto ao desvio padrão, os dados estão mais espalhados, indicando maior variabilidade. O coeficiente de variação está em 70,77 % indicando alta dispersão.

Na segunda análise, eliminando-se os métodos com os maiores T_c 's, Giandotti, Kirpich Modificada, Pasini e SCS Lag. A média reduziu em aproximadamente 50%, a variância reduziu em quase 10 vezes, o desvio padrão caiu 67% e o coeficiente de variação ainda indicando alta dispersão com 46,64%.

Na terceira e última análise feita apenas com FAA, George Ribeiro e Picking, o resultado foi um coeficiente de dispersão média, redução do desvio padrão para 7,36%, indicando que os

dados estão próximos, a variância de 62,78 e a média variando de 8,47 para mais e 4,76 para o menor valor. O valor que mais se aproxima da média é 32 minutos, T_c calculado pelo método de George Ribeiro.

4.2.2 IMPACTO DAS VAZÕES DE PICO CALCULADAS

Comparando a menor e maior vazão, um dispositivo dimensionado para o Giandotti em uma macrobacia onde Schaake melhor se ajustaria, levaria ao subdimensionamento, isso porque os métodos possuem uma diferença na ordem de quase 3 vezes. Caso contrário e a fórmula de Ventura fosse adotada em uma microbacia cuja método aquedado seria Picking, acarretaria o superdimensionamento da estrutura elevando custos e exigindo maior área para reservatórios e canais de escoamento. A diferença entre os T_c se dá ao fato de possuírem abordagens distintas para estimar vazões, baseando-se em diferentes princípios e aplicações hidrológicas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta monografia avaliou o desempenho de 10 fórmulas de tempo de concentração e sua influência em microbacias urbanas, é de grande relevância para a engenharia hidrológica, especialmente no campo da análise estatística aplicada à hidrologia. Diante da abundância de metodologias, mudanças climáticas e regimes hidrológicos, mudança na organização urbana, aumento da impermeabilização dos solos, é indispensável testes nos parâmetros pré-estabelecidos no âmbito da hidrologia, é importante ressaltar que os planos diretores devem passar por atualizações em um intervalo de tempo pré-determinado a fim prevenir ou mitigar problemas relacionados a drenagem, essas informações são cruciais para o planejamento urbano, o desenvolvimento de infraestruturas adequadas e a implementação de medidas de mitigação de desastres.

A fórmula recomendada pelo estudo para a Sub-bacia PD14 é George Ribeiro, visto que melhor se adequa ao cenário atual da região. As estratégias de avaliação adotadas no presente trabalho parecem abranger a faixa de resultados esperados, proporcionando um embasamento sólido para a definição do tempo de concentração e, conseqüentemente, para o cálculo das vazões. A vazão estimada impacta diretamente o dimensionamento de projetos hidrológicos e

hidráulicos, que dependem de vazões e hidrogramas de projeto precisos.

REFERÊNCIAS

ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B. **Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos**. Engenharia Sanitária E Ambiental: Rio de Janeiro, 2017. 22(2), 239–250. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016146750>

AZEVETO NETTO, J. M.; VLELA, S. M. **Manual de Hidráulica**. 5. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1969.

BARBOSA, A.R. J. **Bacia Hidrográfica**. Goiás: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2004.

BIBLIA SAGRADA. **Traduzida em português por João Ferreira de Almeida**. Barueri: Sociedade Bíblica do Brasil, 1995. Sl. 125, 1, p. 693; Pv. 3, 5, p.705.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; JULIANO, N. EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

CALIL P. M.; OLVEIRA, L. F. C. de; KLIEMANN, H. J.; OLIVEIRA, V. A. de. **Caracterização geomorfométrica e do uso do solo da Bacia Hidrográfica do Alto Meia Ponte, Goiás**. Campina Grande, PB: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, UAEA/UFCG, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400014>

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de textos, 2005.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 3. ed. Porto Alegre: ABRHidro, 2021.

COSTA, T.; LANÇA, R. **Capítulo I: Hidrologia de Superfície**. Portugal: Área Departamental De Engenharia Civil Núcleo de Hidráulica e Ambiente da Escola Superior de Tecnologia Universidade do Algarve, 2001.

CHOW, V. T.; MADMENT, D. R.; MARYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw-

Hill. ISBN, 1988.

ECKHARDT, R. R.; HAETINGER, C.; SALDANHA, D. L.; FERREIRA, E. R.; FAVA E.; SILVA, J.; DIEFRICH, V. L. **Previsão e Mapeamento da Área Urbana Inundável na Cidade de Lajeado - RS – Brasil**. Buenos Aires, Argentina: VI International Conference on Engineering and Computer Education, 2009.

KARASIAK, N. **Dzetsaka Qgis Classification plugin**. 2016. Disponível em: [GitHub - nkarasiak/dzetsaka: dzetsaka : classification plugin for Qgis](https://github.com/nkarasiak/dzetsaka:dzetsaka:classification-plugin-for-Qgis)

GENOVEZ, A. M.; Vazões Máximas. In: Paiva, J. B. D.; Paiva, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacia Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

GIVISIEZ, G. H. N.; RIOS NETO, E. L. G.; OLIVEIRA, E. L. **Demanda por novas residências e dinâmica demográfica**. In: VIII SEMINÁRIO INTERNACIONAL DA LARES. São Paulo, 2008.

GUILHERME, O. D. S.; OLIVEIRA, A.; LARANJA, R. E. P. **A organização do espaço urbano no Brasil e implicações socioambientais**. Goiás: Universidade Estadual de Goiás, Revista Sapiência, 2020.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER – HEC. **HEC-HMS Hydrologic Modeling System**. U.S.: Army Corps of Engineers, 2024. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Bacias e divisões hidrográficas do Brasil / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL. Normais Climatológicas (1961/1990). Brasília - DF, 2024. Disponível em: [Instituto Nacional de Meteorologia - INMET](https://www.inmet.gov.br/).

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de Imagens da DGI/INPE**, 2024. Disponível em: <https://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore> . Acesso em: 02 de janeiro de 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC: Global Warming of 1,5 °C**. Special report, 2018.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**. São Paulo: SMA, 2008.

KISHI, R. T. **Método Racional**. 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2019. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~rtkishi.dhs/TH024/TH024_14_Metodo_racional.pdf.

KISHI, R. T. **Método Racional**. 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2022. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~rtkishi.dhs/TH024/TH024_13_HU.pdf

LANÇA, R.M.M. **Contribuição para o estudo de cheias recorrendo a um modelo distribuído**. Portugal: Universidade de Évora, 2000.

LERMEN, A. M.; CLERICI, N. J.; FRONZA, C. S.; REIS, M. V. **Consequências da ineficiência dos projetos de drenagem: um diagnóstico do carregamento de sedimentos causadores de malefícios à saúde humana**. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2020.

LIMA, M. G.; MARTINS, A. M.; PINHEIRO, L. A. L. N.; SOARES, A. A. J. **Climas do Piauí: interações com o ambiente**. Teresina: Edufpi, 2020.

LIMA, R. C. C.; CAVALCANTE, A. M. B.; MARIN, A. M. P. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido – INSA, 2011.

LYRA, G. B.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; LYRA, G. B. **Coefficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu**. Campina Grande, PB: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, UAEA/UFCG, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415->

43662010000400001

MARICATO, E.; CUNHA, T. F. S. **Brasil, cidades: alternativas para a crise urbana**. Petrópolis: Vozes, 2002.

McCUEN, R. H. **A guide to hydrologic analysis using SCS methods**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.

MELLO, A. J. Q. **Rios e Chuvas do Brasil: Novos métodos e Tabelas de Hidrologia**. Curitiba, Paraná: Editora A M, 1973.

NEGRI, R.; FILL, H. **Caracterização física de 14 bacias hidrográficas brasileiras: proposição do indicador da declividade média dos rios e do coeficiente de suscetibilidade de enchentes**. Campina Grande, PB: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental: UAEA/UFCG, 2023. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/S1413-415220220194>

OLIVEIRA, G. S.; SILVA, N. F.; HENRIQUES, R. **Mudanças climáticas: ensinamentos fundamentais e médio**. Brasília: MEC, SEB, MCT, AEB, 2009.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World Population Prospects 2022: Summary of Results**. Nova Iorque: ONU, 2022. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World Population Prospects 2024**. Nova Iorque: ONU, 2024. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

PIERONI, J. P.; BRANCO, K. G.R.; DIAS, G. R. V.; FERREIRA, G. C. **Avaliação do estado de conservação de nascentes em microbacias hidrográficas**. Geociências, 38(1), 185-193, 2019. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/350830723_AVALIACAO_DO_ESTADO_DE_CONSERVACAO_DE_NASCENTES_EM_MICROBACIAS_HIDROGRAFICAS

PINTO, N. L. S; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.

PIROLI, E. L. **Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas**. São Paulo: Editora UNESP, 2022. 141 p. ISBN: 978-65-5714-298-1. Disponível em: <https://doi.org/10.7476/9786557142981>.

RESCK, D.V.S. **Manejo integrado em microbacias hidrográficas** Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1992. 17p. EMBRAPA-CPAC. Documentos, 40). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/548643/1/doc40.pdf>

RODRIGUES, F. M.; PISSARRA, T. C. T. **Caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica Córrego da Fazenda Glória, Município de Taquaritinga**. São Paulo: Repositório Institucional da UNESP, Irriga, Botucatu, 2008. v. 13, n. 3, p. 310 322.

RODRIGUES NETO, E. X.; LIMA, A. J. **Inundações em Teresina-Piauí: uma questão sócio-histórica**. Curitiba, Paraná: Revista Brasileira de Gestão Urbana, 2019. v.11, e20180177. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180177>

SANTOS, J. R.; GALVÃO, L. S.; ROBERTS, D. A. **Caracterização de uma microbacia por meio de geotecnologias**. Natal: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4837-4843, 2008. Disponível em: <https://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.17.19.32/doc/4837-4843.pdf>

SANTOS, L. P. R. **Mapeamento de área suscetível à cheia utilizando modelagem e simulação hidrológica: Área a jusante da Sub-Bacia PD14, Teresina/PI**. Teresina: IFPI, 2024.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; NETO, F. L. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de**

Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. 10 ed. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

SCS. Urban Hydrology For Small Watersheds. U.S. Dept. Agr, 1986. Technical Release, 55.

SILVEIRA, A. L.L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. Porto Alegre: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

SILVEIRA, A. L. L. O ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In Tucci, C. E. M, **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993.

SOBRINHO, A.M. Hidrologia Aplicada: Métodos Científicos e Análise de Tempo de Retorno de Chuvas. Rio de Janeiro: Editora XYZ, 2015.

SOUSA, M. C. B.; PEDROSA, R. A.; IWATA, B. F.; CHAVES, S. V. V. Uso de telhados verdes para controle de águas pluviais urbanas em Teresina – Piauí. Recife: Revista de Geografia, 2021. V. 38, No. 2.

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. Manual de Drenagem. Teresina, 2011.

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. Relatório Final. Teresina, 2010.

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. Plano Diretor de Ordenamento Territorial - PDOT. Lei complementar N° 5.481. Teresina, 2020.

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. Plano Diretor de Ordenamento Territorial - PDOT. Lei complementar N° 5.807. Teresina, 2022.

TUCCI, C. E. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C.; CAMPANHA, N. **Simulação distribuída com IPH II, nova versão**. Gramado: X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Conesul, ABRH, 1993.

UMBELINO, G.; SATHER, D.; MACEDO, D.; FELIPPE, M. **Aplicação de técnicas de geoprocessamento para a preservação dos recursos hídricos e estudos de vulnerabilidade socioambiental**. Florianópolis: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007. INPE, p. 5541-5549.

VAEZA, R. F.; OLIVERA FILHO, P. C. de; MAIA, A. G.; DISPERATI, A. A. **Uso e Ocupação do Solo em Bacia Hidrográfica Urbana a Partir de Imagens Orbitais de Alta Resolução**. Floresta E Ambiente, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/floram.2011.003>

VALENTIM, M. L. P.; MÁS-BASNUEVO, A. **Inteligência organizacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, Marília: Oficina Universitária, 2015. 383 p. ISBN: 978-65-5954-131-7. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/4rwps>. <https://doi.org/10.36311/2015.978-85-7983678-7>.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. **Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2010.