



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Valmir de Paulo Bernardes Junior

**ESTUDO HIDROLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
CÓRREGO VARJADA E IMPACTOS DA
IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO NO LOCAL**

Ouro Preto

2021

Estudo Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Córrego Varjada e Impactos da
Impermeabilização do Solo no Local

Valmir de Paulo Bernardes Junior

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 27 de agosto de
2021 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos – Hidrologia

Orientadora: Prof^a. M.Sc. Maria Luíza Teófilo Gandini - UFOP

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B518e Bernardes Junior, Valmir de Paulo.
Estudo hidrológico da bacia hidrográfica do Córrego Varjada e
impactos da impermeabilização do solo no local. [manuscrito] / Valmir de
Paulo Bernardes Junior. - 2021.
80 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Ma. Maria Luíza Teófilo Gandini.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Hidrologia. 2. Geoprocessamento. 3. Urbanização. 4. Medidores de
fluxo - Hidrograma. I. Gandini, Maria Luíza Teófilo . II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 556.516(815.1)

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

Estudo Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Córrego Varjada e Impactos da
Impermeabilização do Solo no Local

Valmir de Paulo Bernardes Junior

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 27 de agosto de
2021 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:

Maria Luíza Teófilo Gandini

Orientadora: Prof^a. M.Sc. Maria Luíza Teófilo Gandini – UFOP

Aline de Araújo Nunes

Membro: Prof^a. D.Sc. Aline de Araújo Nunes – UFOP

Carlos Eduardo Ferraz de Mello

Membro: Prof. D.Sc. Carlos Eduardo Ferraz de Mello – UFOP

AGRADECIMENTOS

Devo agradecer a Deus, antes de mais nada, pela saúde, pelas oportunidades e pelos desafios. Então, agradeço aos meus pais e minha família que me ensinaram o mais importante da vida: consciência, paciência, altruísmo e dedicação. À minha namorada, pela companhia, carinho e apoio. Aos amigos e amigas, pelo amparo, ensinamentos e diversão. À minha orientadora, pela atenção, auxílio e conhecimentos compartilhados. Enfim, à UFOP e seus participantes, que proporcionaram amadurecimento, desenvolvimento pessoal e o alcance deste desejado título do qual muito me orgulho.

RESUMO

Neste trabalho, realizou-se o estudo hidrológico da bacia hidrográfica do córrego Varjada, localizada em Ouro Preto-MG. O ponto de partida foi a caracterização da área com o programa QGIS, em que se delimitou e se classificou a bacia de acordo com o uso e cobertura do solo e com sua pedologia. Na sequência, verificou-se a consistência da série histórica e, após isto, determinou-se a distribuição de probabilidade que melhor a representasse, em seguida, obtiveram-se os parâmetros de ajuste da equação IDF. Procedeu-se à modelagem hidrológica, em que foi encontrado o tempo de concentração, definidos os hietogramas pelo método dos blocos alternados, calculado o Número da Curva e, por fim, a chuva foi transformada em vazão, empregando-se o programa HEC-HMS. O método utilizado, para se gerar os hidrogramas unitários sintéticos, com suas respectivas vazões de pico, foi o SCS. Foram feitas duas modelagens para análise: uma considerando a condição atual do terreno e uma outra que simula uma possível urbanização prevista na Lei de Uso e Ocupação do município. Os resultados alcançados demonstraram os expressivos impactos negativos provenientes da impermeabilização do solo, ressaltando a grande necessidade desses impactos serem levados em consideração, no planejamento urbano, a fim de se buscar ações e de se agir de modo a evitar problemas futuros com inundações.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica; Geoprocessamento; Equação IDF; Urbanização; Hidrograma.

ABSTRACT

In this work, a hydrological study of the Varjada stream watershed, located in Ouro Preto-MG, was carried out. The starting point was the characterization of the area with the QGIS program, in which the basin was delimited and classified according to land use and soil's coverage and its pedology. Afterwards, the consistency of the historical series was verified and, after that, the probability distribution that best represented it was determined, then the adjustment parameters of the IDF equation were obtained. The hydrological modeling was carried out, in which the concentration time was found, the hyetograms were defined by the method of alternating blocks, the Curve Number was calculated and, finally, the rain was transformed into flow using the HEC-HMS program. The method used to generate the synthetic unit hydrographs, with their respective peak flows, was SCS. Two models were made for analysis: one considering the current condition of the land and another simulating a possible urbanization foreseen in the city's Use and Occupancy Law. The results achieved demonstrated the significant negative impacts arising of soil waterproofing, highlighting the great need for these impacts to be considered in urban planning, in order to seek actions and act in order to avoid future problems with flooding.

Keywords: Hydrological modeling; Geoprocessing; IDF equation; Urbanization; Hydrograph.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico (BIOLOGIANET, 2021).....	4
Figura 2: Impactos da impermeabilização do solo (TUCCI, 2005).....	7
Figura 3: Dinâmica fluvial (GEODINÂMICA, 2021).....	10
Figura 4: Hidrograma unitário sintético (COLLISCHONN & TASSI, 2010).	20
Figura 5: Hidrograma unitário sintético triangular (SIEBRA, 2021).....	21
Figura 6: Localização de Ouro Preto em Minas Gerais (MENDES, 2014).....	29
Figura 7: Abrangência da área de estudo (AUTOR, 2021).	30
Figura 8: Trecho da bacia hidrográfica do rio Doce (ANA, 2021).....	31
Figura 9: Localização da bacia hidrográfica do córrego Varjada no município de Ouro Preto (AUTOR, 2021).	31
Figura 10: Bacia hidrográfica do rio Doce (ANA, 2016).	32
Figura 11: Córrego Varjada em trecho de bacia rural (AUTOR, 2021).	33
Figura 12: Córrego Varjada em trecho do bairro Saramenha (AUTOR, 2021). ...	33
Figura 13: Zona para expansão urbana (AUTOR, 2021).	34
Figura 14: Córrego Varjada em trecho do bairro Saramenha (AUTOR, 2021). ...	35
Figura 15: Ribeirão do Funil em trecho do centro histórico (AUTOR, 2021).....	35
Figura 16: Trecho do bairro Saramenha (AUTOR, 2021).	36
Figura 17: Índices pluviométricos mensais médios (AUTOR, 2021).	39
Figura 18: Índices pluviométricos anuais (AUTOR, 2021).	39
Figura 19: Relação entre as intensidades das chuvas com vários períodos de retorno e sua relação com as intensidades de chuva no $T_r = 2$ anos (MARTINS et al., 2017).	46
Figura 20: Delimitação da bacia (AUTOR, 2021).....	50
Figura 21: Classificação hidrológica do solo da bacia (AUTOR, 2021).....	51

Figura 22: Classificação do uso do solo da bacia (AUTOR, 2021).	53
Figura 23: Gráfico da distribuição Normal (AUTOR, 2021).	54
Figura 24: Gráfico da distribuição log Normal (AUTOR, 2021).	55
Figura 25: Gráfico da distribuição Pearson tipo III (AUTOR, 2021).	55
Figura 26: Gráfico da distribuição log Pearson tipo III (AUTOR, 2021).	56
Figura 27: Gráfico da distribuição Gumbel Teórica (AUTOR, 2021).	56
Figura 28: Gráfico da distribuição Gumbel Finita (AUTOR, 2021).	57
Figura 29: Maior percurso hidráulico – córrego principal (AUTOR, 2021).	60
Figura 30: Hietograma para um Tr de 2 anos (AUTOR, 2021).	61
Figura 31: Hietograma para um Tr de 10 anos (AUTOR, 2021).	61
Figura 32: Hietograma para um Tr de 25 anos (AUTOR, 2021).	62
Figura 33: Hietograma para um Tr de 50 anos (AUTOR, 2021).	62
Figura 34: Hietograma para um Tr de 100 anos (AUTOR, 2021).	63
Figura 35: Classificação do uso e tipo de solo da bacia (AUTOR, 2021).	64
Figura 36: Zona de expansão para a simulação de urbanização (AUTOR, 2021).	65
Figura 37: Hidrograma para um Tr de 2 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).	66
Figura 38: Hidrograma para um Tr de 10 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).	67
Figura 39 : Hidrograma para um Tr de 25 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).	67
Figura 40: Hidrograma para um Tr de 50 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).	68
Figura 41: Hidrograma para um Tr de 100 anos – Condição atual (AUTOR, 2021).	68

Figura 42: Hidrograma para um Tr de 2 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).	69
Figura 43: Hidrograma para um Tr de 10 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).	69
Figura 44: Hidrograma para um Tr de 25 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).	70
Figura 45: Hidrograma para um Tr de 50 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).	70
Figura 46: Hidrograma para um Tr de 100 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes de desagregação (Adaptado de OCCHIPINTI & SANTOS, 1966; CETESB, 1980).....	18
Tabela 2: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (TUCCI, 2001). ...	25
Tabela 3: Valores de CN para bacias rurais (TUCCI, 2001).	26
Tabela 4: Série histórica (AUTOR, 2021).	38
Tabela 5: Áreas ocupadas pelos tipos de solo (AUTOR, 2021).....	51
Tabela 6: Áreas ocupadas de acordo com o uso do solo (AUTOR, 2021).	53
Tabela 7: Função de probabilidade cumulativa para as distribuições (AUTOR, 2021).	57
Tabela 8: Parâmetros de ajuste da equação IDF (AUTOR, 2021).....	58
Tabela 9: Tempo de concentração (AUTOR, 2021).....	59
Tabela 10: Número da Curva para a condição atual (AUTOR, 2021).....	64
Tabela 11: Número da Curva para a simulação de urbanização (AUTOR, 2021).	65
Tabela 12: Vazão de pico e chuva efetiva para as duas situações (AUTOR, 2021).	71

LISTA DE SIGLAS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CN – *Curve Number* (Número da Curva)
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- GIS – *Geographic Information System* (SIG – Sistema de Informação Geográfica)
- HEC-HMS – *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IDE-Sisema – Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
- IDF – Intensidade-Duração-Frequência
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- MDT – Modelo Digital do Terreno
- mPa – Massa Polar Atlântica
- mTa – Massa de Ar Tropical Atlântica
- NASA – *National Aeronautics and Space Administration* (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
- NRCS – *Natural Resources Conservation Service*
- SCS – *Soil Conservation Service*
- USGS – *United States Geological Survey* (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	3
1.1.1	Objetivos Específicos.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Ciclo Hidrológico.....	4
2.2	Bacias Hidrográficas.....	5
2.2.1	Impermeabilização de Bacias Hidrográficas	5
2.3	Dinâmica Fluvial	9
2.3.1	Ocupação das Margens de Rios.....	10
2.4	Uso do geoprocessamento para modelagens hidrológicas	11
2.5	Classificação Hidrológica do Solo.....	12
2.6	Classificação do Uso e Cobertura do Solo	13
2.7	Equação IDF.....	14
2.7.1	Identificação de <i>Outliers</i>	15
2.7.2	Distribuições de Probabilidade.....	17
2.7.3	Cálculo de Chuvas para Diferentes Durações	17
2.8	Modelagem Hidrológica	18
2.8.1	Programa HEC-HMS.....	19
2.8.2	Método SCS.....	20
2.8.3	Tempo de Concentração.....	22
2.8.4	Hietograma.....	23
2.8.5	Número da Curva.....	23

3	DADOS E MÉTODOS	29
3.1	Caracterização da Área de Estudo	29
3.1.1	Localização	29
3.1.2	Uso e Cobertura do Solo.....	32
3.1.3	Histórico do Bairro Saramenha	35
3.1.4	Clima	37
3.2	Processamento no QGIS.....	40
3.2.1	Delimitação da Bacia de Estudo	40
3.2.2	Classificação Hidrológica do Solo	41
3.2.3	Classificação do Uso e Cobertura do Solo.....	41
3.3	Equação IDF.....	43
3.3.1	Identificação de <i>Outliers</i>	43
3.3.2	Distribuições de Probabilidade.....	43
3.3.3	Cálculo de Chuvas para Diferentes Durações	45
3.3.4	Parâmetros de Ajuste da Curva	46
3.4	Modelagem Hidrológica	47
3.4.1	Tempo de Concentração.....	47
3.4.2	Hietograma.....	48
3.4.3	Número da Curva.....	49
4	RESULTADOS.....	50
4.1	Processamento no QGIS.....	50
4.1.1	Delimitação	50
4.1.2	Classificação Hidrológica do Solo	51
4.1.3	Classificação do Uso e Cobertura do Solo.....	52

4.2	Equação IDF	53
4.2.1	Identificação de <i>Outliers</i>	54
4.2.2	Distribuições de Probabilidade.....	54
4.2.3	Parâmetros de Ajuste da Curva	57
4.3	Modelagem Hidrológica	58
4.3.1	Tempo de Concentração.....	59
4.3.2	Hietogramas.....	60
4.3.3	Número da Curva.....	63
4.3.4	Transformação Chuva-Vazão	66
5	CONCLUSÃO	73
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A água representa o recurso natural mais precioso da humanidade, pois garante sua existência nas mais diversas manifestações e constitui todo e qualquer sistema de produção humano. Os corpos d'água viabilizaram as primeiras cidades, mas passaram a sofrer os impactos hidrológicos e ambientais do crescimento urbano, perdendo o papel original de elemento de manutenção da vida.

Desde o princípio, as civilizações procuravam se assentar nos arredores dos rios, em um primeiro momento pelas necessidades básicas de consumo, higiene, agricultura e artesanato, mas em seguida para possibilitar o exercício do comércio externo. No entanto, a concentração e densificação da população nas cidades, feita muitas vezes da forma inadequada, encadeou os problemas ambientais e socioeconômicos provenientes das inundações (BAPTISTA, CARDOSO; 2013).

Nas Idades Antiga e Média os rios já sofriam com a urbanização, recebendo despejos sanitários, resíduos de fábricas, ocupação de margens etc. A situação se tornou mais crítica ao final do século XVIII, quando o advento da revolução industrial intensificou a poluição nos cursos d'água (BAPTISTA, CARDOSO; 2013).

No início do século XX, a população mundial teve um aumento exponencial após tomar consciência da importância da higiene para a saúde. Isso só foi possível com a aplicação de sistemas de esgotamento sanitário e drenagem pluvial, que controlaram as enchentes e minimizaram a proliferação de doenças. Ainda assim, esse crescimento se deu, muitas vezes, próximo às áreas inundáveis, constituindo zonas de risco (BAPTISTA, CARDOSO; 2013).

A urbanização provoca a impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração e elevando o volume e a velocidade do escoamento superficial. Como resultado, os picos dos hidrogramas de cheias sobem e sofrem antecipação. Agrava o quadro, a canalização dos cursos d'água, que tornam as inundações mais recorrentes devido às limitações do sistema de drenagem, com impacto maior nas áreas ribeirinhas (BAPTISTA, CARDOSO; 2013).

Há de se considerar ainda que características físicas naturais, que contemplam a variabilidade climática natural de áreas tropicais, foram desprezadas na organização dos espaços urbanos brasileiros. Tais fatores, como as variações climáticas em relação ao regime pluvial, geram transtornos e perdas e prejudicam a qualidade de vida da população (LIMA, 2012).

Para todos os efeitos, é responsabilidade do planejamento urbano regulamentar o crescimento das cidades, de uma perspectiva global, e sua interferência com os cursos d'água. Entretanto, no que se refere ao uso do solo, o que se percebe é um favorecimento da Cidade Formal, ocupada pela população de renda média e alta. Já a Cidade Informal, habitada pelas classes sociais mais vulneráveis, padece com os problemas das inundações (TUCCI, 2005).

De acordo com estudo divulgado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), intitulado População em Área de Risco no Brasil, mais de 8 milhões de pessoas viviam em áreas com risco potencial de enchentes e deslizamentos de terra em 2010, em 872 municípios no país (GEOCIÊNCIAS, 2021). Outro levantamento do Instituto constatou que, entre 2008 e 2013, 2.276 cidades foram atingidas por inundações graduais e/ou enxurradas bruscas. Apenas as enxurradas foram responsáveis por deixar 1.406.713 pessoas desabrigadas ou desalojadas (GRID, 2021).

A pesquisa constatou ainda que 48% das 5.570 prefeituras do país não possuíam instrumento para dar resposta a esse tipo de acontecimento, sendo que somente 14,8% delas apresentaram Lei de Ocupação do Solo e 2,6% dispunham de lei específica antienchente (GRID, 2021).

O cenário é crítico e se repete todos os anos no período chuvoso. Diante disso, apesar de que ainda há muito a se fazer, ações vêm sendo tomadas pelo meio científico e pelos agentes públicos a fim de se reduzir e evitar tais impactos. As motivações principais são: os prejuízos, a pressão da sociedade e o crescimento da consciência ambiental (BAPTISTA, CARDOSO; 2013).

O córrego Varjada está situado na cidade de Ouro Preto, em Minas Gerais, e não há registros formais de enchentes até o presente momento. Todavia, a crescente

urbanização e impermeabilização da área tornam-se uma preocupação, uma vez que variações neste córrego podem impactar diretamente áreas habitadas e influenciar importantes regimes hidrológicos a jusante.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é realizar o estudo hidrológico da bacia hidrográfica do córrego Varjada para determinar as vazões máximas e seus impactos sob dois cenários: primeiro, considerando as características atuais de uso e ocupação do solo e, segundo, simulando um possível crescimento urbano na bacia.

1.1.1 Objetivos Específicos

O objetivo geral pode ser subdividido em três objetivos específicos.

1. Caracterizar o regime hidrológico da bacia, obtendo as equações de intensidade-duração-frequência locais.
2. Realizar as classificações hidrológica e do uso e cobertura do solo da bacia com o programa QGIS.
3. Empregar o programa HEC-HMS para as modelagens hidrológicas na situação atual e simulando o aumento da impermeabilização local, determinando as vazões máximas para cada período de retorno definido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico (Figura 1) consiste na constante movimentação e transformação da água, na terra e na atmosfera, em seus estados sólido, líquido e gasoso. A água que é resfriada e condensada em gotas na atmosfera cai na terra em forma de precipitação, que pode ser chuva, neve, granizo, geada, neblina/garofa ou orvalho (BARBOSA JR, 2015).

Esse volume de água, ao atingir o solo, pode gerar o escoamento superficial, o qual alcança os córregos, rios e lagos, que por sua vez escoam até os mares. Outra parcela dessa água é infiltrada no solo, alimentando o lençol freático e os reservatórios subterrâneos (BARBOSA JR, 2015).

A energia do sol, em forma de calor, resulta no aquecimento do ar, do solo e da água superficial, sendo responsável pela evaporação da água de superfícies de água livre, solos e vegetação úmida e pela transpiração das plantas. O vapor de água é transportado pelo ar e pode condensar, formando nuvens e iniciando o processo novamente (BARBOSA JR, 2015; COLLISCHONN, DORNELLES; 2015).

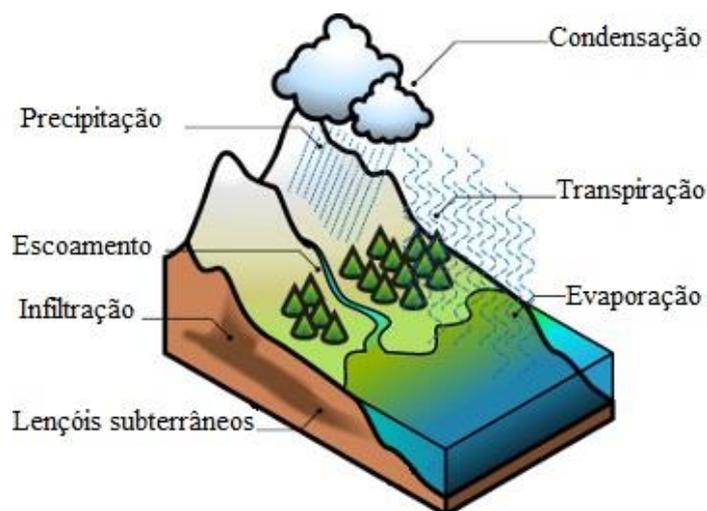


Figura 1: Ciclo hidrológico (BIOLOGIANET, 2021).

2.2 Bacias Hidrográficas

“A bacia hidrográfica é a área definida topograficamente, drenada por um curso d’água ou um sistema conectado de cursos d’água, de modo que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma saída simples. Constitui-se no sistema físico ou área coletora da água da precipitação, que a faz convergir para uma única seção de saída, denominada exutória, foz ou desembocadura.” (BARBOSA JR, 2015).

A bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema físico aberto sujeito a entradas (eventos de precipitação) que geram saídas de água (volume de água escoado pela seção exutória somado com os volumes decorrentes da evaporação e transpiração) (BARBOSA JR, 2015; COLLISCHONN, DORNELLES; 2015).

Em suma, os estudos práticos envolvendo a disponibilidade de água, as enchentes e inundações, os aproveitamentos hídricos para irrigação e geração de energia, dentre outros, adotam as bacias hidrográficas como unidades hidrológicas pela simplicidade do equacionamento (BARBOSA JR, 2015).

2.2.1 Impermeabilização de Bacias Hidrográficas

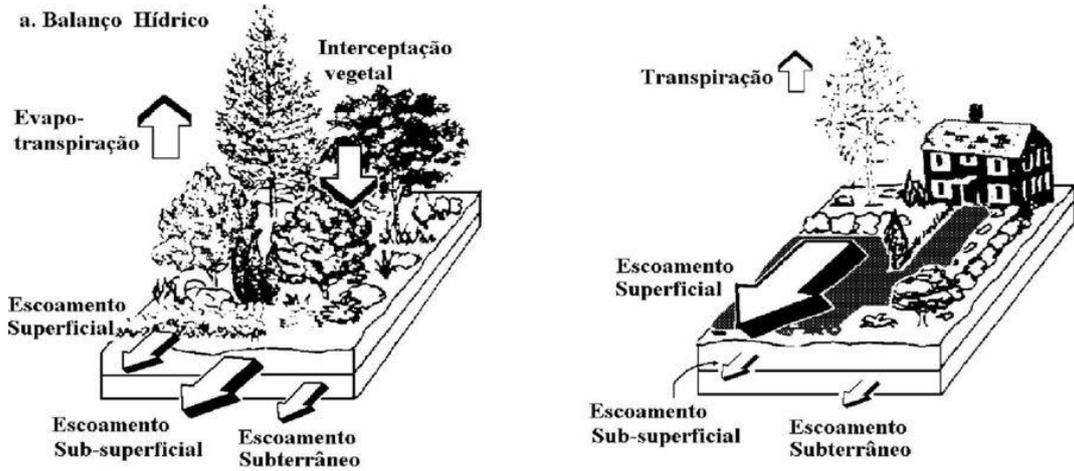
Atualmente, um dos principais problemas do Brasil ligado a recursos hídricos é o impacto resultante do desenvolvimento urbano. Apesar de que, de modo geral, as regiões centrais das cidades deixaram de crescer, as periferias seguem em plena expansão, justamente onde se concentram os mananciais (TUCCI, 2005).

Em uma bacia rural, a água tende a escoar lentamente pela superfície, parte dela sendo retida pelas plantas e outra parte se infiltrando. A impermeabilização do solo, através de telhados, ruas, calçadas e pátios, impede a infiltração e aumenta consideravelmente o escoamento superficial, exigindo maior capacidade de escoamento e aumento das seções e declividade do conduto ou canal (TUCCI, 2005).

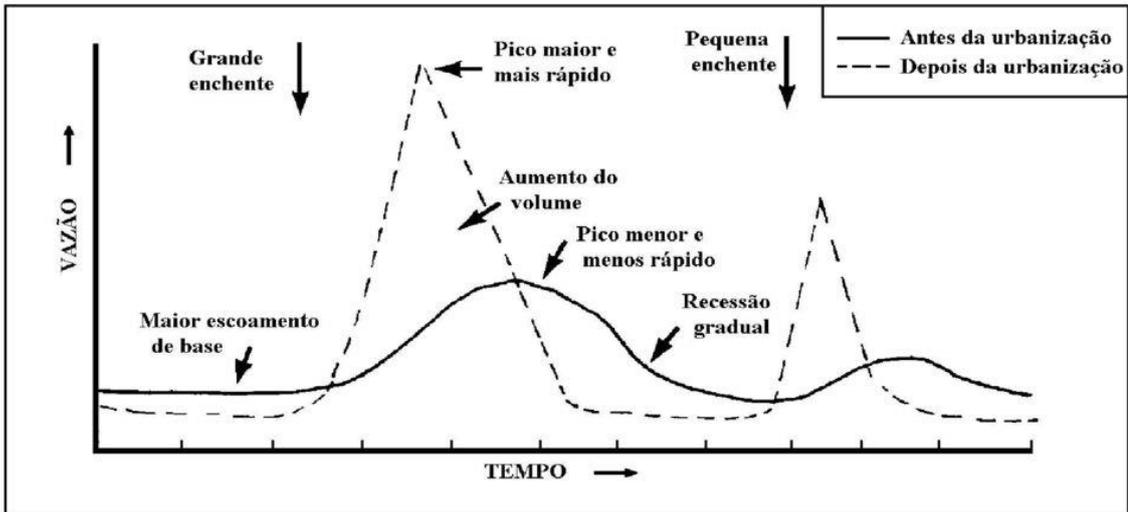
Segundo Tucci (2005), podem ser elencadas as seguintes alterações advindas da impermeabilização:

- aumento do escoamento superficial e redução do tempo de deslocamento em condutos pluviais, elevando e antecipando os picos de vazões máximas. A vazão máxima média de inundação pode aumentar em até 7 vezes;
- redução da infiltração no solo e, conseqüentemente, do nível do lençol freático, diminuindo o escoamento subterrâneo e
- redução da evapotranspiração devido à diminuição de água retida.

A Figura 2, a seguir, ilustra estas alterações.



b. Escoamento



c. Resposta da geometria do escoamento

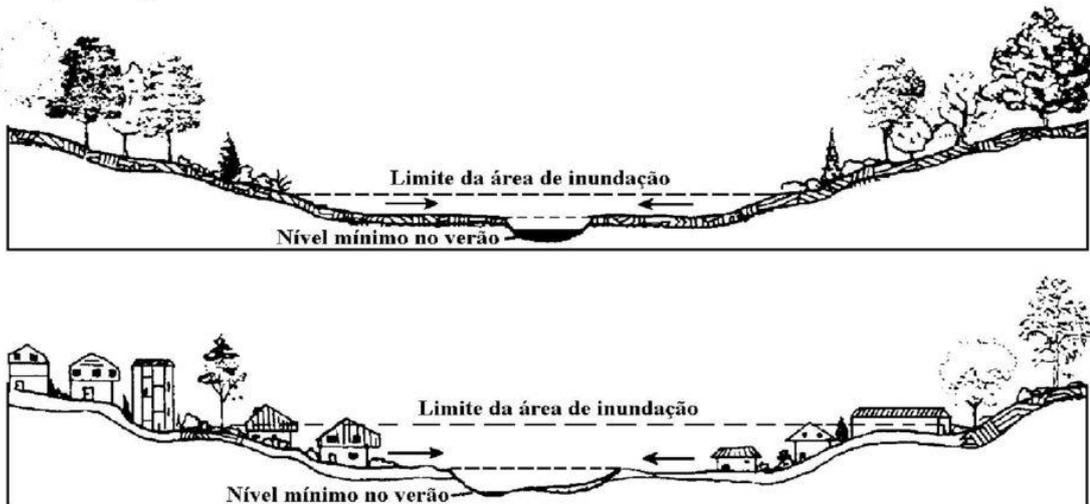


Figura 2: Impactos da impermeabilização do solo (TUCCI, 2005).

2.2.1.1 Impactos na Vazão de Pico e no Escoamento Superficial

Diversos estudos já foram realizados para demonstrar os impactos da urbanização diante de chuvas intensas. Nunes e Fiori (2008) verificaram, através do Método Racional, uma elevação da vazão de pico e do escoamento superficial devido a impermeabilização do solo na bacia hidrográfica do rio Atuba, no estado do Paraná.

Justino et al. (2011) empregaram o Método SCS TR-55, para a bacia do Córrego Lagoinha em Uberlândia-MG, e mostraram que a vazão de pico pode aumentar em até 60% quando a impermeabilização varia entre 29% e 54%. Bianchi et al. (2012) constataram um aumento das vazões de pico ocasionado pela elevação do escoamento superficial, pelo Método Ven-Te-Chow – SCS, em estudo da urbanização da bacia hidrográfica do rio Canguiri em Curitiba-PR.

Faria et al. (2014) realizaram simulação considerando a impermeabilização de toda a bacia hidrográfica do córrego Barbado, em Cuiabá-MT, e concluíram que este cenário afeta diretamente o aumento das vazões de pico. Benini e Mendiondo (2015) observaram, na bacia do córrego Mineirinho em São Carlos-SP, elevações das vazões máximas e diminuição do tempo de pico resultantes da impermeabilização do solo e redução das áreas com cobertura vegetal.

Barros et al. (2016) demonstraram, mais uma vez, o aumento da vazão de pico e do volume de escoamento superficial em razão da urbanização da bacia do riacho do Sapo em Maceió-AL. Santos e Lollo (2016) confirmaram como a falta de planejamento urbano nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante, em Campina Grande-PB, elevaram a impermeabilização e causaram a sobrecarga do sistema de drenagem do local.

Rodrigues e Blanco (2018) encontraram um aumento de 2,24 vezes na vazão de escoamento e uma redução de 95,24% no potencial de infiltração, simulando uma impermeabilização de 90% da bacia do igarapé do Urumari, em Santarém-PA. Todos estes trabalhos salientam a importância de se conhecer as interferências da urbanização nos corpos d'água, previamente às decisões e ações voltadas para o planejamento urbano.

2.3 Dinâmica Fluvial

Os corpos d'água apresentam comportamento variável ao longo das estações e mesmo dentro delas, no que diz respeito ao nível que a água pode atingir. Esse fenômeno é denominado dinâmica fluvial e pode se manifestar, naturalmente ou pela ação do ser humano, através de enchentes e inundações.

As cheias ou enchentes acontecem quando as águas de um rio, córrego ou galeria pluvial, durante o período chuvoso, ultrapassam o leito menor e atingem o leito maior. Trata-se de um processo natural com ocorrências irregulares ao longo do tempo, de modo que a população tende a ocupar o leito maior e ficar susceptível ao impacto das cheias (TUCCI, 2005).

São aspectos que favorecem as enchentes (TUCCI, 2005):

- precipitações intensas vinculadas a uma baixa capacidade de infiltração do solo, o que direciona o escoamento para os corpos d'água fazendo com que a capacidade do leito menor seja superada;
- áreas planas tendem a ser mais ocupadas pela população, contudo, possuem baixa capacidade de escoamento, sendo assim mais propícias a cheias;
- bacias rurais têm maiores interceptação vegetal e áreas permeáveis, de forma que apresentam menor escoamento superficial e drenagem mais lenta. Em contrapartida, bacias urbanas são altamente impermeabilizadas, o que acarreta aumento da vazão máxima e do escoamento superficial e redução do tempo de pico e
- urbanização e desmatamento aumentam a frequência de cheias.

Já inundações submergem áreas além daquelas normais em um curso d'água levando ao extravasamento do leito maior, geralmente relacionadas a chuvas prolongadas na bacia hidrográfica (RODRIGUES, 2019). Ocorrem quando as planícies de inundação, ou várzeas dos rios, são ocupadas pela população sendo, portanto, normalmente associadas a perdas imateriais e materiais (GANDINI, 2014).

A Figura 3, que se segue, ilustra a seção de um rio com margens ocupadas irregularmente.

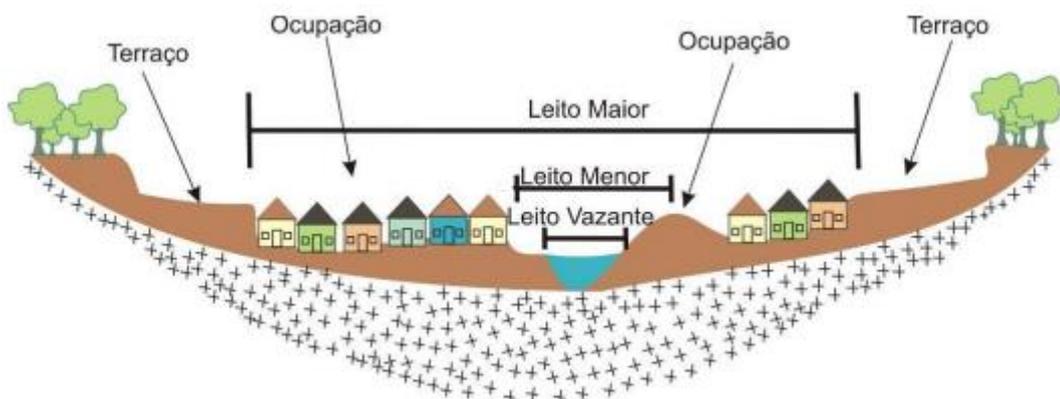


Figura 3: Dinâmica fluvial (GEODINÂMICA, 2021).

2.3.1 Ocupação das Margens de Rios

A humanidade sempre buscou se estabelecer nas proximidades dos corpos d'água que eram, a princípio, utilizados como via de transporte principal. Por este motivo, as cidades se desenvolveram às margens dos rios ou nos litorais, assentadas nas zonas mais altas pelo temor de enchentes. Contudo, com a recente urbanização acelerada e desordenada, houve uma crescente ocupação das várzeas inundáveis nas regiões mais baixas dos córregos e rios (TUCCI, 2005).

Por mais que seja um problema bem atual, a preocupação da população com a ocupação nas imediações dos cursos d'água pela ocorrência de cheias remonta à Idade Antiga, com registros do Egito. Ainda assim, a história mostra que o ser humano tem procurado conviver com inundações, sejam elas frequentes ou raras (TUCCI, 2005).

Devido aos grandes custos das obras e das incertezas acerca das previsões climáticas, a gestão urbana voltada para inundações acaba envolvendo muito mais a minimização do que a eliminação dos impactos. O que não condiz com os prejuízos advindos das mesmas, que representam 50% dos desastres naturais relacionados à

água, dos quais 20% acontecem nas Américas, geralmente associados ao desrespeito de planícies de inundação (TUCCI, 2005).

Portanto, as perdas resultantes da ocupação das margens de rios são recorrentes e ocorrem desde a antiguidade, sendo do conhecimento da sociedade. Mesmo assim, ainda são escassas as ações concretas para superá-las no Brasil, justificadas por (TUCCI, 2005):

- falta de informação técnica dos planejadores urbanos sobre controle de enchentes;
- falta de planejamento e gestão de ocupações e inundações em nível federal e estadual;
- desgaste político para os administradores públicos no controle do zoneamento urbano e
- falta de interesse das partes envolvidas.

Uma ação concreta é obedecer ao zoneamento urbano que deve estar bem estabelecido no plano diretor de cada cidade e para estabelecê-lo pode-se recorrer às modelagens hidrológicas que auxiliam a definição de zonas potencialmente inundáveis com determinada recorrência. O geoprocessamento está cada vez mais presente nas modelagens hidrológicas e por isso ele será abordado no próximo item.

2.4 Uso do geoprocessamento para modelagens hidrológicas

Entende-se por geoprocessamento o conjunto de tecnologias voltadas a coleta e tratamento de dados espaciais, executadas por sistemas específicos comumente chamados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), em inglês *Geographic Information System* (GIS). Tem como saídas mais comuns a geração de mapas convencionais, relatórios, arquivos digitais, dentre outros (INPE, 2021).

Um SIG pode processar dados gráficos e alfanuméricos, com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies. Além disso, permite integrar em uma única base de dados informações cartográficas, dados de censo, cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos digitais do terreno. Assim, este sistema combina

várias informações para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados e gerar mapas (INPE, 2021).

Dois formatos muito utilizados em programas de geoprocessamento, para dados de entrada e saída, são denominados *Shapefile* e *Raster*, introduzidos a seguir conforme QGIS (2021) e ArcGIS (2021):

- *Shapefile*: formato para armazenamento de dados vetoriais, contendo a posição, a forma e os atributos de feições geográficas. Representam o mundo real utilizando geometria, com pontos, polilinhas e polígonos, sendo adequados para o desenho de estradas, construções etc. e
- *Raster*: formados por uma matriz de pixels, em que cada pixel carrega uma informação numérica que caracteriza a área de estudo. Representam de forma satisfatória elementos com muitas variações de cor e densidade, como paisagens naturais.

Quanto ao processamento de dados gráficos é importante definir os MDT (modelos digitais do terreno) que são vetores de números que representam a distribuição espacial de um conjunto de propriedades do terreno (COLLINS, 1978). Ao se tratar apenas da propriedade elevação, o termo modelo digital de elevação (MDE) passa a ser empregado (CUNHA, 2001). Logo, um MDE consiste em uma representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada à uma superfície real. A partir dele é possível calcular volumes e áreas, desenhar perfis e seções transversais e gerar imagens, mapas e perspectivas tridimensionais (CUNHA, 2001).

2.5 Classificação Hidrológica do Solo

Na hidrologia, os solos são classificados com base em dois aspectos fundamentais, que são a possibilidade de erosão e a produção de escoamento. O que define a forma como um solo responde diante de uma chuva intensa e com grande duração são suas características, como espessura, textura, presença de matéria orgânica, estrutura e grau de expansão (SARTORI, 2005).

Todas estas propriedades influenciam a taxa de infiltração do solo, o que resulta em uma classificação que se inicia com argilas compactas, de infiltração praticamente nula, até areias de grande intensidade de infiltração. Para o presente estudo são apresentados, a seguir, duas classes de solo de acordo com Sartori et al. (2005) e EMBRAPA (2011):

- Cambissolos: representam solos minerais, pouco intemperizados, normalmente com espessuras pequenas em terrenos acidentados. Geralmente apresentam altos teores de silte, o que caracteriza sua textura média, apresentando alta erodibilidade e grande potencial de escoamento superficial. Neste estudo evidencia-se a classificação CXbd29 (Cambissolos Háplicos Tb Distróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Afloramentos de Rochas) e
- Neossolos: no caso dos Litólicos, consistem em solos rasos, com espessuras inferiores a 50 cm. São naturais de relevo montanhoso e muito suscetíveis à erosão, tendo também grande potencial de escoamento superficial. Neste estudo evidencia-se a classificação RLd10 (Neossolos Litólicos Distróficos + Argissolos Vermelhos Eutróficos + Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos).

2.6 Classificação do Uso e Cobertura do Solo

O IBGE vem realizando, continuamente, o mapeamento da cobertura e uso da terra, enquanto parte do projeto Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Esses dados são importantes pois permitem um panorama da dinâmica de ocupação do território nacional demonstrando, especialmente, o desenvolvimento do agronegócio e da urbanização (IBGE, 2020). Tendo isso em vista, o Instituto elaborou classes de cobertura e uso da terra das quais, para este trabalho, três serão transcritas a seguir (IBGE, 2020):

- Área Artificial: áreas onde predominam superfícies antrópicas não-agrícolas. São aquelas estruturadas por edificações e sistema viário, nas quais estão incluídas as metrópoles, cidades, vilas, as aldeias indígenas e comunidades quilombolas, áreas ocupadas por complexos industriais e comerciais e

- edificações que podem, em alguns casos, estar situadas em áreas peri-urbanas. Também pertencem a essa classe as áreas onde ocorrem a exploração ou extração de substâncias minerais, por meio de lavra ou garimpo;
- Vegetação Florestal: área ocupada por florestas. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura, incluindo-se aí as áreas de Floresta Ombrófila Densa, de Floresta Ombrófila Aberta, de Floresta Estacional, além da Floresta Ombrófila Mista. Inclui outras feições em razão de seu porte superior a 5 m de altura, como a Savana Florestada, Campinarana Florestada, Savana-Estépica Florestada, os Manguezais e os Buritizais, conforme o Manual Técnico de Uso da Terra e
 - Vegetação Campestre: área caracterizada por formações campestres. Entende-se como campestres as diferentes categorias de vegetação fisionomicamente bem diversas da florestal, ou seja, aquelas que se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as Savanas, Estepes, Savanas Estépicas, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos. Encontram-se disseminadas por diferentes regiões fitogeográficas, compreendendo diferentes tipologias primárias: estepes planaltinas, campos rupestres das serras costeiras e campos hidroarenosos litorâneos (restinga), conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013). Essas áreas podem estar sujeitas a pastoreio e a outras interferências antrópicas de baixa intensidade como as áreas de pastagens não manejadas do Rio Grande do Sul e do Pantanal.

2.7 Equação IDF

Os eventos de precipitação máxima são aqueles de ocorrência extrema, em que a duração e a distribuição temporal e espacial para uma dada região são críticas. Seu estudo é uma das formas de se alcançar a vazão de enchente de uma bacia, podendo ser representados pelas curvas IDF, que relacionam a duração, a intensidade e a possibilidade da precipitação ser igualada ou superada (TUCCI, 1993).

Para o dimensionamento de obras hidráulicas e o estudo de cheias, é necessário conhecer essas três grandezas que caracterizam as precipitações máximas: intensidade, duração e frequência, esta última também denominada tempo de retorno ou recorrência. A relação entre essas variáveis deve ser estabelecida após a obtenção de dados de chuvas intensas de um local, desde que se tenha um período significativo e representativo (TUCCI, 1993).

Segundo Tucci (1993), a equação genérica que representa as curvas IDF pode ser expressa pela Equação 1:

$$i = \frac{a \cdot Tr^b}{(t_d + c)^d} \quad (1)$$

onde i é a intensidade em mm/h, Tr o tempo de retorno em anos e t_d a duração da chuva em minutos; a , b , c e d são parâmetros de ajuste da curva, próprios de cada posto pluviométrico ou pluviográfico.

2.7.1 Identificação de *Outliers*

Ao se relacionar distribuições de séries históricas com distribuições probabilísticas teóricas, pode ser constatada a presença de valores extremos que comprometam os resultados obtidos, chamados de *outliers*. Não significa, necessariamente, que se tratam de valores errados, por vezes podem representar precipitações de tempos de retorno maiores do que o período analisado. Ainda assim, eles podem ser dispensados para uma análise adequada às informações disponíveis (GANDINI, 2016).

Existem alguns métodos para a identificação de *outliers*, dentre eles serão demonstrados a seguir o de Grubbs (1969) – Equações 2 a 4 – e de Grubbs e Beck (1972) – Equações 5 a 7, conforme explicação retirada do trabalho de Gandini (2016).

Seja uma amostra de n observações, disposta em ordem crescente, com $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_n$, sendo este último o valor maior e duvidoso. Para um único

outlier, Grubbs (1969) indica o seguinte teste, T_n , onde \bar{x} é a média aritmética dos n valores e σ^* o desvio padrão da mostra com $n - 1$ graus de liberdade:

$$T_n = \frac{(x_n - \bar{x})}{\sigma^*} \quad (2)$$

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

No caso do primeiro valor, x_1 , ser o duvidoso, o teste é dado por T_1 , em que:

$$T_1 = \frac{(\bar{x} - x_1)}{\sigma^*} \quad (4)$$

Se algum dos valores de T acima forem maiores do que o $T_{crítico}$, que é tabelado para os níveis de significância de 10%, 5%, 2,5%, 1%, 0,5% e 0,1%, tem-se um *outlier*.

Já o teste de Grubbs e Beck (1972) propõe a utilização das Equações 5 e 6, de modo que os valores da amostra maiores do que x_H e menores do que x_L são considerados *outliers*.

$$x_H = \exp(\bar{x} + k_N \sigma) \quad (5)$$

$$x_L = \exp(\bar{x} - k_N \sigma) \quad (6)$$

Em que \bar{x} é a média da amostra, σ o desvio padrão dos logaritmos naturais e k_N é uma estatística tabulada para vários tamanhos de amostra e níveis de significância. Para um nível de significância de 10%, Pilon et al. (1985), citados por Rao e Hamed (2000), sugerem a aproximação dada pela Equação 7, sendo N o tamanho da amostra:

$$k_N = -3,62201 + 6,28446N^{\frac{1}{4}} - 2,49835N^{\frac{1}{2}} + 0,491436N^{\frac{3}{4}} - 0,037911N \quad (7)$$

2.7.2 Distribuições de Probabilidade

Modelos de probabilidade podem ser aplicados para se definir a relação entre séries históricas de vazões e suas respectivas frequências, informações fundamentais para o dimensionamento e estudo de obras hidráulicas. Sustenta esses modelos a hipótese de que as cheias verificadas em determinado período podem se repetir no futuro, com características hidrológicas similares (BARBOSA JR, 2015).

Existem diversas distribuições de probabilidade que podem ser empregadas para modelar eventos máximos anuais de variáveis hidrológicas, de modo que a escolha pela mais adequada se baseará naquela que melhor reproduzirá características importantes dos dados para o estudo (COSTA, 2014).

2.7.3 Cálculo de Chuvas para Diferentes Durações

Para o levantamento de dados de precipitação, o melhor cenário é dispor de um pluviógrafo, que registra a variação da altura da chuva com o tempo, ou seja, a intensidade. No entanto, grandes séries de dados advindas desse instrumento são dificilmente encontradas no país, de modo que o que se tem, geralmente, são séries de dados pluviométricos, que fornecem apenas a altura da chuva acumulada em um dia (GANDINI, 2016).

Por esse motivo, é necessário recorrer a coeficientes que convertem as chuvas diárias em valores correspondentes de menores durações, inclusive que transformem a chuva de 1 dia em chuva de 24 horas. Para se determinar as chuvas de 1 dia com os períodos de retorno desejados, após definição da distribuição de probabilidade a ser adotada, utiliza-se a Equação 8, conhecida como equação de Ven-Te-Chow (GANDINI, 2016):

$$x_{Tr} = \bar{x} + K\sigma \quad (8)$$

em que \bar{x} é a média dos dados consistidos da série histórica, K o fator de frequência e σ é o desvio padrão.

Em seguida, deve-se transformar a chuva acumulada diária em uma chuva de 24 horas. Alguns estudos foram realizados para se determinar esta relação, como o de Occhipinti & Santos (1966) e da CETESB (1980), os quais recomendam o valor de 1,14 (GANDINI, 2016). Para as demais durações, empregam-se os coeficientes de desagregação que podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes de desagregação (Adaptado de OCCHIPINTI & SANTOS, 1966; CETESB, 1980).

Relações entre as durações	Coeficientes de desagregação	Relações entre as durações	Coeficientes de desagregação
5 min / 24 h	0,106	2 h / 24 h	0,52
10 min / 24 h	0,168	4 h / 24 h	0,63
15 min / 24 h	0,218	6 h / 24 h	0,72
20 min / 24 h	0,252	8 h / 24 h	0,78
25 min / 24 h	0,283	10 h / 24 h	0,82
30 min / 24 h	0,311	12 h / 24 h	0,85
1 h / 24 h	0,42	1 dia / 24 h	1,14

Com os valores da precipitação P em milímetros e o tempo de duração t_d da chuva em minutos, é possível obter as intensidades em milímetros por hora pela Equação 9 (GANDINI, 2016):

$$i = \frac{P}{t_d} \cdot 60 \quad (9)$$

2.8 Modelagem Hidrológica

Devido à possibilidade de previsão de regimes fluviais de interesse, a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas consiste em uma ferramenta fundamental no

gerenciamento dos recursos hídricos. Nesse sentido, o desenvolvimento e aplicação de modelos físicos, feitos com o auxílio de técnicas de mapeamento, tem sido comum na avaliação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas (VIOLA, 2009).

Os modelos chuva-vazão, especificamente, possibilitam a transformação de precipitações pluviométricas de séries históricas em vazão, sendo a bacia hidrográfica entendida como um complexo sistema em que parte da água infiltra ou percola enquanto outra parte sofre evapotranspiração. É observado também um atraso da vazão em relação à precipitação, justificado pelos processos de interceptação e escoamentos superficial e subsuperficial, que dependem das características do local como o relevo, o solo, a vegetação, áreas artificiais etc. (SOUSA et al., 2017).

Normalmente as informações geradas por estes modelos são representadas por hidrogramas, que demonstram a variação do volume de água escoada na foz da bacia em função do tempo. Tratam-se, portanto, de dados relevantes para o planejamento urbano e ambiental, pois permitem a predição de cheias em áreas urbanas e rurais (SOUSA et al., 2017).

2.8.1 Programa HEC-HMS

O HEC-HMS, em que HMS remete a Sistema de Modelagem Hidrológica e HEC a Centro de Engenharia Hidrológica, é um programa aberto desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano para modelagens hidrológicas. O sistema é projetado para simular os processos hidrológicos completos de bacias hidrográficas, como infiltração, evapotranspiração e previsão do fluxo de água (HEC-HMS, 2021).

O *software* inclui procedimentos tradicionais de análise hidrológica, como hidrogramas unitários, gerando resultados que podem ser usados em conjunto com outros programas para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impacto de urbanização futura, dentre outros (HEC-HMS, 2021).

2.8.2 Método SCS

A determinação das vazões de cheia em uma bacia hidrográfica é de suma importância para estudos hidrológicos, de modo que as dificuldades relacionadas a dados pluviométricos vêm sendo superadas com o avanço de métodos matemáticos (RIGHETTO, 1998).

Nesse aspecto, quando se possui poucos ou nenhum dado hidrológico da bacia hidrográfica de estudo, uma alternativa é empregar hidrogramas unitários sintéticos (CANHOLI, 2005). Esses hidrogramas podem ser obtidos de diversas maneiras, sendo bem comum o uso do Método SCS (*Soil Conservation Service*), atualmente denominado NRCS (*Natural Resources Conservation Service*).

A Figura 4, retirada de Collischonn & Tassi (2010), retrata as características importantes de um hidrograma em que se conhece o valor da chuva efetiva em três intervalos de tempo.

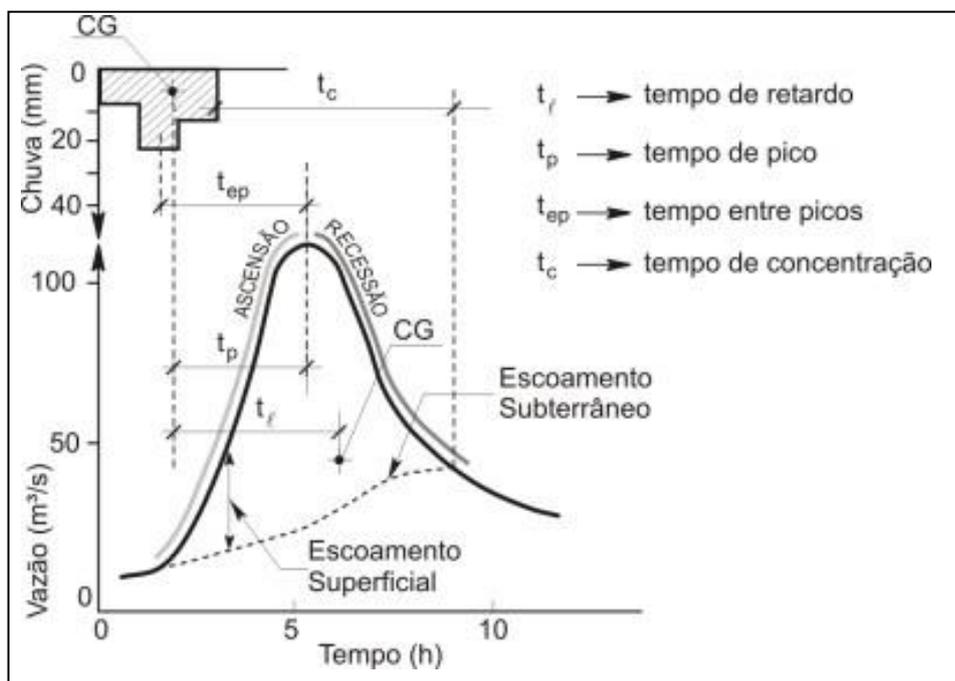


Figura 4: Hidrograma unitário sintético (COLLISCHONN & TASSI, 2010).

De acordo com Collischonn & Tassi (2010), têm-se as seguintes definições:

- Tempo de retardo: intervalo de tempo entre os centros de gravidade do hietograma (chuva efetiva) e do hidrograma superficial;
- Tempo de pico: tempo entre o centro de gravidade do hietograma (chuva efetiva) e o pico do hidrograma;
- Tempo entre picos: intervalo entre o pico da chuva efetiva e o pico da vazão superficial e
- Tempo de concentração: intervalo de tempo entre o final da ocorrência da chuva efetiva e o final do escoamento superficial.

O Método SCS faz uma simplificação e utiliza o hidrograma unitário na forma de um triângulo, cuja área corresponde ao volume unitário precipitado (TUCCI, 2004). O programa HEC-HMS reconhece este método, combinando um hidrograma unitário sintético triangular com um algoritmo de separação de escoamentos, a partir do parâmetro de calibração CN – que significa *Curve Number* ou Número da Curva (ENOMOTO, 2004).

A Figura 5, que se segue, apresenta um hidrograma unitário sintético triangular pelo Método SCS.

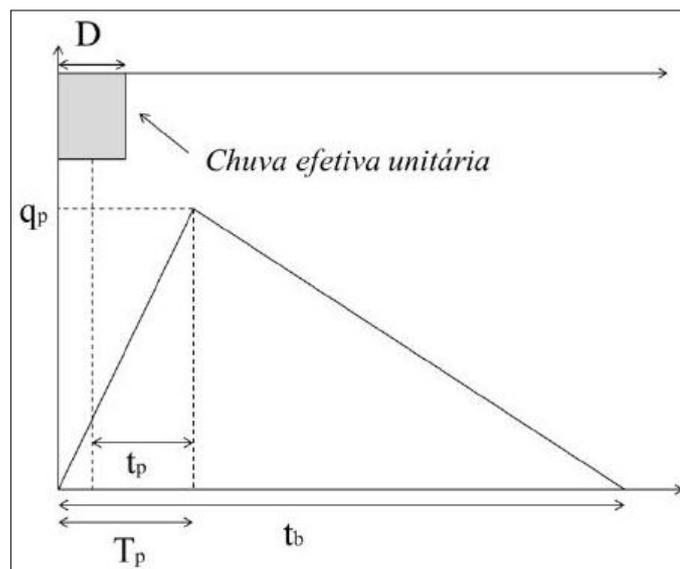


Figura 5: Hidrograma unitário sintético triangular (SIEBRA, 2021).

As variáveis observadas na Figura 5 podem ser obtidas pelas Equações 10 a 13, conforme Chow, Maidment & Mays (1998).

O tempo de pico (t_p), em horas, é dado em função do tempo de concentração (t_c), também em horas, sendo calculado pela Equação 10:

$$t_p = 0,6 \cdot t_c \quad (10)$$

Já o tempo de subida do hidrograma (T_p), em horas, Equação 11, é obtido pela relação entre o tempo de pico (t_p) e a duração da chuva (D), em horas, onde:

$$T_p = t_p + \frac{D}{2} \quad (11)$$

O tempo de base (T_b), em horas, pode ser estimado pela Equação 12, que o associa ao tempo de subida (T_p), a saber:

$$T_b = T_p + 1,67 \cdot T_p \quad (12)$$

Por fim, a vazão de pico (q_p), em m³/s, é calculada pela Equação 13 que utiliza a área da bacia (A), em km² e o tempo de subida (T_p), em horas, portanto:

$$q_p = \frac{2,08 \cdot A}{T_p} \quad (13)$$

2.8.3 Tempo de Concentração

O tempo de concentração corresponde ao tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo no ponto exutório, considerando que este sistema seja linear para o escoamento superficial. Este tempo ocorre quando se tem o equilíbrio, em regime permanente, entre uma chuva efetiva de intensidade constante e o escoamento superficial por ela produzido (SILVEIRA, 2005).

Outro conceito é aquele que define o tempo de concentração como o tempo despendido para que uma gota d'água, partindo do ponto mais distante do percurso hidráulico, alcance o exutório (SILVEIRA, 2005). Portanto consiste, efetivamente, na soma do tempo de encharcamento da superfície do solo com o tempo demandado pela partícula de água, podendo o tempo de encharcamento ser desprezado para chuvas intensas (BARBOSA JR, 2015).

Dentre os diversos métodos para se obter o valor do tempo de concentração existentes, optou-se por realizar a média de três que são indicados para as características da bacia em estudo: *Corps of Engineers*, Kirpich e Ven-Te-Chow. Essa decisão se deu com base no estudo de Silveira (2005), que constatou que Kirpich e Ven-Te-Chow subestimam este valor enquanto *Corps of Engineers* o superestima, sugerindo uma combinação dos métodos para melhor ajustar o resultado.

2.8.4 Hietograma

A distribuição cronológica de eventos pluviométricos é representada por meio de diagramas com os valores de precipitação ao longo do tempo. Quando discretos, estes são denominados hietogramas e podem ser baseados em equações IDF, em que os incrementos de precipitação ocorrem em sucessivos intervalos de tempo constantes (PORTELA, 2000).

Em seguida, essas parcelas de precipitação, ou blocos, são organizadas em uma sequência temporal de acordo com um padrão de variação desejado. Um deles, denominado blocos alternados, faz a disposição dos blocos de precipitação de modo que as maiores magnitudes fiquem no centro e as menores nas extremidades (PORTELA, 2000).

2.8.5 Número da Curva

O número da curva, também denominado CN, é um parâmetro que representa a capacidade de armazenamento da bacia hidrográfica, tendo em vista o tipo e o uso

do solo. Seu valor deve ser menor ou igual a 100, número que indica que não há armazenamento (CANHOLI, 2005).

Para obtê-lo, Tucci (2001) determinou, para os tipos de solo A, B, C e D, valores de CN para cada classe de utilização ou cobertura do solo em bacias urbanas e suburbanas e bacias rurais. Essa classificação buscou agrupar e categorizar as ocupações do solo com características hidrológicas semelhantes, conforme Tabela 2 e Tabela 3 a seguir.

Tabela 2: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (TUCCI, 2001).

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D	
Zonas cultivadas sem conservação do solo	72	81	88	91	
Zonas cultivadas com conservação do solo	62	71	78	81	
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89	
Terrenos baldios em boas condições	39	61	74	80	
Prado em boas condições	30	58	71	78	
Bosques ou zonas florestais com cobertura ruim	45	66	77	83	
Bosques ou zonas florestais com cobertura boa	25	55	70	77	
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80	
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições 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				
<500	65	77	85	90	92
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	98
Arruamento e estradas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98	98
Arruamentos e estradas de paralelepípedo	76	85	89	91	91
Arruamentos e estradas asfaltadas de terra	72	82	87	89	89

Tabela 3: Valores de CN para bacias rurais (TUCCI, 2001).

Uso do solo	Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curva de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Muito esparsas, baixa transpiração	45	66	77	83
	Esparsas	36	60	73	79
	Normais	30	58	71	78
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfícies duras	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Normais	36	60	60	76
	Densas, de alta transpiração	26	52	62	69

A classificação adotada pelo Método SCS, segundo Tucci (2001), corresponde a:

- Solo A: solos com baixo escoamento superficial e alta infiltração;
- Solo B: solos menos permeáveis do que o anterior;
- Solo C: solos com escoamento superficial acima da média e infiltração abaixo da média e
- Solo D: solos contendo argilas expansivas, pouco profundos, com infiltração muito baixa e os maiores valores de escoamento superficial.

Buscando adequá-la à situação brasileira, Sartori, Neto & Genovez (2005) sugeriram uma nova classificação de acordo com os quatro grupos hidrológicos que se seguem:

- Grupo A: 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 B: 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 C: 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; Espodossolos Ferrocárbico; Neossolo Flúvico e
- Grupo D: 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.

3 DADOS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

Como caracterização inicial da bacia hidrográfica alvo desse estudo, determinou-se a sua localização, fez-se um reconhecimento *in loco* do uso e cobertura do solo da região, realizou-se uma pesquisa quanto ao contexto histórico do bairro que é cortado pelo córrego Varjada, além da determinação do clima local. Todas essas características são descritas com detalhes nos próximos itens que se seguem.

3.1.1 Localização

O córrego Varjada localiza-se no município de Ouro Preto, região central de Minas Gerais, conforme Figura 6. Sua nascente está a sudoeste da cidade, acompanhando a rodovia MG-129 que liga Ouro Preto à cidade de Ouro Branco. O córrego percorre uma distância de cerca de 2,8 km, em bacia rural, até alcançar o bairro Saramenha (Figura 7).

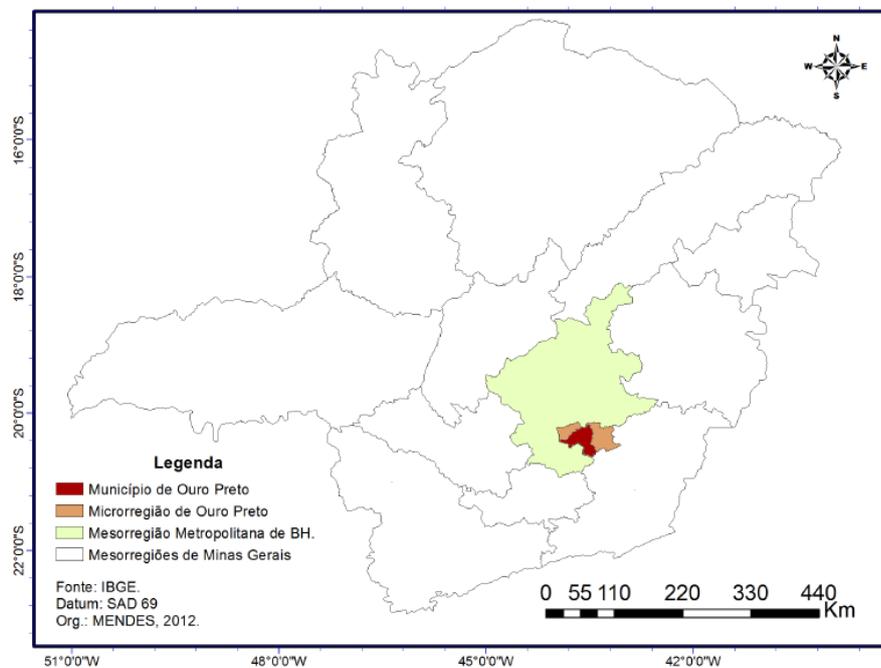


Figura 6: Localização de Ouro Preto em Minas Gerais (MENDES, 2014).

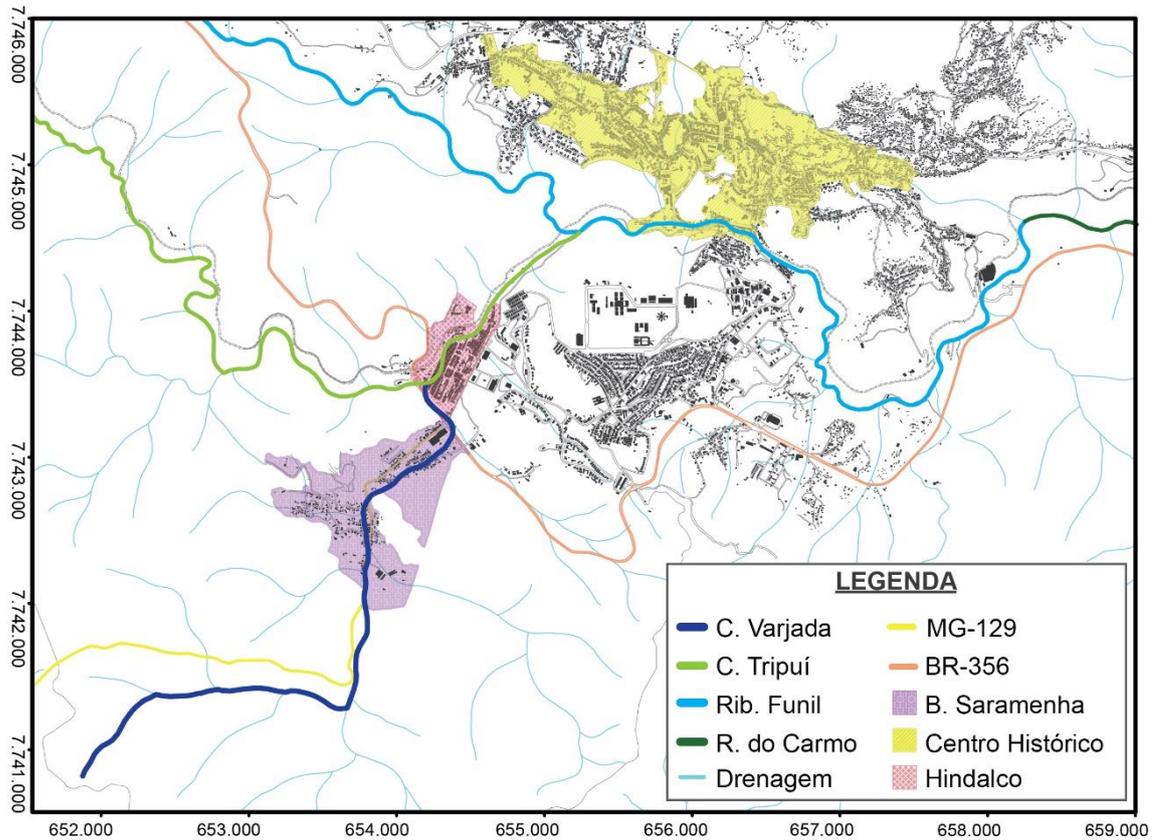


Figura 7: Abrangência da área de estudo (AUTOR, 2021).

O Varjada corta o referido bairro por cerca de mais 1,5 km, em bacia urbanizada, até a sua confluência com o córrego Tripuí que ocorre em galeria subterrânea abaixo da fábrica da Hindalco. O córrego Tripuí, em seguida, deságua no Ribeirão do Funil, que se estende por trecho do centro histórico de Ouro Preto.

Próximo a findar seu curso em perímetro urbano, o ribeirão do Funil passa a ser denominado rio do Carmo, o qual escoar até a cidade vizinha de Mariana. Finalmente, o rio do Carmo vai ao encontro do rio Gualaxo do Sul que, por sua vez, desemboca no rio Doce, a jusante, nas proximidades da cidade homônima, conforme Figura 8.

A bacia hidrográfica do córrego Varjada (Figura 9) está inserida na bacia hidrográfica do rio Piranga, a qual integra a bacia hidrográfica do rio Doce (Figura 10). Esta última possui grande importância econômica para Minas Gerais e para o país, abrigando o maior complexo siderúrgico da América Latina e a maior mineradora a céu aberto do mundo.



Figura 8: Trecho da bacia hidrográfica do rio Doce (ANA, 2021).

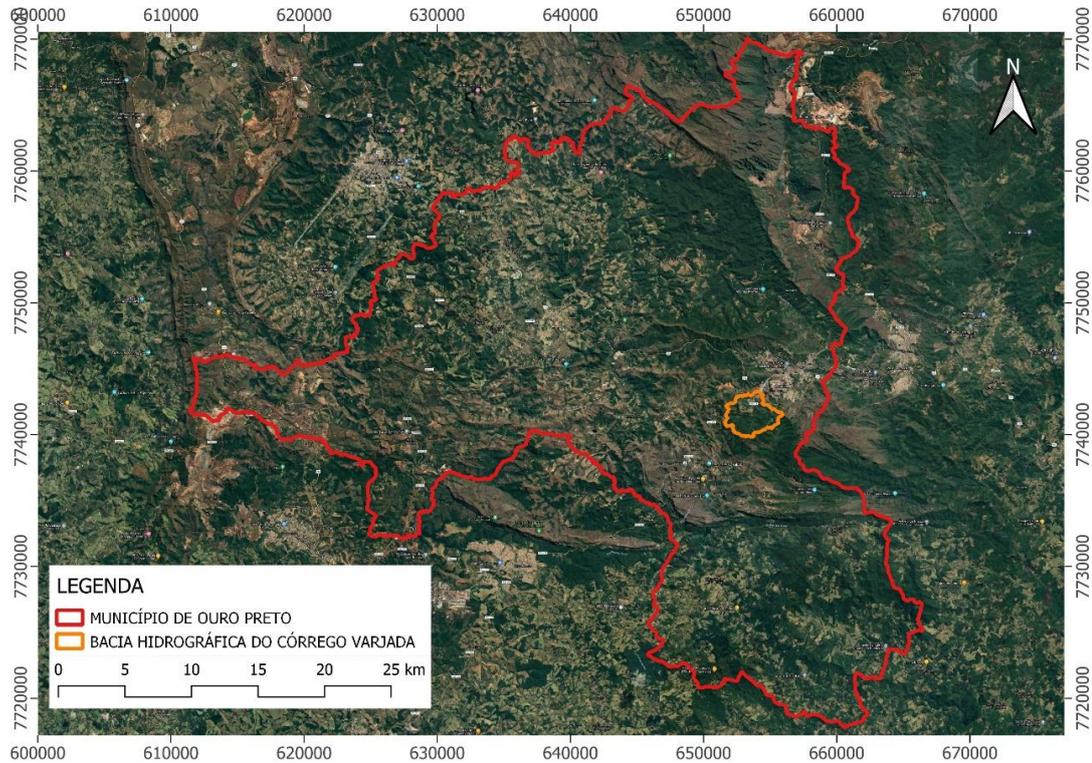


Figura 9: Localização da bacia hidrográfica do córrego Varjada no município de Ouro Preto (AUTOR, 2021).

No entanto, a urbanização do bairro Saramenha, assentada em suas imediações (Figura 12), vem ocorrendo sem o devido planejamento e acompanhamento, de modo que sua continuidade poderá alterar o regime hidrológico do córrego e assim provocar futuras inundações.

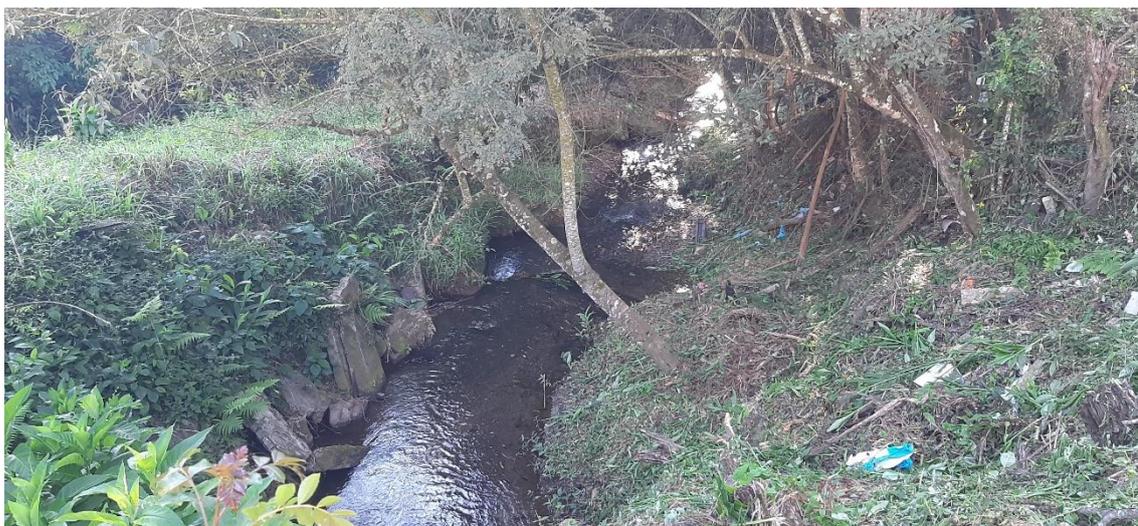


Figura 11: Córrego Varjada em trecho de bacia rural (AUTOR, 2021).



Figura 12: Córrego Varjada em trecho do bairro Saramenha (AUTOR, 2021).

A despeito disso, a Lei de Uso e Ocupação do Solo de Ouro Preto determina uma área quase cinco vezes maior que a do bairro, classificada como Zona para Expansão Urbana, prevista para a cabeceira da bacia (Figura 13). Se efetivado este crescimento, possíveis inundações poderão vir a ocorrer uma vez que a ocupação no local já é totalmente inadequada, com moradias irregulares margeando o Córrego (Figura 14).

Agrava a situação a proximidade do bairro Saramenha com a BR-356, importante rodovia que liga os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. A ocorrência de uma inundação poderia interferir no pleno funcionamento da autopista, visto que o próprio Varjada intercepta e corre paralelo a mesma, ora em rede subterrânea ora em canal aberto.

Ademais, uma elevação na vazão do Córrego Varjada não implicaria, apenas, prejuízos locais. Uma possível cheia no ribeirão do Funil, que o têm como afluente, poderia representar perdas expressivas, já que ele corre dentro do centro histórico de Ouro Preto (Figura 15).

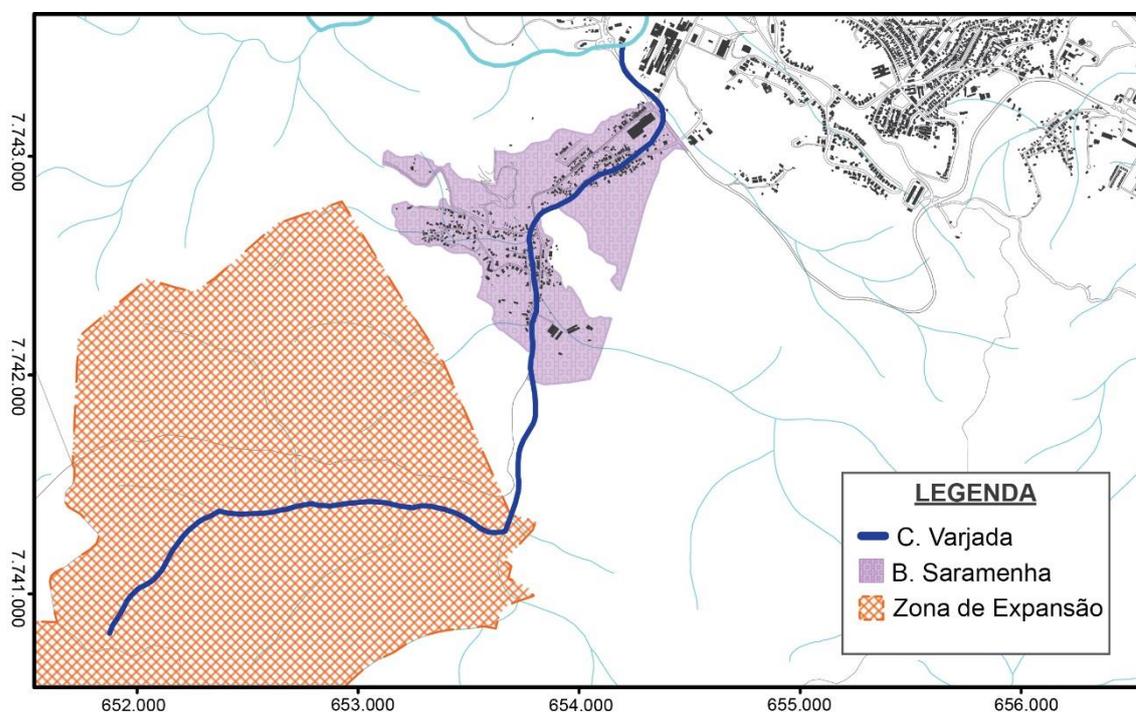


Figura 13: Zona para expansão urbana (AUTOR, 2021).



Figura 14: Córrego Varjada em trecho do bairro Saramenha (AUTOR, 2021).



Figura 15: Ribeirão do Funil em trecho do centro histórico (AUTOR, 2021).

3.1.3 Histórico do Bairro Saramenha

A comunidade de Saramenha teve seu povoamento iniciado no século XVIII, de modo que a ocupação permaneceu pequena e fragmentada até o final do século XIX. Foi apenas em 1934, com a instalação da Eletro Química Brasileira S/A, hoje Hindalco,

que o bairro se viu crescendo significativamente, visto que a vinda da empresa trouxe consigo uma valorização das terras locais (PIRES, 2015).

Com isso o bairro, que pode ter um trecho observado na Figura 16, foi se expandindo, sendo principalmente povoado pelos trabalhadores da fábrica que, tendo sucesso na busca pelo emprego, acabavam permanecendo na região. Ainda assim, consistia em um pequeno corpo social até meados do século XX, quando participou do crescimento da população da cidade como um todo, devido ao turismo e a fundação da UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) na década de 60 (PIRES, 2015).

Hoje, corresponde a uma grande área urbanizada, contudo, dividida socialmente: a região de Saramenha de Baixo, próxima à Hindalco e que abriga a parcela mais abastada, passou a ser chamada de Vila dos Engenheiros; enquanto que os trabalhadores desfavorecidos, antigos moradores e grupos que buscaram por baixo custo residem em Saramenha de Cima, comumente chamada apenas de Saramenha (PIRES, 2015).



Figura 16: Trecho do bairro Saramenha (AUTOR, 2021).

3.1.4 Clima

O clima em Ouro Preto é classificado como Tropical de Altitude Úmido, caracterizado por verões brandos, invernos com baixas temperaturas e umidade elevada durante todo o ano. A temperatura média anual é de 18,5 °C, com o mês de janeiro apresentando os maiores valores e o mês de julho os menores (CASTRO, 2006).

Os períodos chuvosos coincidem com as temperaturas mais quentes, enquanto no período seco predomina o frio. A região possui alta pluviosidade devido, em parte, às elevadas altitudes, com os meses de outubro a março concentrando 87% da precipitação anual (CASTRO, 2006).

No verão, as chuvas são trazidas pela Massa de Ar Tropical Atlântica (mTa), proveniente do oceano Atlântico. Já no inverno, as temperaturas podem atingir 2 °C com a ocorrência de geadas, provocadas pela ação da Massa Polar Atlântica (mPa) (GPBR, 2019).

As expressivas variações de altitude da área favorecem o surgimento de microclimas locais, com condições de temperatura e umidade distintas de regiões relativamente próximas. Nas localidades mais elevadas, é comum a existência de forte radiação solar, constante incidência de ventos, elevada amplitude térmica diária e tempestades de raios (GPBR, 2019).

3.1.4.1 Estação Pluviométrica

Os dados de precipitação utilizados neste trabalho, compreendidos entre 1982 e 2014, foram coletados pela estação meteorológica que pertencia a antiga fábrica da Novelis, atual Hindalco, no bairro Saramenha. O instrumento empregado para tal foi um pluviômetro analógico.

3.1.4.2 Precipitação

Dispondo dos dados de precipitação, elencaram-se os maiores valores de chuva diária para cada ano hidrológico, compreendido entre os meses de outubro a setembro. De acordo com Naghettini e Pinto (2007), a aplicação desta definição é fundamental para garantir que cada ano hidrológico tenha sua própria precipitação máxima.

Com os valores de precipitação máxima determinados e agrupados, tem-se a série histórica, que é a base para os procedimentos relacionados à equação IDF e à modelagem hidrológica. A série utilizada neste trabalho é apresentada na Tabela 4, com os maiores valores de chuva para cada ano hidrológico. Por exemplo, o primeiro dado de 63,2 mm, corresponde ao período de outubro de 1982 a setembro de 1983.

Tabela 4: Série histórica (AUTOR, 2021).

Período	P. máx (mm)	Período	P. máx (mm)	Período	P. máx(mm)
1982/83	63,2	1993/94	61,5	2004/05	98
1983/84	124,5	1994/95	69,6	2005/06	61,4
1984/85	72,3	1995/96	97,9	2006/07	56
1985/86	56,6	1996/97	114,2	2007/08	54
1987/87	73,3	1997/98	73,5	2008/09	89,3
1987/88	97,8	1998/99	56,6	2009/10	76
1988/89	61,9	1999/00	114,3	2010/11	65,1
1989/90	103,6	2000/01	114,3	2011/12	91
1990/91	115,2	2001/02	66	2012/13	69
1991/92	106,4	2002/03	69,7	2013/14	59,2
1992/93	80,6	2003/04	91,2		

Para caracterizar o regime pluviométrico da área de estudo, seguem dois gráficos: um com as médias mensais e outro com os índices anuais da série histórica. Pode-se

observar, na Figura 17, que o mês de dezembro teve a maior precipitação média neste período, enquanto o mês de julho a menor. Na Figura 18, nota-se que o ano de 1992 foi o mais chuvoso, ao passo que em 1990 houve as menores chuvas.

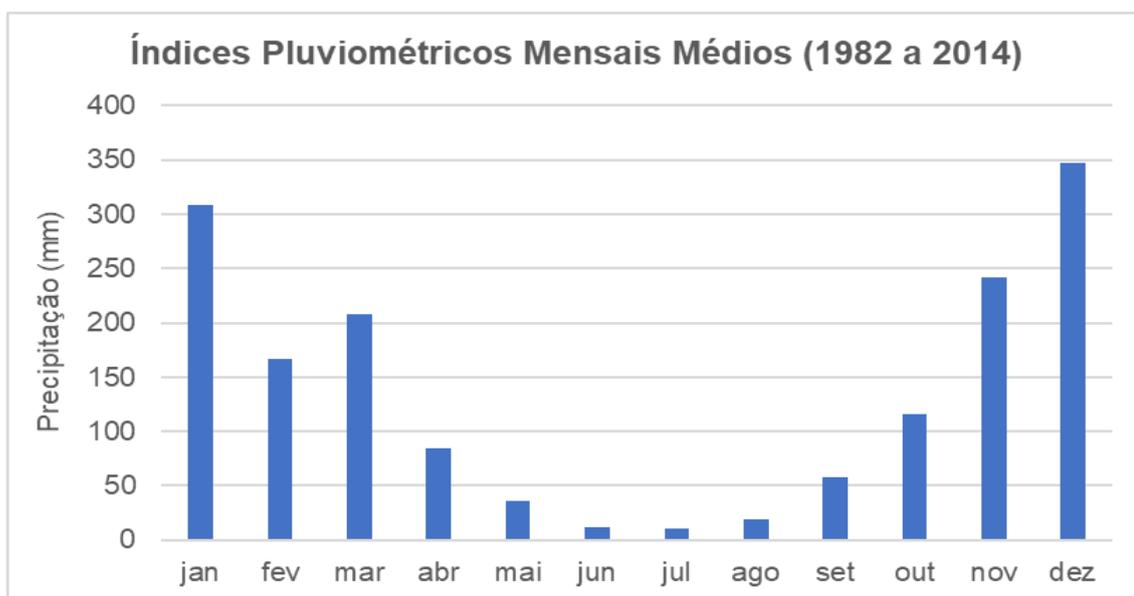


Figura 17: Índices pluviométricos mensais médios (AUTOR, 2021).

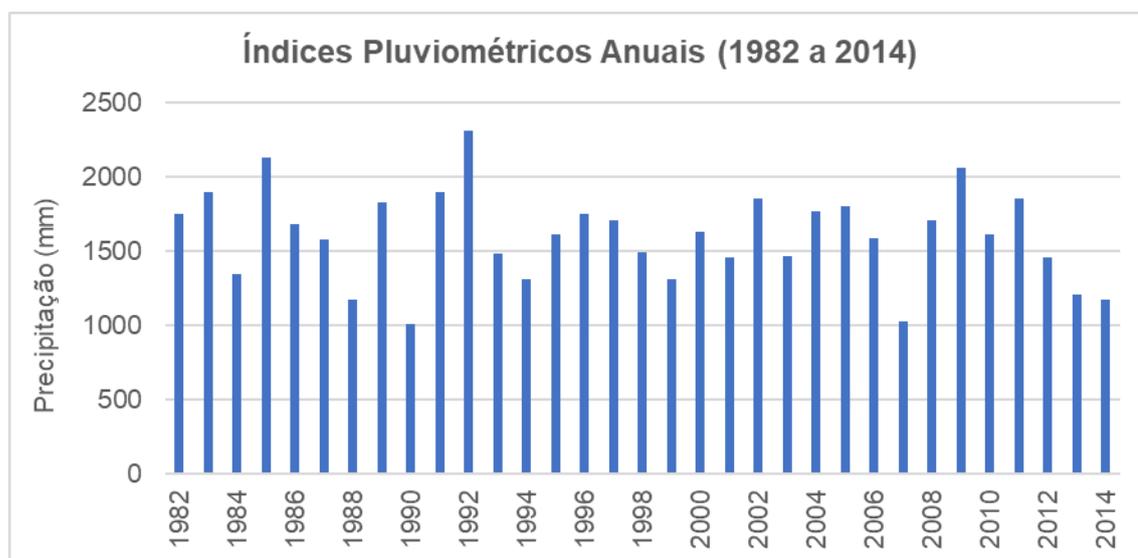


Figura 18: Índices pluviométricos anuais (AUTOR, 2021).

3.2 Processamento no QGIS

Para o geoprocessamento dos dados necessários à modelagem hidrológica empregou-se o programa QGIS 3.16.8, que consiste em um aplicativo profissional GIS livre e de código aberto. Suas aplicações abrangem a criação, edição, visualização, análise e publicação de informações geoespaciais (QGIS, 2021).

3.2.1 Delimitação da Bacia de Estudo

O primeiro passo foi a delimitação da bacia hidrográfica do córrego Varjada, partindo do *download* de modelos digitais de elevação (MDE's) na plataforma *Alaska Satellite Facility*. Estes dados foram captados pelo satélite Alos com o sensor Palsar, da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Trata-se de informações que trazem significativa acurácia ao processamento, visto que entregam uma resolução de 12,5 metros.

Em seguida, elaborou-se o mapa de localização para a delimitação da região de estudo. A base de dados escolhida foi o portal de mapas do IBGE, onde foi feito o *download* do *shapefile* com a demarcação de todos os municípios de Minas Gerais. Este arquivo foi aberto no QGIS e, com a ferramenta Seleccionar Feições por Área ou Por Simples Clique, criou-se um novo vetor definido apenas pelo município de Ouro Preto.

Dispondo das informações anteriores, abriu-se o *raster* do MDE no QGIS. Devido às grandes dimensões da imagem, inseriu-se o *shapefile* de Ouro Preto para a localização e recorte da área de interesse. Então, prosseguiu-se com o pré-processamento em três etapas:

- remoção de pixels negativos com a ferramenta *Raster Calculator*;
- remoção de pixels vazios para a eliminação de ruídos com a ferramenta Preencher sem Dados e
- remoção de depressões, que ocorrem quando um pixel é anômalo, ou seja, é bem destoante dos pixels vizinhos. Assim, a aplicação da ferramenta *Fill Sinks* produziu áreas mais planas e condizentes com a realidade.

Após essa preparação dos dados de entrada, iniciou-se o processo de delimitação da bacia do córrego Varjada através da ferramenta *Channel Network and Drainage Basins*. Os dados de saída foram quatro camadas do tipo *raster*, sendo a direção do fluxo, a conectividade do fluxo, a ordem dos rios e a área de drenagem da bacia; além de três *shapefiles*, correspondentes a rede de drenagem, a área da bacia e as junções.

Posteriormente, empregando a ferramenta *r.watershed*, obtiveram-se as bacias e sub-bacias da área, o rio principal da região e toda a rede de drenagem. A fim de se localizar a bacia de estudo, foi ativada a aplicação *QuickMapServices*, que exibiu uma imagem de satélite do Google.

Finalmente, utilizando a ferramenta *r.water.outlet*, definiu-se no mapa o ponto exutório do sistema e então, automaticamente, o programa QGIS delimitou a bacia. A suavização do traçado da rede de drenagem foi possível com o uso da ferramenta *v.generalize*.

3.2.2 Classificação Hidrológica do Solo

A segunda etapa do geoprocessamento teve o objetivo de determinar a pedologia da bacia do córrego Varjada. Para isso, realizou-se o *download* do *shapefile* Mapeamento de Solos na página da IDE-Sisema, que corresponde a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recurso Hídricos.

Tal arquivo carrega a classificação do solo de todo o estado de Minas Gerais e, por este motivo, foi iniciado no QGIS juntamente ao vetor gerado durante a delimitação da bacia, para que a área de interesse fosse destacada. A ferramenta empregada para essa operação foi a de Recortar, na aba Geoprocessamento da janela Vetor.

3.2.3 Classificação do Uso e Cobertura do Solo

O último estágio de processamento no QGIS procurou classificar a bacia do Varjada no que se refere ao uso e a ocupação do solo. Para tanto, realizou-se o

download de imagens de sensoriamento remoto na página *EarthExplorer*, do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

As imagens foram registradas pelo satélite Landsat 8 e obtidas com diferentes bandas do sensor, a depender do intervalo do espectro eletromagnético para um mesmo local. Para o procedimento em questão foram empregadas as bandas de números 2 a 7, correspondentes ao visível de cores azul, verde e vermelho e ao infravermelho próximo e médio.

Ao abrir as imagens no programa, foi necessário reprojeta-las para o hemisfério sul com a ferramenta Reprojetar Coordenadas, visto que estavam reprojeta-das para o hemisfério norte. Feito isso, inseriu-se o vetor de delimitação da bacia para que a sua região fosse recortada em todas as imagens.

Após preparar as informações para o processamento, iniciou-se a classificação supervisionada em si, possibilitada pela aplicação *Semi-Automatic Classification Plugin*. Neste método verifica-se, previamente, quais classes de uso e ocupação estão presentes no solo da área de estudo, seja através de reconhecimento no local ou com o auxílio de imagens de satélite.

Em seguida, as classes são cadastradas no QGIS e para que o programa as identifique, deve-se proceder da seguinte maneira:

- desenham-se polígonos, sobre uma composição das imagens de sensoriamento remoto, em locais que possuem uma determinada classe definida anteriormente;
- ao se fazer isso, o programa reconhece os pixels delimitados pelo polígono e entende que todos os locais da composição que os possuem têm a mesma classificação e
- assim, uma a uma as classes são identificadas, até que toda a região seja varrida.

3.3 Equação IDF

A seguir serão descritos os procedimentos realizados para se obter os parâmetros da equação IDF, de acordo com Gandini (2016).

3.3.1 Identificação de *Outliers*

Após a organização dos registros de chuvas máximas da série histórica por ano hidrológico, aplicaram-se os testes de Grubbs (1969) e de Grubbs e Beck (1972) para a identificação de possíveis *outliers*. Neste trabalho foi adotado nível de significância de 1%, por ser mais restritivo, para ambos os testes e todos os cálculos foram realizados no Excel.

3.3.2 Distribuições de Probabilidade

Para a escolha daquela que melhor representasse o regime pluviométrico deste estudo, foram calculados os parâmetros e plotados os gráficos, no Excel, das seguintes distribuições de probabilidade: Normal, log Normal, Pearson tipo III, log Pearson tipo III, Gumbel Teórica e Gumbel Finita. Buscando identificar a distribuição que apresentasse a curva mais bem ajustada aos valores da série histórica, principalmente às precipitações máximas, aplicou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov juntamente à análise visual dos gráficos.

Para o teste de Kolmogorov-Smirnov, empregou-se a Equação 14, como ele pode não rejeitar nenhuma distribuição, calculou-se o p-valor, P_{KS} , usando a Equações 15 para saber qual das distribuições não-rejeitadas representa melhor a série histórica.

$$D = \max_{-\infty < x < \infty} |S_N(x) - P(x)| \quad (14)$$

$$P_{KS}(z) = \frac{\sqrt{2\pi}}{z} \sum_{j=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{(2j-1)^2\pi^2}{8z^2}\right) \quad (15)$$

Sendo $S_N(x)$ o conjunto de dados, $P(x)$ uma função distribuição cumulativa, $D_{máx}$ o valor máximo da diferença absoluta entre duas funções de distribuição cumulativas e P_{KS} a função de probabilidade cumulativa, definida para z positivo, calculado segundo a Equação 16 (GANDINI, 2016).

$$z = \left(\sqrt{N_e} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{N_e}} \right) \cdot D_{máx} \quad (16)$$

Em que N_e é o número de pontos efetivos, no caso de comparação envolvendo uma distribuição contínua, tem-se que o número de pontos efetivo é igual ao número de pontos experimentais.

Neste trabalho, evidenciou-se apenas a distribuição Gumbel Finita, assim denominada por considerar que a amostra tem um tamanho finito. A seguir, será apresentada a sequência de equações aplicadas nesta distribuição de probabilidade, de acordo com o material de Gandini (2016), para as demais distribuições, as equações aplicadas para a metodologia em questão, podem ser encontradas nesta mesma referência no item 2.7.2.

Neste modelo, a probabilidade de ocorrência de uma precipitação ser igual ou menor a um dado valor x é dada pela Equação 17:

$$F(x) = e^{-e^{-y'}} \quad (17)$$

onde e é a base dos logaritmos neperianos e y' uma variável reduzida calculada pela Equação 18:

$$y' = \sigma_N \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma} + \frac{Y_N}{\sigma_N} \right) \quad (18)$$

em que \bar{x} é a média e σ o desvio padrão da população, enquanto Y_N e σ_N são obtidos pelas Equações 19 e 20, respectivamente:

$$Y_N = \frac{\sum_{m=1}^{m=N} [Y_m(N)]}{N} \quad (19)$$

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{N \sum_{m=1}^{m=N} \{[Y_m(N)]^2\} - \{\sum_{m=1}^{m=N} [Y_m(N)]\}^2}{N^2}} \quad (20)$$

com Y_m , a variável reduzida de Gumbel, calculada para cada posição de plotagem m de uma amostra ordenada de tamanho N . Finalmente, considerando a posição de plotagem pela fórmula de Weibull obtém-se a Equação 21 para o cálculo de Y_m , sendo m a ordem de classificação do elemento amostral e N o tamanho da amostra.

$$Y_m(N) = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{m}{N+1} \right) \right] \quad (21)$$

Para se estimar os parâmetros e obter o quantil associado ao tempo de retorno, Tr é utilizada a Equação 22, em que K_{GF} é o fator de frequência para a Gumbel Finita, calculado pela Equação 23, e y representa a variável reduzida de Gumbel associada ao tempo de retorno Tr , e é dada pela Equação 24.

$$x_{Tr} = \bar{x} + K_{GF}\sigma \quad (22)$$

$$K_{GF} = \frac{y - Y_N}{\sigma_N} \quad (23)$$

$$y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \quad (24)$$

3.3.3 Cálculo de Chuvas para Diferentes Durações

Uma vez definida a distribuição de probabilidade a ser adotada, utilizou-se a equação de Ven-Te-Chow e determinou-se a chuva de 1 dia para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 75 e 100 anos. Em seguida, aplicaram-se os coeficientes de desagregação para obtenção das alturas pluviométricas de durações menores, por fim as intensidades de precipitação foram calculadas e agrupadas para os tempos de duração e para cada tempo de recorrência considerados.

3.3.4 Parâmetros de Ajuste da Curva

Portando os conjuntos de valores de período de retorno, duração e intensidade, procedeu-se com a regressão não linear realizada no programa Origin 6.0 para dois intervalos de duração: de 5 a 60 minutos e 60 a 1.440 minutos. A separação em dois intervalos, um de pequena e outro de grande duração, visou diminuir erros advindos da diferença de tendência nas intensidades entre chuvas, conforme observado por Martins et al. (2017) que, estudando um pluviógrafo de Caraguatatuba-SP, constataram que existe um comportamento bastante distinto entre as chuvas com durações menores do que 60 minutos e as com durações maiores do que 60 minutos, como pode ser visto na Figura 19. De acordo com os autores, a diferença de comportamento poderia ser explicada pelos diferentes fatores que levam formação das chuvas: chuvas com menores durações têm o efeito de convecção mais frequente, enquanto chuvas com durações maiores podem ter efeitos combinados de orografia ou de frentes.

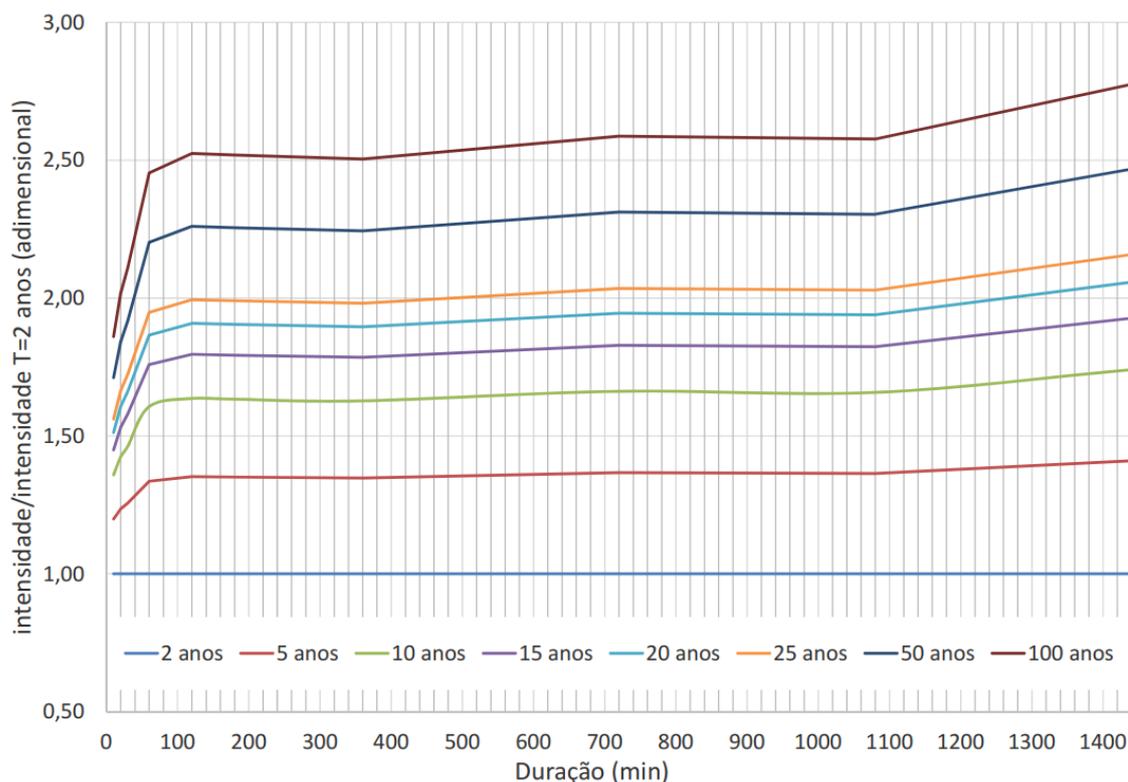


Figura 19: Relação entre as intensidades das chuvas com vários períodos de retorno e sua relação com as intensidades de chuva no $T_r = 2$ anos (MARTINS et al., 2017).

3.4 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica foi feita no HEC-HMS e as primeiras entradas foram os dados dos hietogramas pré-definidos, que possuem os incrementos de precipitação para cada intervalo de tempo. O processamento no programa foi realizado, individualmente, para cada período de retorno adotado.

Procedeu-se com a definição dos elementos hidrológicos e parâmetros, além da seleção de métodos de cálculo, para cada elemento da bacia. Para tal, criou-se uma sub-bacia enquanto parte física do modelo, referente à bacia do Varjada, e adicionou-se sua área. Escolheram-se os métodos de separação de escoamento e hidrograma unitário do SCS e desconsiderou-se a vazão de base para a modelagem.

Em seguida, os valores do Número da Curva e do tempo de retardo, adotado como 60% do tempo de concentração, foram inseridos. Então, determinou-se o método de cálculo das variáveis hidrológicas bem como as especificações de controle. As perdas por evapotranspiração e evaporação foram desprezadas, preocupando-se apenas com as perdas por infiltração.

Finalmente, criou-se uma “rodada” combinando os dados da bacia, os dados de controle e os dados das variáveis meteorológicas para, então, realizar o processamento. Os resultados obtidos foram os hidrogramas de cheia e respectivas vazões de pico para cada período de retorno.

3.4.1 Tempo de Concentração

As três equações escolhidas para o cálculo do tempo de concentração são: *Corps of Engineers*, Kirpich e Ven-Te-Chow, recomendados para bacias rurais de até 12.000 km², as Equações 25, 26 e 27 as apresentam, respectivamente. A equação do *Corps of Engineers* considera o tempo de retardo multiplicado por 1,417, a de Kirpich foi adaptada da de Kibler (1982) e a de Ven-Te-Chow considera o tempo de pico multiplicado por 1,67 (SILVEIRA, 2005).

$$t_{c \text{ CorpsofEngineers}} = 0,191 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad (25)$$

$$t_{c \text{ Kirpich}} = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad (26)$$

$$t_{c \text{ Ven-Te-Chow}} = 0,160 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (27)$$

Nas Equações 25, 26 e 27, t_c é o tempo de concentração em horas (h), L o comprimento do percurso hidráulico em quilômetros (km) e S a declividade do percurso hidráulico em metros por metro (m/m). As variáveis L e S foram obtidas no QGIS, a primeira pela Tabela de Atributos do vetor do maior percurso hidráulico exportado; já a segunda pelos dados de elevação do programa em conjunto com o Google Earth, após a realização de uma média ponderada para diversos trechos e suas respectivas declividades.

3.4.2 Hietograma

Para a construção dos hietogramas de blocos alternados, adotou-se o tempo de duração total como sendo igual ao tempo de concentração da bacia. Em seguida, definiram-se o intervalo de tempo para cada parcela de precipitação e os períodos de retorno a serem considerados, sendo os de 2, 10, 25, 50 e 100 anos, contemplando a microdrenagem e a macrodrenagem.

A partir destes dados, calcularam-se as intensidades para cada intervalo, em mm/h, com a equação IDF obtida. Então, determinaram-se as precipitações acumuladas e, logo depois, desagregaram-se as mesmas para cada bloco, dispondo estas últimas com os maiores valores ao centro do gráfico. Esse processo foi realizado para cada período de retorno, com o auxílio do Excel.

3.4.3 Número da Curva

Para a obtenção do Número da Curva, consideraram-se duas situações: uma que representa a condição atual da bacia e outra que consiste em uma simulação, reproduzindo um possível cenário futuro em que seja urbanizada a zona de expansão prevista na Lei de Uso e Ocupação do Solo de Ouro Preto.

Na Condição Atual, o CN foi encontrado utilizando-se o QGIS, em que foram carregados no programa os resultados da classificação hidrológica do solo e da classificação do uso do solo. Com a sobreposição dos dois mapas, o programa forneceu a porcentagem da área total que cada classe de uso ocupa, em função do tipo de solo.

Para a Simulação de Urbanização, os resultados da Condição Atual foram exportados do QGIS em formato DXF para que fossem abertos, juntamente à zona de expansão, no AutoCAD. Feito isso, calculou-se a redução das áreas de Florestas e Campos ocupadas pela zona de expansão e obteve-se, conseqüentemente, o aumento da Área Artificial.

4 RESULTADOS

4.1 Processamento no QGIS

No programa QGIS foi possível estabelecer a delimitação da bacia e a classificação hidrológica do solo bem como a do seu uso e cobertura. Os próximos subtópicos apresentam os mapas para cada um destes resultados.

4.1.1 Delimitação

A bacia hidrográfica do córrego Varjada possui uma área de 9,16 km², obtida no programa QGIS, então ela pode ser considerada uma microbacia (Figura 20). O ponto de foz escolhido está às margens da BR-356, na entrada do bairro Saramenha, pouco antes do córrego Varjada se juntar ao córrego Tripuí.

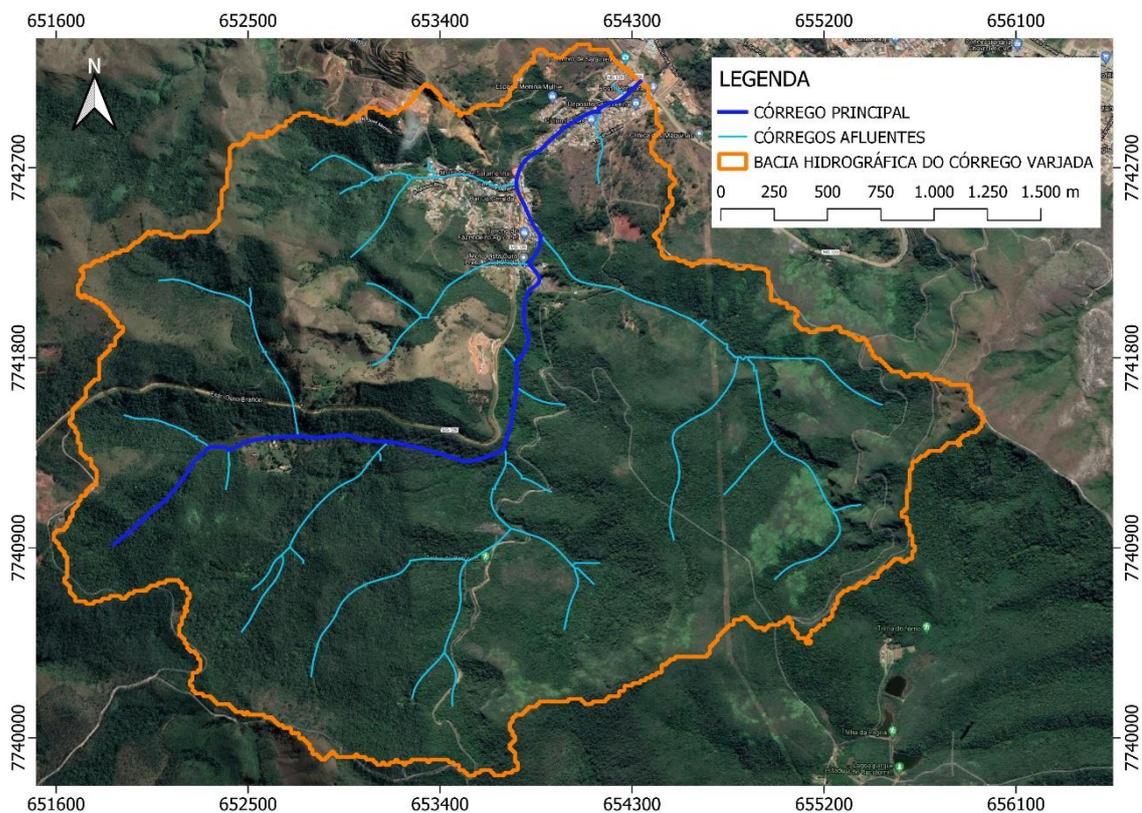


Figura 20: Delimitação da bacia (AUTOR, 2021).

4.1.2 Classificação Hidrológica do Solo

Uma vez que foi plotado o mapa com a pedologia da região da bacia, identificaram-se os solos ali presentes e suas respectivas áreas. Foram reconhecidos dois tipos de solo, conforme demonstrado na Figura 21. Para o cálculo das áreas utilizou-se a Calculadora de Campo da Tabela de Atributos no QGIS e o resultado pode ser observado na Tabela 5.

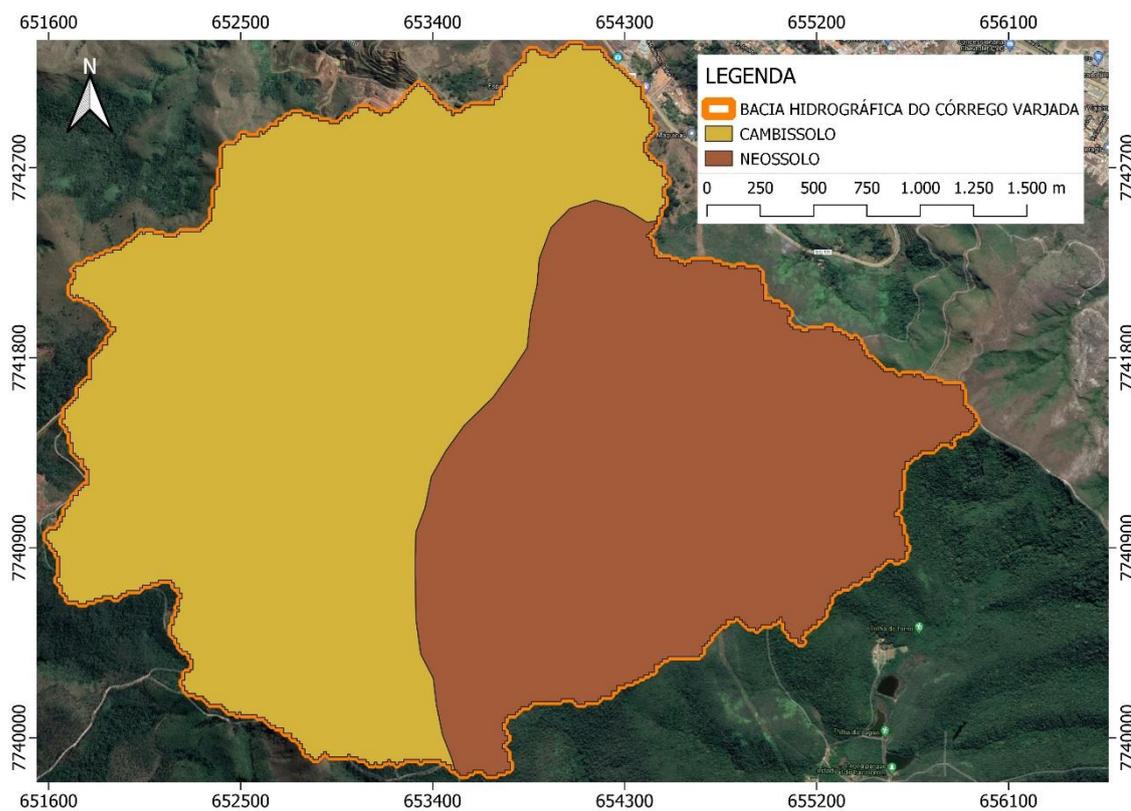


Figura 21: Classificação hidrológica do solo da bacia (AUTOR, 2021).

Tabela 5: Áreas ocupadas pelos tipos de solo (AUTOR, 2021).

Tipo de Solo	Área Ocupada (km ²)	Área Ocupada (%)
Cambissolo Háplico (CXbd29)	5,24	57,21
Neossolo Litólico (RLd10)	3,92	42,79

Percebe-se, assim, que a bacia possui presença pouco maior de Cambissolo. De acordo com as características de ambos os solos, pode-se constatar que se trata de uma região com alta probabilidade de erosão e grande potencial de escoamento superficial.

4.1.3 Classificação do Uso e Cobertura do Solo

O resultado da classificação supervisionada é a indicação de todas as camadas que compõem a região de interesse, podendo-se obter suas respectivas áreas na Tabela de Atributos do QGIS. Nota-se com a Figura 22 e a Tabela 6 que a bacia é predominantemente rural, composta principalmente por Vegetação Florestal.

A classificação supervisionada adotada, de acordo com o que se tem na área da bacia, está alinhada com a classificação do IBGE (2020), já que:

- a classificação Florestas se adequa a classe Vegetação Florestal, pois consiste em uma mata preservada e densa, com formações arbóreas de alto porte;
- a classificação Campos é compatível com a classe Vegetação Campestre, pois se caracteriza por uma área com arbustos esparsos sobre estrato gramíneo e
- a classificação Área Artificial, mesma denominação da classe do IBGE, é propícia, uma vez que representa áreas urbanas, correspondentes ao bairro Saramenha, e região de exploração mineral, que equivale a mina de topázio imperial.

É importante salientar que, para a apropriada classificação da região, foi feito, juntamente a uma análise apurada de imagens de satélite, o reconhecimento da bacia a partir de visitas ao local, que comprovou que as classificações de uso e ocupação do solo obtidas pelo QGIS estavam adequadas à bacia em estudo.

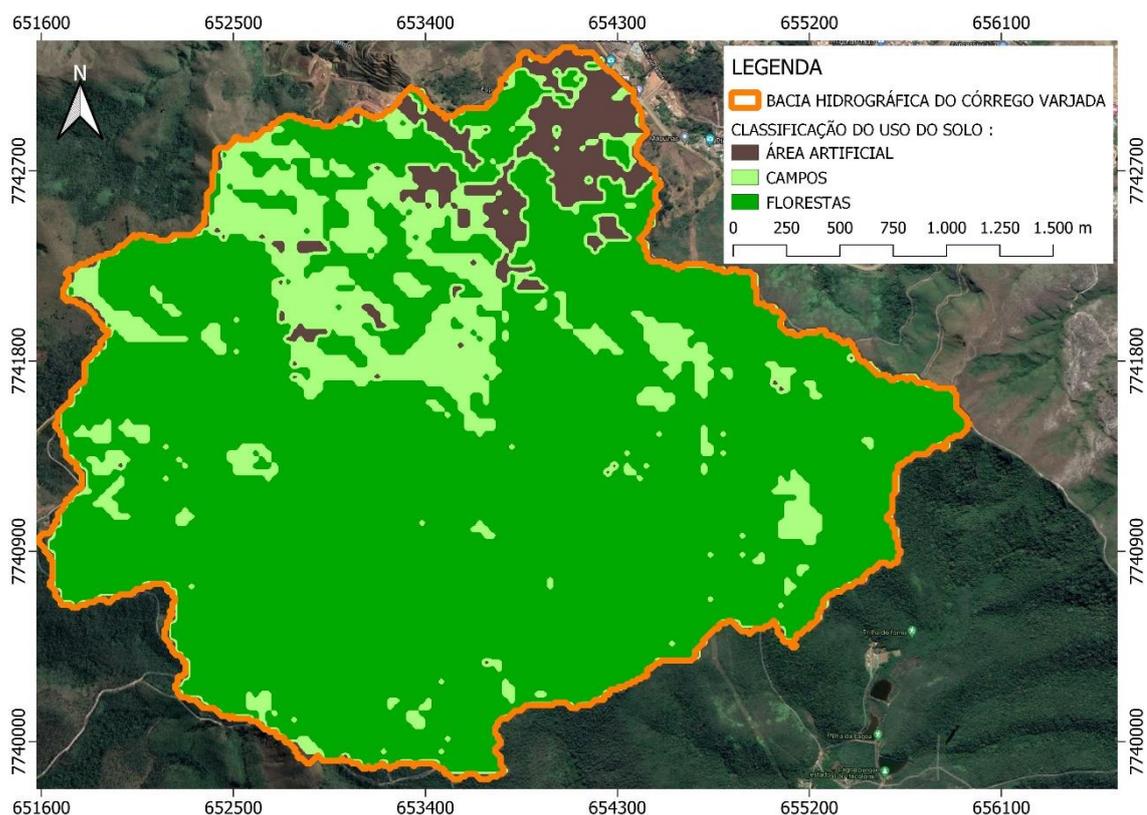


Figura 22: Classificação do uso do solo da bacia (AUTOR, 2021).

Tabela 6: Áreas ocupadas de acordo com o uso do solo (AUTOR, 2021).

Classificação do Uso do Solo	Área Ocupada (km ²)	Área Ocupada (%)
Florestas	7,36	80,35
Campos	1,29	14,08
Área Artificial	0,51	5,57

4.2 Equação IDF

Nos próximo três subtópicos serão apresentados os resultados do teste de *outlier*, do teste de Kolmogorov-Smirnov, do p-valor e da regressão não linear para obtenção dos parâmetros da equação IDF.

4.2.1 Identificação de *Outliers*

O critério adotado neste trabalho considerou um dado como *outlier* apenas se este resultado fosse observado nos dois métodos abordados no item 2.7.1, o que não ocorreu, visto que em ambos não foi feita tal constatação. Sendo assim, não foram excluídos valores de precipitação da série histórica.

4.2.2 Distribuições de Probabilidade

O teste de Kolmogorov-Smirnov não rejeitou nenhuma distribuição de probabilidade. Após o cálculo do p-valor e da análise visual dos gráficos plotados para todas as distribuições de probabilidade, observou-se que a Gumbel Finita foi a que melhor se adequou, tanto de uma forma geral quanto para os maiores valores de precipitação. Isso é importante pois, para este trabalho que abrange o estudo de cheias, é apropriado considerar os valores máximos da série histórica.

Nas Figuras 23 a 28 são apresentados os gráficos para todas as distribuições consideradas neste trabalho e a Tabela 7 confirma que o melhor ajuste aconteceu para a Gumbel Finita, já que o menor valor de P_{KS} se deu para tal distribuição.

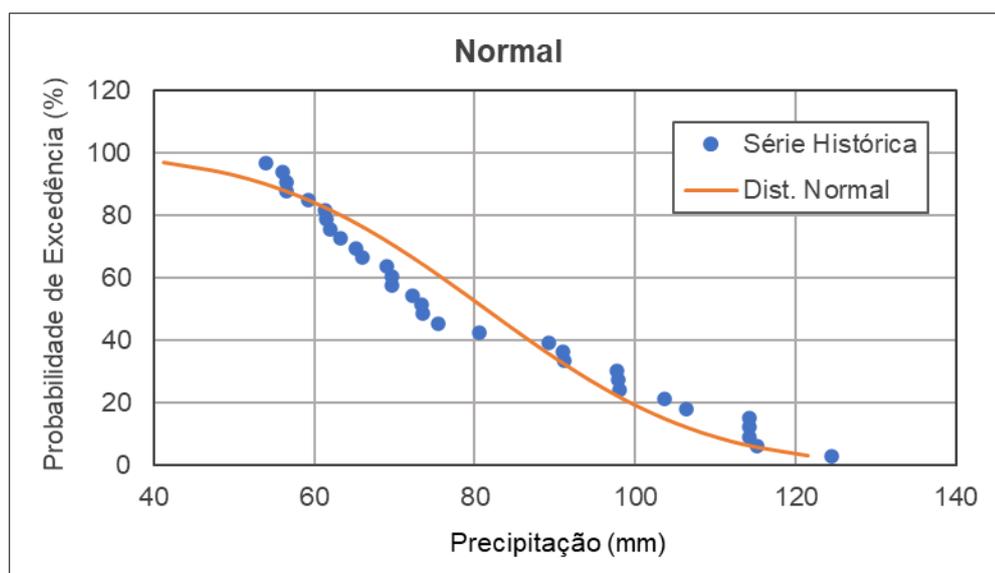


Figura 23: Gráfico da distribuição Normal (AUTOR, 2021).

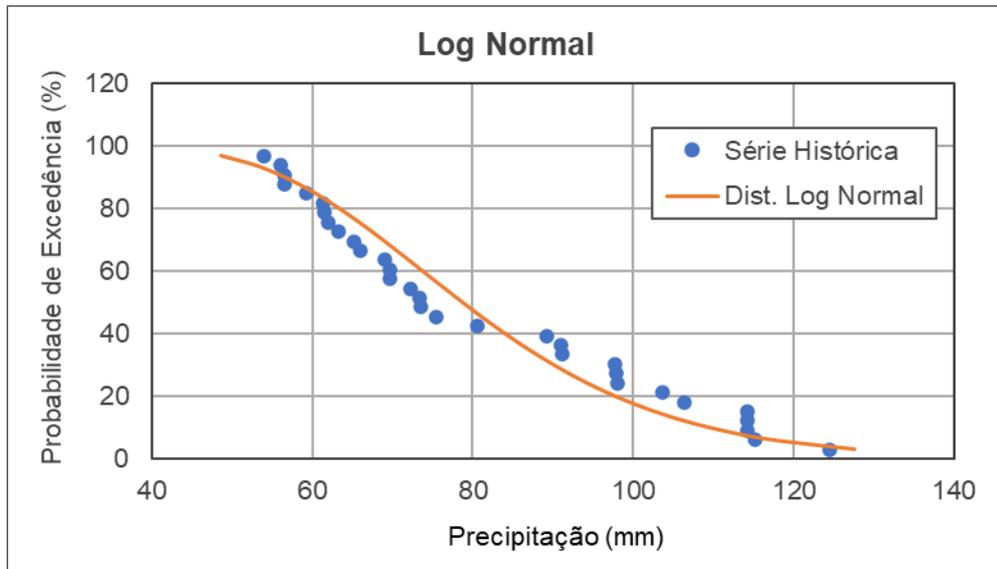


Figura 24: Gráfico da distribuição log Normal (AUTOR, 2021).

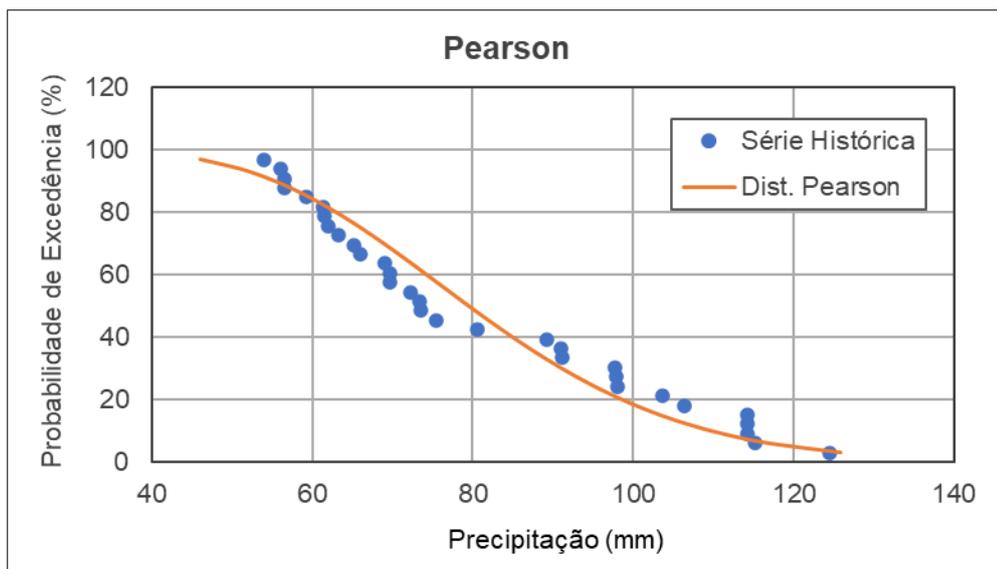


Figura 25: Gráfico da distribuição Pearson tipo III (AUTOR, 2021).

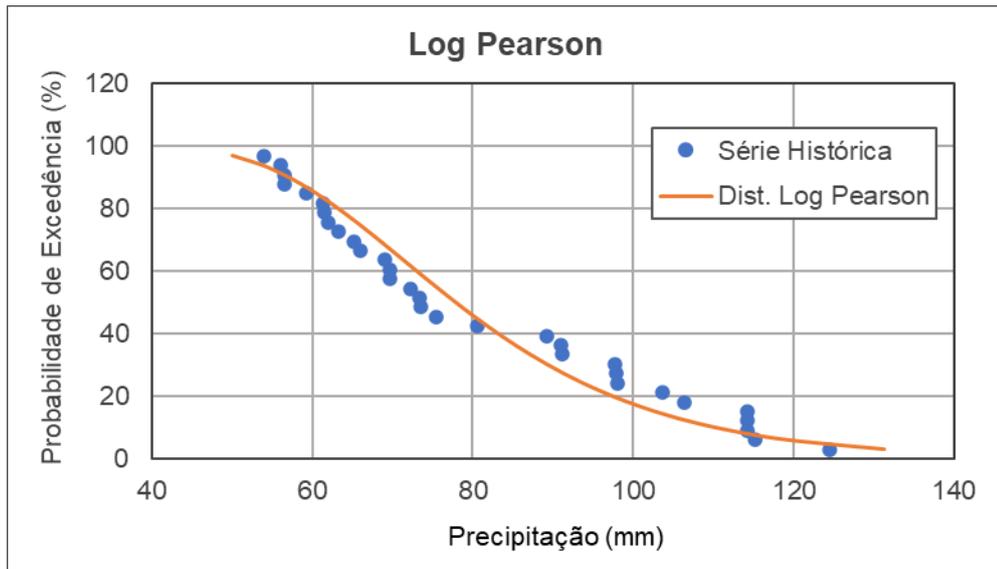


Figura 26: Gráfico da distribuição log Pearson tipo III (AUTOR, 2021).

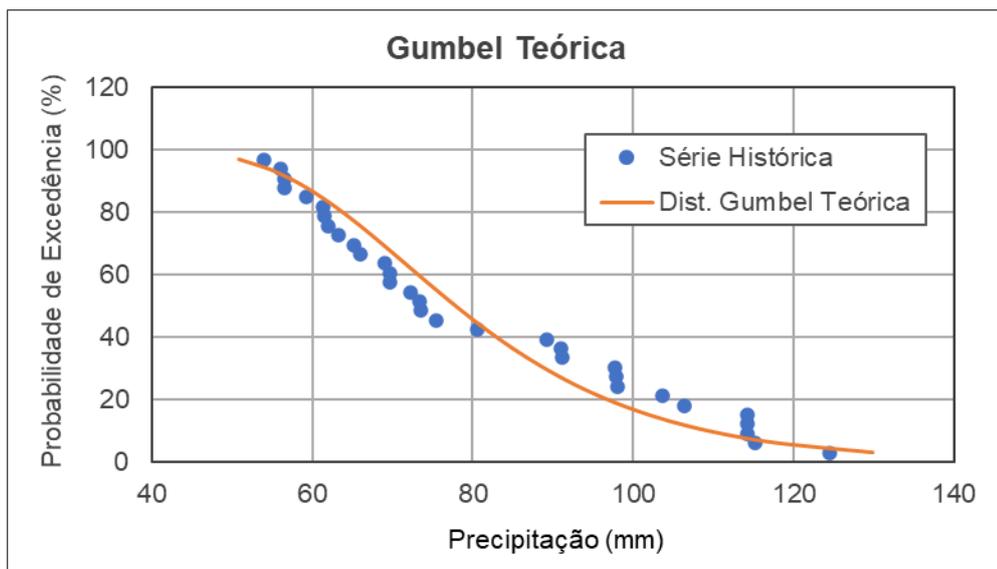


Figura 27: Gráfico da distribuição Gumbel Teórica (AUTOR, 2021).

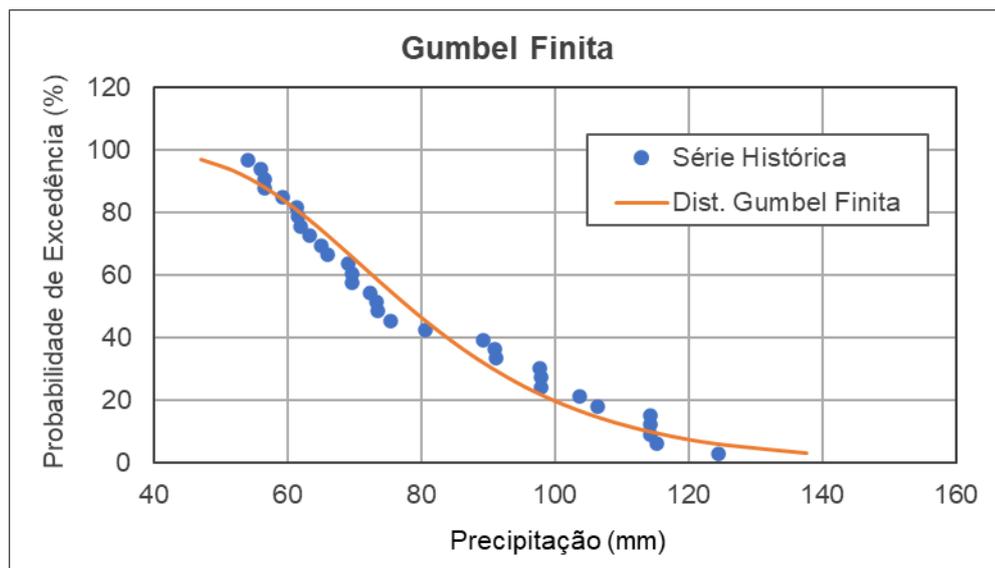


Figura 28: Gráfico da distribuição Gumbel Finita (AUTOR, 2021).

Tabela 7: Função de probabilidade cumulativa para as distribuições (AUTOR, 2021).

Distribuição de Probabilidade	P_{KS}
Gumbel Finita	0,245
Gumbel Teórica	0,317
Log Pearson	0,440
Log Normal	0,440
Pearson	0,527
Normal	0,739

4.2.3 Parâmetros de Ajuste da Curva

Após a realização da regressão não linear, chegou-se aos parâmetros de calibração da equação IDF para os dois intervalos apresentados na Tabela 8:

Tabela 8: Parâmetros de ajuste da equação IDF (AUTOR, 2021).

Intervalo (min)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
$5 \leq t_d \leq 60$	550,98022	0,16623	7,23706	0,64538
$60 \leq t_d \leq 1.440$	783,85217	0,16623	5,42459	0,73554

Ao se compararem os valores da intensidade real com aqueles calculados pela equação IDF, chegou-se a um erro relativo menor do que 3% para os dois intervalos. Isso demonstra mais uma vez que a distribuição probabilística adotada, de Gumbel Finita, representou de forma satisfatória os dados da série histórica.

As Equações 28 e 29, apresentam as equações IDF encontradas para cada um dos intervalos:

$$i = \frac{550,98022 \cdot Tr^{0,16623}}{(t_d + 7,23706)^{0,64538}}, \quad (5 \leq t_d \leq 60) \quad (28)$$

$$i = \frac{783,85217 \cdot Tr^{0,16623}}{(t_d + 5,42459)^{0,73554}}, \quad (60 \leq t_d \leq 1.440) \quad (29)$$

Embora as equações pareçam próximas, se aplicadas fora do seu intervalo válido, os erros relativos encontrados aumentam em torno de 6 vezes. Para o intervalo de 5 a 60 minutos, o erro relativo médio com a equação correta é 2,626% enquanto para a equação do outro intervalo o erro aumenta para 13,190%. E para o intervalo de 60 a 1.440 minutos o valor do erro relativo médio é 2,838% usando a equação deste intervalo e aumenta para 20,068% ao usar a equação do outro intervalo.

4.3 Modelagem Hidrológica

Para se chegar aos resultados de vazão a partir das precipitações, calculou-se o tempo de concentração da microbacia, construíram-se os hietogramas, determinou-se ou Número da Curva e todos esses resultados, apresentados nos próximos

subitens, foram inseridos no HEC-HMS, que também tem seus resultados apresentados a seguir.

4.3.1 Tempo de Concentração

Com o emprego do QGIS obtiveram-se os dados do maior percurso hidráulico, representado na Figura 29, que são o comprimento (L) de 4.245,86 metros (4,25 km) e a declividade (S) de 0,06 metros/metro. A partir destes valores, chegou-se ao tempo de concentração utilizando as três equações escolhidas. A Tabela 9, apresenta o comprimento e a declividade adotados bem como os tempos de concentração calculados pelas Equações 25, 26 e 27, respectivamente e a média dos três resultados. Para este trabalho foi considerado um tempo de concentração de 0,86 horas.

Tabela 9: Tempo de concentração (AUTOR, 2021).

L (km)	S (m/m)	t_c (h) <i>Corps of Engineers</i>	t_c (h) Kirpich	t_c (h) Ven Te Chow	t_c (h) Médio
4,25	0,06	0,98	0,60	0,99	0,86

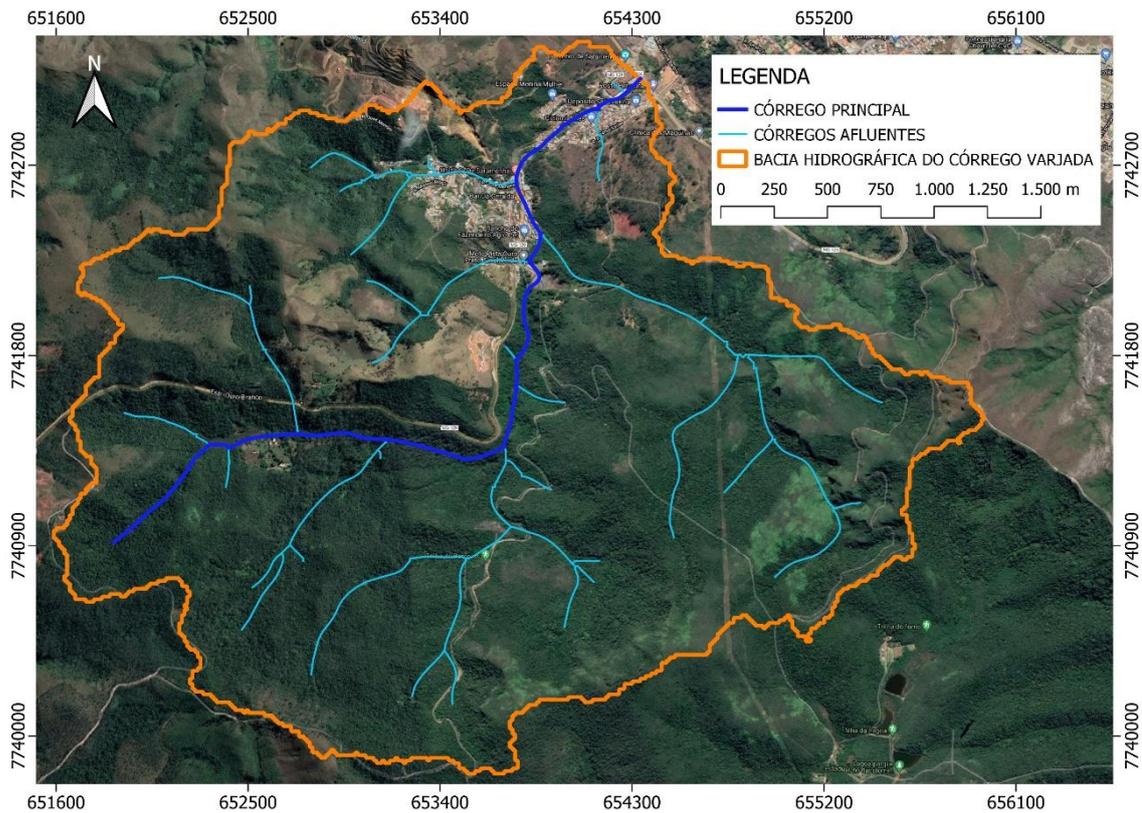


Figura 29: Maior percurso hidráulico – córrego principal (AUTOR, 2021).

4.3.2 Hietogramas

Nos hietogramas apresentados nas Figuras 30 a 34, para cada período de retorno, adotou-se uma duração de 50 minutos, arredondando o tempo de concentração de 0,86 horas para baixo. Tal escolha se justifica pela natureza deste trabalho, que busca encontrar os impactos mais críticos de chuvas intensas para a bacia de estudo.

Os intervalos de tempo considerados foram de 5 minutos, totalizando 10 blocos. A equação IDF aplicada foi aquela obtida para o intervalo de 5 a 60 minutos, devido ao tempo de concentração calculado.

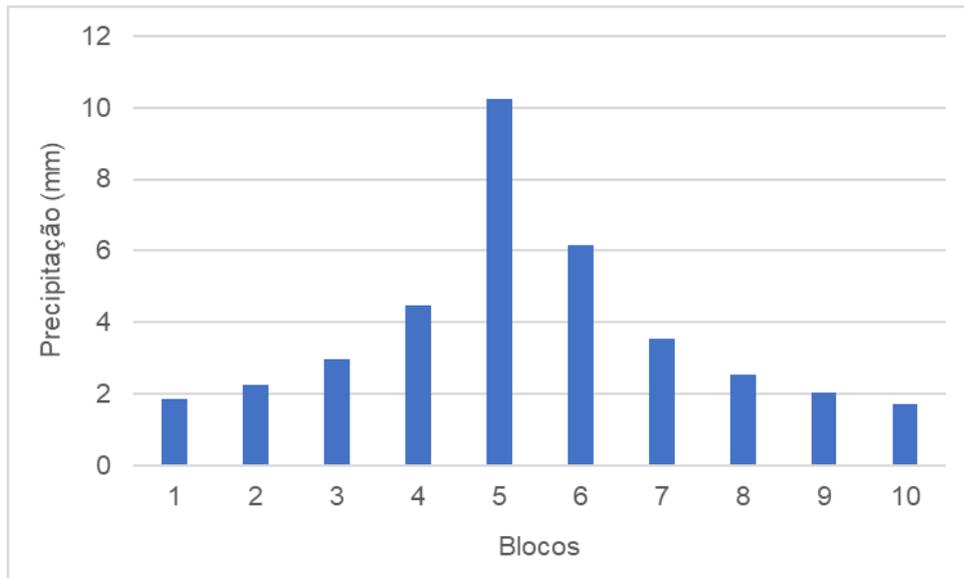


Figura 30: Hietograma para um Tr de 2 anos (AUTOR, 2021).

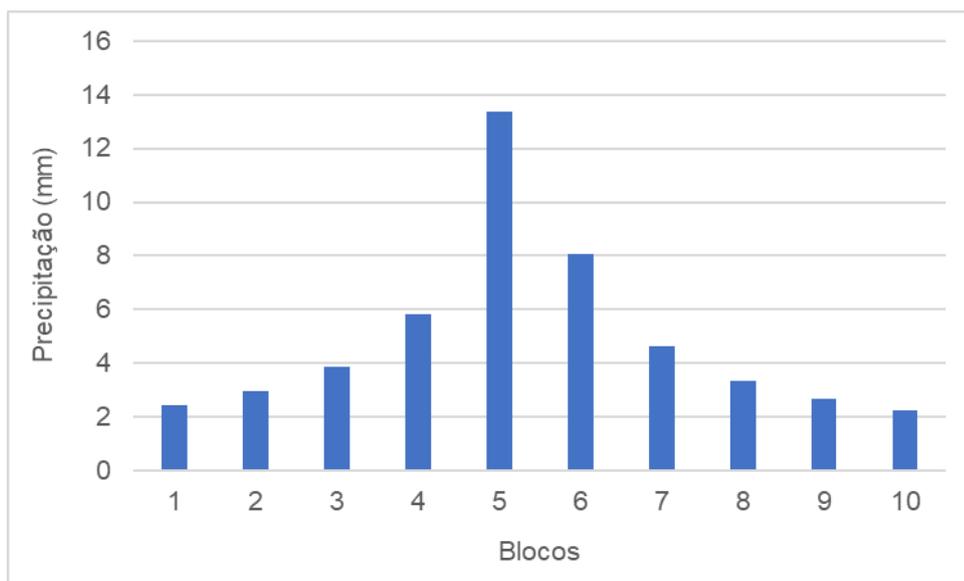


Figura 31: Hietograma para um Tr de 10 anos (AUTOR, 2021).

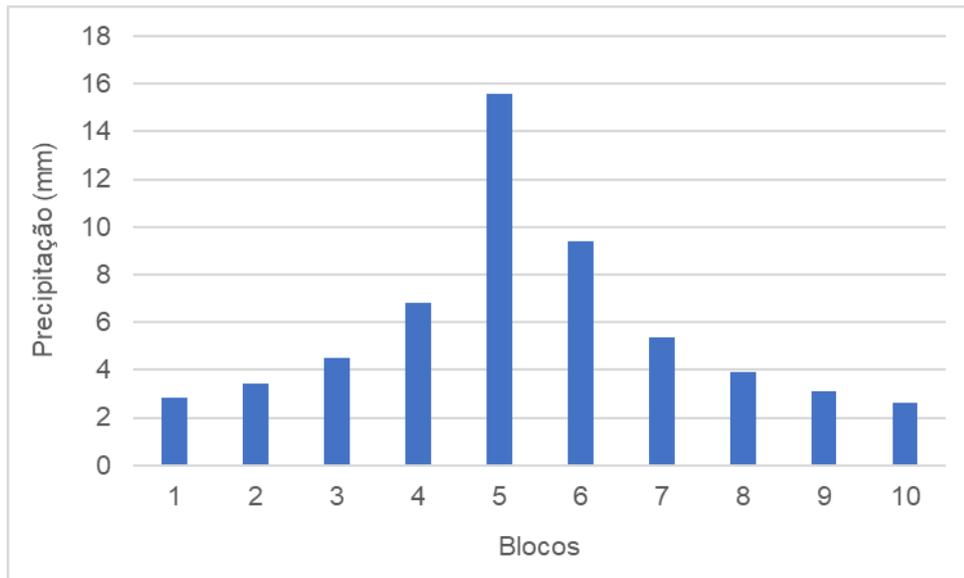


Figura 32: Hietograma para um Tr de 25 anos (AUTOR, 2021).

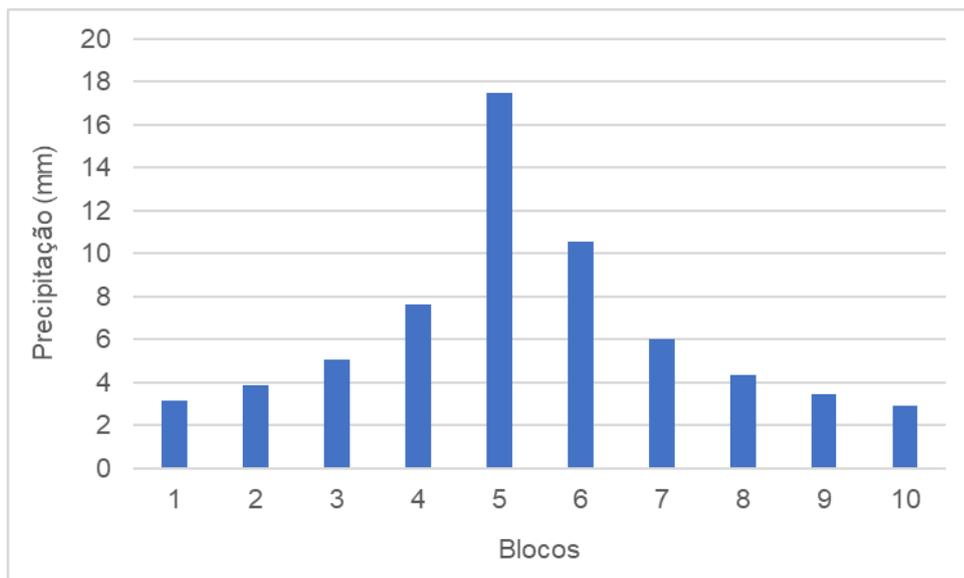


Figura 33: Hietograma para um Tr de 50 anos (AUTOR, 2021).

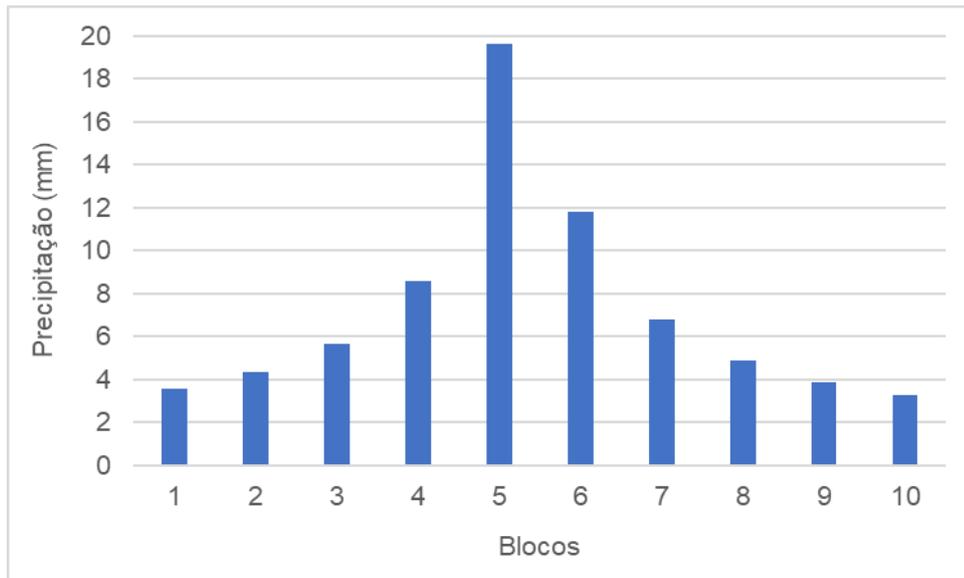


Figura 34: Hietograma para um Tr de 100 anos (AUTOR, 2021).

4.3.3 Número da Curva

Os mapas confeccionados para obtenção do Número da Curva para a Condição Atual e para a Simulação de Urbanização são apresentados nos dois itens seguintes, bem como as tabelas com a porcentagem das áreas de cada uso e ocupação para cada grupo hidrológico de solo identificado.

4.3.3.1 Condição Atual

A Tabela 10 demonstra a parcela da área total, em porcentagem, ocupada por cada classe de uso do solo - Florestas, Campos e Área Artificial - de acordo com as duas tipologias pedológicas da microbacia – Cambissolo Háplico (Grupo C) e Neossolo Litólico (Grupo D). Para a obtenção do Número da Curva que melhor representasse a bacia, realizou-se uma média ponderada em função das porcentagens e valores de cada CN, o que resultou em 69,8. Na Figura 35 observa-se a composição feita no QGIS.

Tabela 10: Número da Curva para a condição atual (AUTOR, 2021).

Classificação Hidrológica	Florestas	Campos	Área Artificial
Grupo C	40,38 %	11,40 %	5,23 %
	60	71	90
Grupo D	39,97 %	2,68 %	0,34 %
	76	78	92

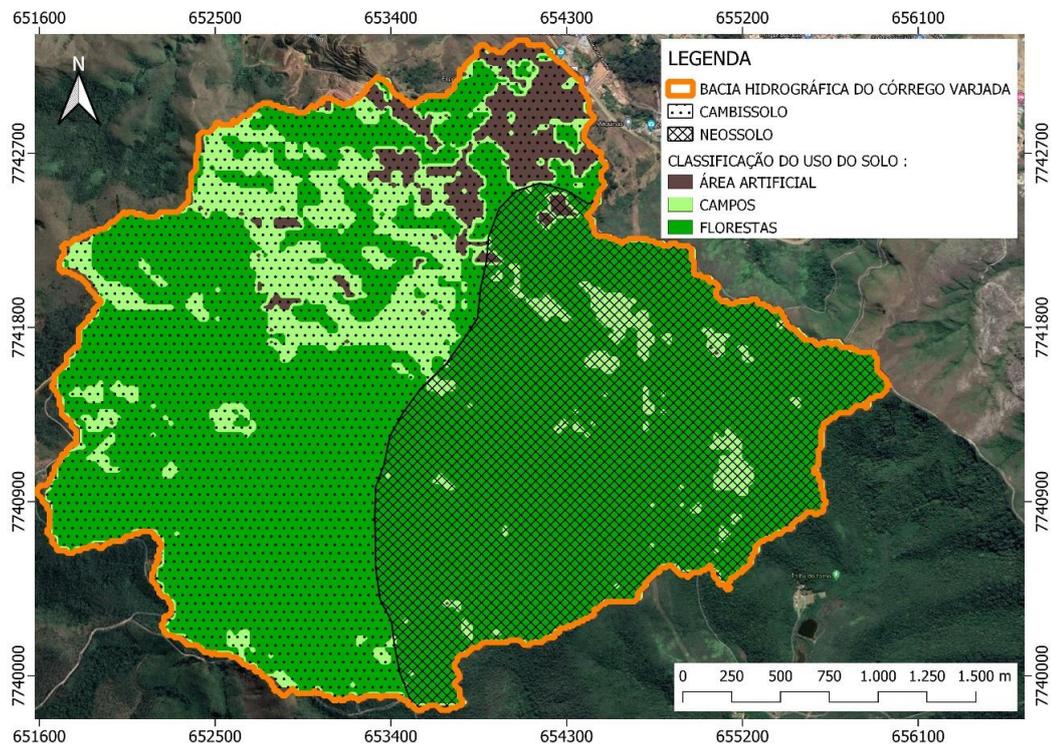


Figura 35: Classificação do uso e tipo de solo da bacia (AUTOR, 2021).

4.3.3.2 Simulação de Urbanização

Na Tabela 11 estão as porcentagens de cada classe, assim como no item anterior, mas considerando agora a zona de expansão urbanizada (Figura 36). O procedimento de cálculo se deu com a subtração da área referente à zona de expansão das áreas de Florestas e Campos ocupados por ela, somando-a como Área Artificial. Observa-

se uma redução brusca das Florestas do Grupo C, resultando em um CN maior igual a 79,8.

Tabela 11: Número da Curva para a simulação de urbanização (AUTOR, 2021).

Classificação Hidrológica	Florestas	Campos	Área Artificial
Grupo C	12,46 %	4,57 %	39,94 %
	60	71	90
Grupo D	38,17 %	2,61 %	2,25 %
	76	78	92

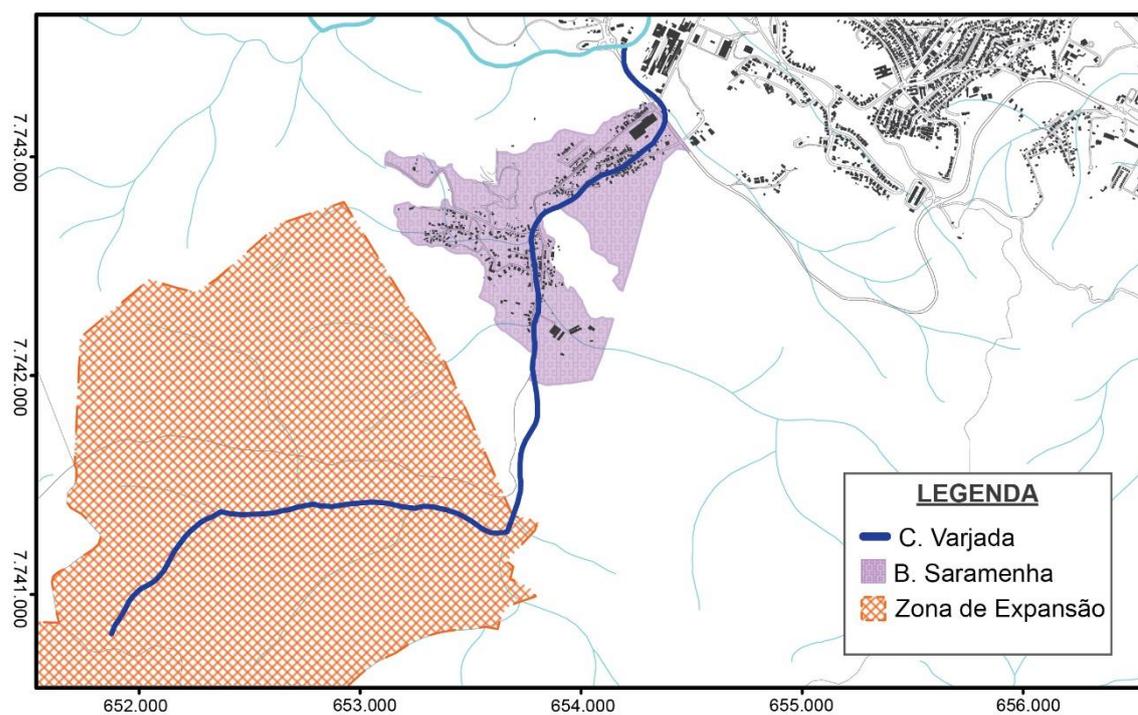


Figura 36: Zona de expansão para a simulação de urbanização (AUTOR, 2021).

4.3.4 Transformação Chuva-Vazão

Foram feitas duas modelagens no HEC-HMS, uma considerando a Condição Atual e outra para a Simulação de Urbanização. Em ambas, apenas o valor do número da curva se alterou, as demais entradas do programa foram mantidas. Os resultados são os hidrogramas de cheia (Figuras 37 a 46), cujos componentes são:

- nos hietogramas da parte de cima do gráfico, a região vermelha equivale à chuva que infiltrou, foi interceptada ou ficou retida nas depressões do terreno, enquanto a região azul refere-se à chuva efetiva. A soma das duas parcelas corresponde ao volume precipitado e
- a curva localizada na parte de baixo do gráfico consiste no hidrograma superficial, representando o comportamento da vazão ao longo do tempo.

Nas Figuras 37 a 41, são apresentados os hidrogramas obtidos para cada período de retorno para a Condição Atual.

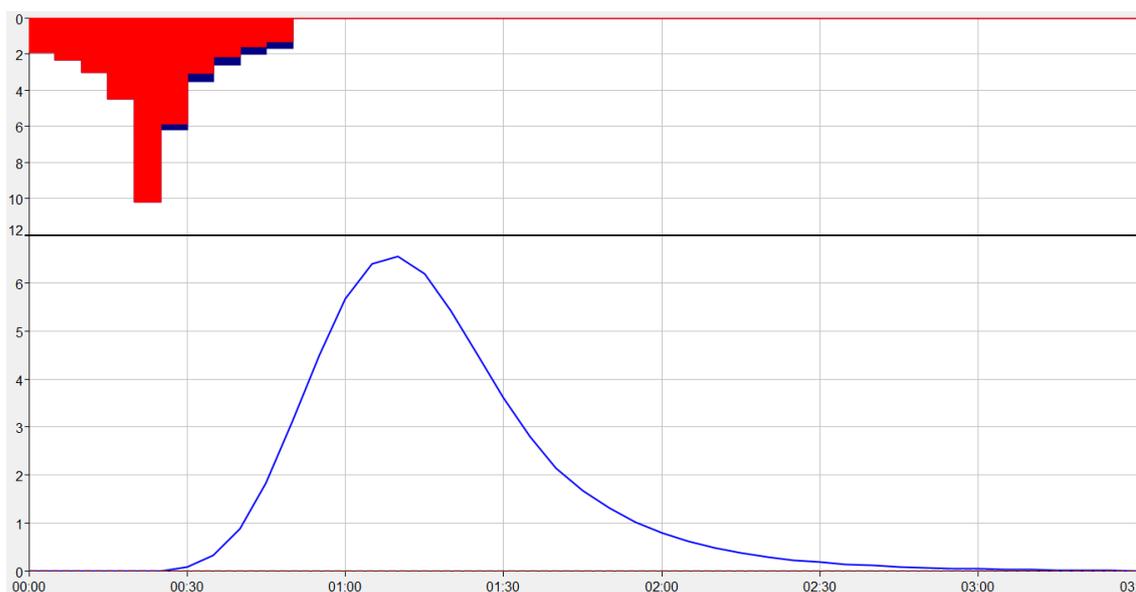


Figura 37: Hidrograma para um Tr de 2 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).

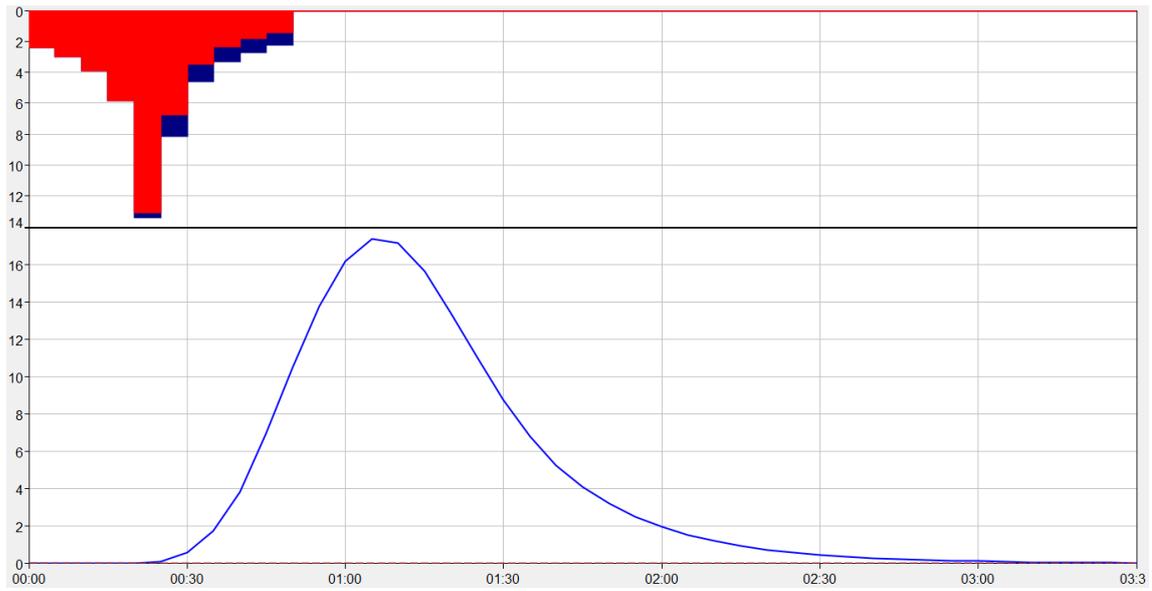


Figura 38: Hidrograma para um Tr de 10 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).

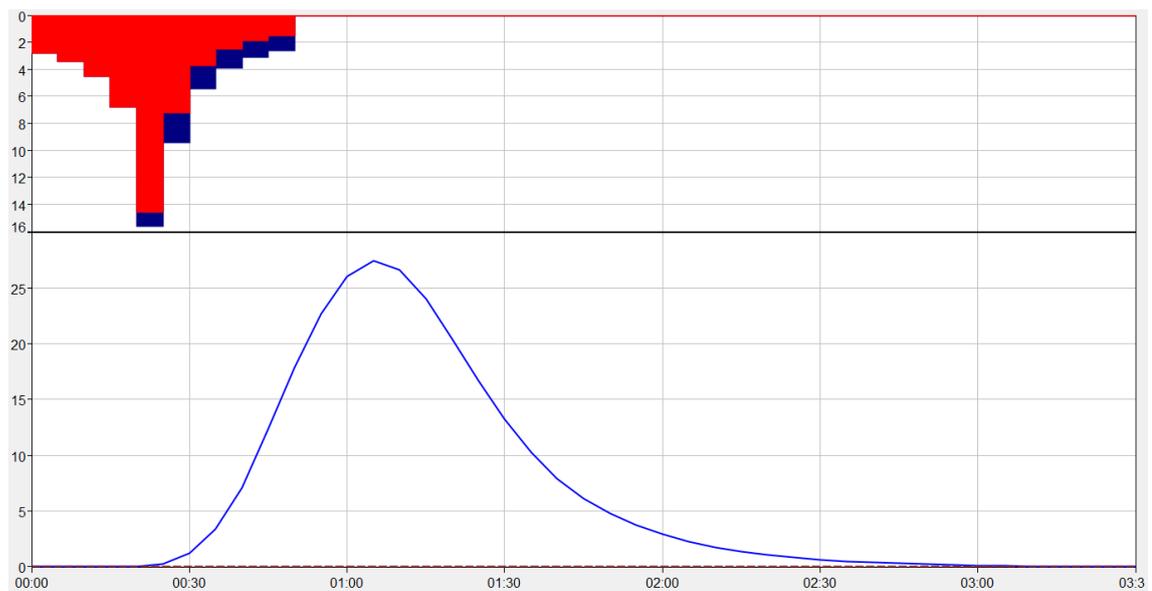


Figura 39 : Hidrograma para um Tr de 25 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).

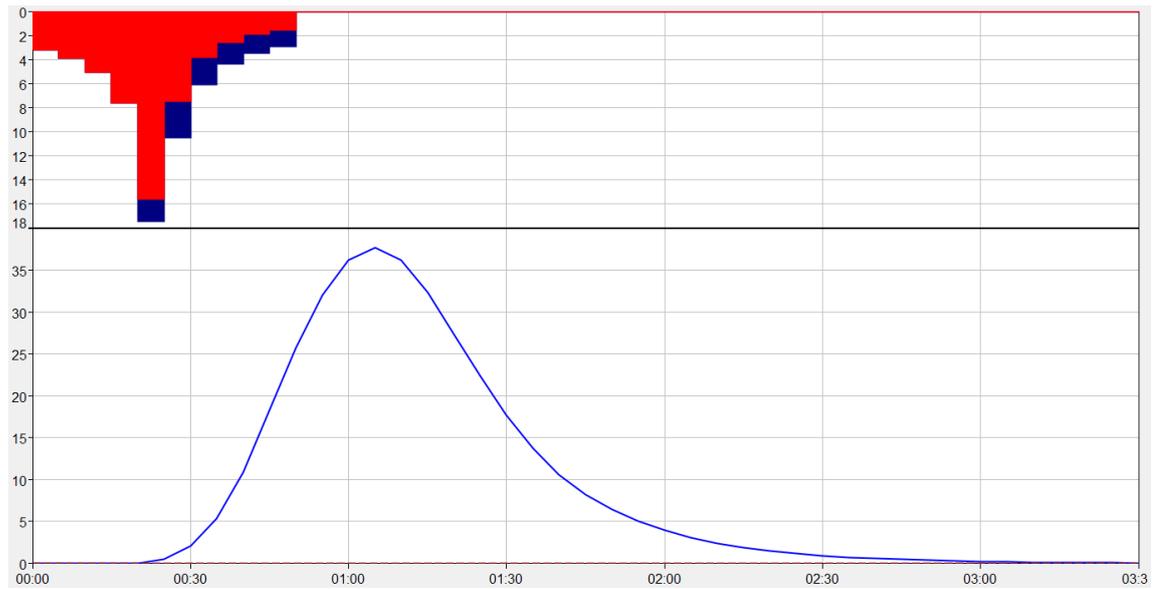


Figura 40: Hidrograma para um Tr de 50 anos – Condição Atual (AUTOR, 2021).

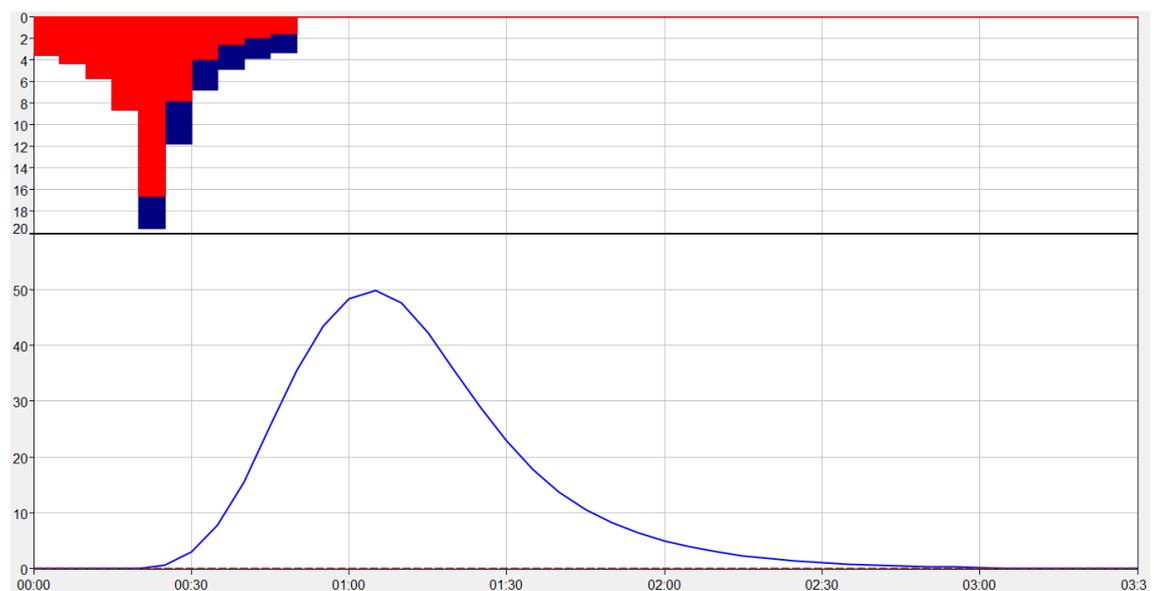


Figura 41: Hidrograma para um Tr de 100 anos – Condição atual (AUTOR, 2021).

Nas Figuras 42 a 46, são apresentados os hidrogramas obtidos para cada período de retorno para a Simulação de Urbanização.

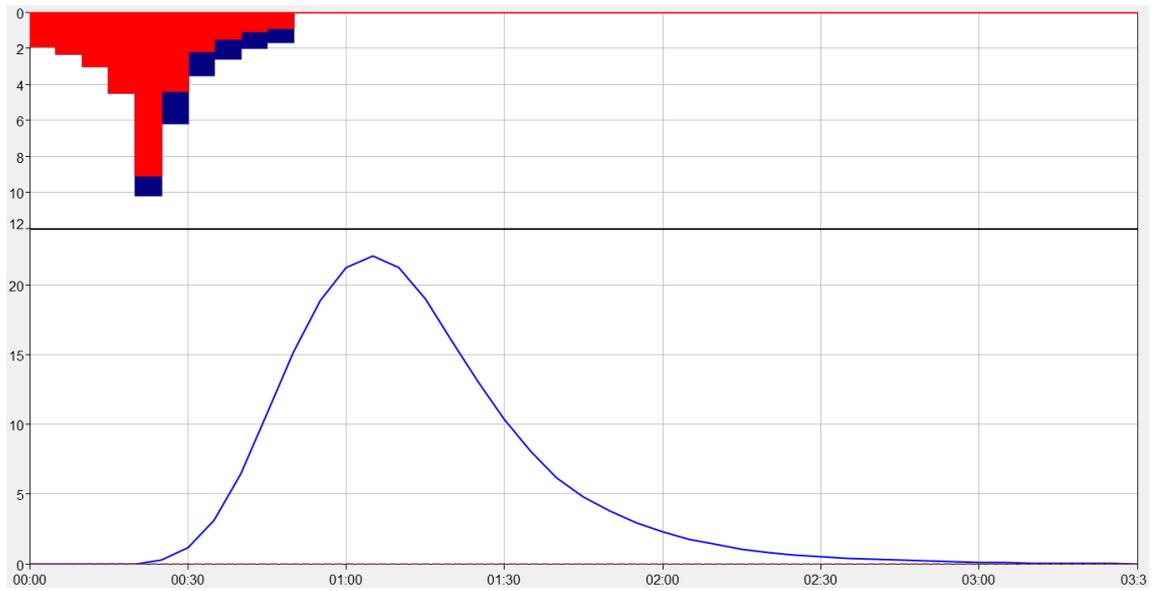


Figura 42: Hidrograma para um Tr de 2 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).

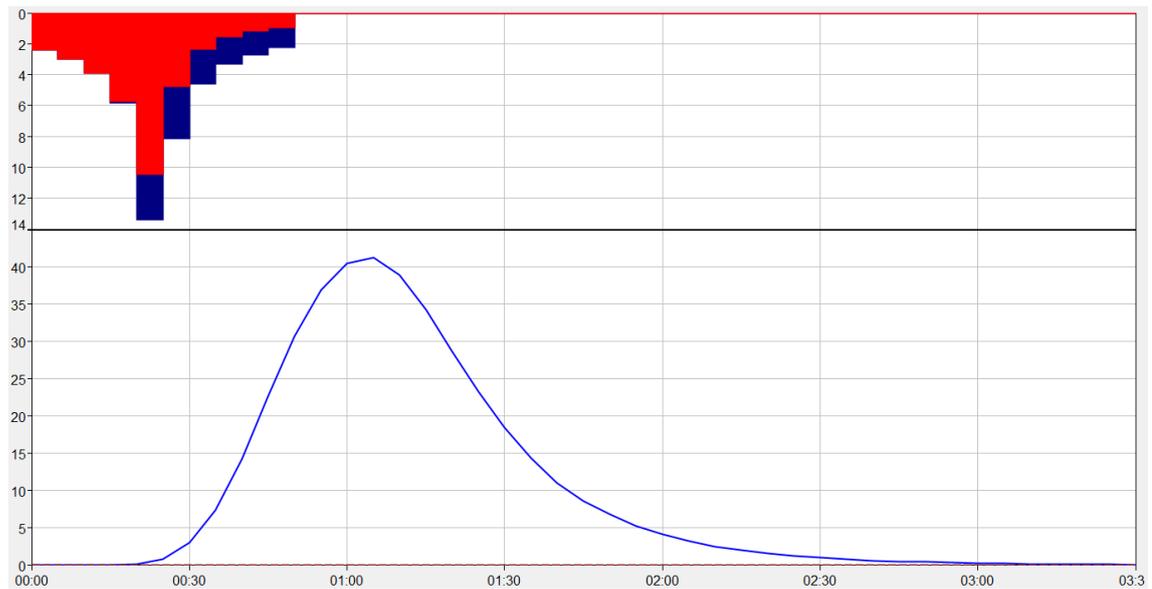


Figura 43: Hidrograma para um Tr de 10 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).

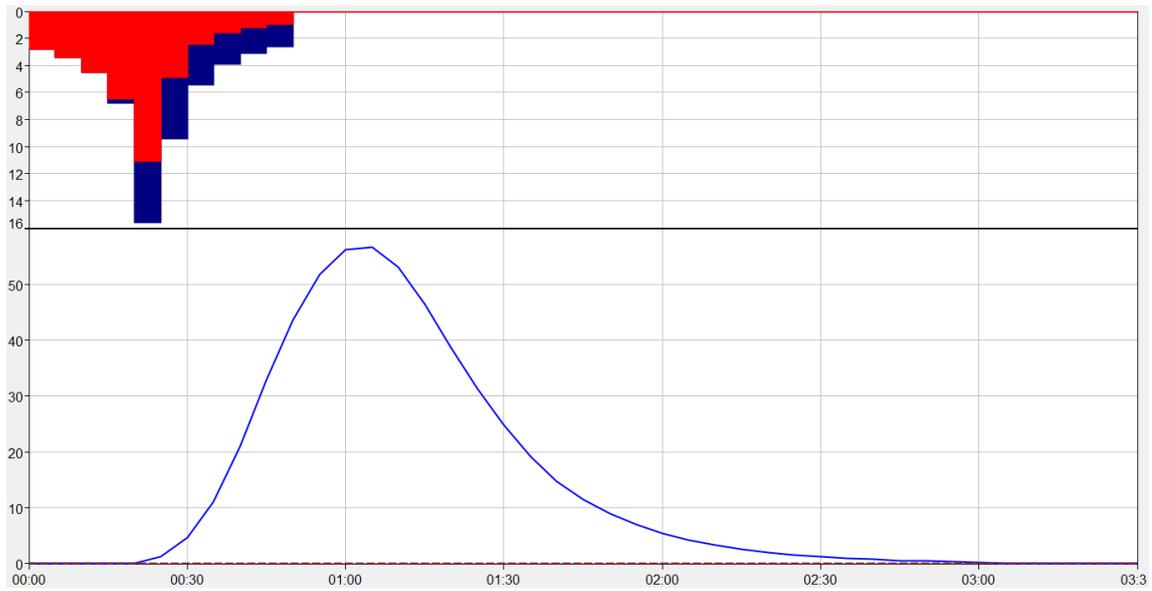


Figura 44: Hidrograma para um Tr de 25 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).

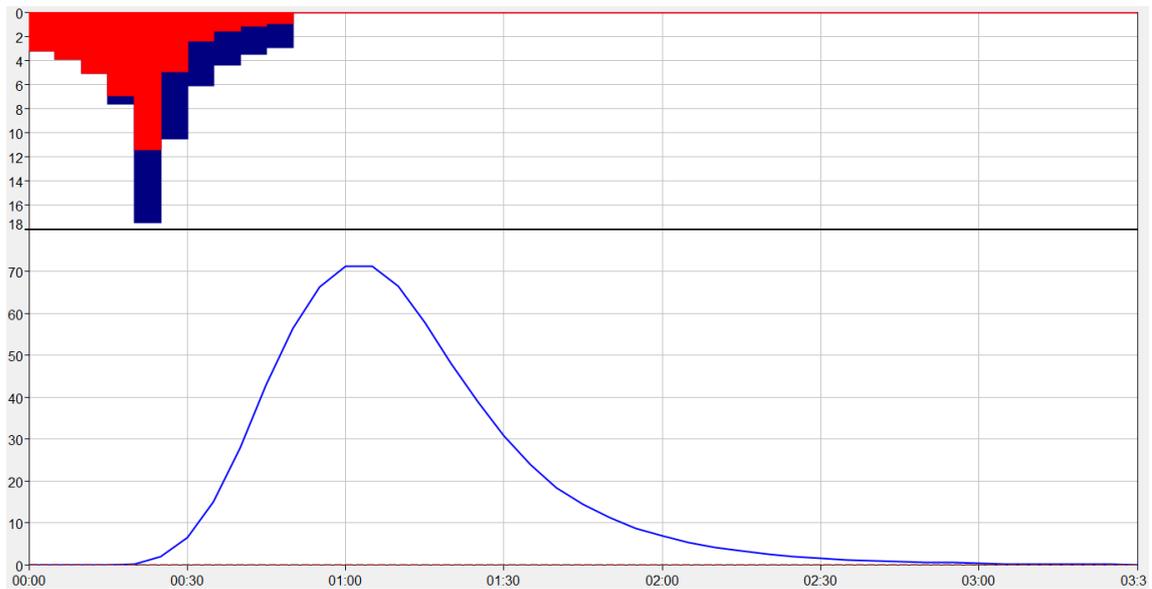


Figura 45: Hidrograma para um Tr de 50 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).

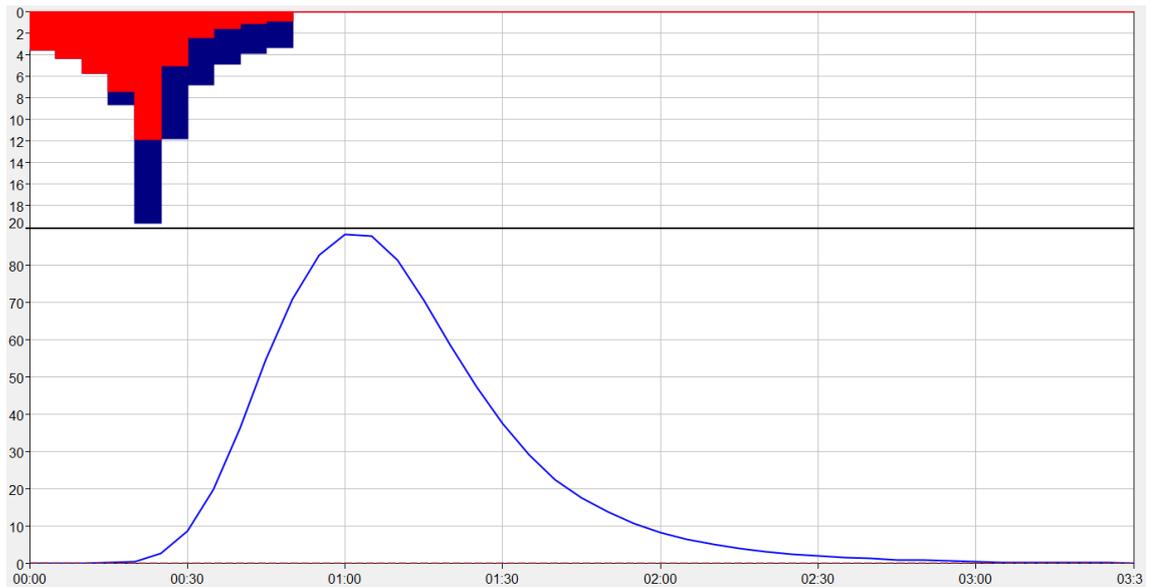


Figura 46: Hidrograma para um Tr de 100 anos – Simulação de Urbanização (AUTOR, 2021).

A Tabela 12 resume os principais resultados dos gráficos das Figuras 37 a 46.

Tabela 12: Vazão de pico e chuva efetiva para as duas situações (AUTOR, 2021).

Período de Retorno (anos)		2	10	25	50	100
Precipitação (mm)		37,90	49,40	57,50	64,70	72,50
Vazão de Pico	Condição Atual (m ³ /s)	6,60	17,40	27,40	37,60	49,90
	Simulação Urbanização (m ³ /s)	22,21	41,30	56,60	71,30	88,30
	Aumento (%)	234,85	137,36	106,57	89,63	76,95
Chuva Efetiva	Condição Atual (mm)	2,01	5,48	8,68	11,96	15,91
	Simulação Urbanização (mm)	7,02	13,24	18,29	23,14	28,70
	Aumento (%)	249,25	141,61	110,71	93,48	80,39

Na Tabela 12 foram apresentados os valores da vazão de pico e chuva efetiva obtidos para as duas situações estudadas, que são a Condição Atual e a Simulação de Urbanização, em função de cada período de recorrência considerado. É possível observar que tais variáveis hidrológicas sofreram alterações relevantes, ocasionadas pela impermeabilização do solo.

A precipitação efetiva apresentou um aumento de 80%, para um tempo de retorno de 100 anos, e de 250%, para um tempo de retorno de 2 anos. Da mesma forma, pode-se notar um crescimento de 77% na vazão de cheia para um tempo de recorrência de 100 anos e de 235% para um tempo de recorrência de 2 anos.

Isso mostra que as maiores elevações se deram para os menores períodos de retorno, indicando que não seria necessária uma chuva de intensidade tão grande, com ocorrência a cada 50 ou 100 anos, para provocar possíveis inundações. Entende-se assim que a microdrenagem, composta pelos elementos de drenagem superficial, sofreria grandes impactos regularmente.

5 CONCLUSÃO

Com este trabalho, buscou-se determinar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do córrego Varjada sob dois aspectos: tendo em conta a presente situação de uso do terreno e simulando uma possível expansão urbana. Pensando nisso, primeiro se caracterizou as condições atuais da bacia, obtendo uma área com predominância de florestas e pedologia com grande potencial de escoamento superficial.

Em seguida, realizou-se a simulação que demonstrou o grande impacto que a urbanização de uma área com 3,35 km², inserida em uma microbacia rural de 9,16 km², pode causar. As consequências da impermeabilização da área foram primeiro experimentadas pelo Número da Curva, que saltou de 69,8 para 79,8.

No entanto, os valores mais expressivos foram representados pelas precipitações efetivas e respectivas vazões de pico. Obtiveram-se variações alarmantes na fração de chuva responsável pelo escoamento superficial, assim como para as vazões de cheia, com aumentos da ordem de 77% a até 250%.

Desse modo, a essência deste estudo foi apresentar os efeitos que o assentamento de uma zona de expansão, prevista na Lei de Uso e Ocupação de Ouro Preto, podem acarretar. Os resultados encontrados, cuja significância merece atenção, confirmam a importância de uma análise apurada, pelo planejamento urbano, previamente à tomada de decisões.

Portanto, os aumentos constatados nas vazões do córrego Varjada sugerem precaução, ainda mais pelas ocupações irregulares registradas no bairro Saramenha. Considerando que as informações geradas por este instrumento podem ser utilizadas para se evitar problemas futuros com inundações, juntamente a estudos de cunho social e econômico, entende-se que este trabalho cumpriu com seu objetivo de forma satisfatória.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

São sugestões de trabalhos que podem ser realizados com base neste estudo:

- como já foi realizada a análise hidrológica da bacia hidrográfica do Varjada, propõe-se a modelagem hidráulica do córrego de modo a complementar o estudo, identificando as variações provocadas no corpo d'água e mapeando as possíveis áreas inundáveis;
- outra sugestão é avaliar e determinar como pode vir a ocorrer a urbanização da zona de expansão, sob os aspectos construtivos e urbanísticos, para que não ocorram impactos tão consideráveis no escoamento superficial e vazão de pico e
- como neste trabalho foi adotada uma IDF estacionária, obtida considerando que o padrão climático se repete ao longo do tempo, uma outra proposta é estudar alterações no uso e ocupação do solo da bacia juntamente às mudanças climáticas que estão, a cada dia, mais presentes.

REFERÊNCIAS

ANA. (2016). *Encarte Especial Sobre a Bacia do Rio Doce – Rompimento da Barragem em Mariana / MG. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2015*. Agência Nacional das Águas, Ministério do meio Ambiente, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR, Brasília – DF, 2016.

ANA. (2021). *Domínio de Cursos d'Água da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e da Região Hidrográfica do Rio Barra Seca*. Acesso em 26 de junho de 2021, disponível em Agência Nacional de Águas: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/BaciaDoce/MapaRioDoce.pdf>.

ARCGIS. (2021). *Portal for ArcGIS – Shapefiles*. Acesso em 27 de julho de 2021, disponível em ARCGIS: <https://enterprise.arcgis.com/pt-br/portal/latest/use/shapefiles.htm>.

BAPTISTA, M.; CARDOSO, A. (2013). *Rios e Cidades: uma Longa e Sinuosa História*. Revista UFMG, Belo Horizonte, V. 20, N. 2, P. 124-153, julho / dezembro de 2013.

BARBOSA JR., A. R. (2015). *Elementos de Hidrologia Aplicada*.

BARROS, A. M.; NEVES, M. G. F. P.; HENRIQUE, D. C. (2016). *Variabilidade e Causas na Geração de Vazão em Bacias Urbanas: Estudo de Caso do Riacho do Sapo, Maceió-AL*. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, Salvador, v.4, n.15, p.220-231, 2016.

BENINI, R. M.; MENDIONDO, E. M. (2015). *Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho*. Floresta e Ambiente, Seropédica, v.22, n.2, p.211-222, 2015.

BIANCHI, R. C.; RIZZI, N. E.; GUIMARÃES, R. Z.; SCHECHI, R.G. (2012) *Estimativa da Vazão Máxima da Bacia Hidrográfica do Rio Canguiri Através do Método de Ven Te Chow*. Raega – O Espaço Geográfico em Análise, Curitiba, n.25, p.164-185, 2012.

BIOLOGIANET. (2021). *Ciclo da Água*. Acesso em 25 de julho de 2021, disponível em Biologianet: <https://www.biologianet.com/ecologia/ciclo-agua.htm>.

CANHOLI, A. P. (2005). *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos.

CASTRO, J. M. G. (2006). *Pluviosidade e Movimentos de Massa nas Encostas De Ouro Preto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. (1980). *Drenagem Urbana: manual de projeto*. São Paulo. 476p.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1998). *Applied Hydrology*.

COLLINS, S. H. (1978). *Algorithms for Dense Digital Terrain Models*. Ontário, Canadá, pp. 307-317.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2015). *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. Edição 2- revisada e ampliada. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

COLLISCHONN, W., & TASSI, R. (2010). *Introduzindo Hidrologia - IPH UFRGS*. Rio Grande do Sul.

COSTA, K. T. (2014). *Avaliação de Distribuições de Probabilidades das Vazões Médias Diárias Máximas Anuais do Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CUNHA, J. C. (2001). *O Uso do Modelo Digital de Elevação como Alternativa para Correção dos Efeito da Iluminação Diferenciada em Imagens de Satélite*. Monografia de Especialização, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

EMBRAPA. (2011). *O Novo Mapa de Solos do Brasil - Legenda Atualizada*. EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro, 2011.

ENOMOTO, C. F. (2004). *Método Para Elaboração de Mapas de Inundação: Estudo de Caso na Bacia do Rio Palmital, Paraná*. Universidade Federal do Paraná, Paraná.

FARIA, N. O.; BARBASSA, A. P.; SILVEIRA, A. (2014). *Monitoramento, Modelagem E Simulação De Cenários Para A Bacia Do Córrego Barbado - Cuiabá/MT*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.19, n.1, p.165-176, 2014.

GANDINI, M. L. T. (2014). *Utilização de Modelo Hidráulico para Definição de Áreas Inundáveis com Diferentes Probabilidades na Região do Centro Histórico da Cidade de Mariana - MG*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto.

GANDINI, M. L. T. (2016). *Análise Estatística dos Efeitos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica*. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

GEOCIÊNCIAS. (2021). *Agência IBGE Notícias*. Acesso em 24 de junho de 2021, disponível em IBGE: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/21565-em-2010-brasil-tinha-8-3-milhoes-de-pessoas-morando-em-areas-com-risco-de-desastres-naturais>.

GEODINÂMICA. (2021). *Geodinâmica Externa – Processos de Dinâmica Superficial - Inundação*. Acesso em 23 de junho de 2021, disponível em UNESP: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter11.html>.

GPBR. (2019). *Projeto Detalhado – Projeto de Adequação Ambiental – Lago do Azedo – Estudos Hidrológicos*. GPBR.

GRID. (2021). *Gestão de Riscos de Desastres - UFRGS*. Acesso em 24 de junho de 2021, disponível em UFRGS: <http://www.ufrgs.br/grid/noticias/ibge-desastres-naturais-atingiram-40-9-dos-municipios-do-pais-nos-ultimos-anos>.

HEC-HMS. (2021). *US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center*. Acesso em 15 de agosto de 2021, disponível em HEC-HMS: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

IBGE. (2020). *Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil - 2016 a 2018*. IBGE, Rio de Janeiro, 2020.

INPE. (2021). *Manuais – Tutorial de Geoprocessamento*. Acesso em 08 de agosto de 2021, disponível em INPE: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html.

JUSTINO, E. A.; PAULA, H. M.; PAIVA, E. C. R. (2011). *Análise do Efeito da Impermeabilização dos Solos Urbanos na Drenagem de Água Pluvial do Município de Uberlândia-MG*. Espaço em Revista, Goiânia, v.13, n.2, p.16-38, 2011.

LIMA, A. P. (2012). *Análise de Impactos Associados à Precipitação na Cidade de São Carlos-SP*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, FCT, Presidente Prudente.

MARTINS, D.; KRUK, N. S.; MAGNI, N. L. G.; QUEIROZ, P. I. B. (2017). *Comparação de duas metodologias de obtenção da equação de chuvas intensas para a cidade de Caraguatatuba (SP)*. Revista DAE, n.207, p.34-49.

MENDES, I. A. da S. (2014). *Avaliação Ecotoxicológica da Qualidade da Água e do Sedimento no Córrego Tripuí, Ouro Preto – MG*. Monografia de Especialização, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas, Belo Horizonte.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte.

NUNES, F. G.; FIORI, A. P. (2008). *Análise da Impermeabilização dos Solos e Aumento dos Picos de Vazão de Cheias em Bacias Hidrográficas Urbanas*. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, n.62-63, p.47-60, 2008.

OCCHIPINTI, A. G.; SANTOS, P. M. (1966). *Relações entre as precipitações máximas de “um dia” e de “24 horas” na cidade de São Paulo*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, USP. 26p.

PIRES, T. (2015). *Saramenha de Cima: Uma “Periferia” de Ouro Preto e as suas Percepções de Patrimônio*. Revista em Extensão da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PORTELA, M. M.; MARQUES, P.; CARVALHO, F. F. (2000). *Hietogramas de Projecto para a Análise de Cheias Baseada no Modelo do Hidrograma Unitário do Soil Conservation Service (SCS)*. 5º Congresso da Água - Ano 2000.

QGIS. (2021). *Documentação do QGIS2.14 – Dados Raster*. Acesso em 27 de julho de 2021, disponível em QGIS: https://docs.qgis.org/2.14/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html.

RIGHETTO, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos, São Paulo, Brasil.

RODRIGUES, L. L.; BLANCO, C. J. C. (2018). *Vazão de Pico em Uma Bacia Hidrográfica com Diferentes Níveis de Urbanização em Santarém/PA*. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.9, n.7, p.62-75, 2018.

RODRIGUES, S. J. A. (2019). *Modelagem Hidrológica para Diagnóstico de Áreas Sujeitas a Inundações: Estudo de Caso da Sub-Bacia do Córrego Carioca em Itabirito - MG*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto.

SANTOS, F. M.; LOLLO; J. A. (2016). *Cartografia Digital para Estimativa de Escoamento Superficial Visando ao Planejamento Urbano*. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.21, n.4, p.663-675, 2016.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. (2005). *Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n.4, p.05-18, out/dez 2005.

SIEBRA, G. (2021). *Método Soil Conservation Service – SCS*. Acesso em 09 de agosto de 2021, disponível em GitHub: <https://gustavosiebra.github.io/metodo-scs/>.

SILVEIRA, A. L. L. (2005). *Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n.1, p.05-23, Jan/Mar 2005.

SOUSA, F. R. C.; COSTA, L. H. M.; PAULA, D. P. (2017). *Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão Aplicada ao Estudo de Chuvas Intensas na Bacia Hidrográfica Semiárida do Rio Pesqueiro (Ceará – Brasil)*. I Congresso Nacional de Geografia Física, Campinas.

TUCCI, C. E. M. (Organizador) (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. (1ª ed.). EDUSP, Editora da UFRGS. ABRH. 952p.

TUCCI, C. E. M. (Organizador) (2001). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. (2ª ed.). Porto Alegre: Universidade / UFRGS. ABRH. 943p.

TUCCI, C. E. M. (Organizador) (2004). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. (3ª ed.). Porto Alegre: UFRGS. ABRH. 943p.

TUCCI, C. E. M. (2005). *Gestão de Inundações Urbanas*. Ministério das Cidades.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JR, F. W.; SILVA, A. M. (2009). *Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 5, p. 581-590, Campina Grande.