



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**



Nayara Martinelli

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO
GUALAXO DO NORTE**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

OURO PRETO, 2017

Nayara Martinelli

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO
GUALAXO DO NORTE**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Antenor Rodrigues Barbosa Júnior.

OURO PRETO, MARÇO DE 2017

M385c Martinelli, Nayara.
 Caracterização Física e Hidrológica da Bacia do Rio Gualaxo do Norte
 [manuscrito] / Nayara Martinelli. - 2017.

84f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Antenor Rodrigues Barbosa Júnior.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Ambiental.

1. Mariana(MG). 2. Gualaxo do Norte, Rio. 3. Hidrologia - Caracterização física. 4. Doce, Rio (MG). I. Barbosa Júnior, Antenor Rodrigues. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 556

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Nayara Martinelli

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO GUALAXO
DO NORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental defendida e aprovada em
24/03/2017 pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Antenor Rodrigues Barbosa Júnior – Professor orientador/UFOP



Aníbal da Fonseca Santiago – Professor convidado/UFOP



Gilberto Queiroz da Silva – Professor convidado/UFOP

OURO PRETO, MARÇO DE 2017

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar.

Aos meus pais, Roberto e Denise, e ao meu irmão, Matheus, por todo apoio, torcida e amor.

A todos os mestres da Escola de Minas e da Universidade Federal de Ouro Preto pelo conhecimento e por tornarem possível esta graduação, em especial ao meu orientador, Antenor Rodrigues Barbosa, pela paciência, orientação e tempo demandado.

A Fundação Gorceix, por todo apoio e ensino durante a graduação.

Aos meus amigos de Ouro Preto por sempre estarem ao meu lado em todas as situações, principalmente a Amb 10.2 e a República Gandaia, pelos anos de amizade e companheirismo.

À Deyse pelo auxílio durante toda elaboração do trabalho e a todos que de alguma forma me ajudaram, muito obrigada.

RESUMO

O presente trabalho consiste em uma caracterização física e hidrológica da bacia do rio Gualaxo do Norte, que em novembro de 2015 foi assolada pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração de ferro de Fundão, da empresa Samarco Mineração, no município de Mariana/MG. A caracterização física foi realizada com auxílio dos mapas topográficos e imagens de satélite de relevo (SRTM) da região e do software ArcGis. Obtiveram-se resultados como área de drenagem de aproximadamente 532 km² e comprimento do rio principal de 79,1 km. A densidade de drenagem encontrada foi de 2,5, o coeficiente de compacidade de 1,89 e o fator de forma 0,0849, do que se pode concluir que a bacia é bem drenada e possui pouca probabilidade de ocorrência de enchentes na parte baixa da bacia, por ocasião de chuvas intensas. A caracterização hidrológica foi feita a partir da construção das séries históricas de chuva e vazão das estações de Bicas e Fazenda Ocidente construídas com base no banco de dados da Agência Nacional de Águas - ANA - Hidroweb. Foram testados diferentes modelos de probabilidade, sendo observado uma superioridade do modelo Log-Normal no caso das séries de chuvas máximas e das séries de vazões máximas e mínimas, e dos modelos Pearson Tipo III e Gumbel no caso da série de vazões Q₇. Os resultados encontrados nesse trabalho têm o intuito de auxiliar futuros projetos de restauração, planejamento e controle dos recursos da bacia do Gualaxo do Norte.

PALAVRAS – CHAVES

Mariana – Bacia Hidrográfica – Rio Gualaxo do Norte – Caracterização física e hidrológica – Rio Doce

ABSTRACT

The present work consists of a physical and hydrological characterization of the Gualaxo do Norte river basin, which in November of 2015 was affected by the rupture of the iron ore tailings dam at Fundão, of the Samarco mineration enterprise, in the municipality of Mariana / MG. The physical characterization was performed with the aid of the topographic maps and satellite images of relief (SRTM) of the region and the software ArcGis. From it results were obtained as a drainage area equal to approximately 532 km² and length of the main river equal to 79,1 km. The drainage density found was 2,5, the compactness coefficient was 1,89 and the form factor was 0,0849, from which it can be concluded that the basin is well drained and has little probability of occurrence of flooding in the lower part of the basin, in the event of heavy rains. The hydrological characterization was made from the construction of the historical series of rainfall and flow of the Bicas and Fazenda Ocidente stations, based on the National Water Agency (ANA) database - Hidroweb. Different models of probability were tested, showing a superiority of the Log-Normal model in the case of the series of maximum rains and the series of maximum and minimum flows, and the Pearson Type III and Gumbel models in the case of the series of flows Q₇. The results obtained in this work are intended to assist future projects for restoration, planning and control of the resources of the Gualaxo do Norte basin.

KEYWORDS

Mariana - Hydrographic Basin - Gualaxo do Norte River - Physical and hydrological characterization – Doce River

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos e Justificativas do estudo	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Descrição da área de estudo.....	15
2.2. Ciclo hidrológico em bacias hidrográficas	16
2.3. Bacias hidrográficas.....	17
2.4. Caracterização física da bacia hidrográfica	19
2.4.1. Área de drenagem e perímetro da bacia hidrográfica.....	19
2.4.2. Características de forma da bacia	19
2.4.2.1. Coeficiente de compactidade ou índice de Gravelius	20
2.4.2.2. Fator de forma	20
2.4.3. Sistema de drenagem	21
2.4.3.1. Ordem dos cursos de água.....	21
2.4.3.2. Densidade de drenagem	21
2.4.3.3. Percurso médio do escoamento superficial	22
2.4.4. Características do relevo.....	22
2.4.4.1. Curva hipsométrica	22
2.4.4.2. Perfil longitudinal e declividade do curso d'água principal	23
2.4.4.3. Modelo Digital de Terreno (MDT)	26
2.5. Caracterização hidrológica da bacia hidrográfica.....	26
2.5.1. Precipitação	27
2.5.2. Vazão.....	28
2.5.2.1. Vazões mínimas, médias e máximas.....	28
2.5.3. Análise estatística na hidrologia	29
2.5.3.1. Métodos probabilísticos	30
2.6. Sistemas de Informações Geográficas (SIGs)	34
2.7. O desastre de Mariana.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1. Caracterização da área de estudo	38

3.1.1.	Dados básicos ou base geográfica	38
3.1.2.	Geoprocessamento.....	39
3.1.3.	Área e perímetro	40
3.1.4.	Ordem dos cursos de água.....	40
3.2.	Caracterização física da bacia hidrográfica	40
3.3.	Caracterização hidrológica da bacia hidrográfica.....	42
3.3.1.	Coleta e análise de dados.....	42
3.3.1.1.	Dados de Chuva	42
3.3.1.2.	Vazão.....	43
3.3.2.	Análise estatística	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1.	Caracterização da área de estudo	47
4.2.	Caracterização física da bacia.....	51
4.3.	Caracterização hidrológica da bacia	57
	CONCLUSÃO.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXOS.....	77
	ANEXO A: Série dos totais anuais precipitados e das máximas diárias na estação fluviométrica Fazenda Ocidente (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12).....	78
	ANEXO B: Série dos totais anuais precipitados e das máximas diárias na estação fluviométrica Bicas (Figuras 4.7, 4.8 e 4.9).....	79
	ANEXO C: Série anuais de vazões máximas e mínimas na estação fluviométrica Fazenda Ocidente (Figuras 4.13, 4.14 e 4.15).....	80
	ANEXO D: Série de vazões Q_7 na estação fluviométrica Fazenda Ocidente (Figuras 4.16 e 4.17).....	81
	ANEXO E: Série de vazões médias mensais na estação fluviométrica Fazenda Ocidente (Figura 4.18).....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

km: quilômetro

m: metro

m²: metro quadrado

cm³: centímetro cúbico

m³/s: metro cúbico por segundo

t_c: tempo de concentração

Per: perímetro

A: área

k_c: coeficiente de compacidade

k_f: fator de forma

L: comprimento axial da bacia hidrográfica

l: largura média da bacia

λ_d: densidade de drenagem

L_i: comprimento total dos cursos d'água da bacia

l_{es}: percurso médio do escoamento superficial

z_{med}: elevação mediana

\bar{z} : elevação média

A_i: área compreendida entre duas curvas de nível consecutivas

\bar{z}_i : média aritmética das cotas de duas curvas de nível consecutivas

S₁₀₋₈₅: declividade entre as cotas a 10% e 85% do comprimento do rio principal

S₂: declividade média do rio principal

S₃: declividade equivalente do rio principal

A_p: área sob a curva do perfil longitudinal

L_i: comprimento do trecho i

S_i: declividade do trecho

P: precipitação

Q: vazão

T_r: tempo de recorrência ou período de retorno

X_{Tr}: magnitude da variável hidrológica (vazão ou chuva) de T_r anos de recorrência

\bar{X} : chuva ou vazão média

s: desvio-padrão

K: fator de frequência de Chow

\bar{y} : média dos logaritmos da variável hidrológica X

s_y : desvio-padrão dos logaritmos de X

LISTA DE SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

ESRI: *Environmental Systems Research Institute*

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IGAM: Instituto Mineiro de Gestão das Águas

MDE: Modelo Digital de Elevação

MDEHC: Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Correto

MDT: Modelo Digital de Terreno

SIG: Sistema de Informações Geográficas

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros físicos de caracterização da bacia hidrográfica e do curso d'água principal.....	41
Tabela 3.2 – Técnicas de probabilidade e estatística em hidrologia.....	46
Tabela 4.1 - Elementos para a representação da curva hipsométrica da bacia do Gualaxo do Norte.....	52
Tabela 4.2 - Elementos para o traçado do perfil longitudinal do rio Gualaxo do Norte.	54
Tabela 4.3 – Dados da declividade S_3	56
Tabela 4.4 – Caracterização física.	57
Tabela 4.5 – Comparação dos valores de vazão encontrados no trabalho e do Atlas Digital.	69
Tabela 4.6 – Tabela de dados de vazão para as estações fluviométricas da Região I segundo o Atlas Digital.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema do Ciclo Hidrológico.....	17
Figura 2.2 - Modelo gráfico para o cálculo da declividade S_2	24
Figura 2.3 - Complexo minerário de Samarco após o rompimento.	35
Figura 2.4 - Caminho da lama de rejeitos desde o córrego Santarém, local do acidente, até a foz do rio Doce.	36
Figura 3.2 – Extração da rede de drenagem.	39
Figura 3.3 - Vazões diárias dos meses de julho, agosto, outubro e novembro do ano de 2009.	45
Figura 4.1 - Bacia Hidrográfica do Gualaxo do Norte e as estações utilizadas.	48
Figura 4.2 – Mapa de Hierarquia do rio Gualaxo do Norte.....	49
Figura 4.3 – Modelo Digital do Terreno (MDT) da bacia do Gualaxo do Norte.	50
Figura 4.4 – Percurso médio do escoamento superficial.....	52
Figura 4.5 – Curva Hipsométrica da bacia do Gualaxo do Norte.	53
Figura 4.6 – Perfil Longitudinal do rio Gualaxo do Norte.	54
Figura 4.7 - Chuvas máximas da estação Bicas: Distribuição Gumbel (teórico) e Gumbel–Chow.....	58
Figura 4.8 - Chuvas máximas da estação Bicas: Distribuição Log-Normal.....	58
Figura 4.9 – Chuvas totais da estação Bicas: Distribuição Normal.	59
Figura 4.10 – Chuvas máximas da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Gumbel (teórico) e Gumbel–Chow.....	60
Figura 4.11 - Chuvas máximas da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log-Normal.....	61
Figura 4.12 - Chuvas totais da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Normal.	62
Figura 4.13 – Vazão máxima da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Gumbel (teórico) e Gumbel–Chow.....	63
Figura 4.14 - Vazão máxima da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log - Normal.	63
Figura 4.15 - Vazão mínima da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log-Normal e Log-Gumbel.	64
Figura 4.16 - Vazão Q_7 da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Gumbel (teórico) e Pearson Tipo III.....	65
Figura 4.17 - Vazão Q_7 da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log–Normal, Log-Gumbel e Log–Pearson.	66
Figura 4.18 – Curva de permanência de vazão da estação Fazenda Ocidente.	67
Figura 4.19 – Vazões nas coordenadas da estação Fazenda Ocidente.	68
Figura 4.20 – Fórmulas para determinação de vazão nas coordenadas da estação Fazenda Ocidente.....	69

1. INTRODUÇÃO

A caracterização física de uma bacia hidrográfica é um procedimento muito utilizado em análises de âmbito hidrológico e ambiental. Tem como objetivo esclarecer as várias questões relacionadas com a dinâmica ambiental local e regional. Através dela encontram-se diferentes aspectos relacionados a estrutura da bacia em estudo, como a área de drenagem, o perímetro, as características de forma, o sistema de drenagem e as características de relevo.

Esse procedimento também auxilia no gerenciamento da bacia, uma vez que impõe limites naturais que possibilitam a caracterização e a quantificação das variáveis hidrológicas como precipitação, escoamento superficial, evaporação e transpiração. O conhecimento dessas variáveis hidrológicas é essencial para um adequado gerenciamento dos recursos hídricos e para a elaboração de obras hidráulicas em uma bacia hidrográfica.

A caracterização hidrológica da bacia é feita a partir dos registros diários de precipitação e vazão gerados nas estações pluviométricas e fluviométricas da região. Esses registros estão disponíveis no banco de dados do portal HidroWeb no sítio eletrônico da Agência Nacional de Águas - ANA, e é a partir dessas informações que são construídas as séries históricas de precipitação e vazão com o intuito de realizar a análise das frequências de ocorrência destas variáveis ao longo do tempo.

O presente estudo busca realizar uma caracterização física e hidrológica da bacia do rio Gualaxo do Norte, situada em sua maior parte no município de Mariana – MG. A área em estudo foi assolada, em novembro de 2015, por um dos maiores desastres ambientais brasileiro, o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de ferro de Fundão, da mineradora Samarco. Este rompimento foi responsável pelo lançamento de milhões de metros cúbicos de lama de rejeito sobre o vale do córrego Santarém, um dos afluentes do Gualaxo do Norte. Em seguida essa lama seguiu o percurso do rio Gualaxo do Norte até desaguar no rio do Carmo, em Barra Longa – MG, e posteriormente no rio Doce, deslocando até a sua foz no Oceano Atlântico, em Regência, no município de Linhares - ES.

Devido à dimensão deste desastre, surgiu o interesse em se realizar um estudo na região da bacia a fim de melhor conhecer suas características físicas e hidrológicas.

1.1. Objetivos e Justificativas do estudo

O trabalho em questão tem como objetivo geral realizar uma caracterização física e hidrológica da região da bacia do rio Gualaxo do Norte. Para isso foram definidas as seguintes diretrizes:

- Fazer o levantamento de informações cartográficas da bacia do rio Gualaxo do Norte, a fim de realizar a sua caracterização física, quantificando os parâmetros fundamentais de uma bacia hidrográfica;
- Fazer o levantamento de informações hidrológicas da bacia do rio Gualaxo do Norte, analisando o comportamento das chuvas médias, máximas e mínimas da região e analisando o comportamento das vazões máximas e mínimas de diferentes recorrências.

Espera-se que esse material possa servir de base para estudos futuros mais aprofundados da bacia e como subsídio para o manejo adequado dos recursos naturais da bacia e para as tomadas de decisão na área estudada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Descrição da área de estudo

A bacia do rio Gualaxo do Norte tem sua cabeceira localizada a Nordeste do município de Ouro Preto e a Noroeste do município de Mariana, ambos situados no estado de Minas Gerais, Brasil. O rio Gualaxo do Norte é tributário da margem esquerda do rio do Carmo, que é um dos formadores do rio Doce, que é considerada uma das bacias mais importantes de Minas Gerais e Espírito Santo.

Segundo o Atlas Digital das Águas de Minas (2016) a bacia do Gualaxo do Norte tem uma área aproximada de 566 km² e é delimitada pelos meridianos 43°3'34" e 43°31'40" de longitude oeste e os paralelos 20°17'15" e 20°15'15" de latitude sul.

Conforme os dados da CPRM (1993), a área de estudo possui duas unidades geomorfológicas bem definidas: o Quadrilátero Ferrífero e os Planaltos Dissecados do Centro– Sul e Leste de Minas Gerais, sendo que a primeira se restringe à cabeceira do rio Gualaxo do Norte. Segundo Costa (2001), a região é caracterizada pelo desenvolvimento de elementos fisiográficos que se bifurcam no Alto do Conta História, cujos ramos são constituídos pela Serra de Antônio Pereira

(Sudeste), Serra Geral (Noroeste) e Serra do Caraça (Norte). Estas serras são suportadas por espessas camadas de quartzitos da Formação Moeda e pelas camadas ferríferas da Formação Cauê recobertas por canga (ENDO, 1988). A topografia se expressa na forma de alinhamento de cristas estruturais do tipo “*hogback*” com vales encaixados e vertentes ravinadas (RADAMBRASIL,1983).

Já a unidade representada pelos Planaltos Dissecados do Centro-Sul e Leste de Minas ocupa cerca de 70-80% da bacia, sendo representada no médio e baixo curso do rio Gualaxo do Norte. Conforme revisto por Costa (2001), esta unidade é caracterizada por colinas e cristas com vales encaixados e/ou de fundo chato, formas derivadas da dissecação fluvial atuante sobre rochas predominantemente granito-gnáissicas.

O relevo da região é caracterizado como um tipo ondulado com declives na faixa de 20 a 40% (Souza et al., 2005). Pedologicamente, a área em questão é dominada pela subclasse latossolo vermelho-amarelo distrófico, caracterizada por apresentar solos antigos e profundos, com textura argilosa e saturados em bases (CPRM, 1993).

O clima da região é do tipo mesotérmico brando e semiúmido, tendo de quatro a cinco meses de estiagem por ano. A classificação de Köppen (1948) indica que o clima da região é o Cwa; clima temperado com inverno seco e verão chuvoso, sendo a temperatura média do mês mais frio inferior a 18° C e a do mês mais quente superior a 22° C (Souza et al., 2005).

2.2. Ciclo hidrológico em bacias hidrográficas

Na natureza, a água se encontra em permanente movimento, em um ciclo interior às três unidades principais que compõem o nosso planeta, que são a atmosfera, a hidrosfera e a litosfera. Essa dinâmica de movimentação da água nas referidas unidades formam um grande e complexo ciclo denominado ciclo hidrológico (BARBOSA Jr., 2015).

O ciclo hidrológico é considerado um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado pela energia solar, gravidade e pela rotação terrestre (GOLDENFUM & TUCCI, 1998). Este ciclo envolve os processos de evaporação, transpiração, precipitação, infiltração, percolação, escoamento superficial, subsuperficial e de base, além da vazão, que constituem os diferentes caminhos pelos quais a água se movimenta entre as três fases do sistema Terra (LIMA, 1976), conforme ilustrado na Figura 2.1.

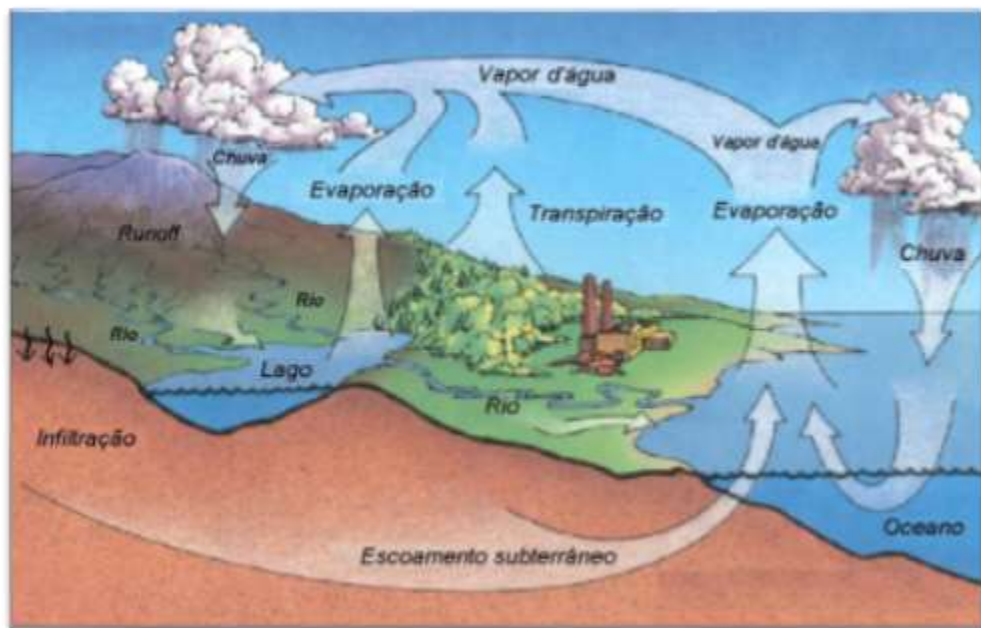


Figura 2.1 - Esquema do Ciclo Hidrológico.
Fonte: Barbosa Jr., 2015.

É importante enfatizar que o ciclo hidrológico só é considerado um sistema fechado em nível global, pois os volumes evaporados em um determinado local do planeta não se precipitam necessariamente no mesmo local, isso ocorre devido as diferentes dinâmicas entre a atmosfera e superfície terrestre. Sendo assim, à medida que áreas menores são consideradas, como por exemplo uma bacia hidrográfica, o ciclo hidrológico fica mais caracterizado como um ciclo aberto (TUCCI, 2007).

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica está relacionado com suas características geomorfológicas, como sua forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, e com seu tipo de cobertura vegetal (LIMA, 1986). As características físicas e bióticas de uma bacia são importantes na identificação dos processos do ciclo hidrológico como infiltração, quantidade de água produzida, evapotranspiração e escoamentos superficial e subsuperficial da bacia (TONELLO, 2005).

2.3. Bacias hidrográficas

O conceito de bacia hidrográfica está associado a uma área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou um sistema conectado de cursos d'água, onde toda a vazão efluente é

descarregada através de uma única seção de saída, denominada exutória, foz ou desembocadura (BARBOSA Jr., 2015).

A bacia hidrográfica é necessariamente contornada por um divisor, assim caracterizado por ser a linha de separação que divide as precipitações que caem em bacias vizinhas e que encaminha o escoamento superficial resultante para um ou outro sistema fluvial. O divisor geralmente é uma linha traçada em torno da bacia e que atravessa o curso d'água somente no ponto de saída. Essa linha divisora é tracejada através dos pontos de cota máxima entre bacias, o que não impede que haja pico isolados de cotas superiores no interior da bacia (VILLELA E MATTOS, 1975).

Atualmente existem diferentes definições de bacia hidrográfica, porém percebe-se uma grande semelhança entre autores no que diz respeito ao recorte espacial da área de drenagem. As definições que envolvem as subdivisões da bacia hidrográfica (sub-bacia e microbacia) geralmente levam em consideração diferentes fatores que vão do físico, político ao ecológico (TEODORO et al., 2007).

O termo sub-bacia pode ser definido como sendo a área de drenagem de um tributário do curso d'água principal. Faustino (1996) define como sub-bacias as bacias que possuem áreas de drenagem maiores que 100 km² e menores que 700 km²; já Santana (2003) diz que todas as bacias hidrográficas podem ser desmembradas em inúmeras sub-bacias, dependendo apenas do ponto de saída considerado ao longo do seu canal coletor. Já Teodoro et al. (2007) definem uma microbacia como sendo uma sub-bacia hidrográfica de área reduzida, em que área de drenagem máxima varia 0,1 km² a 200 km².

O estudo das bacias hidrográficas e de suas sub-bacias é de extrema importância para a gestão dos elementos naturais e sociais de uma região, pois através de suas características é possível acompanhar as mudanças realizadas pelos homens e as reações da natureza referentes a essas mudanças. Por esse motivo a bacia hidrográfica tem sido utilizada como unidade de planejamento e gerenciamento, quantificando os diversos usos e interesses pela água e garantindo sua qualidade e quantidade (GERRA & CUNHA, 1996).

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora diversos princípios e normas para a gestão de recursos hídricos, onde as bacias hidrográficas ficam definidas como unidade de estudo e gestão (BRASIL, 1997). Dessa forma, o conceito de bacia hidrográfica é de grande importância para as tomadas de decisões relacionadas ao gerenciamento de recursos hídricos.

2.4. Caracterização física da bacia hidrográfica

As características físicas de uma bacia são elementos importantes no processo de avaliação do comportamento hidrológico da mesma, pois ao relacioná-las com os dados hidrológicos conhecidos pode-se determinar indiretamente valores hidrológicos em locais que não haja inexistência de dados (VILLELA & MATTOS, 1975).

A seguir serão apresentadas algumas características físicas mais utilizadas.

2.4.1. Área de drenagem e perímetro da bacia hidrográfica

A área de drenagem de uma bacia hidrográfica é dada pela área plana correspondente à projeção horizontal e vertical dessa bacia, limitada pelos seus divisores topográficos. Sua medida representa a área da superfície coletora da água da chuva e é extremamente importante para o cálculo de outras diversas características da bacia (CAMPOS, 2002).

Já o perímetro da bacia (Per) constitui o comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas (TONELLO, 2005).

2.4.2. Características de forma da bacia

As características de forma da bacia estão associadas ao conceito de tempo de concentração (t_c) que é o tempo contado a partir do início da chuva necessário para que toda a bacia contribua para a vazão na seção de saída, em outras palavras, é a duração da trajetória da partícula de água de chuva que cai no ponto mais remoto da bacia até a seção em estudo (BARBOSA Jr., 2015).

A forma da bacia e o tempo de concentração informam a propensão de ocorrência ou não de inundação na bacia em questão.

2.4.2.1. Coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius

O coeficiente de compacidade (k_c) ou índice de Gravelius é definido pela relação entre o perímetro da bacia (Per) e o comprimento da circunferência de um círculo de área igual à área da bacia. Esse coeficiente apresenta um valor adimensional e variável com a forma da bacia (VILLELA & MATTOS, 1975).

Matematicamente, esta definição é expressa pela equação 2.1:

$$k_c = \frac{\text{Per}}{2\pi r} \cong 0,28 \frac{\text{Per}}{\sqrt{A}} \quad (2.1)$$

Bacias com coeficiente próximo a 1 são mais compactas e tendem a concentrar o escoamento, ou seja, são mais predispostas a inundações (BARBOSA Jr., 2015).

2.4.2.2. Fator de forma

O fator de forma de uma bacia hidrográfica (k_f) está relacionado com a largura média da bacia e o seu comprimento axial, ambos normalmente medidos em km. O comprimento axial da bacia hidrográfica (L) é aproximadamente igual ao comprimento do curso d'água principal, medido desde a seção fluviométrica de referência até a cabeceira mais distante na bacia; e a largura média da bacia (ℓ) é obtida dividindo-se a área da bacia pelo seu comprimento axial: $\ell=A/L$ (BARBOSA Jr., 2015).

Assim, o fator de forma pode ser expresso pela equação 2.2:

$$k_f = \frac{\text{largura média da bacia}}{\text{comprimento axial}} = \frac{A}{L} * \frac{1}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (2.2)$$

Quanto menor for o fator forma da bacia, menor será a susceptibilidade de ocorrência de enchentes na mesma.

2.4.3. Sistema de drenagem

O sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica é constituído pelo curso d'água principal mais os tributários. As ramificações e o sistema de drenagem fornecem um indicativo da maior ou menor velocidade do escoamento da bacia (BARBOSA Jr., 2015). A ordem dos cursos d'água, a densidade de drenagem e o percurso médio do escoamento superficial permitem avaliar o grau de ramificação e de desenvolvimento da drenagem em uma bacia hidrográfica.

2.4.3.1. Ordem dos cursos de água

A hierarquia fluvial consiste no processo de se estabelecer a classificação de determinado curso de água (ou da área drenada a qual pertence) no conjunto total da bacia hidrográfica. A importância da utilização desta hierarquia é tornar mais objetiva a análise morfométrica das bacias, como também, auxiliar no gerenciamento físico-econômico da mesma, a exemplo da seleção sub-bacias e microbacias mais representativas do ponto de vista físico.

A ordem dos cursos d'água representa o grau de ramificação do sistema de drenagem da bacia (TUCCI, 2001). Tal ordem pode ser determinada seguindo diferentes critérios, os mais conhecidos são os de Horton (1945) e Strahler (1957).

O método exposto por Strahler (1957) determina que a ordem de fluxo aumenta quando os fluxos da mesma ordem se cruzam. Por esse critério, cursos d'água sem tributários são considerados de ordem "1" ou primeira ordem; cursos d'água de segunda ordem são aqueles que recebem tributários de primeira ordem, de terceira ordem recebem dois ou mais tributários de segunda ordem, podendo também receber tributários de primeira ordem, e assim sucessivamente.

2.4.3.2. Densidade de drenagem

A densidade de drenagem (λ_d) reflete a influência da geologia, topografia, solo e vegetação na bacia hidrográfica, e está ligada ao tempo gasto para a saída do escoamento superficial da bacia (LIMA, 1986).

A densidade de drenagem é uma relação entre o comprimento total dos cursos d'água ($\sum L_i$) e a área da bacia hidrográfica (A), como demonstrado na equação 2.3:

$$\lambda_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (2.3)$$

Os valores de densidade de drenagem variam entre $0,5 \text{ km}^{-1}$ (bacia com drenagem pobre) e $3,5 \text{ km}^{-1}$ (bacias bem drenadas).

2.4.3.3. Percurso médio do escoamento superficial

O percurso médio do escoamento superficial (l_{es}) é a distância média que a água de chuva teria que escoar sobre a bacia caso o escoamento ocorresse em linha reta desde o ponto de sua queda até o curso d'água mais próximo (BARBOSA Jr., 2015).

O l_{es} é obtido admitindo-se uma bacia retangular de mesma área com o lado maior tendo comprimento igual ao comprimento total dos cursos d'água da bacia, $\sum L_i$. Tal conceito pode ser expresso na equação 2.4:

$$l_{es} = \frac{A}{4 * \sum L_i} = \frac{1}{4 * \lambda_d} \quad (2.4)$$

2.4.4. Características do relevo

O relevo de uma bacia tem grande influência sobre os fatores meteorológicos e hidrológicos, pois a velocidade do escoamento superficial e o tempo de concentração são determinados pela declividade do terreno. Além disso, a temperatura, a precipitação, a evaporação, etc., são funções da altitude da bacia (MOSCA, 2003).

2.4.4.1. Curva hipsométrica

A curva hipsométrica é uma representação gráfica do relevo médio da bacia hidrográfica. Através dessa curva é possível observar as variações de elevação na bacia. É construída a partir

da porcentagem das áreas de drenagem da bacia hidrográfica que se encontram acima ou abaixo das várias elevações representadas (BARBOSA Jr., 2015).

A elevação mediana (z_{med}) e a elevação média (\bar{z}) também podem ser estimadas com auxílio da curva hipsométrica. A elevação mediana pode ser encontrada a partir da leitura da cota correspondente à área relativa acumulada de 50%, e a elevação média pode ser calculada pela equação 2.5:

$$\bar{z} = \frac{1}{A} \sum (A_i * \bar{z}_i), \quad (2.5)$$

em que, A_i é a área compreendida entre duas curvas de nível consecutivas e \bar{z}_i é a média aritmética das cotas destas curvas de nível.

2.4.4.2. Perfil longitudinal e declividade do curso d'água principal

A declividade do curso d'água principal (S) de uma bacia está relacionada ao relevo associado à calha do rio. É uma medida de extrema importância uma vez que a velocidade do escoamento em um curso d'água se relaciona com a declividade da calha fluvial: quanto maior a declividade, maior a velocidade do escoamento (BARBOSA Jr., 2015).

Existem diferentes métodos de se calcular a declividade de um curso d'água. Nesse estudo são utilizadas as declividades S_{10-85} , S_2 e S_3 , que mais se aproximam de um valor médio de declividade: declividade entre pontos que excluem valores extremos (S_{10-85}), declividade média baseada na área sob a curva das elevações da linha de fundo do canal (S_2), e declividade equivalente constante (S_3).

A declividade S_{10-85} é obtida excluindo-se trechos extremos de montante e jusante do curso d'água natural: excluem-se 10% do comprimento do curso d'água próximo à foz e 15% do comprimento junto à cabeceira. São feitas as medições das cotas a 10% ($z_{10\%}$) e 85% ($z_{85\%}$) do comprimento do rio e, uma vez conhecidas as duas altitudes, a diferença é dividida por 75% da extensão do canal principal, como demonstrado pela equação 2.6:

$$S_{10-85} = \frac{z_{85\%} - z_{10\%}}{0,75L} \quad (2.6)$$

Para determinar a declividade média S_2 é necessário traçar uma linha de declividade no gráfico do perfil longitudinal, de forma que a área compreendida entre essa linha e o eixo da abscissa seja igual à área entre a curva do perfil real do curso d'água e a abscissa. A área sob a curva do perfil (A_p) pode ser determinada por métodos gráficos ou analiticamente pela equação 2.7:

$$A_p = \frac{(z_1 - z_{foz}) * (x_1) + (z_2 + z_1) * (x_2 - x_1) + \dots + (z_{cab} + z_n) * (L - x_n)}{2}, \quad (2.7)$$

em que, z_{foz} é a elevação na foz do rio, z_{cab} é a elevação na cabeceira, e z_1, z_2, \dots e z_n são cotas entre a foz e a cabeceira, que distam x_1, x_2, \dots e x_n da foz, respectivamente.

Simplificando a equação 2.7, pode-se determinar S_2 a partir da seguinte igualdade:

$$A_p = \frac{1}{2} [z_{foz} + (z_{foz} + S_2 * L)] * L = \frac{1}{2} (2z_{foz} + S_2 * L) * L = z_{foz} * L + \frac{1}{2} S_2 * L^2$$

Assim tem-se a equação 2.8:

$$S_2 = 2 \frac{A_p}{L^2} - 2 \frac{z_{foz}}{L} \quad (2.8)$$

Na Figura 2.2 é representada a linha de declividade S_2 e a área sob a curva do perfil A_p .

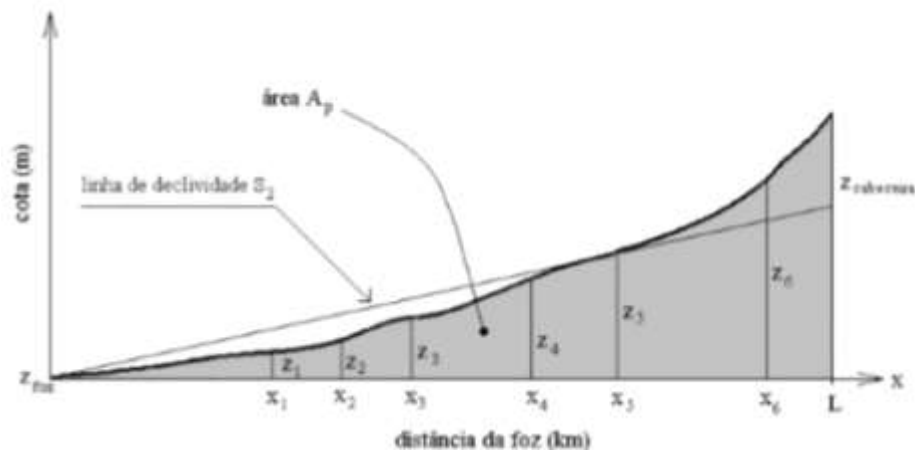


Figura 2.2 - Modelo gráfico para o cálculo da declividade S_2 .

Fonte: Barbosa Jr., 2015.

Já declividade equivalente constante S_3 é obtida a partir da consideração de que o tempo total de percurso da água no canal real é igual ao tempo de percurso num canal hipotético de declividade constante S_3 .

O tempo total de percurso da água é obtido a partir da subdivisão da extensão do canal natural em vários trechos retilíneos de declividade e rugosidade aproximadamente uniformes. Assim o tempo total será igual à soma dos tempos de percurso da água em cada um destes trechos. Para

a determinação do S_3 é considerada válida a equação de Chézy onde para cada trecho, tem-se a equação 2.9:

$$V_i = \alpha \sqrt{R_{Hi} * S_i} = K_i * \sqrt{S_i} = \frac{L_i}{t_i} \quad (2.9)$$

em que:

V_i = velocidade do trecho;

S_i = declividade do trecho;

α = coeficiente de rugosidade de Chézy;

R_{Hi} = raio hidráulico de uma seção característica do trecho i ;

$K_i = \alpha \sqrt{R_{Hi}}$;

L_i = comprimento do trecho i ;

t_i = tempo de percurso da água no trecho i .

Sendo assim o tempo total de percurso da água no curso d'água natural é dado pela seguinte equação aproximada 2.10:

$$T = \sum t_i = \sum \left(\frac{L_i}{K_i * \sqrt{S_i}} \right) \quad (2.10)$$

Para o canal de declividade equivalente S_3 (eq. 2.11):

$$T = \frac{L}{V} = \frac{L}{\alpha \sqrt{R_H * S_3}} = \frac{L}{K * \sqrt{S_3}} \quad (2.11)$$

em que $L = \sum L_i$ = comprimento do canal principal.

Igualando as equações 2.10 e 2.11 e desconsiderando os efeitos da rugosidade e de forma do canal ($K_i = K$), tem-se a equação 2.12:

$$\frac{L}{\sqrt{S_3}} = \sum \frac{L_i}{\sqrt{S_i}} \quad (2.12)$$

Logo S_3 é dado pela equação 2.13:

$$S_3 = \frac{L^2}{\left(\sum \frac{L_i}{\sqrt{S_i}} \right)^2} \quad (2.13)$$

2.4.4.3. Modelo Digital de Terreno (MDT)

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial (x, y, z) em uma dada região da superfície terrestre. Esta ferramenta é construída com base nas informações altimétricas e planimétricas da área de pesquisa, e representa bem o relevo encontrado na bacia (FELGUEIRAS & CÂMARA, 2004).

As informações fornecidas por esse modelo são muito utilizadas nas áreas de geoprocessamento de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

2.5. Caracterização hidrológica da bacia hidrográfica

Assim como a caracterização física, a análise do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é extremamente importante para a gestão dos recursos hídricos e tomadas de decisões do ponto de vista social, econômico e ambiental da região.

O gerenciamento adequado dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica está relacionado com a sua disponibilidade hídrica. Essa disponibilidade hídrica geralmente é avaliada através da equação de balanço hídrico, que relaciona os valores da precipitação e da vazão da região da bacia. Os dados de precipitação da bacia são utilizados para quantificar a entrada de água na bacia, e os valores das vazões máximas, médias e mínimas são importantes parâmetros dos projetos de obras hidráulicas e processos de outorga do direito de uso da água.

Esse entendimento do comportamento hidrológico deve ser feito preferencialmente por meio de monitoramento, o qual fornece subsídios técnicos para compreender diferentes processos do ciclo hidrológico. O monitoramento hidrológico no Brasil é feito por uma rede hidrométrica básica cuja responsabilidade é da Agência Nacional de Águas (ANA); através do portal HydroWeb, a Agência oferece um banco de dados com todas as informações coletadas pela rede hidrometeorológica e reúne dados sobre cotas, vazões, chuvas, evaporação, perfil do rio, qualidade da água e sedimentos (ANA, 2016).

2.5.1. Precipitação

O regime hidrológico de uma bacia hidrográfica é determinado por diferentes fatores de natureza climática e hidrometeorológica, como precipitação, evaporação, temperatura, umidade do ar, vento, e por suas características físicas, geológicas e topográficas (BARBOSA Jr., 2015).

A precipitação é toda água proveniente do vapor d'água da atmosfera depositada na superfície da terra por várias formas, como chuva, granizo, neve, neblina, orvalho ou geada. (BARBOSA Jr., 2015).

A precipitação em forma de chuva é o principal processo pelo qual a água condensada na atmosfera atinge gravitacionalmente a superfície terrestre. Para se conhecer o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica é de extrema importância determinar sua precipitação média, que é a lâmina de água de altura uniforme sobre toda a sua área, associada a um período de tempo (um dia, um mês, etc.). Esta altura é, normalmente, expressa em milímetros e determinada pelo uso de aparelhos denominados pluviômetros ou pluviógrafos.

Os pluviômetros são aparelhos coletores de chuva, que armazenam em um recipiente interno e com área de captação padronizada pela Organização Meteorológica Mundial, em geral 200 ou 400 cm³. Já os pluviógrafos são formados por um sistema que determina a distribuição temporal e a variação da intensidade das chuvas. Os locais onde estes aparelhos são instalados são denominados postos pluviométricos (TUCCI, 2001).

O objetivo destes postos pluviométricos é produzir uma série de dados das precipitações ocorridas ao longo dos anos, o que torna possível o estudo das variações de intensidade das mesmas. Porém, podem ocorrer períodos com falha nos dados das observações, por isso os dados coletados, antes de serem utilizados, devem passar por uma análise preliminar de correção de falhas (BARBOSA Jr., 2015).

Normalmente, a disponibilidade de longas séries de precipitações é muito mais frequente que a de vazão, sendo assim o estudo das precipitações máximas é um dos caminhos para se conhecer a vazão de enchente de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2001).

2.5.2. Vazão

A vazão (Q) representa o volume de água que atravessa a seção transversal ao escoamento, na unidade de tempo. É a principal grandeza a caracterizar o escoamento e sua principal unidade é m^3/s . Os dados que caracterizam uma bacia hidrográfica são as vazões máximas, médias e mínimas do curso d'água principal (BARBOSA Jr., 2015).

Para a medição da vazão podem ser utilizadas diferentes técnicas como vertedores, flutuadores, molinetes e curva chave. Os vertedores são considerados um dos métodos estruturais de medição de vazão pelo fato de utilizar estruturas de medição pré-calibradas, bastando determinar em geral uma medida de nível para obter-se a vazão. Os métodos dos flutuadores e dos molinetes são considerados na categoria de métodos não estruturais por se tratarem de métodos que se baseiam na velocidade do fluxo local para a determinação da vazão. Enquanto isso a curva chave associa a vazão do fluxo ao nível d'água no local.

A representação gráfica da vazão em uma seção de um curso d'água em relação ao tempo de passagem da água pela seção é denominada hidrograma. O hidrograma pode ser entendido como a resposta da bacia hidrográfica, em função de suas características fisiográficas que regem as relações entre chuva e escoamento, a uma dada precipitação e à contribuição de um aquífero.

Outra variável muito importante nas bacias hidrográficas é a curva de permanência, que informa sobre a variação das vazões e a frequência de incidência das mesmas no curso d'água. Em outras palavras, essa curva indica a porcentagem de tempo em que a vazão de dada magnitude é igualada ou superada durante um intervalo de observações. Através dela é possível visualizar o potencial natural de um corpo d'água, destacando-se as vazões máxima, média e mínima e o grau de permanência para qualquer vazão. A curva de permanência é gerada com base em valores diários, semanais ou mensais, sendo muito utilizada em diversos estudos (BARBOSA, S. et al., 2005).

2.5.2.1. Vazões mínimas, médias e máximas

O conhecimento das vazões mínimas, médias e máximas de uma bacia hidrográfica é fundamental para a elaboração de diferentes projetos de obras hidráulicas e processos de outorga de direito de uso da água.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) a vazão mínima é a vazão que assegura a qualidade e quantidade de água, no tempo e no espaço, necessárias para manter os componentes, as funções e os processos dos ecossistemas aquáticos. Sua determinação é importante para a verificação da disponibilidade natural dos cursos d'água, como sua capacidade natural de autodepuração e, também, para apreciar as possibilidades de concessão do uso da água para dada finalidade (BARBOSA, S. et al, 2005).

A vazão média de longo período é definida como a média das vazões médias anuais de toda uma série de dados, sendo denominada como específica quando dividida pela área da bacia hidrográfica de interesse. Seu valor permite caracterizar a maior vazão possível de ser regularizada em uma bacia, permitindo a avaliação dos limites superiores da disponibilidade de água de um manancial (ALEXANDRE & MARTINS, 2005).

Já a vazão máxima de um rio é entendida como sendo o valor associado a um risco de ser igualado ou ultrapassado a ser utilizado na previsão de enchentes e em projetos de obras hidráulicas. O conhecimento da vazão máxima é importante para o controle e atenuação das cheias em uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2001).

2.5.3. Análise estatística na hidrologia

A estatística na hidrologia tem como principal objetivo a realização de análises de frequência dos dados hidrológicos e o ajuste da distribuição de probabilidade que permite a extrapolação desses dados. Assim, a partir de análises estatísticas, é possível obter, por exemplo, as vazões de projetos de obras hidráulicas para o aproveitamento dos recursos hídricos, abastecimento público, dentre outras.

Para a realização da análise estatística hidrológica é necessário que os dados de chuva e vazão sejam dispostos em séries, normalmente anuais ou parciais. A escolha de uma ou outra depende da qualidade dos dados e do tamanho da série disponível associada ao objetivo do estudo.

As séries anuais são formadas pelos maiores valores (ou menores no caso de valores mínimos) de cada ano, formando N valores da variável em N anos de registros. Já as séries parciais incluem todos os valores dos registros que se encontram acima (ou abaixo) de um valor de referência. Podem possuir, portanto, mais de um valor por ano, diferentemente da série parcial.

Segundo Santos (1999), as séries anuais produzem resultados mais consistentes para períodos de retorno superiores a dez anos, enquanto as séries parciais fornecem resultados mais consistentes para períodos de retorno inferiores.

Estando os dados hidrológicos de uma variável x (chuva ou vazão) dispostos em séries homogêneas, será possível realizar a análise de frequência, que consiste, no caso da análise de máximos, na avaliação do número de vezes que o evento de magnitude x_0 é igualado ou superado. Dentre os métodos existentes para essa análise pode-se citar o método Weibull. Para estimar a frequência para os valores máximos, os N dados da série devem ser classificados em ordem decrescente e a cada um atribui-se o seu número de ordem (m), enquanto para valores mínimos deve-se fazer a classificação inversa. Pelo método de Weibull, tem-se a equação 2.14:

$$\mathcal{F}(x_0) = \frac{m}{(N+1)} \quad (2.14)$$

Considerando que a frequência é uma boa estimativa da probabilidade teórica (P) e que a mesma é o inverso do período de retorno, pode-se definir o termo tempo de recorrência ou período de retorno (T_r) como sendo o tempo médio (anos) em que um determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez. Tal definição é expressa na equação 2.15:

$$T_r = \frac{1}{P} = \frac{1}{\mathcal{F}(x_0)} \quad (2.15)$$

Para períodos de retorno bem menores que o número de anos de observação, o valor encontrado pode dar uma boa ideia do valor real de P , já para grandes períodos de recorrência a repartição de frequência deve ser ajustada a uma lei probabilística teórica, para possibilitar um cálculo mais correto da probabilidade.

2.5.3.1. Métodos probabilísticos

Dentre os modelos de probabilidade existentes, têm sido empregados nas análises estatísticas as seguintes distribuições: Normal, Log-Normal, Gumbel (ou Gumbel teórica), Log-Gumbel, Gumbel-Chow (ou Gumbel finita), Pearson tipo III e a Log-Pearson tipo III.

A seleção da distribuição mais apropriada para cada série de dados pode ser feita a partir de técnicas matemáticas de ajuste de curvas, em que, a distribuição considerada mais adequada para realização de previsões será a que possuir o melhor ajuste (BARBOSA Jr., 2015).

Ven Te Chow mostrou que para a maioria das distribuições de probabilidade utilizadas em hidrologia pode-se escrever a equação 2.16:

$$x_{Tr} = \bar{x} + K * s \quad (2.16)$$

em que:

x_{Tr} = magnitude da variável hidrológica (vazão ou chuva) de T_r anos de recorrência;

\bar{x} = chuva ou vazão média;

s = desvio-padrão; e

K = fator de frequência de Chow, que, no caso geral, é função do tipo de distribuição, da frequência, do tamanho da amostra e do grau de assimetria da distribuição.

A seguir são apresentados os modelos de probabilidades utilizados neste trabalho:

- Distribuição Normal

A distribuição Normal, ou distribuição de Gauss, é a mais familiar das distribuições contínuas de probabilidade. Se uma variável aleatória x tem distribuição normal, sua função densidade de probabilidade $f(x)$ é dada pela expressão disposta na equação 2.17:

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right)^2} \quad (2.17)$$

em que:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \text{ } \rangle \text{ chuva ou vazão média;}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{N}} \text{ } \rangle \text{ desvio-padrão;}$$

O valor da variável hidrológica de recorrência T_r pode ser encontrado segundo a distribuição normal a partir da relação desenvolvida por Chow (eq. 2.16). A distribuição de probabilidade Normal aplicada aos dados de uma dada série pode, ainda, ser visualizada graficamente com o uso do papel aritmético de probabilidade. Neste papel, o modelo de probabilidade Normal é uma reta que passa por três pontos característicos (eq. 2.18):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{50\%} = \bar{x} \text{ } \rangle \text{ } \mathcal{F}(\bar{x}) = 50\% \\ x_{16\%} = \bar{x} + s \text{ } \rangle \text{ } \mathcal{F}(\bar{x} + s) = 16\% \\ x_{84\%} = \bar{x} - s \text{ } \rangle \text{ } \mathcal{F}(\bar{x} - s) = 84\% \end{array} \right. \quad (2.18)$$

- Distribuição Log-Normal

A distribuição Log-Normal é uma generalização da distribuição Normal, tornada assimétrica por uma mudança da variável, $w = \log x$. Dessa forma, tem-se a equação 2.19:

$$f(y) = \frac{1}{s_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{w-\bar{w}}{s_w} \right)^2} \quad (2.19)$$

em que:

$$\bar{y} = \frac{\sum \log x_i}{N} \text{ , média dos logaritmos da variável hidrológica } x;$$

$$s_w = \sqrt{\frac{\sum (\bar{w} - w_i)^2}{N-1}} \text{ , desvio-padrão dos logaritmos de } x;$$

Na distribuição Log-Normal, a equação desenvolvida por Chow (eq. 2.16) também sofre uma mudança de variável, sendo reescrita pela equação 2.20:

$$w_{Tr} = \bar{w} + K * s_w \quad (2.20)$$

Uma vez que $w = \log x$, a variável procurada (chuva ou vazão) é encontrada pelo cálculo do antilogaritmo: $x_{Tr} = 10^{w_{Tr}}$. Sendo assim, a distribuição Log-Normal também gera uma reta que passa pelos seguintes pontos (eq. 2.21):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{50\%} = 10^{\bar{w}} \text{ , } \mathcal{F}(\bar{w}) = 50\% \\ x_{16\%} = 10^{(\bar{w}+s_w)} \text{ , } \mathcal{F}(\bar{w}+s_w) = 16\% \\ x_{84\%} = 10^{(\bar{w}-s_w)} \text{ , } \mathcal{F}(\bar{w}-s_w) = 84\% \end{array} \right. \quad (2.21)$$

- Distribuição Gumbel

A distribuição Gumbel, também conhecida como distribuição duplo exponencial de eventos extremos, é aplicada com o interesse de estudar os valores extremos prováveis de um fenômeno hidrológico. Ela se aplica a uma série infinita e é expressa pelas equações 2.22 e 2.23:

$$F(x_0) = e^{-e^{-y}} \quad (2.22)$$

Para eventos de máximos, $\mathcal{F}(x_0) = 1 - F(x_0)$ (2.23)

em que y é a variável reduzida da distribuição Gumbel. Na equação (2.22), y pode ser igualado à seguinte expressão com as respectivas definições dos parâmetros (eq. 2.24) (TUCCI *et al*, 2001):

$$y = \frac{1}{0,7797s} * (x - \bar{x} + 0,45s) \quad (2.24)$$

- Distribuição Log-Gumbel

A distribuição Log-Gumbel é uma generalização, assim como a distribuição Log-Normal, com uma mudança da variável ($w = \log x$) na equação 2.24, gerando a equação 2.25:

$$y = \frac{1}{0,7797s_w} * (w - \bar{w} + 0,45s_w) \quad (2.25)$$

- Distribuição Gumbel-Chow

A distribuição Gumbel-Chow é assim definida para diferenciar da distribuição Gumbel por se referir a uma série finita. A distribuição pode ser descrita pela equação de Chow (eq. 2.16), em que, agora, o fator de frequência K é função do período de retorno (T_r) e do tamanho da amostra (N).

- Distribuição Pearson Tipo III

A distribuição Person Tipo III é também utilizada nas análises de frequência de vazões e precipitações máximas anuais. Seu uso também pode ser feito a partir da relação descrita por Chow, definida na equação 2.16.

Nesse caso, o fator de frequência de Chow (K) é função do coeficiente de assimetria (g) e da frequência F(%) ou período de retorno T_r . Sendo o coeficiente de assimetria expresso pela equação 2.26:

$$g = \frac{N}{(N-1)*(N-2)} * \frac{\sum(x_i - \bar{x})^3}{s^3} \quad (2.26)$$

- Distribuição Log-Pearson Tipo III

A distribuição Log-Pearson Tipo III segue o mesmo princípio explicado para as demais distribuições Log, onde também ocorre uma mudança de variável ($y = \log x$), gerando assim uma variação da equação 2.16, a equação 2.27.

$$g_w = \frac{N}{(N-1)*(N-2)} * \frac{\sum(w - \bar{w})^3}{s_w^3} \quad (2.27)$$

Para essa distribuição, a variável aleatória w é calculada pela relação definida por Chow, conforme a equação 2.20, e a variável hidrológica é obtida pelo cálculo do antilogaritmo.

2.6. Sistemas de Informações Geográficas (SIGs)

A delimitação de uma bacia hidrográfica é um procedimento muito utilizado para a realização de análises hidrológicas ou ambientais. Para isso, são utilizadas diversas informações de relevo em formato analógico que, contudo, comprometem a confiabilidade e os resultados devido à carga de subjetividade presente nos métodos manuais. Com a consolidação dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e o surgimento de formas digitais de representação do relevo, como os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), métodos automáticos para delimitação de bacias têm sido desenvolvidos desde então (GARBRECHT & MARTZ, 1999).

Os Sistemas de Informações Geográficas possuem a capacidade de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões de uma maneira simples e eficiente, permitindo uma economia de tempo e recursos. Nesses sistemas é possível agregar dados de diferentes fontes como imagens de satélite, mapas topográficos, mapas de solo e diferentes escalas. Essas manipulações geram como resultados mapas temáticos com as informações desejadas (MENDES, 1997).

Os SIGs são sistemas que automatizam as tarefas que eram realizadas manualmente, tornando mais fácil a realização de análises complexas, através da integração de dados geocodificados (FELGUEIRAS, 1987). Eles podem ser considerados um instrumento para mapear e indicar respostas a diferentes questões relacionadas ao planejamentos urbano e regional, meio rural e levantamento dos recursos renováveis, detalhando os mecanismos das mudanças que ocorrem no meio ambiente e auxiliando o gerenciamento dos recursos naturais de regiões específicas (FERREIRA, 1997).

Dentre os softwares que utilizam a linguagem SIG, o programa ArcGIS, desenvolvido pela empresa Norte-Americana Environmental Systems Research Institute (ESRI), é atualmente o mais utilizado.

2.7. O desastre de Mariana

No dia 05 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de ferro de Fundão, pertencente ao complexo minerário de Germano (Figura 2.3), no município de Mariana/MG. O complexo em questão é de propriedade da Samarco Mineração (empresa

controlada pela Vale e pela BHP Billiton) e engloba as barragens de Germano, Fundão e Santarém, que continham, respectivamente, 116 milhões m³, 50 milhões m³ e 7 milhões m³ de rejeitos (IBAMA, 2015).



Figura 2.3 - Complexo minerário de Samarco após o rompimento.

Fonte: Google Earth.

O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em novembro de 2015, gerou um fluxo de lama de cerca de 32 milhões de metros cúbicos que inicialmente atingiu a barragem de Santarém logo a jusante, causando seu galgamento e forçando a passagem de uma onda de rejeitos no vale do córrego Santarém e por mais 55 km no rio Gualaxo do Norte até desaguar no rio do Carmo. Em seguida, os rejeitos percorreram outros 22 km até seu encontro com o rio Doce e continuaram a ser carregados até a foz no Oceano Atlântico, chegando em Regência no município de Linhares, no estado do Espírito Santo, no dia 21 de novembro de 2015, totalizando 663,2 km de corpos hídricos diretamente impactados (IBAMA; DIPRO; CGEMA, 2015).

A Figura 2.4 representa o percurso da lama pelos corpos d'água.



Figura 2.4 - Caminho da lama de rejeitos desde o córrego Santarém, local do acidente, até a foz do rio Doce.
Fonte: Google Earth.

De acordo com o laudo técnico preliminar do IBAMA (2015), o desastre em análise foi classificado quanto à intensidade como Desastre de Nível IV conforme classificação da Defesa Civil Nacional. Essa categoria representa os desastres de muito grande porte, ou seja, os danos causados são muito importantes e os prejuízos muito vultosos e consideráveis. Tais desastres não são superáveis e suportáveis pelas comunidades, mesmo quando bem informadas, preparadas, participativas e facilmente mobilizáveis, a menos que recebam ajuda de fora da área afetada. Nessas condições, o restabelecimento da situação de normalidade depende da mobilização e da ação coordenada dos três níveis de governo e, em alguns casos, de ajuda internacional.

Quanto à evolução, o desastre de Mariana se classifica como súbitos ou de evolução aguda, ou seja, é caracterizado pela subtaneidade, pela velocidade com que o processo evolui e pela violência dos eventos adversos causadores dos mesmos.

Ainda segundo o laudo do IBAMA (2015), esse acidente foi considerado o maior desastre ambiental já ocorrido no Brasil e dentre seus impactos pode-se citar:

- Dezoito mortes de trabalhadores da empresa e moradores das comunidades afetadas;
- Destruição do povoado de Bento Rodrigues, com pouco mais de 200 casas e 600 moradores, quase totalmente coberto pela lama - desagregação dos vínculos sociais da comunidade, perda de infraestrutura pública e bens privados, perdas de receitas econômicas e perda de patrimônio cultural;

- Desalojamento de populações: 644 desabrigados e 716 desalojados em Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Paracatu de Cima, Águas Claras, Campinas, Borba, Pedras e Bica, Gesteira, Barreto e Barra Longa;
- Interrupção do abastecimento de água: 35 municípios afetados no estado de Minas Gerais e 4 no Espírito Santo, além da alteração dos padrões de qualidade da água doce, salobra e salgada;
- Interrupção da geração de energia elétrica pelas hidrelétricas atingidas: Candonga, Baguari, Aimorés e Mascarenhas, sendo que a primeira delas teve suas estruturas ameaçadas e sofreu completo assoreamento de seu reservatório;
- Destruição de áreas de preservação permanente e vegetação nativa de Mata Atlântica: cerca de 1.500 hectares de mata ciliar destruídos e 80 km² de área no mar afetada pela pluma de rejeitos, além de dezenas de quilômetros de ambiente costeiro, no litoral do Espírito Santo;
- Mortandade de biodiversidade aquática e fauna terrestre: cerca de 11 toneladas de peixes mortos ao longo do rio Doce;
- Assoreamento de cursos d'água: Gualaxo do Norte, Carmo e Doce;
- Mudança do aspecto de todo o curso d'água: altos níveis de turbidez;
- Interrupção da pesca por tempo indeterminado: comunidade indígena (Krenak) e pescadores da região afetada;
- Perda e fragmentação de habitats: restrição ou enfraquecimento dos serviços ambientais dos ecossistemas aquáticos e terrestres;
- Perda econômica: queda da arrecadação de cerca de R\$4 milhões/mês do Município de Mariana, em decorrência da paralisação das atividades minerárias, aumento do desemprego e interrupção do turismo.

Os impactos sobre os ecossistemas naturais e a perda de biodiversidade ainda estão em processo de avaliação ao longo do rio Doce e afluentes, bem como na foz do rio e nas áreas marinhas adjacentes, havendo risco de desaparecimento de espécies, especialmente as endêmicas. Também não se sabe, ainda, como e quanto tempo será necessário para recuperar a bacia e mesmo se ela conseguirá voltar a ter as mesmas condições econômicas, sociais e ambientais que existiam antes do acidente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho compreendeu o levantamento e o processamento de dados hidrológicos e a aplicação de técnicas de geoprocessamento para a determinação de parâmetros da caracterização física e hidrológica da bacia do rio Gualaxo do Norte.

3.1. Caracterização da área de estudo

A caracterização da área de estudo foi feita a partir de um banco de dados montado através da organização, aquisição, investigação e geoprocessamento de dados básicos referentes a bacia do rio Gualaxo do Norte.

3.1.1. Dados básicos ou base geográfica

O mapa de dados básicos constitui-se numa base de registro ou de georreferenciamento dos demais planos de informação. Para a elaboração do mesmo foi utilizada uma imagem de satélite de relevo (SRTM) na escala 1:250.000, disponibilizada no site da Embrapa (SF-23-X-B) em formato GEOTIFF com resolução espacial de 90 metros. Além disso, também foram adquiridas cartas topográficas do IBGE dos municípios de Catas Altas (SF-23-X-B-I-1), Alvinópolis (SF-23-X-B-I-2), Mariana (SF-23-X-B-I-3) e Barra Longa (SF-23-X-B-I-4), todas na escala 1:50.000 de 1976.

O primeiro passo foi o tratamento dos dados SRTM no software ArcGis 10.3.1. Esse processo foi dividido em seis etapas, sendo: 1º - preenchimento de depressões (*Fill sinks*); 2º - direção de fluxo (*Flow direction*); 3º - fluxo acumulado (*Flow accumulation*); 4º - extração da rede de drenagem (*Conditional*); 5º - delimitação da bacia (*Watershed*); 6º - delimitação da hierarquia fluvial (*Stream Order*). As cartas topográficas foram trabalhadas posteriormente no software AutoCAD 2016.

3.1.2. Geoprocessamento

A partir da aquisição da imagem SRTM foi gerado um Modelo Digital de Elevação (MDE). Para correção de possíveis falhas ou depressões no relevo desse modelo foi utilizada a ferramenta *Spatial Analyst – Hidrology - Fill Sinks*. Esta função permite correções no MDE, de modo que esta considera as altitudes dos pixels vizinhos para preencher as falhas, suavizando a consistência no mapa e gerando um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Correto (MDEHC).

Após essas correções, iniciou-se a análise do escoamento superficial a partir da definição da direção do fluxo, bem como o cálculo do acúmulo do fluxo, utilizando as ferramentas *Flow direction* e *Flow accumulation*.

A ferramenta *Flow direction* gerou um arquivo raster de direção do fluxo a partir da direção da maior declividade do terreno. Nessa etapa cada célula tende a seguir seu vizinho mais íngreme. Enquanto a ferramenta *Flow accumulation* cria um arquivo raster que determina a acumulação de fluxo a partir do *Flow direction* criado anteriormente, as células com um elevado fluxo de acumulação são consideradas áreas de fluxo concentrado e podem ser usadas para a identificação dos canais de transmissão.

O próximo passo foi a extração da rede de drenagem através da ferramenta *Raster Calculator* e a função COM (*Conditional*), como ilustrado na Figura 3.1.

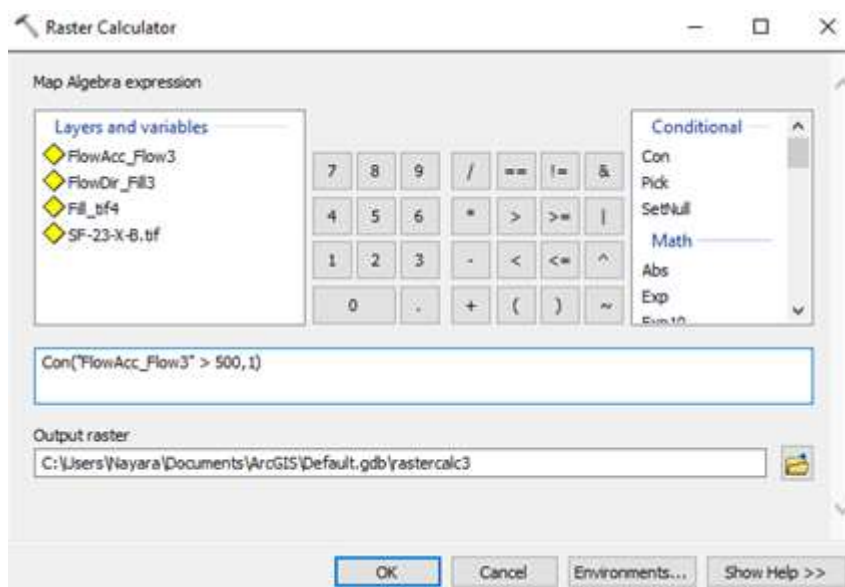


Figura 3.1– Extração da rede de drenagem.

Fonte: ArcGis for Desktop 10.3.1.

Na condição demonstrada na Figura 3.1 todas as células do arquivo raster *Flow accumulation* com valor superior a 500 foram consideradas durante a criação de um novo mapa, enquanto as demais foram transformadas em NODATA, gerando assim a rede de drenagem.

3.1.3. Área e perímetro

A delimitação da bacia hidrográfica foi feita pelos caminhos de drenagem do MDEHC em relação ao exutório da bacia por meio da ferramenta *Spatial Analyst Tools – Hydrology - Watershed*. Essa ferramenta gera um polígono levando em consideração as coordenadas da foz da bacia e a direção do fluxo dos cursos d'água. A partir desse polígono foi possível determinar a área de drenagem e o perímetro da bacia pela ferramenta *Measure*.

3.1.4. Ordem dos cursos de água

A delimitação da hierarquia fluvial da bacia foi realizada por meio da ferramenta *Stream Order*. Essa ferramenta estabelece a ordenação dos cursos d'água pela proposta de Horton - Strahler (1957), pela qual os canais menores que não recebem tributários são considerados de 1ª ordem; canais de 2ª ordem são gerados a partir do encontro de dois canais de 1ª ordem; canais de 3ª ordem são gerados no encontro de dois canais de 2ª e também pode receber afluentes de 1ª e 2ª ordens; e assim sucessivamente até alcançar a ordem do canal principal da bacia.

3.2. Caracterização física da bacia hidrográfica

Após o processamento dos dados SRTM, foi possível quantificar alguns parâmetros que caracterizam física e geometricamente a bacia. Neste tópico são expostas as características físicas e de forma do terreno, sendo que os significados e relevâncias dos principais parâmetros já foram abordados na seção 2.4.

Na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros utilizados na caracterização física da bacia, com seus respectivos símbolos, fórmulas e unidades de medida.

Tabela 3.1 - Parâmetros físicos de caracterização da bacia hidrográfica e do curso d'água principal.

Numeração	Abreviação	Parâmetro	Definição	Unidade
<i>eq. 2.1</i>	k_c	Coefficiente de compacidade	$k_c = 0,28 \frac{Per}{\sqrt{A}}$	-
<i>eq. 2.2</i>	k_f	Fator forma	$k_f = \frac{A}{L^2}$	-
<i>eq. 2.3</i>	λ_d	Densidade de drenagem	$\lambda_d = \frac{\sum L_i}{A}$	km^{-1}
<i>eq. 2.4</i>	l_{es}	Percurso médio de escoamento superficial	$l_{es} = \frac{1}{4 * \lambda_d}$	km
<i>eq. 2.5</i>	\bar{z}	Elevação média da bacia a partir da curva hipsométrica	$\bar{z} = \frac{1}{A} \sum (A_i * z_i)$	m
<i>eq. 2.6</i>	S_{10-85}	Declividade do curso d'água principal, S_{10-85}	$S_{10-85} = \frac{z_{85\%} - z_{10\%}}{0,75L}$	m/m
<i>eq. 2.8</i>	S_2	Declividade média do curso d'água principal, S_2	$S_2 = 2 \frac{A_p}{L^2} - 2 \frac{z_{foz}}{L}$	m/m
<i>eq. 2.13</i>	S_3	Declividade equivalente constante do curso d'água principal, S_3	$S_3 = \frac{L^2}{(\sum \frac{L_i}{\sqrt{S_i}})^2}$	m/m

(-) = Unidade Adimensional

Fonte: Dados da pesquisa.

Em que: Per = Perímetro da bacia [km];

A = Área da bacia [km²];

L = Comprimento axial da bacia[km];

L_i = Comprimento total de canais [km];A_i = Área compreendida entre duas curvas de nível consecutivas [km²]; \bar{z}_i = Média aritmética das cotas destas curvas de nível [m];z_{10%} = Cota do curso d'água a 10% da sua extensão medida a partir da foz [m];z_{85%} = Cota do curso d'água a 85% da sua extensão [m];A_p = Área sob a curva do perfil do álveo do curso d'água [m²];z_{foz} = Cota na foz do rio principal [m];S_i = Declividade do trecho de rio [m/m];

3.3. Caracterização hidrológica da bacia hidrográfica

Neste tópico são discutidos os dados hidrológicos existentes na bacia do Gualaxo do Norte e, no caso das chuvas, são consideradas as informações disponíveis em estações localizadas nas proximidades da área de estudo. Os dados pluviométricos e fluviométricos da região são avaliados com o objetivo de se conhecer o comportamento das chuvas e das vazões na bacia.

3.3.1. Coleta e análise de dados

Os dados de precipitação e de vazão referem-se aos registros diários nos postos pluviométricos e fluviométricos disponíveis no banco de dados do site da Agência Nacional de Águas (ANA) - HidroWeb.

Para a bacia do rio Gualaxo do Norte foram identificadas 2 estações pluviométricas - Bicas e Fazenda Ocidente - e 5 estações fluviométricas - PCH Bicas Jusante, Bicas, Bicas Jusante, Fazenda Ocidente e RNQA MG-7694-I-3 Jequeri - porém apenas as estações Bicas Jusante e Fazenda Ocidente apresentaram os dados de vazão disponíveis no site da ANA.

Antes de processar esses dados foi realizada uma análise preliminar dos mesmos com intuito de identificar possíveis erros e corrigi-los. Em seguida, foram elaboradas séries anuais de chuvas máximas diárias e de totais anuais precipitados, e séries anuais de vazões máximas e mínimas diárias, séries de vazões mensais e séries anuais de mínimas médias de sete dias (Q₇).

3.3.1.1. Dados de Chuva

Na estação Fazenda Ocidente (2043027) foram encontrados registros de dados de chuva de 48 anos (de 1968 a 2015). Nesses registros, foram identificadas falhas nos anos de 1968 e 1986. Uma vez que nesses anos os valores precipitados de máxima e de total anual se apresentaram muito menores do que os habituais, buscou-se identificar um possível erro por meio da comparação com dados desses anos em uma estação vizinha (Acaiaca Jusante – 2043009, localizada a 9,84 km da estação em análise). Dessa forma foi possível comprovar a inconsistência dos dados e desconsiderar os dois anos mencionados.

Para a construção da série, é conveniente trabalhar com dados consistidos, uma vez que dados brutos provenientes de estações pluviométricas podem apresentar problemas e erros variados, derivados do próprio processo de coleta e armazenamento. Porém, para o ano de 2003 e para os anos de 2006 a 2015 os dados consistidos ainda não estavam disponíveis na plataforma HidroWeb. Dessa forma, foram processados os dados brutos com o propósito de possuir uma maior amostragem. Assim, a série final da estação Fazenda Ocidente foi construída com valores de 46 anos de registros.

Já a estação de Bicas (2043028) apresentou uma quantidade menor de dados, apenas 24 anos (de 1942 a 1965). Na análise desses dados, foram identificadas falhas no ano de 1942: inexistência de registros nos meses de janeiro e fevereiro. Uma vez que esses meses são normalmente chuvosos, os valores da chuva máxima anual e do total precipitado em 1942 estão comprometidos. Por isso, na construção da série, os registros de 1942 foram desconsiderados. Dessa forma, as séries dessa estação foram construídas utilizando os dados consistidos de 23 anos.

As demais falhas observadas em ambas as estações foram desconsideradas pelo fato destas terem ocorrido nos meses de seca, sendo assim estas apresentavam pouca significância nos valores precipitados.

3.3.1.2. Vazão

Na estação de Bicas Jusante (56336001) foram encontrados dados de apenas 3 anos (1940, 1941 e 1942). Assim, pela pouca significância da amostragem de valores essa estação foi desconsiderada.

Já a estação Fazenda Ocidente (56337000) apresentou registros de dados fluviométricos de 74 anos (de 1939 a 2014). Nesses registros foram identificadas falhas nos anos de 1991, 2006 e 2007. No ano de 1991 foi identificado apenas um erro de digitação no valor de vazão mínima: a vazão foi registrada com o sinal de negativo. O dado foi incluído na análise, após ter sido considerado um mero engano. Já os anos de 2006 e 2007 foram desconsiderados pela inexistência de registros. As demais falhas identificadas foram relevadas por não terem apresentado grande significância para os propósitos das análises.

Como no caso das chuvas, na construção das séries de vazões máximas e mínimas deveriam ser utilizados apenas dados consistidos. Porém, para os anos de 2008 a 2014 estão disponíveis na plataforma HidroWeb apenas os dados brutos. Por isso, os registros de dados brutos de 2008 e 2014 foram considerados com o propósito de possuir amostragem mais ampla.

Para a elaboração da série de vazões mínimas médias de sete dias, Q_7 , foi necessário trabalhar com os registros de vazões diárias. A partir desses registros, produziram-se as médias Q_7 das vazões de 7 dias consecutivos. Em seguida, o valor da Q_7 anual foi determinado pelo menor valor encontrado entre as Q_7 calculadas em cada ano. Tal procedimento foi realizado para todos os anos da série de dados da estação Fazenda Ocidente.

Durante esse processo foram identificadas falhas em alguns anos devido à inexistência de registros de vazão diária. Os casos em que a ausência de registros se deu em meses considerados chuvosos foram relevados por não apresentarem significância para a determinação da vazão mínima Q_7 . Porém, para o ano de 2009 as falhas ocorreram no mês de setembro, que é considerado um mês de pouca chuva. Então, a fim de assegurar maior confiabilidade das informações passadas nesse trabalho optou-se por descartar o ano de 2009, uma vez que não se pode afirmar com segurança que a vazão mínima anual não ocorreu no mês de setembro desse ano.

Para ilustrar, foi construído o gráfico com os valores das vazões diárias dos meses de julho, agosto, outubro e novembro do ano de 2009 (Figura 3.2).

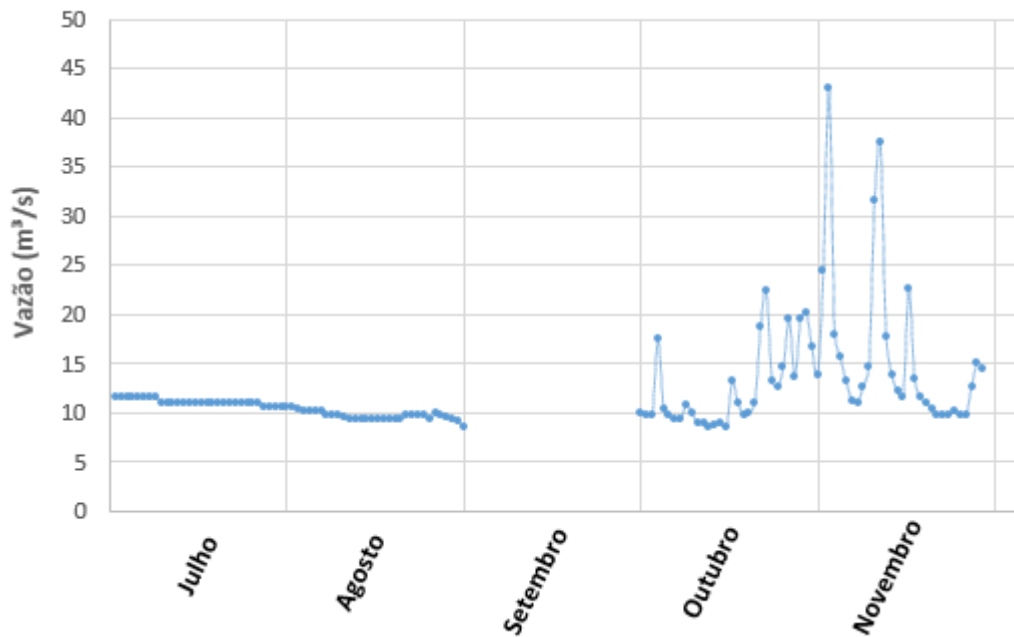


Figura 3.2 - Vazões diárias dos meses de julho, agosto, outubro e novembro do ano de 2009.
Fonte: Dados da pesquisa.

Como se pode observar na Figura 3.2, não é possível assegurar que no mês de setembro não tenha ocorrido uma vazão menor do que as ocorridas nos meses anteriores.

3.3.2. Análise estatística

Após a construção das séries de chuvas e vazão foi feita a análise estatística destes dados. Os métodos utilizados na caracterização hidrológica já foram abordados no item 2.5.3.

Na tabela 3.2 são resumidamente apresentados os métodos e equações utilizadas na análise estatística dos dados das séries hidrológicas construídas neste trabalho.

Tabela 3.2 – Técnicas de probabilidade e estatística em hidrologia.

Numeração	Métodos	Definição
eq. 2.14	Weibull	$\mathcal{F}(x_0) = \frac{m}{(n+1)}$
eq. 2.18	Normal	$x_{50\%} = \bar{x} \rightarrow \mathcal{F}(\bar{x}) = 50\%$ $x_{16\%} = \bar{x} + s \rightarrow \mathcal{F}(\bar{x} + s) = 16\%$ $x_{84\%} = \bar{x} - s \rightarrow \mathcal{F}(\bar{x} - s) = 84\%$
eq. 2.21	Log - Normal	$w = \log x$ $x_{50\%} = 10^{\bar{w}} \rightarrow \mathcal{F} = 50\%$ $x_{16\%} = 10^{(\bar{w}+s_w)} \rightarrow \mathcal{F} = 16\%$ $x_{84\%} = 10^{(\bar{w}-s_w)} \rightarrow \mathcal{F} = 84\%$
eq. 2.22 eq. 2.23 eq. 2.24	Gumbel (teórico)	$F = e^{-e^{-y}}$ $\mathcal{F} = 1 - F$ $y = \frac{1}{0,7797s} * (x - \bar{x} + 0,45s)$
eq. 2.22 eq. 2.23 eq. 2.25	Log - Gumbel (teórico)	$F = e^{-e^{-y}}$ $\mathcal{F} = 1 - F$ $y = \frac{1}{0,7797s_w} * (w - \bar{w} + 0,45s_w)$
eq. 2.16	Gumbel -Chow	$x_{Tr} = \bar{x} + K * s$
eq. 2.26	Pearson	$g = \frac{N}{(N-1)(N-2)} * \sum \frac{(x - \bar{x})^3}{s^3}$
eq. 2.20 eq. 2.27	Log- Pearson	$w_{Tr} = \bar{w} + K * s_w$ $g_w = \frac{N}{(N-1)(N-2)} * \sum \frac{(w - \bar{w})^3}{s_w^3}$

Fonte: Dados da pesquisa.

Em que: $\mathcal{F}(x_0)$ = Frequência com que foi igualado ou superado o evento de magnitude x_0 ;

$x_{50\%}$ = Chuva ou vazão de $\mathcal{F} = 50\%$;

$x_{16\%}$ = Chuva ou vazão de $\mathcal{F} = 16\%$;

$x_{84\%}$ = Chuva ou vazão de $\mathcal{F} = 84\%$;

\bar{x} = Chuva ou vazão média;

s = Desvio padrão;

$F(x_0)$ = Probabilidade da magnitude da variável hidrológica ser igual ou inferior a x_0 ;

$w = \log x$

T_r = Período de retorno;

N = Quantidade de dados existentes na série = número de anos de registros;

K = Fator de frequência de Chow;

Após as análises de frequência para todas as séries foi possível construir gráficos ilustrativos do comportamento das frequências das variáveis hidrológicas de cada um dos métodos de

análise, a fim de encontrar o modelo de probabilidade que melhor explica o comportamento das frequências de ocorrência das variáveis hidrológicas. Os gráficos foram construídos no programa Origin 6.0.

A partir da análise estatística foi possível encontrar diferentes vazões de projeto, como $Q_{7,10}$, Q_{mlp} , entre outros. Em seguida elas foram comparadas com as disponíveis na plataforma do Atlas Digital das Águas de Minas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização da área de estudo

A partir da utilização do software ArcGis 10.3.1 e das metodologias descritas no item 3.1 foi possível delimitar a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte (Figura 4.1).

Uma vez delimitada a bacia, foram quantificados os valores de área e perímetro da bacia, 532 km² e 155,8 km, respectivamente. A partir da Figura 4.1 também foi possível determinar a hierarquia dos cursos d'água segundo o critério de Horton-Strahler, cujos resultados encontram-se representados na Figura 4.2. Conforme o critério, o curso d'água principal (rio Gualaxo do Norte) é de ordem 5.

Em seguida, foi elaborado o modelo digital do terreno (MDT) da bacia, que permitiu analisar a variação do relevo de acordo com as curvas de nível. O modelo apresentado na Figura 4.3 apresenta uma caracterização das elevações da bacia, a partir de curvas de nível variando de 50 em 50 metros. As cotas na bacia variam de 390 m a 1350 m.

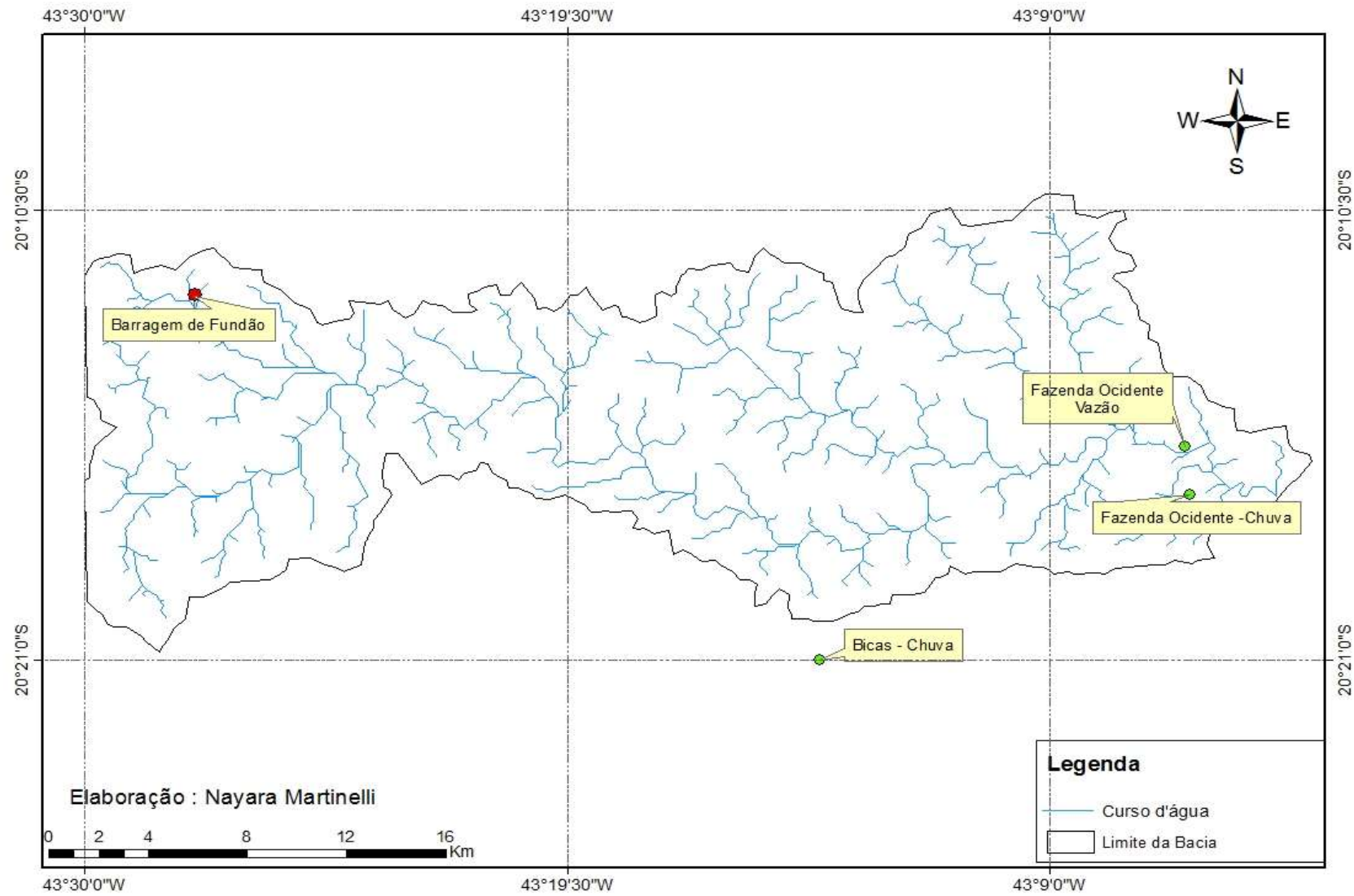


Figura 4.1 - Bacia Hidrográfica do Gualaxo do Norte e as estações utilizadas.

Fonte: Dados da pesquisa.

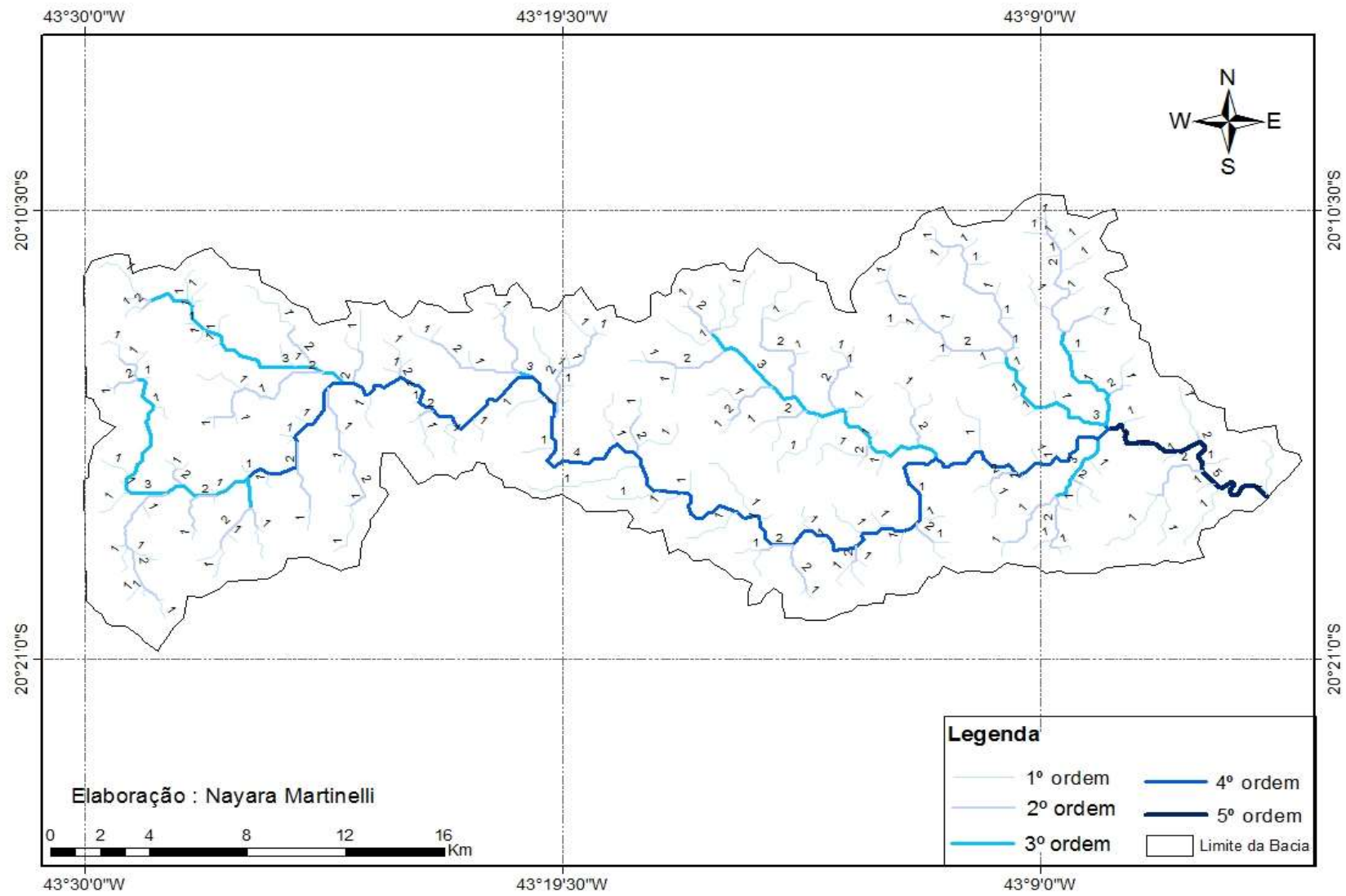


Figura 4.2 – Mapa de Hierarquia do rio Gualaxo do Norte.

Fonte: Dados da pesquisa.

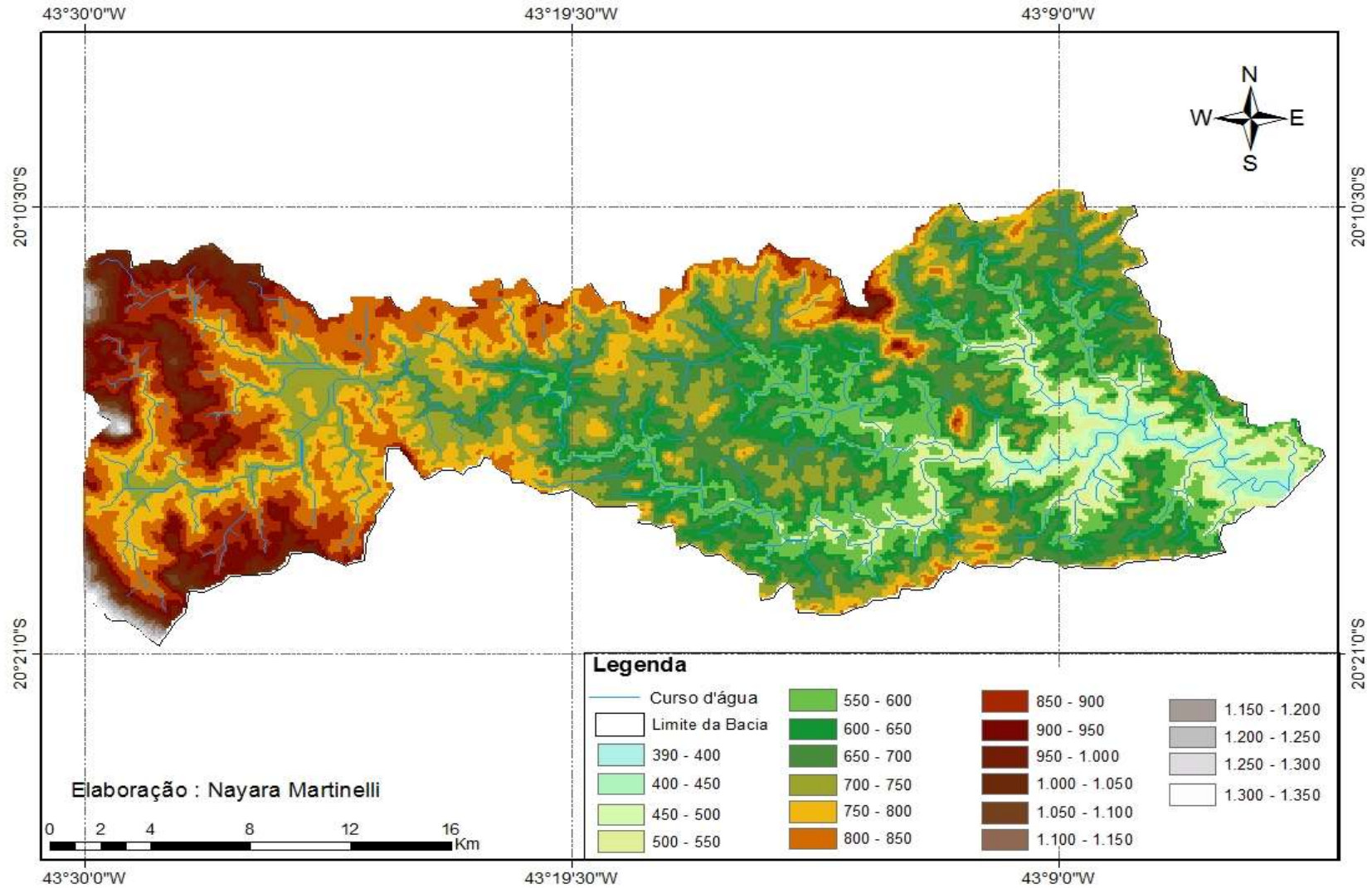


Figura 4.3 – Modelo Digital do Terreno (MDT) da bacia do Gualaxo do Norte.

Fonte: Dados da pesquisa.

4.2. Caracterização física da bacia

Além dos valores de área e perímetro da bacia do Gualaxo do Norte, outras características físicas da mesma foram determinadas. Os cálculos foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.2.

Os resultados estão dispostos a seguir:

- Coefficiente de compacidade ou índice de Gravelius

O valor encontrado para coeficiente de compacidade da bacia (eq. 2.1) foi de $k_c = 1,89$. Tal resultado indica que há pouca probabilidade de ocorrência de enchentes na parte baixa da bacia, por ocasião de chuvas intensas.

- Fator de forma

Para determinar tal parâmetro primeiramente foi preciso encontrar o comprimento axial, L , da bacia. Esse comprimento foi determinado com auxílio do ArcGis, sendo este igual a 79,1 km. Em seguida foi calculado o fator de forma (eq. 2.2) igual a $k_f = 0,0849$.

Esse valor relativamente baixo é característico de bacias alongadas. Dessa forma, pode-se afirmar, novamente, que a bacia apresenta pouca tendência de ocorrer enchentes em suas partes baixas, uma vez que, quanto mais alongada, menores as chances de que uma chuva intensa cubra toda a bacia.

- Densidade de drenagem

Antes de calcular a densidade de drenagem foi necessário quantificar o somatório dos comprimentos das linhas de drenagem da bacia. Tal valor foi determinado com auxílio das 4 cartas topográficas em escala 1:50.000 e do software AutoCad, sendo este igual a 1365,1 km.

Em seguida foi calculada a densidade de drenagem da bacia do rio Gualaxo do Norte (eq. 2.3): $\lambda_d = 2,57 \text{ km}^{-1}$. Esse valor sugere que a bacia do rio Gualaxo do Norte é bem drenada.

- Percurso médio do escoamento superficial

O valor do percurso médio do escoamento superficial da bacia encontrado (eq. 2.4) foi $\ell_{es} = 97,4 \text{ m}$. Este índice dá uma boa ordem de grandeza da distância média percorrida pela água superficial na bacia, antes de encontrar um curso d'água. A Figura 4.4 apresenta um esquema descritivo do percurso do escoamento superficial.

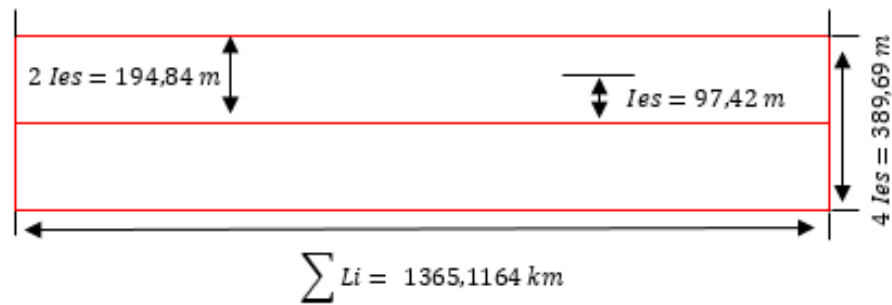


Figura 4.4 – Percurso médio do escoamento superficial.

Fonte: Dados da pesquisa.

▪ Curva hipsométrica

A construção da curva hipsométrica da bacia do Gualaxo do Norte foi feita com auxílio do software ArcGis. As áreas compreendidas entre as curvas de nível equidistantes de 50 metros foram quantificadas e as áreas relativas acumuladas calculadas para a construção da curva do relevo médio da bacia. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1 que também foi preparada para permitir o cálculo da elevação média da bacia. A curva hipsométrica da bacia segue na Figura 4.5.

Tabela 4.1 - Elementos para a representação da curva hipsométrica da bacia do Gualaxo do Norte.

Nº	Intervalo Cotas (m)		Cota média (m)	Área parcial (km ²)	Área acumulada (km ²)	% Área total	Cota média x Área parcial
1	390	400	395	0,20	531,85	100,00	80,1
2	400	450	425	9,64	531,64	99,96	4095,6
3	450	500	475	12,45	522,01	98,15	5911,6
4	500	550	525	26,37	509,56	95,81	13843,5
5	550	600	575	58,16	483,19	90,85	33443,4
6	600	650	625	68,25	425,03	79,92	42654,7
7	650	700	675	84,83	356,78	67,08	57257,9
8	700	750	725	80,07	271,96	51,13	58049,6
9	750	800	775	60,70	191,89	36,08	47040,1
10	800	850	825	54,15	131,19	24,67	44676,4
11	850	900	875	29,53	77,04	14,48	25841,2
12	900	950	925	18,87	47,50	8,93	17457,9
13	950	1000	975	14,54	28,63	5,38	14181,4
14	1000	1050	1025	6,48	14,09	2,65	6644,1
15	1050	1100	1075	2,23	7,60	1,43	2395,5
16	1100	1150	1125	1,67	5,37	1,01	1880,2
17	1150	1200	1175	1,55	3,70	0,70	1822,7
18	1200	1250	1225	1,22	2,15	0,40	1495,8
19	1250	1300	1275	0,63	0,93	0,18	808,4
20	1300	1350	1325	0,29	0,30	0,06	394,4
						TOTAL=	379974,9

Fonte: Dados da pesquisa.

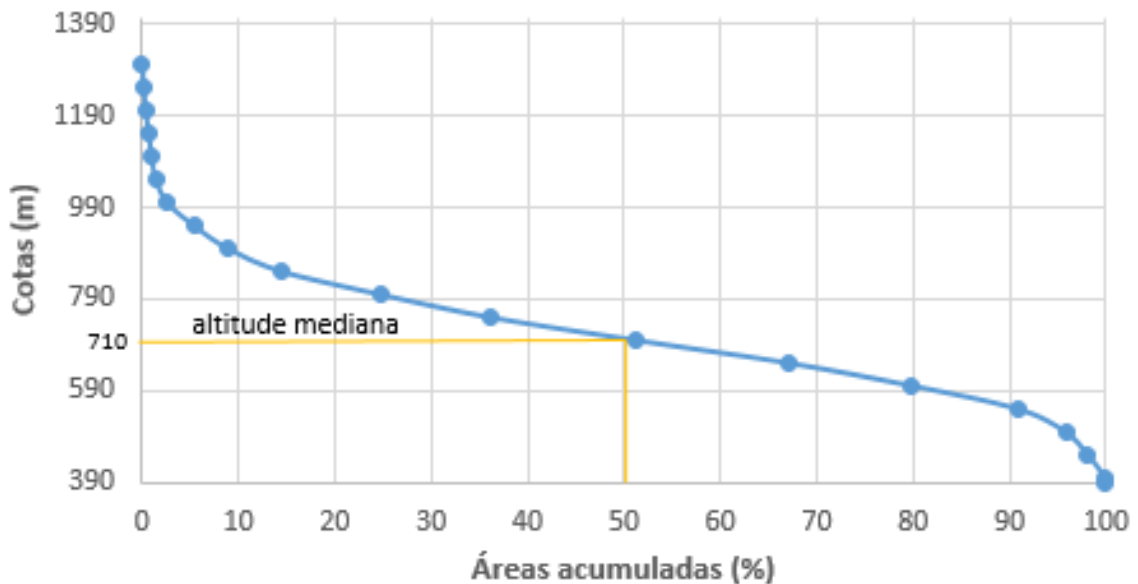


Figura 4.5 – Curva Hipsométrica da bacia do Gualaxo do Norte.
Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da curva hipsométrica foram determinadas a elevação média e mediana da bacia, \bar{z} e z_{med} , respectivamente, valores que influenciam na precipitação e escoamento superficial.

A elevação mediana (eq. 2.5) encontrada foi de 710 m, o que indica que 50% da área da bacia se encontra acima desta cota, e 50% se encontra abaixo da mesma. Já a elevação média calculada foi 714,4 m.

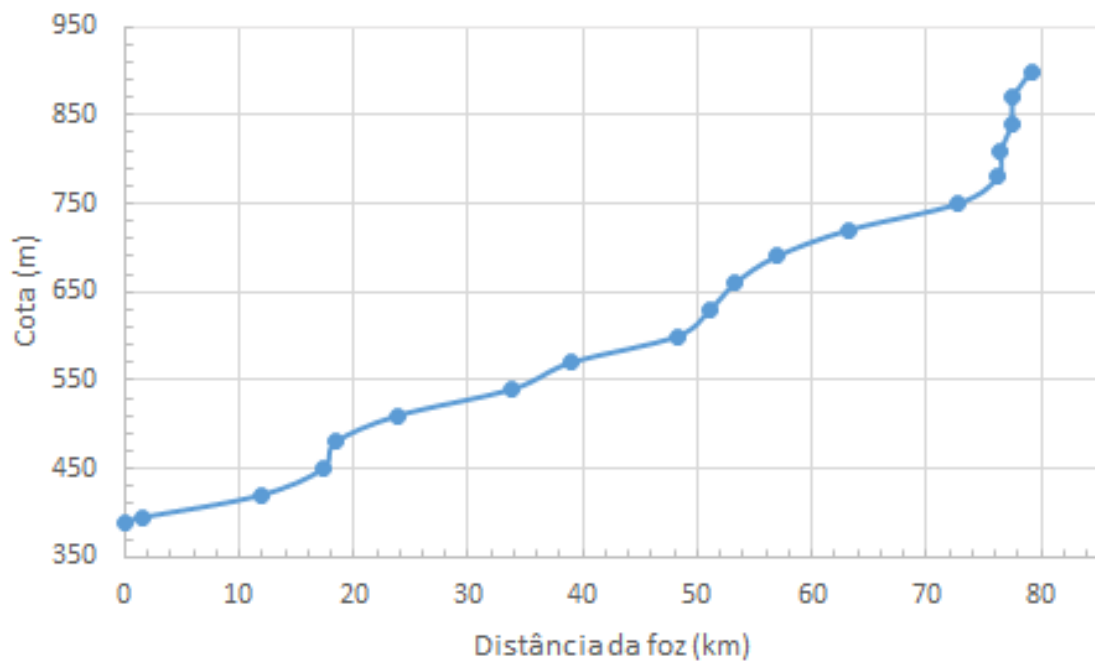
- Perfil longitudinal e declividade do curso d'água principal

O perfil longitudinal do curso d'água principal foi traçado com auxílio dos dados gerados pelo software ArcGis - mapa MDT. Nesse processo foram utilizadas as ferramentas *3D Analyst Tools – Functional Surface – Interpolate Shape* para interpolar o rio principal e suas respectivas cotas, tendo sido consideradas as cotas variando de 30 em 30 metros. Em seguida foi utilizada a ferramenta *3D Analyst – Profile Graph* para visualizar os dados gerados e, a partir das distâncias das respectivas cotas, esses valores foram transferidos para o Excel. Os resultados estão representados na Tabela 4.2, a partir da qual foi possível construir o perfil longitudinal representado na Figura 4.6.

Tabela 4.2 - Elementos para o traçado do perfil longitudinal do rio Gualaxo do Norte.

Distância da foz (km)	Altitude (m)
79,1	900
77,6	870
77,4	840
76,5	810
76,2	780
72,8	750
63,2	720
56,9	690
53,3	660
51,1	630
48,3	600
38,9	570
33,8	540
23,8	510
18,4	480
17,3	450
11,8	420
1,5	395
0	390

Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 4.6** – Perfil Longitudinal do rio Gualaxo do Norte.

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir do perfil longitudinal do Gualaxo do Norte foram encontradas as declividades da bacia:

Declividade S_{10-85}

Para quantificar a declividade S_{10-85} foram excluídos os trechos correspondentes a 10% da extensão do rio junto à foz e 15% da extensão próxima à cabeceira. As distâncias da foz correspondentes às cotas de $z_{10\%}$ e $z_{85\%}$ foram obtidas conforme demonstrado abaixo:

$$L = 79,128 \text{ km} \rightarrow 100\%$$

$$X(z_{10\%}) = ? \rightarrow 10\%$$

$$X(z_{10\%}) = 7,9128 \text{ km}$$

$$L = 79,128 \text{ km} \rightarrow 100\%$$

$$X(z_{85\%}) = ? \rightarrow 85\%$$

$$X(z_{85\%}) = 67,2588 \text{ km}$$

As distâncias da foz encontradas acima permitiram identificar as cotas correspondentes com auxílio do perfil longitudinal e da Tabela 4.2. Dessa forma, os valores encontrados foram $z_{85\%}$ igual a 730 m e $z_{10\%}$ igual a 400 m, permitindo assim quantificar declividade S_{10-85} (eq. 3.6): $S_{10-85} = 0,00556 \text{ m/m}$.

Declividade média S_2

No cálculo da declividade média S_2 foi obtido primeiramente o valor da área sob o perfil longitudinal representado na Figura 4.6. Para isso, com auxílio da Tabela 4.2, foram calculadas as áreas dos elementos trapezoidais que somadas produziu o resultado $A_p = 45516497 \text{ m}^2$. O cálculo da declividade média S_2 foi feito com o auxílio da (eq. 2.8): $S_2 = 0,00468 \text{ m/m}$.

Declividade S_3

Para encontrar a declividade S_3 foi utilizada a equação 2.13. A Tabela 4.3 foi construída a fim de possibilitar o cálculo do somatório $\sum \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}$.

Tabela 4.3 – Dados da declividade S_3 .

Intervalo h=30	L_i (m)	l_i (30/ L_i)	$S_i = \sqrt{l_i}$	L_i / S_i
900-870	1542,4	0,019	0,139	11059,5
870-840	171,4	0,175	0,418	409,7
840-810	914,5	0,033	0,181	5049,1
810-780	253,2	0,118	0,344	735,6
780-750	3472,1	0,008	0,093	37353,2
750-720	9587,4	0,003	0,056	171392,0
720-690	6327,7	0,005	0,069	91898,4
690-660	3557,6	0,008	0,092	38741,4
660-630	2196,5	0,014	0,117	18794,7
630-600	2845,7	0,010	0,103	27715,5
600-570	9331,8	0,003	0,057	164584,0
570-540	5122,3	0,006	0,076	66932,5
540-510	10024,4	0,003	0,055	183242,8
510-480	5389,1	0,005	0,074	72229,3
480-450	1102,9	0,027	0,165	6687,2
450-420	5444,4	0,005	0,074	73343,9
420-395	10305,8	0,003	0,054	191012,6
395-390	1539,0	0,019	0,139	11022,9
			SOMA=	1172204,4

Fonte: Dados da pesquisa.

Como pode-se observar, o valor encontrado para o somatório foi igual a 1172204,4. Assim, a partir dele foi determinada a declividade S_3 (eq. 2.13): $S_3 = 0,00456$ m/m.

- Resultados finais

A Tabela 4.4 resume os resultados encontrados na etapa de caracterização física da bacia do rio Gualaxo do Norte:

Tabela 4.4 – Caracterização física.

Parâmetro	Valor	Unidade
Área (A)	532	km ²
Perímetro (Per)	155,8	km
Coefficiente de compacidade (k _c)	1,89	-
Comprimento axial (L)	79,1	km
Fator de forma (k _f)	0,0849	-
Comprimento total dos cursos d'água ($\sum L_i$)	1365,1	km
Densidade de drenagem (λ_d)	2,57	km ⁻¹
Percurso médio do escoamento superficial (I _{es})	97,4	m
Elevação média (\bar{z})	714,4	m
Elevação mediana (z _{med})	710,0	m
Declividade S ₁₀₋₈₅	0,00556	m/m
Declividade S ₂	0,00468	m/m
Declividade S ₃	0,00456	m/m

Fonte: Dados da pesquisa.

4.3. Caracterização hidrológica da bacia

As séries de chuva e vazão foram elaboradas conforme a metodologia descrita no item 3.3. Para cada uma das séries geradas foram construídos os gráficos de frequência das variáveis hidrológicas e testados os modelos de probabilidade.

Os resultados estão dispostos a seguir:

- Precipitação

A partir das séries de chuvas máximas diárias e de totais precipitados das estações pluviométricas (anexos A e B), foram testados diferentes modelos de probabilidade e construídos seus respectivos gráficos de frequência para cada uma das estações.

Chuvas máximas da estação pluviométrica Bicas:

Para a série anual de chuvas máximas diárias da estação pluviométrica de Bicas foram testados os modelos Gumbel, Gumbel–Chow e Log–Normal, como ilustrado nas Figuras 4.7 e 4.8.

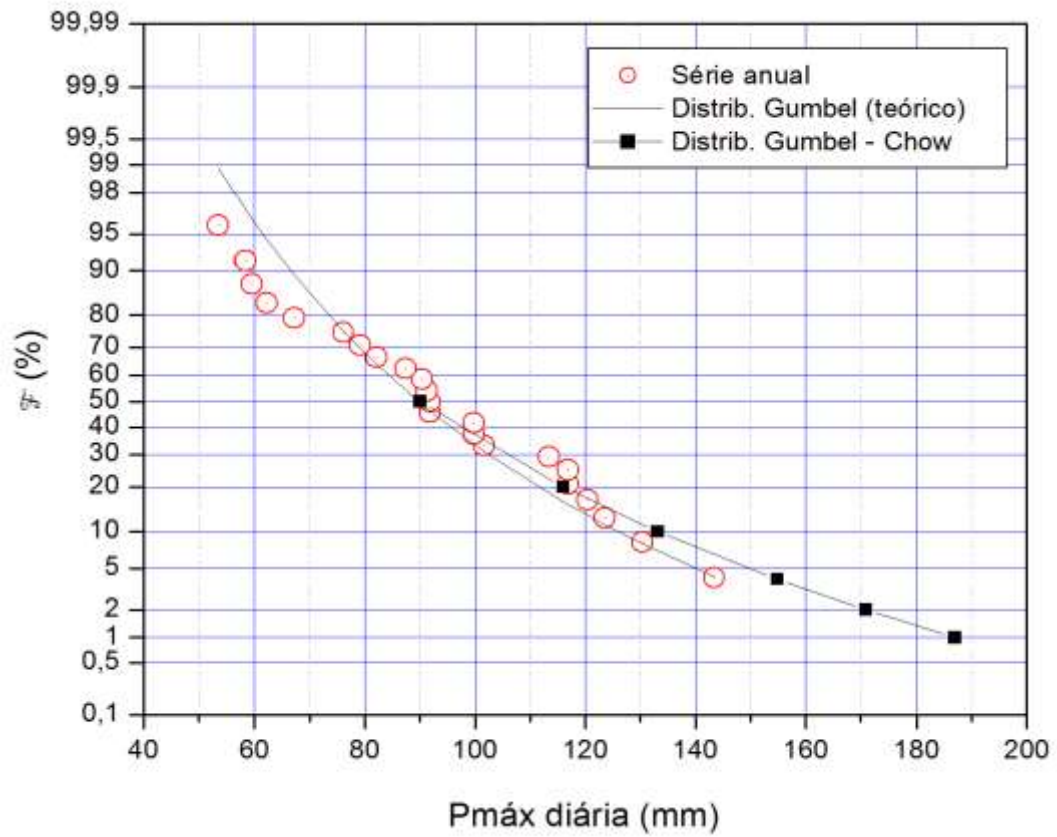


Figura 4.7 - Chuvas máximas da estação Bicas: Distribuição Gumbel (teórico) e Gumbel-Chow.
Fonte: Dados da pesquisa.

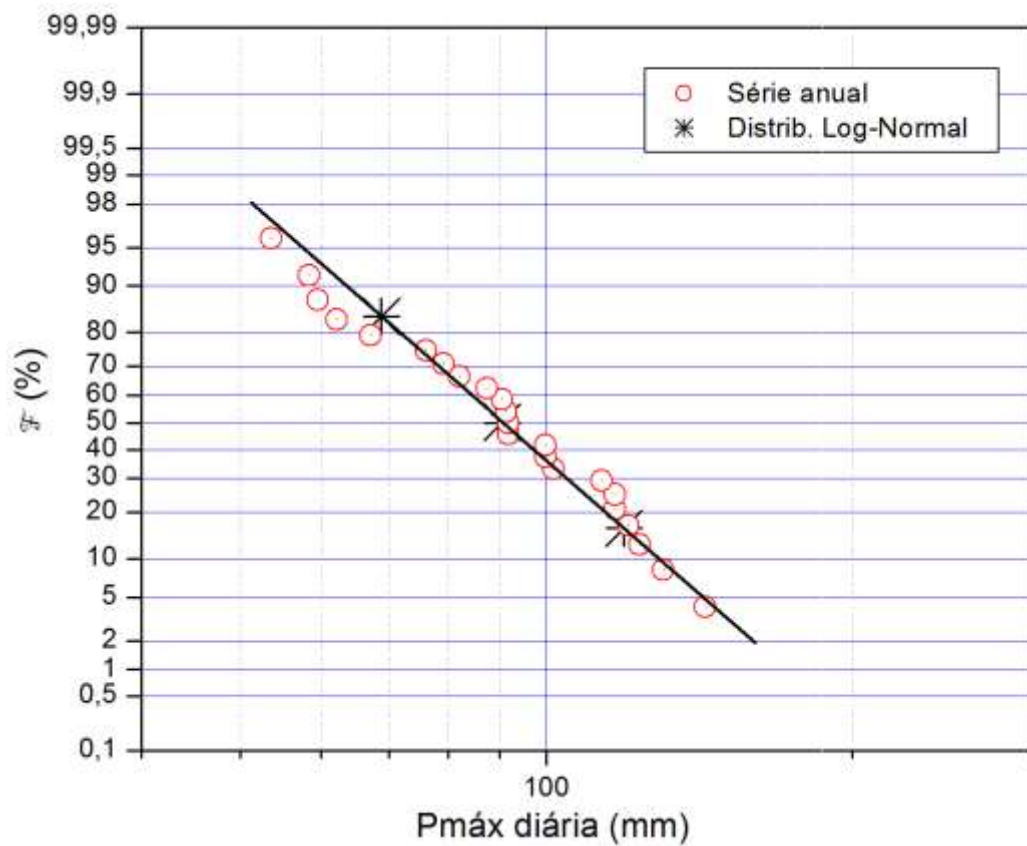


Figura 4.8 - Chuvas máximas da estação Bicas: Distribuição Log-Normal.
Fonte: Dados da pesquisa.

Da observação da Figura 4.7 pode-se constatar que a distribuição Gumbel teve um bom ajuste para as precipitações máximas maiores que 120 mm, porém quando analisadas as precipitações menores que 70 mm notam-se grandes desvios entre os valores previstos e os da série. A construção gráfica da Figura 4.7 permite, ainda, concluir que os ajustes pela distribuição Gumbel–Chow afastam-se bastantes dos dados da série anual apresentada.

Já na Figura 4.8 nota-se que a distribuição Log–Normal, representada no papel logarítmico de probabilidade, apresentou um bom ajuste, observando-se somente um pequeno desvio em relação às precipitações com menores valores. Sendo assim, ao comparar os três modelos, pode-se concluir que a distribuição Log–Normal é a mais adequada para a extrapolação das chuvas máximas da estação de Bicas.

Chuvas totais anuais da estação pluviométrica Bicas:

Para a série de chuvas totais anuais da estação pluviométrica de Bicas foi testado apenas o modelo de distribuição Normal (Figura 4.9).

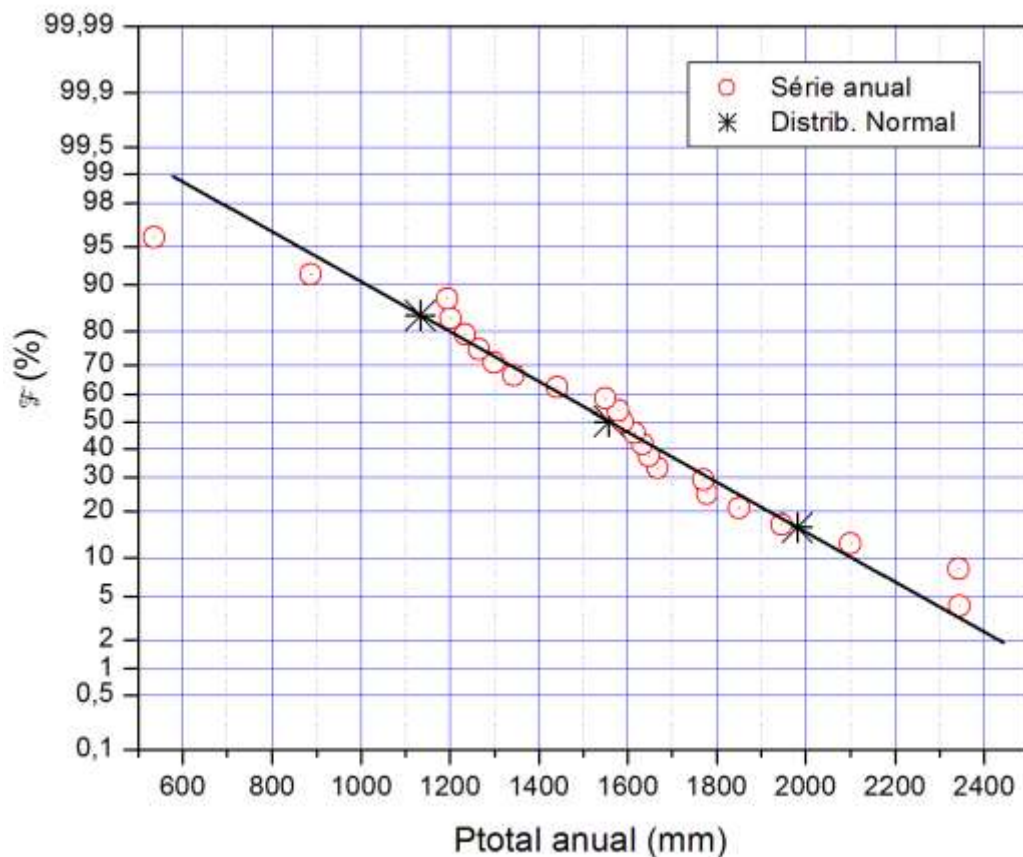


Figura 4.9 – Chuvas totais da estação Bicas: Distribuição Normal.

Fonte: Dados da pesquisa.

A distribuição Normal é representada na Figura 4.9 na forma de uma linha reta, pois as frequências estão lançadas em escala de probabilidade. Conforme a figura, os pontos apresentam uma razoável aderência à reta, sugerindo que as chuvas totais anuais na estação Bicas são adequadamente previstas pelo modelo de probabilidade Normal.

Chuvas máximas da estação pluviométrica Fazenda Ocidente:

Para a série de chuvas máximas diárias da estação pluviométrica Fazenda Ocidente foram avaliados os modelos Gumbel, Gumbel–Chow e Log–Normal. Os resultados são representados nas Figuras 4.10, para as distribuições Gumbel e Gumbel-Chow, e 4.11, para a distribuição Log-Normal.

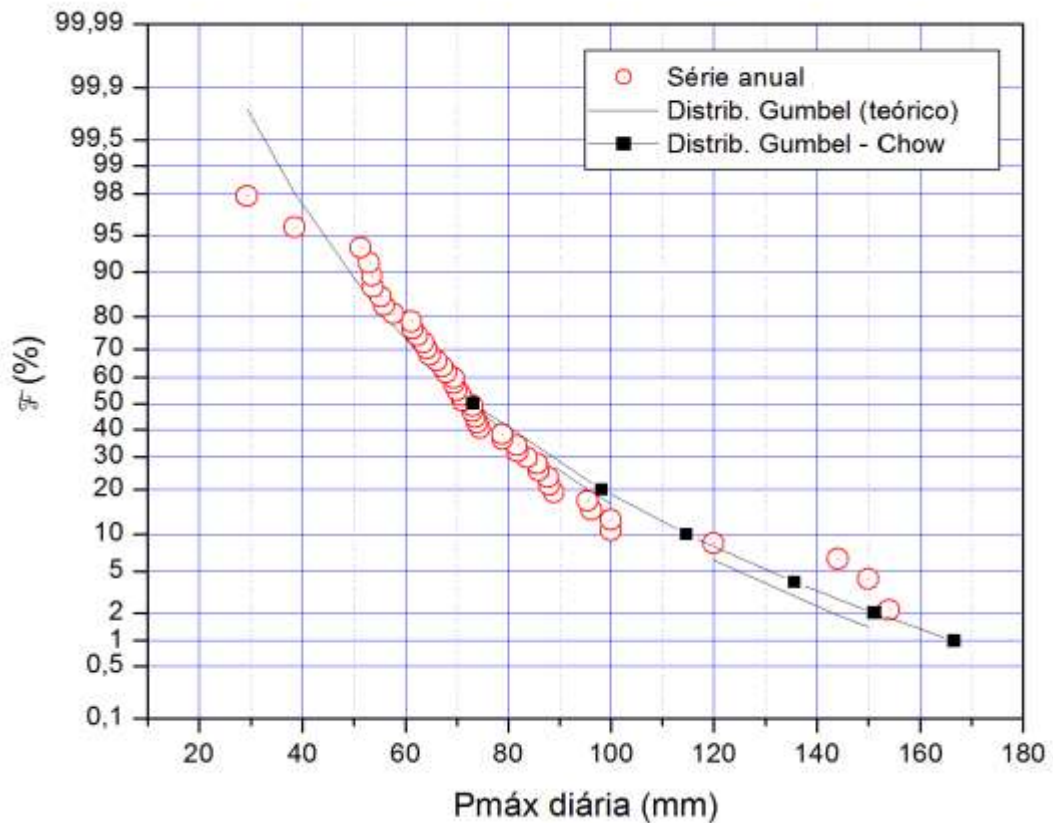


Figura 4.10 – Chuvas máximas da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Gumbel (teórico) e Gumbel–Chow.
Fonte: Dados da pesquisa.

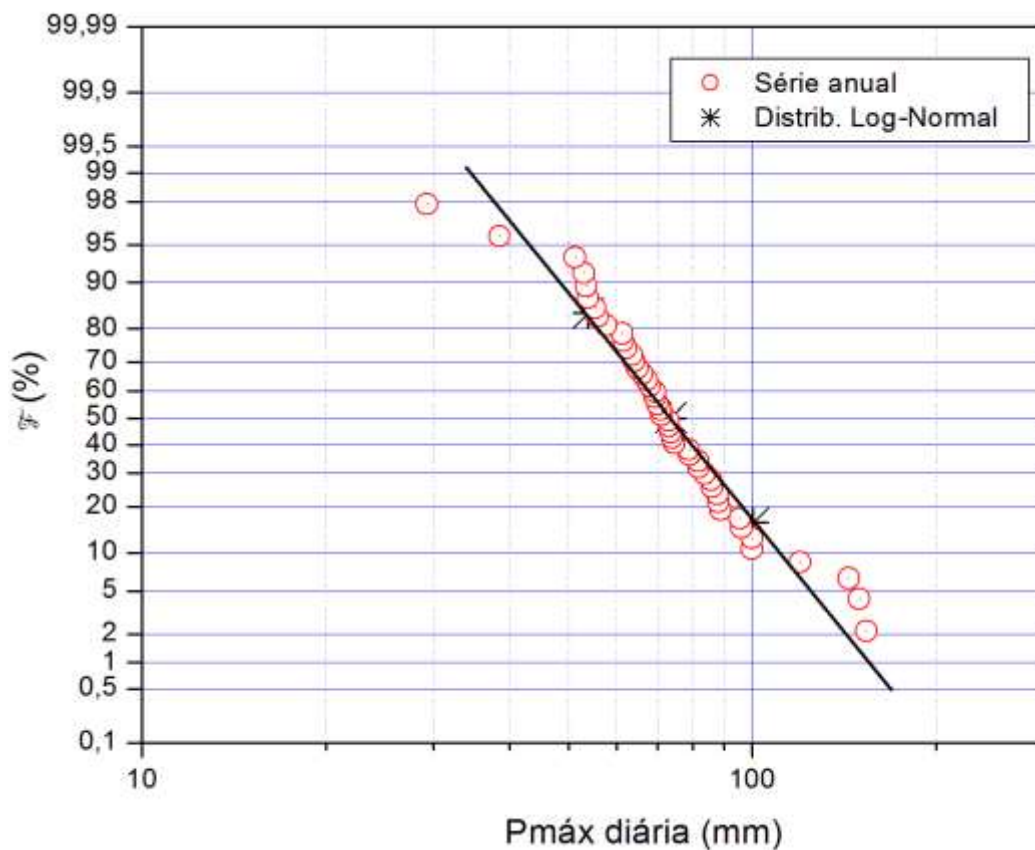


Figura 4.11 - Chuvas máximas da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log-Normal.
Fonte: Dados da pesquisa.

Os modelos Gumbel (Figura 4.10) e Log-Normal (Figura 4.11) apresentaram comportamentos semelhantes: ambos produziram um bom ajuste para os valores médios da série, porém não produziram boa aderência para os maiores e menores valores das chuvas. Já a distribuição Gumbel-Chow não atingiu uma boa aproximação com os dados da série anual.

Por conseguinte, pode-se considerar que as distribuições Gumbel e Log-Normal foram as mais adequadas para a análise e extrapolação das chuvas máximas da estação Fazenda Ocidente.

Chuvas totais da estação pluviométrica Fazenda Ocidente:

Na série de chuvas totais da estação pluviométrica Fazenda Ocidente foi testado apenas a distribuição Normal, ilustrada na Figura 4.12.

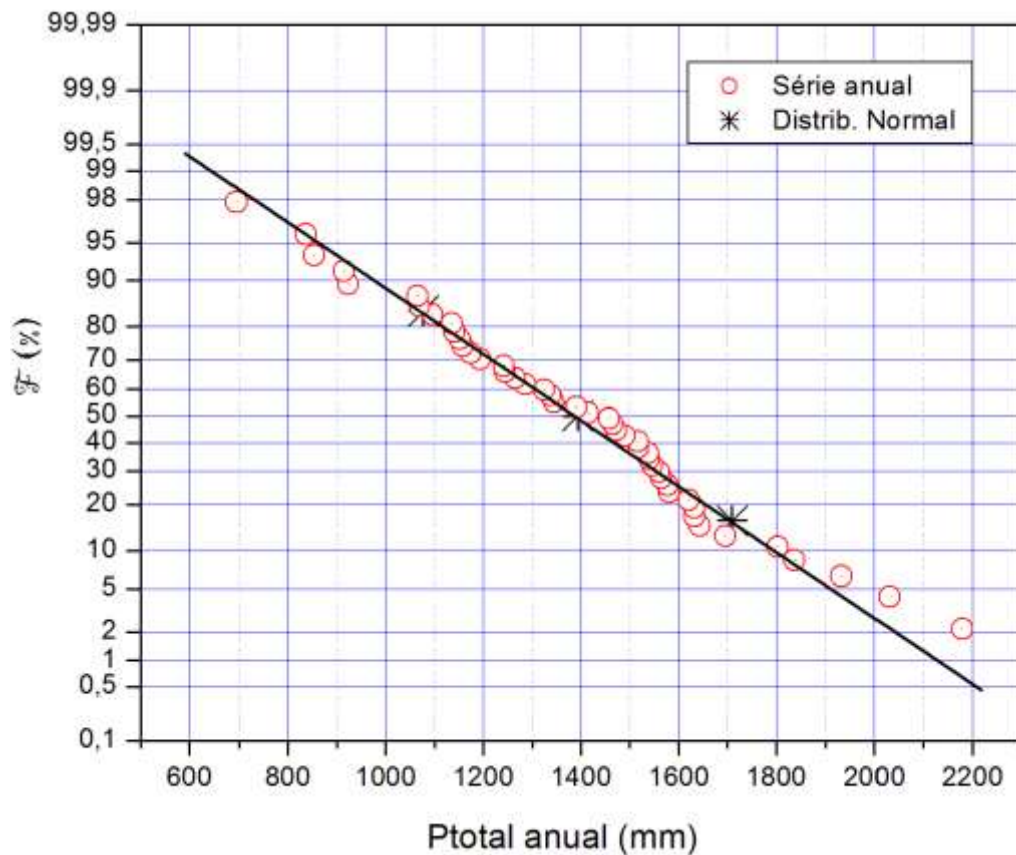


Figura 4. 12 - Chuvas totais da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Normal.
Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 4.12 mostra que o modelo de distribuição Normal apresentou um bom ajuste para os valores mínimos e médios dos dados de chuvas totais, havendo apenas um desvio no caso dos valores maiores que 1900 mm.

- Vazão

As séries anuais de vazões máximas, mínimas e da Q_7 , encontradas nos anexos C e D, passaram pelo mesmo processo realizado nos dados de precipitação. Os gráficos estão dispostos a seguir:

Vazões máximas da estação fluviométrica Fazenda Ocidente:

Para a série de vazões máximas da estação fluviométrica Fazenda Ocidente, foram testados os modelos Gumbel, Gumbel–Chow e Log-Normal, ilustrados nas Figuras 4.13 e 4.14.

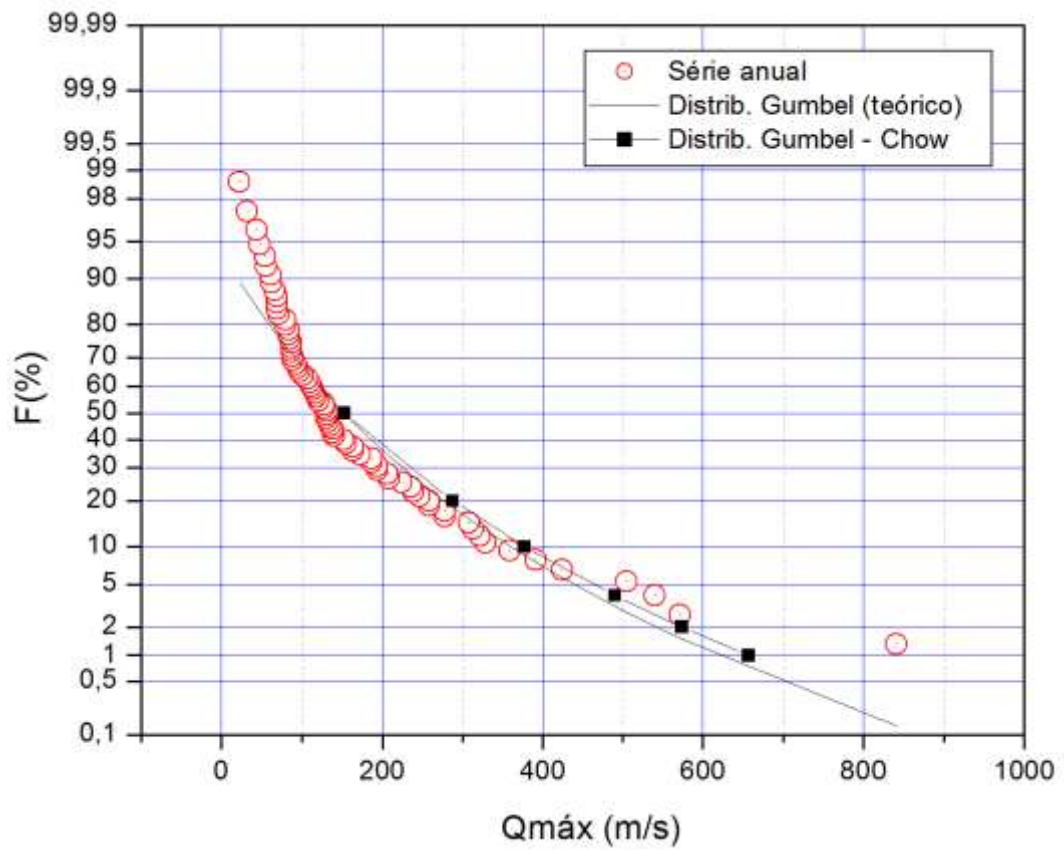


Figura 4.13 – Vazão máxima da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Gumbel (teórico) e Gumbel–Chow.
Fonte: Dados da pesquisa.

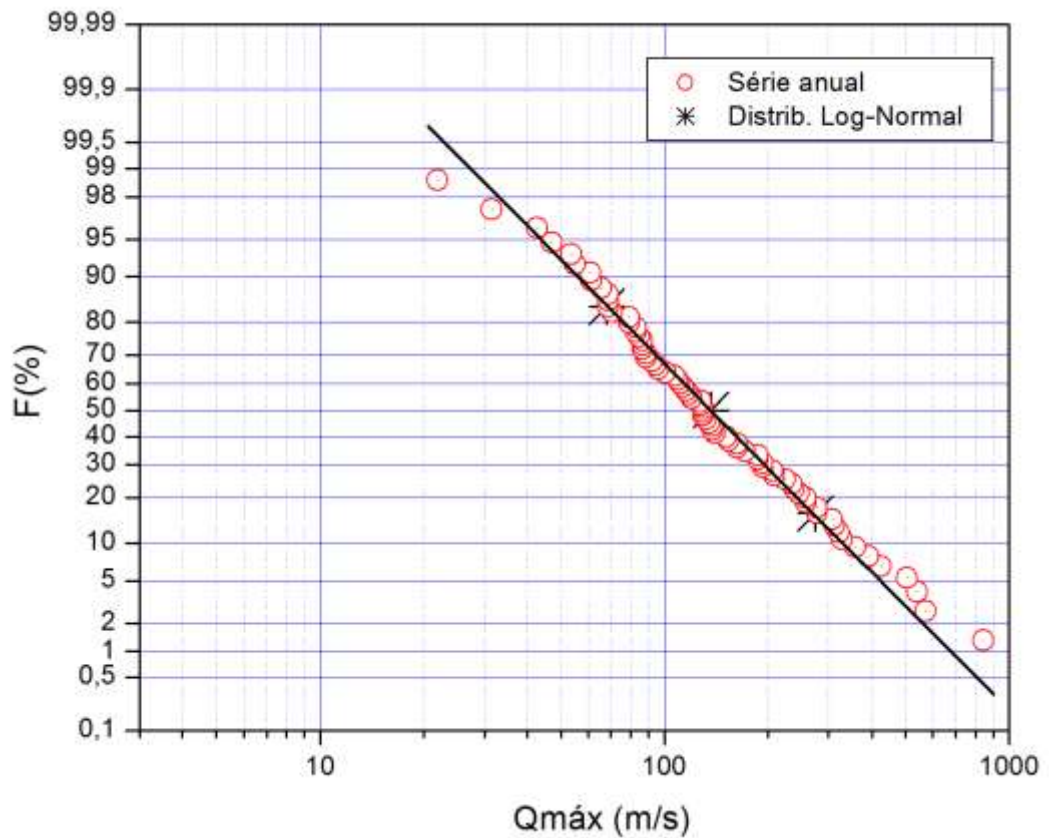


Figura 4.14 - Vazão máxima da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log - Normal.
Fonte: Dados da pesquisa.

Os modelos Gumbel e Gumbel–Chow (Figura 4.13) apresentaram um ajuste razoável para os valores médios da série, porém não foram capazes de produzir uma boa previsão para os maiores e, principalmente, menores valores da série. Já o modelo Log–Normal (Figura 4.14) produziu uma boa aderência à série de dados de vazões máximas na estação Fazenda Ocidente.

Uma vez determinado o modelo com maior ajuste foi possível encontrar os valores de vazão máxima para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos: $Q_{\text{máx}10} = 342,7 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{máx}20} = 448 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{máx}50} = 571,9 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{máx}100} = 698,6 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{\text{máx}500} = 1019,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vazão mínima da estação fluviométrica Fazenda Ocidente:

Para a série de vazões mínimas da estação fluviométrica Fazenda Ocidente, foram testadas as distribuições Log–Normal e Log–Gumbel, conforme ilustrado na Figura 4.15.

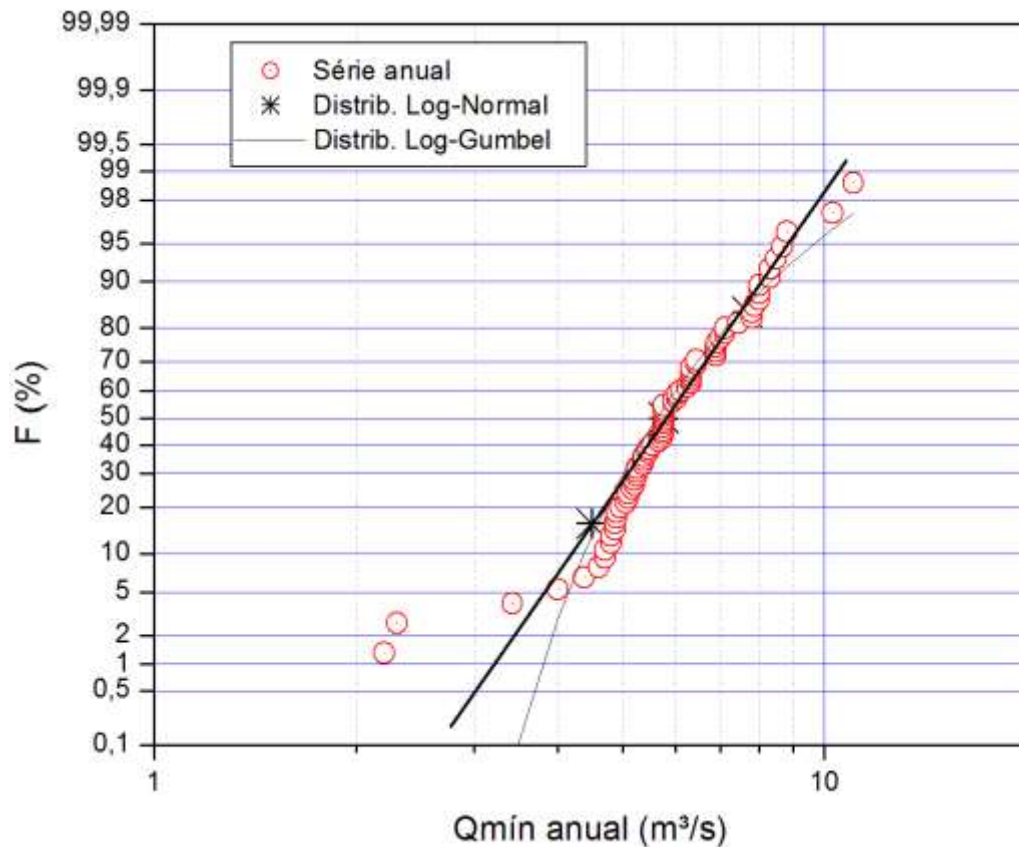


Figura 4.15 - Vazão mínima da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log-Normal e Log-Gumbel.

Fonte: Dados da pesquisa.

As distribuições Log–Normal e Log–Gumbel apresentaram comportamentos similares em relação à massa média de dados da série, porém a primeira produziu um melhor ajuste para os maiores valores de vazão mínima. Dessa forma, para fins de extrapolação dos dados históricos

de vazões mínimas na Fazenda Ocidente, pode-se considerar que a distribuição Log–Normal é superior à Log-Gumbel.

Vazão Q_7 da estação fluviométrica Fazenda Ocidente:

Para a série de vazões mínimas médias de sete dias de duração, Q_7 , da estação fluviométrica Fazenda Ocidente, foram testados os modelos de distribuição Gumbel e Pearson Tipo III, representados na Figura 4.16, e os modelos Log–Normal, Log–Gumbel e Log–Pearson, representados na Figura 4.17.

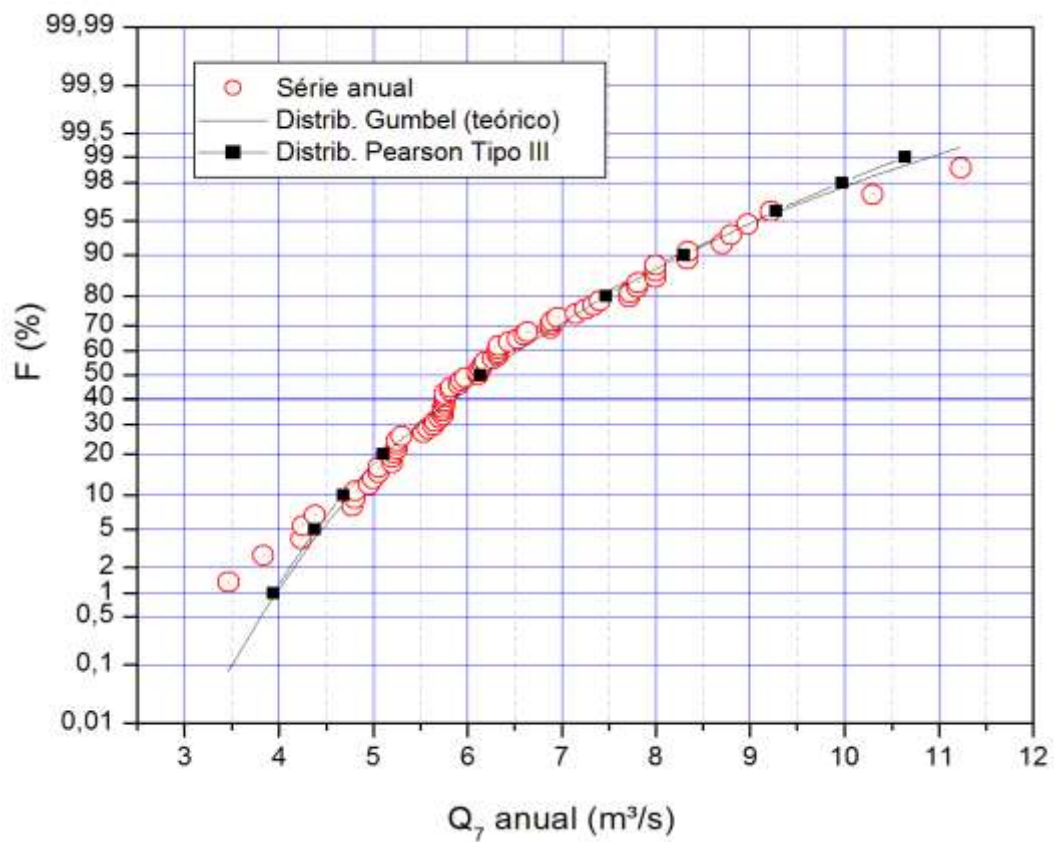


Figura 4.16 - Vazão Q_7 da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Gumbel (teórico) e Pearson Tipo III.
Fonte: Dados da pesquisa.

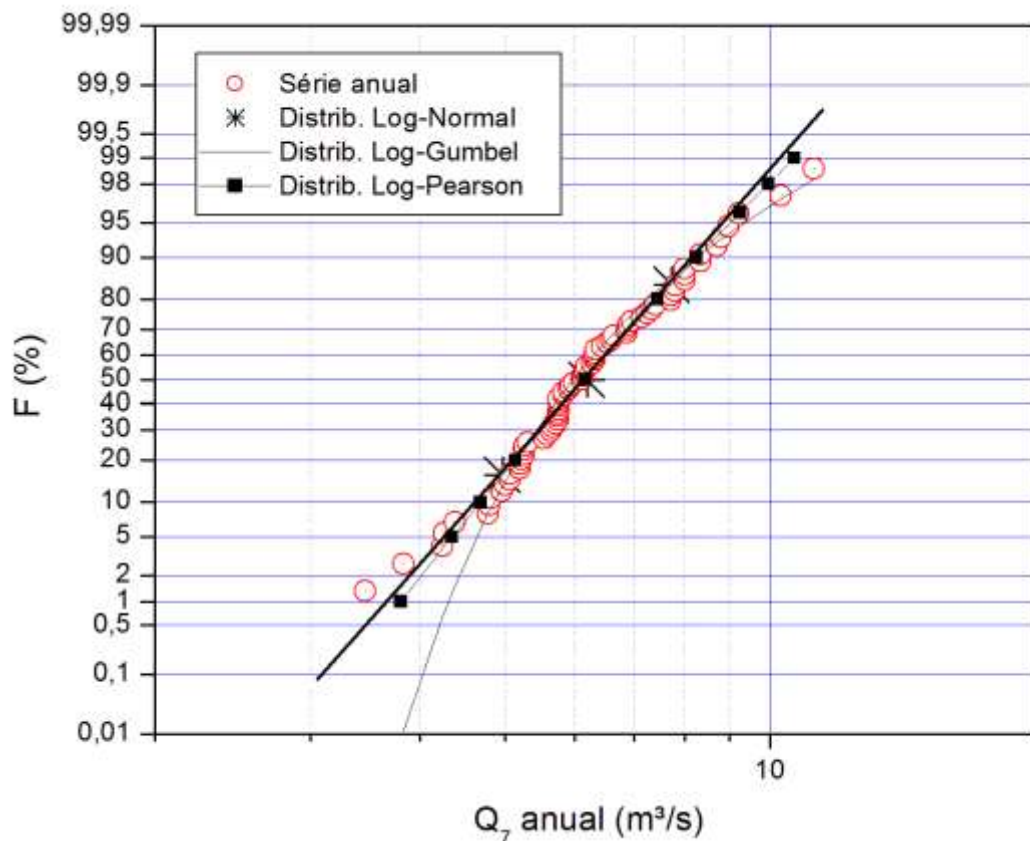


Figura 4.17 - Vazão Q_7 da estação Fazenda Ocidente: Distribuição Log–Normal, Log–Gumbel e Log–Pearson.
Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 4.16 observa-se que a distribuição Pearson Tipo III e a distribuição Gumbel tiveram um comportamento semelhante. Ambas seguem bem o comportamento dos dados de vazão, tendo um distanciamento apenas em relação aos baixos valores de Q_7 (menores que $4 \text{ m}^3/\text{s}$).

Analisando a Figura 4.17, nota-se que a distribuição Log–Gumbel apresentou um bom ajuste para os valores médios e máximos de Q_7 , porém quando analisados os dados mínimos observa-se um grande desvio. Já as distribuições Log–Normal e Log–Pearson apresentaram um comportamento muito similar, produzindo um bom ajuste para os valores medianos e pequenos desvios nos valores extremos de Q_7 .

Dessa forma, conclui-se que nenhum dos modelos testados se mostrou suficientemente capaz de representar adequadamente o comportamento das frequências das vazões Q_7 da Fazenda Ocidente. Os melhores ajustes foram produzidos com as distribuições Pearson Tipo III e a Gumbel.

A partir do ajuste desses modelos foi possível encontrar o valor da vazão mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos: $Q_{7,10}$ (Gumbel) = 4,67 m³/s e $Q_{7,10}$ (Pearson Tipo III) = 4,76 m³/s.

- Vazão de permanência

Para a construção da curva de permanência das vazões da estação Fazenda Ocidente foram utilizadas todas as vazões médias mensais do período de 74 anos de observação (de 1939 a 2014). Estas vazões foram classificadas em ordem decrescente e distribuídas em intervalos de classe, gerando um total de 884 observações. Em seguida cada intervalo de classe foi dividido pelo número total de observações e multiplicado por 100, estabelecendo assim a probabilidade de ocorrerem vazões iguais ou maiores a determinada vazão. A curva de permanência segue demonstrada na Figura 4.18 e a Tabela das vazões médias mensais segue no anexo E.

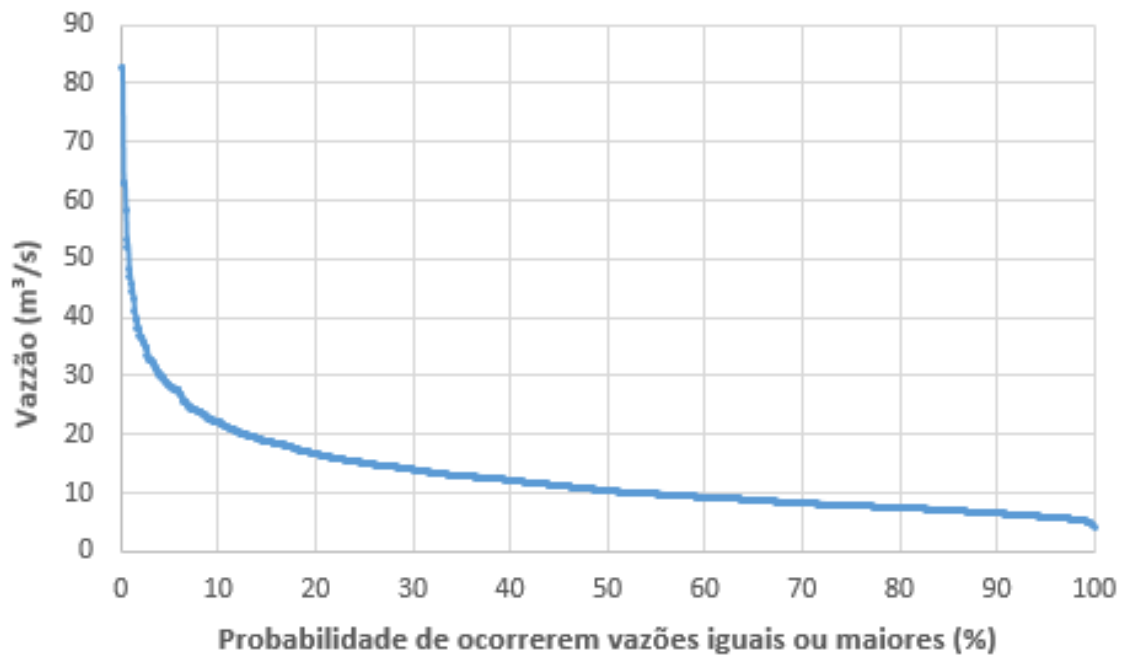


Figura 4.18 – Curva de permanência de vazão da estação Fazenda Ocidente.

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da curva de permanência foram encontrados os valores das vazões de 50%, 65%, 75%, 85% e 95% de permanência, sendo eles respectivamente iguais a 10,39 m³/s, 8,76 m³/s, 7,83 m³/s, 7,00 m³/s e 5,91 m³/s.

Com base na mesma série de dados utilizada para a construção da curva de permanência foi possível determinar a vazão média de longo período (Q_{mlp}) a partir da média das vazões médias anuais: $Q_{mlp} = 12,92$ m³/s.

- Comparação entre os dados encontrados e os dados do Atlas Digital das Águas de Minas

A fim de avaliar a viabilidade dos modelos utilizados no Atlas Digital foi realizada uma comparação entre os dados obtidos nesse trabalho e os dados disponibilizados na plataforma.

O primeiro parâmetro analisado foi a vazão máxima para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos. Os dados do Atlas Digital foram obtidos de duas formas:

1º) A partir do Banco de dados – Consulta espacial - Informações em qualquer seção fluvial, onde foram encontrados os valores de vazão nas coordenadas da estação Fazenda Ocidente (Latitude: -20,27, Longitude: 43,10), como observado na Figura 4.19.

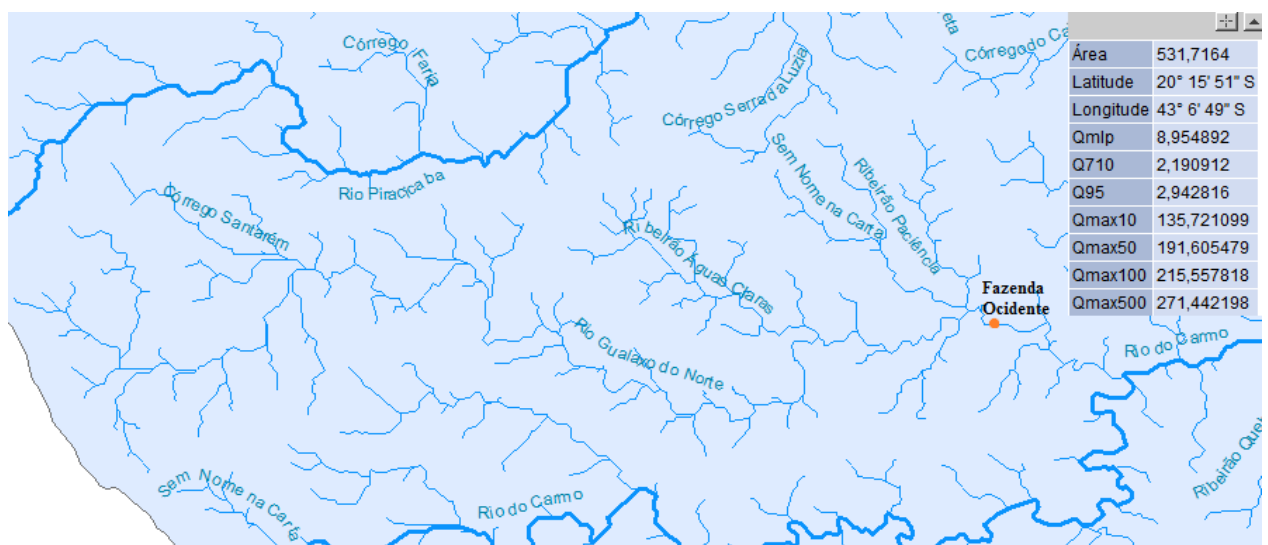


Figura 4.19 – Vazões nas coordenadas da estação Fazenda Ocidente.

Fonte: Atlas Digital da Águas de Minas - Informações em qualquer seção fluvial.

2º) A partir do Banco de dados – Consulta espacial – Modelos ajustados por curso d'água, onde foram encontradas as fórmulas utilizadas para determinar as vazões nas coordenadas da estação Fazenda Ocidente, como observado na Figura 4.20. Optou-se por avaliar as fórmulas a fim de verificar se os valores obtidos através delas correspondem aos mesmo observados na Figura 4.19, e foi observado coerência entre os valores.

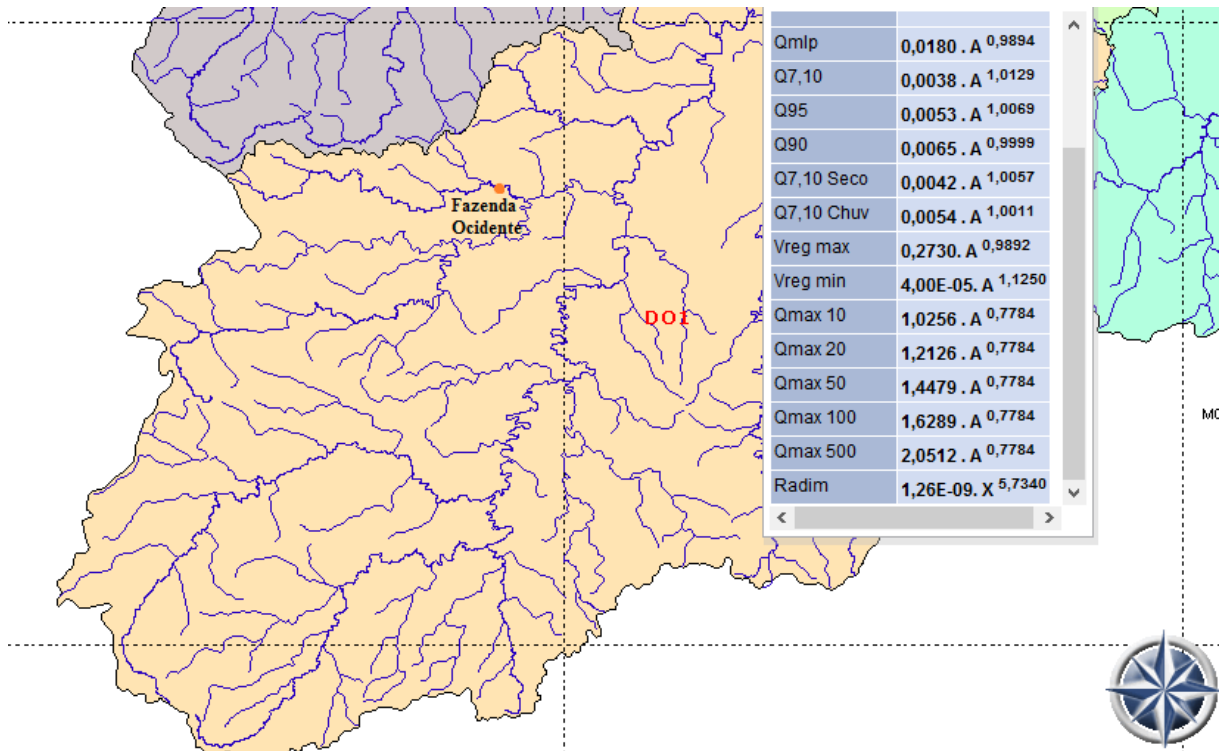


Figura 4.20 – Fórmulas para determinação de vazão nas coordenadas da estação Fazenda Ocidente.

Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas - Modelos ajustados por curso d'água.

A Tabela 4.5 mostra uma comparação entre os dados encontrados no estudo e os disponibilizados pela plataforma do Atlas Digital.

Tabela 4.5 – Comparação dos valores de vazão encontrados no trabalho e do Atlas Digital.

(m ³ /s)	Q _{mlp}	Q _{7,10}	Q ₉₅	Q _{máx10}	Q _{máx20}	Q _{máx50}	Q _{máx100}	Q _{máx500}
Atlas Digital	8,95	2,19	2,94	135,58	160,30	191,40	215,33	271,16
Trabalho	12,92	4,76	5,91	342,7	448	571,9	698,6	1019,5

Fonte: Dados da pesquisa e Atlas Digital (2017).

A partir da Tabela 4.5 é possível notar que há uma grande diferença entre os valores obtidos e os disponibilizados pelo Atlas Digital, principalmente quando analisadas as vazões máximas de diferentes tempos de recorrência. Observa-se que os valores encontrados são muito maiores do que os esperados de acordo com a metodologia, principalmente para a vazão máxima com período de retorno de 500 anos. Isso mostra que o modelo não é tão confiável para extrapolação de valores.

No caso dos valores Q_{mlp}, Q_{7,10} e Q_{95%} também é observado uma diferença razoável entre os valores calculados no estudo e os valores disponibilizados pela plataforma.

Uma provável justificativa para essa diferença de valores é a metodologia utilizada pelo Atlas, que consiste num modelo de regionalização de vazão a partir de regiões hidrologicamente homogêneas, onde são determinadas fórmulas gerais para todos os cursos d'água pertencentes aquela região específica. Nessas fórmulas, como pode ser observado na Figura 4.20, a única variável a ser considerada é a área de drenagem do ponto escolhido. Esse fato também pode interferir nos resultados, uma vez que são desconsiderados outros parâmetros importantes como declividade do curso d'água, pluviosidade local, entre outros.

É válido dizer que foram encontrados valores diferente para as vazões de Q_{mlp} , $Q_{7,10}$ e $Q_{95\%}$ quando acessado o Banco de dados do Atlas Digital – Consulta Informativa – Índice de vazões mínimas, como pode ser observado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Tabela de dados de vazão para as estações fluviométricas da Região I segundo o Atlas Digital.

Sub-bacia	Rio	Área	Vazão(m ³ /s)		
			Q_{mlp}	$Q_{7,10}$	Q_{95}
Região I					
Piranga	Piranga	1395	23,90	5,40	6,80
Braz Pires	Xopoto	1089	18,90	5,30	6,90
Senador Firmino	Turvo	291	5,50	1,30	-
Porto Firme	Piranga	4251	71,70	21,30	27,50
Fazenda Varginha	Turvo Limpo	324	4,00	1,50	1,70
Ponte Nova-Jusante (Pcd Inpe)	Piranga	6132	100,80	27,80	37,90
Fazenda Paraíso	Gualaxo do Sul	857	18,70	4,90	7,80
Acaiaca-Jusante	Carmo	1371	30,70	11,50	13,90
Fazenda Ocidente	Gualaxo do Norte	531	12,60	4,80	5,60
Sao Miguel do Anta	Casca	534	8,10	2,40	2,90
Rio Casca	Casca	2036	25,50	6,00	9,40
Fazenda Cachoeira D'antas	Doce	10080	167,10	53,20	72,70
Matipó	Matipó	615	10,00	1,60	2,40
Raul Soares-Montante	Matipó	1347	19,60	2,90	4,60
Abre Campo	Santana	272	3,90	0,80	1,30
Inst.Florestal Raul Soares	Matipó	1800	24,70	4,40	15,90
Cachoeira dos Oculos-Montante	Doce	15836	228,10	80,80	92,10
Bom Jesus do Galho	Sacramento	301	3,40	1,00	1,40
Pingo D'agua	Sacramento	814	10,20	2,00	2,60
Rio Piracicaba	Piracicaba	1163	25,50	5,30	-
Carrapato (Brumal)	Santa Bárbara	420	12,50	2,90	3,80
Mario de Carvalho (Pcd Inpe)	Piracicaba	5060	93,00	25,00	31,20
Cachoeira Escura	Doce	24204	389,40	113,50	124,40

Fonte: Adaptado do Atlas Digital das Águas de Minas – Índice de vazões mínimas.

De acordo com o descrito nessa página o procedimento utilizado na construção dessa tabela consistiu na utilização dos dados hidrológicos das estações (sub-bacias) localizadas na bacia do rio Doce, onde foram construídas séries históricas de cada estação fluviométrica, metodologia similar a utilizada nesse trabalho.

Comparando os valores descritos na Tabela 4.6 e os encontrados no trabalho ($Q_{mlp} = 12,92 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{7,10(\text{Gumbel})} = 4,67 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{7,10(\text{Pearson Tipo III})} = 4,76 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{95\%} = 5,91 \text{ m}^3/\text{s}$) foi possível observar uma maior concordância entre os valores, o que indica que os dados apresentados nesse documento estão corretos.

CONCLUSÃO

Neste trabalho é descrita a bacia do rio do Gualaxo do Norte, sendo caracterizado o seu relevo e quantificados diversos parâmetros de natureza física que influenciam as variáveis hidrológicas chuva e vazão, que também são caracterizadas neste estudo a partir de uma análise estatística dos dados da região.

Da análise física, conclui-se que a bacia é bem drenada (densidade de drenagem igual a 2,57 km⁻¹ e ordem dos cursos d'água igual a 5) e possui pouca propensão à ocorrência de enchentes na sua parte baixa, por ocasião de chuvas intensas (k_c igual a 1,89 e k_f igual a 0,0849). A área de drenagem da bacia é 532 km² e o comprimento do curso d'água principal é de 79,1 km. Sendo o valor de área encontrado razoavelmente próximo do determinado pelo Atlas Digital (566 km²).

Dentre as características do relevo conclui-se que 50% da área da bacia se encontra acima da cota de 710 m (Z_{med} retirada da curva hipsométrica) e que as declividades do curso d'água principal S_{10-85} , S_2 e S_3 são respectivamente iguais a 0,00556 m/m, 0,00468 m/m e 0,00456 m/m, isto é, a declividade do curso d'água principal é de aproximadamente igual a 5m/km.

Em relação à análise hidrológica, foram processados os dados de 2 estações pluviométricas (Bicas e Fazenda Ocidente) e 1 estação fluviométricas (Fazenda Ocidente). Considerando-se as estações pluviométricas, foram construídas séries dos totais anuais precipitados e das máximas diárias; já para a estação fluviométrica, construíram-se as séries anuais de vazões máximas, mínimas, médias mensais e mínimas de sete dias de estiagem (Q_7).

A partir de cada série foram testados diferentes modelos de probabilidade, concluindo-se pela superioridade do modelo Log-Normal em relação aos demais no caso das séries de chuvas máximas e das séries de vazões máximas e mínimas, enquanto os modelos Pearson Tipo III e Gumbel mostraram-se superiores no caso da série de vazões Q_7 .

Através dos dados de vazões máximas foram encontrados as vazões para diferentes períodos de retorno: $Q_{máx10} = 342,7$ m³/s, $Q_{máx20} = 448$ m³/s, $Q_{máx50} = 571,9$ m³/s, $Q_{máx100} = 698,6$ m³/s e $Q_{máx500} = 1019,5$ m³/s. Assim como no caso da vazão mínima de sete dias, onde foi possível determinar a vazão para o período de retorno de 10 anos para os modelos que mais se ajustaram a série anual, $Q_{7,10(\text{Gumbel})} = 4,67$ m³/s e $Q_{7,10(\text{Pearson Tipo III})} = 4,76$ m³/s, havendo apenas uma pequena variação entre os valores.

Também foi construída a curva de permanência de vazão da estação Fazenda Ocidente, da qual retiraram-se as vazões de permanência: $Q_{50\%} = 10,39 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{65\%} = 8,76 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{75\%} = 7,83 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{85\%} = 7,00 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{95\%} = 5,91 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir da mesma série de dados de vazões médias mensais foi determinada a vazão de média de longo período: $Q_{mlp} = 12,92 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os dados processados nas séries (anexos A e B) indicam que o maior total anual precipitado foi de 2344,1 mm, no ano de 1964, na estação de Bicas; e que a maior precipitação diária foi de 154 mm e ocorreu na estação Fazenda Ocidente no ano de 1982.

Os dados obtidos foram comparados com os dados disponibilizados pelo Atlas Digital das Águas de Minas, chegando a conclusão de que a utilização das fórmulas descritas pela metodologia da plataforma não se mostrou viável, uma vez que os valores por elas determinados apresentaram uma grande variação quando confrontados com os encontrados neste trabalho.

Espera-se que os resultados deste trabalho possam ser úteis a futuros trabalhos relacionados a bacia do Gualaxo do Norte e a projetos de recuperação, de uso e conservação dos recursos hídricos da bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. HidroWeb: Sistema de informações hidrológicas. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp> >. Acesso em: 29 fev. 2016.

ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E. S. P. R. Regionalização de vazões médias de longo período para o estado do Ceará. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 10 n. 3 Jul/Set 2005, 93-102. Disponível em: < https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/a7bbd0057fc5ab9daa43a733da4ba656_e6bcc1062f90d3146f685db5604e797.pdf >. Acesso em: 17 mai. 2016.

ARAÚJO, C. B. O. Caracterização física e Regionalização de vazão máxima na Bacia do Rio do Carmo, alto Rio Doce. 2008. 127p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2008. Disponível em: < <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp062587.pdf> >. Acesso em: 8 mai. 2016.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. Resultados. Disponível em: < http://www.atlasdasaguas.ufv.br/atlas_digital_das_aguas_de_minas_gerais.html >. Acesso em 25 jan. 2016.

BARBOSA, S. E. S.; et al. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2005, vol.10, n.1, pp.64. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522005000100008 >. Acesso em: 17 mai. 2016.

BARBOSA, A. R. 2015. Apostila de Hidrologia Aplicada – Bacia Hidrográfica. UFOP. Disponível em: < http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodrigues/12_Bacia%20hidrografica.pdf >. Acesso em: 07 mai. 2016.

BARBOSA, A. R. 2015. Apostila de Hidrologia Aplicada – Introdução. UFOP. Disponível em: < http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodrigues/11_introducao.pdf >. Acesso em: 07 mai. 2016.

BARBOSA, A. R. 2015. Apostila de Hidrologia Aplicada – Previsão de enchentes. UFOP. Disponível em: < http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodrigues/7_Previsao%20de%20Enchente.pdf >. Acesso em: 17 out. 2016.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre, RG: UFRGS, 2001. 943 p.

BRASIL. LEI FEDERAL Nº 9433, de 8 de janeiro de 1997 - Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília.

1997. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=370> >. Acesso em: 20 abr. 2016.

CEXBARRA. Comissão externa do rompimento de barragem na região de Mariana – MG: Relatório Final. Câmara dos Deputados. 2016. Disponível em: < http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1472309&filename=REL+3/2016+CEXBARRA >. Acesso em: 22 out. 2016.

CAMPOS, E. N. Análise de dados fluviométricos, construção de séries e regionalização de vazões da bacia do rio do Carmo (MG). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – MG. 2002.

CASTRO, A. L. C. Glossário de defesa civil: estudos de riscos e medicina de desastres. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa. Brasília – DF, 2008, 5. ed., 191p. Disponível em: < http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=71458606-5f48-462e-8f03-4f61de3cd55f&groupId=10157 >. Acesso em: 22 out. 2016.

COSTA, A. T. Geoquímica das águas e dos sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, leste – sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG): Estudo de uma área afetada por atividade de extração mineral. 2001. 146p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2001.

CPRM, 1993. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Levantamentos geológicos básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Org. por Orivaldo Ferreira Baltazar e Frederico Ozanam Raposo. Brasília, DNPM/CPRM. 196p.

CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R. Hidrologia subterrânea. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1976. vol 2. 1157p.

ENDO I. 1988. Análise estrutural qualitativa do minério de ferro e encaixantes da Mina de Timbopéba – borda leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana, MG. Universidade Federal da Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 130f.

FAUSTINO, J. Planificación y gestión de manejo de cuencas. Turrialba, CATIE, 1996. 90 p.

FELGUEIRAS, C. A. Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores. São José dos Campos: INPE, 1987. 243p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1987.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem Numérica de Terreno. 2004. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf> >. Acesso: 11 mai. 2016.

FERREIRA, C.C.M. Zoneamento agroclimático para implantação de sistemas agroflorestais com eucaliptos, em Minas Gerais. 1997. 158p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1997.

GARBRECHT; MARTZ, 1999 apud CARDOSO et al., 2006. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622006000200011&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 07 mai. 2016.

GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M. Hidrologia de águas superficiais. Brasília: ABEAS, 1998. 122 p.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 337-339.

GUIMARÃES, R. C. Probabilidade e estatística Aplicada à hidrologia. 2011. Disponível em: <<https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4729/1/Probabilidade%20e%20Estat%C3%A0Dstica%20aplicada%20C3%A0%20Hidrologia.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2016.

IBAMA; DIPRO; CGEMA. Laudo técnico preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. 2015. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf>. Acesso em: 22 out. 2016.

IBGE. Cartas Planialtimétricas. Disponível em: < <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/cartas.html> >. Acesso em: 25 jan. 2016.

INPE. Catálogo de Imagens. Disponível em: < <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> >. Acesso em: 29 fev. 2016.

KÖEPPEN W. Climatologia. México, Ed. Fundo de Cultura Econômica. 1948.

LIMA, W. P. Princípios de manejo de bacias hidrográficas. Piracicaba: ESALQ/USP. 143p. 1976.

LIMA, W.P. Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas. Piracicaba; ESALQ/USP, 1986, 242p.

MARBLE, D. F.; PEUQUET, D. J. 1983 apud SANTOS, A. R., 2001. Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo, micro-região de Viçosa, MG. 2001. 125p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2001. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/6191224-Alexandre-rosa-dos-santos-caraterizacao-morfologica-hidrologica-e-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-turvo-sujo-micro-regiao-de-vicosa-mg.html> >. Acesso em: 07 mai. 2016.

MENDES, C. A. B. Planejamento nacional de recursos hídricos baseado no uso de técnicas de geoprocessamento. Porto Alegre: [s.n]. 9p. 1997.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: < <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br> >. Acesso em: 25 jan. 2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 17 mai. 2016.

MOSCA, A.A.O. Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental de manejo de florestas plantadas. 2003. 96p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

RADAMBRASIL. Folhas SF 23/24, Rio de Janeiro/Vitória. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. 780p. 1983.

RODRIGUES, A. S. L. Caracterização da bacia do rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil: Avaliação geoquímica ambiental e proposição de valores de background. 2012. 190p. Tese (Doutorado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2012.

SANTANA, D.P. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p.

SOUZA, L.A.; SOBREIRA, F.G.; PRADO-FILHO, J.F. Cartografia e diagnóstico geoambiental aplicados ao ordenamento territorial do município de Mariana-MG. Revista Brasileira de Cartografia. 2005. Disponível em: < <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2087> >. Acesso em: 25 jan. 2016.

TEODORO, V. L.; et al. O conceito da bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. Revista Uniara. n. 20, 2007. Disponível em: < http://www.uniara.com.br/legado/revistauniara/pdf/20/RevUniara20_11.pdf >. Acesso em: 12 mai. 2016.

TONELLO, K. C. Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG. 2005. 69p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005. Disponível em: < <http://www.ipef.br/servicos/teses/arquivos/tonello,kc-m.pdf> >. Acesso em: 08 mai. 2016.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre, RG: UFRGS, 2007. 943 p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. 1975, Hidrologia Aplicada. Editora Mc Graw Hill, São Paulo 245p.

ANEXOS

ANEXO A: Série dos totais anuais precipitados e das máximas diárias na estação pluviométrica Fazenda Ocidente (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12).

Séries dos totais anuais precipitados e das máximas diárias na estação pluviométrica: FAZENDA OCIDENTE – Código: 2043027					
Ano	Máxima diária (mm)	Total anual (mm)	Ano	Máxima diária (mm)	Total anual (mm)
1968	24,0 *	201,3 *	1992	78,8	1933,2
1969	81,8	1134,0	1993	38,5	915,2
1970	81,7	1516,4	1994	78,9	1565,0
1971	83,7	1324,9	1996	71,1	1539,9
1972	62,3	1560,7	1997	95,5	1490,5
1973	85,6	1632,5	1998	63,5	1119,8
1974	64,1	1337,4	1999	95,7	1836,5
1975	70,8	1458,1	2000	87,7	2030,8
1976	73,6	1580,4	2001	64,8	1158,5
1977	55,8	835,7	2002	88,9	1696,0
1978	120,0	1389,8	2003	73,1	1152,2
1979	100,0	2178,9	2004	144,1	1803,0
1980	70,0	1244,0	2005	55,3	1472,3
1981	100,0	1517,6	2006	61,5	1287,1
1982	154,0	1621,3	2007	57,7	1064,8
1983	68,0	1837,4	2008	67,2	1536,9
1984	73,0	1126,4	2009	61,2	1643,5
1985	53,0	1093,9	2010	66,1	1242,3
1986	10,6 *	231,2 *	2011	74,5	1344,6
1987	150,0	923,8	2012	88,1	1140,8
1988	69,4	1069,5	2013	96,2	1546,3
1989	51,3	1465,7	2014	69,4	854,0
1990	29,3	695,5	2015	74,0	1174,0
1991	53,5	1622,5			
		*	Dado desconsiderado		
			Período com falhas		

ANEXO B: Série dos totais anuais precipitados e das máximas diárias na estação pluviométrica Bicas (Figuras 4.7, 4.8 e 4.9).

Séries dos totais anuais precipitados e das máximas diárias na estação pluviométrica: BICAS – Código: 2043028					
Ano	Máxima diária (mm)	Total anual (mm)	Ano	Máxima diária (mm)	Total anual (mm)
1942	93,6 *	1507,8 *	1954	59,6	886,4
1943	91,8	1650,0	1955	130,4	1615,8
1944	90,4	1441,4	1956	87,4	1265,9
1945	123,6	2342,1	1957	91,8	2101,2
1946	67,2	1589,8	1958	79,2	1344,0
1947	101,6	1778,3	1959	116,8	1193,6
1948	143,4	1578,2	1960	116,8	1770,2
1949	58,4	1647,6	1961	91,2	1201,1
1950	53,6	1234,1	1962	99,8	1945,5
1951	120,4	1298,7	1963	76,1	535,8
1952	99,8	1495,7	1964	82,1	2344,1
1953	113,4	1549,7	1965	62,2	1805,1
		*	Dado desconsiderado		
			Período com falhas		

**ANEXO C: Série anuais de vazões máximas e mínimas na estação fluviométrica
Fazenda Ocidente (Figuras 4.13, 4.14 e 4.15).**

Séries anuais de vazões máximas e mínimas na estação fluviométrica: FAZENDA OCIDENTE – Código: 56337000					
Ano	Máxima (m³/s)	Mínima (m³/s)	Ano	Máxima (m³/s)	Mínima (m³/s)
1939	55,2	5,0	1976	82,8	2,2
1940	127,6	6,1	1977	86,5	5,9
1941	278,0	8,3	1978	130,0	5,7
1942	94,4	11,1	1979	540,0	7,0
1943	172,0	8,3	1980	187,0	5,4
1944	68,8	10,3	1981	258,0	5,1
1945	322,0	8,0	1982	391,0	4,6
1946	137,8	6,3	1983	118,0	5,1
1947	187,0	5,8	1984	154,2	5,4
1948	246,6	5,2	1985	308,2	7,9
1949	132,6	8,0	1986	70,5	5,7
1950	68,8	6,9	1987	82,8	5,7
1951	235,4	6,9	1988	79,1	6,0
1952	130,0	8,7	1989	120,4	5,2
1953	113,6	7,4	1990	22,0	4,9
1954	115,8	5,2	1991	358,8	-5,4
1955	135,2	8,8	1992	239,0	6,2
1956	163,0	7,8	1993	47,1	4,9
1957	163,0	6,3	1994	86,5	6,9
1958	107,0	6,3	1995	206,6	5,7
1959	130,0	4,8	1996	42,8	6,3
1960	127,6	4,8	1997	328,9	7,8
1961	224,6	5,8	1998	61,3	5,3
1962	109,2	5,8	1999	84,7	5,3
1963	31,5	4,0	2000	100,6	5,5
1964	278,0	6,9	2001	68,8	5,3
1965	312,8	8,0	2002	571,6	6,4
1966	193,4	6,3	2003	840,7	6,4
1967	79,1	5,8	2004	504,5	7,1
1968	92,4	4,9	2005	424,2	7,1
1969	111,4	2,3	2008	151,4	4,7
1970	140,0	5,5	2009	193,4	8,5
1971	53,7	4,4	2010	65,7	5,8
1972	96,4	5,5	2011	208,4	4,7
1973	137,8	6,0	2012	70,5	5,8
1974	88,5	4,9	2013	88,5	5,1
1975	86,5	5,7	2014	61,0	3,4
			Período com falhas		

ANEXO E: Série de vazões médias mensais na estação fluviométrica Fazenda Ocidente (Figura 4.18).

Séries de vazões médias mensais da estação fluviométrica: FAZENDA OCIDENTE – Código: 56337000												
ANO	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
1939	20,14	11,30	9,37	9,39	7,18	6,19	6,15	5,49	5,71	6,74	7,28	9,82
1940	15,40	18,72	13,64	8,83	7,59	7,86	8,35	7,11	7,41	8,99	19,09	12,51
1941	14,94	15,04	16,37	12,78	11,47	11,96	12,41	10,74	10,75	12,31	13,56	26,84
1942	21,26	15,12	19,07	16,99	15,63	14,09	13,05	11,75	12,71	13,09	17,28	48,40
1943	36,64	22,38	22,09	16,53	13,08	12,35	10,78	10,90	9,43	10,82	13,22	32,45
1944	18,58	24,36	17,50	14,86	13,55	12,79	12,25	11,59	10,81	11,90	13,55	23,56
1945	45,54	24,55	23,53	21,63	15,05	12,66	11,45	9,65	8,80	9,04	13,59	27,78
1946	27,54	14,82	15,85	16,14	10,31	9,42	8,77	7,71	8,15	7,28	11,75	11,85
1947	19,69	12,90	21,91	11,61	8,70	7,57	7,05	6,98	6,80	6,86	9,96	22,53
1948	13,62	15,76	14,03	9,64	9,13	8,43	7,25	6,63	6,16	6,51	13,77	32,86
1949	24,38	32,76	18,91	15,84	12,52	12,35	10,11	9,04	8,24	10,51	12,32	21,75
1950	16,69	17,08	15,56	12,84	10,13	9,00	8,30	7,55	7,32	8,07	13,50	14,21
1951	12,78	25,95	32,50	18,30	13,36	11,78	10,34	9,49	8,46	8,53	7,87	14,73
1952	22,49	30,93	36,68	18,21	14,16	12,51	10,73	10,18	10,19	10,73	13,65	21,16
1953	14,57	24,24	15,64	14,60	11,34	9,91	9,04	8,04	8,38	9,21	11,46	16,88
1954	10,11	14,87	9,71	9,07	7,92	6,92	6,59	5,81	5,65	6,61	9,77	14,56
1955	22,14	13,89	12,99	12,95	11,70	11,17	10,06	9,43	8,83	11,16	13,25	18,93
1956	13,99	9,99	12,94	9,99	9,81	9,91	9,32	9,26	8,48	7,96	12,89	24,12
1957	17,71	14,91	21,99	14,33	12,47	10,07	9,26	8,11	8,16	7,22	18,09	30,21
1958	19,78	17,70	13,51	13,34	10,91	8,94	9,36	7,64	7,67	8,97	8,28	10,46
1959	11,26	7,62	16,07	7,32	6,02	5,55	5,19	4,85	4,80	7,96	13,81	10,49
1960	17,57	13,12	18,02	9,33	8,51	7,52	6,75	5,99	6,40	5,94	9,28	20,81
1961	34,91	27,91	17,45	12,48	11,17	9,52	8,32	7,36	6,43	6,50	8,98	9,33

Séries de vazões médias mensais da estação fluviométrica: FAZENDA OCIDENTE – Código: 56337000												
ANO	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
1962	22,57	22,39	14,56	9,98	8,48	7,58	6,97	6,33	6,59	7,78	9,90	27,48
1963	11,29	9,72	7,24	6,50	5,80	5,76	5,76	5,85	5,20	5,55	6,23	6,11
1964	38,08	29,05	15,93	11,23	9,79	8,81	9,62	8,66	7,14	14,17	17,03	28,15
1965	25,64	28,36	31,63	17,91	14,61	12,13	10,86	10,12	8,51	13,20	16,42	14,39
1966	26,68	16,11	16,73	10,78	9,31	8,13	8,03	7,04	6,53	7,87	11,71	18,42
1967	20,61	24,91	18,35	12,12	10,00	8,54	7,78	7,08	6,60	6,27	11,28	13,15
1968	14,55	13,46	11,12	9,24	6,93	6,25	5,79	5,62	6,31	8,66	9,59	14,33
1969	14,54	10,99	12,79	7,70	7,32	6,71	6,10	5,93	5,31	8,69	13,45	17,13
1970	24,10	12,15	9,79	10,62	7,67	7,56	7,90	6,88	7,29	9,73	11,94	9,30
1971	7,65	5,67	7,56	6,13	4,91	5,90	4,83	4,45	5,11	8,66	18,56	13,12
1972	8,11	13,30	14,61	10,43	7,60	6,86	7,92	6,77	6,82	8,42	10,73	24,99
1973	20,29	12,65	20,19	11,63	10,09	8,99	7,71	7,31	6,86	9,68	14,01	22,05
1974	20,25	12,83	18,99	15,85	10,97	9,81	8,20	7,74	6,87	8,92	7,44	14,47
1975	20,81	14,44	9,77	9,35	7,72	7,30	7,81	6,45	5,96	7,37	16,51	9,53
1976	20,81	14,44	9,77	9,35	7,72	7,30	7,81	6,45	5,96	7,37	16,51	9,53
1977	22,47	14,17	15,03	12,57	9,01	8,18	7,47	6,55	7,33	8,54	9,01	15,49
1978	19,35	12,67	12,00	10,66	9,01	7,35	7,00	5,98	6,31	8,38	12,35	14,67
1979	33,58	82,73	14,59	15,47	19,32	15,88	13,98	12,10	12,11	10,15	15,40	23,67
1980	35,63	18,55	11,74	18,59	11,06	9,67	8,60	7,99	7,53	6,38	9,97	21,09
1981	16,91	10,33	13,98	11,00	8,13	7,92	6,86	6,47	5,69	9,13	20,97	23,33
1982	37,04	17,85	52,24	18,78	14,52	11,19	9,90	9,04	8,25	9,02	6,61	15,54
1983	27,10	18,75	18,85	17,97	14,78	12,47	11,34	9,77	12,71	23,77	19,82	31,84
1984	16,12	12,06	15,75	11,86	9,48	8,32	7,90	8,35	8,53	9,36	9,73	22,39
1985	53,10	30,72	30,59	20,43	15,77	13,20	11,57	10,22	10,08	10,39	12,21	24,89
1986	29,06	16,63	13,83	10,43	9,96	9,00	8,52	8,62	7,18	6,62	9,51	15,60
1987	13,04	10,28			11,30	9,16	8,12	7,17	7,93	7,12	8,33	23,94
1988	16,12	23,18	13,81	13,03	10,10	8,91	7,68	7,14	6,50	7,35	9,66	

Séries de vazões médias mensais da estação fluviométrica: FAZENDA OCIDENTE – Código: 56337000													
ANO	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	
1989	11,68	11,91	12,93	7,35	6,63	7,28	6,82	6,15	6,29	8,18	10,14	22,79	
1990	10,34	8,11	8,75	7,44	7,11	5,74	6,39	5,91	6,16	6,05	8,16	6,79	
1991	29,43	18,98	19,70	12,71	10,02	8,09	7,11	6,19	6,53	7,89	12,30	11,81	
1992	39,46	28,33	12,70	11,76	11,20	9,13	8,31	7,99	9,91	10,65	28,70	27,84	
1993	17,98	15,07	15,86	16,52	10,91	9,82	8,43	8,06	7,39	8,54	9,96	14,08	
1994	25,75	11,53	21,50	14,55	11,67	9,33	7,84	7,78	7,78	8,39	10,02	18,95	
1995	9,36	17,12	12,60	10,39	8,66	6,94	6,90	6,57	5,84	7,77	9,89	29,83	
1996	15,24	12,70	10,83	10,34	9,63	7,56	6,77	6,35	7,54	9,48	17,22	19,80	
1997	58,30	19,18	20,16	19,84	13,41	10,73	8,90	7,81	8,85	10,43	10,39	21,31	
1998	16,03	15,46	12,91	8,68	11,53	8,10	7,41	8,11	7,10	10,06	11,70	13,59	
1999	13,21	8,28	14,13	7,67	6,79	5,67	5,25	5,25	7,08	6,74	13,07	14,92	
2000	13,42	20,44	12,28	9,01	7,73	7,27	6,59	6,15	7,24	6,22	20,20	14,35	
2001	15,47	7,80	8,53	6,14	6,14	6,32	5,25	5,50	5,56	6,36	12,96	17,79	
2002	62,97	43,05	16,68	12,00	10,32	8,11	7,85	7,23	7,94	7,23	18,20	27,90	
2003	62,77	15,59	15,39	11,09	8,78	8,43	7,56	7,43	7,83	7,57	10,56	18,39	
2004	34,82	27,54	23,71	39,84	14,31	12,72	11,30	9,57	8,04	9,03	8,92	30,27	
2005	19,51	20,60	41,09	13,73	12,30	10,62	9,68	8,71	8,77	8,42	15,45	35,81	
2008	12,49	15,19	18,23	11,69	7,57	5,89	5,26	5,22	6,27	5,93	14,31	29,91	
2009	38,00	32,94	25,56	23,96	15,05	12,97	11,12	9,62		12,43	15,75	21,08	
2010	17,61	10,08	16,31	11,86	9,43	8,60	7,79	6,64	6,39	7,70	14,58	17,15	
2011	19,82	9,56	19,94	11,26	8,61	7,79	6,86	5,95	5,40	7,30	18,68	44,50	
2012	46,86	17,25	15,32	13,07	12,68	10,57	9,03	8,00	6,99	6,93	16,12	10,73	
2013	16,70	17,33	14,43	12,37	9,24	8,48	7,33	6,14	5,87	7,32	7,96	23,08	
2014	9,24	6,55	10,04	8,00	6,47	5,87	5,87	5,21	4,26	4,58	8,42	10,43	
									Período com falhas				