

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL**

**JOSELINE CORRÊA SOUZA**

**INFLUÊNCIA DOS REGISTROS FISIAGRÁFICOS E DAS  
ALTERNATIVAS DE MODELAGEM DE PROCESSOS  
HIDROLÓGICOS NA DETERMINAÇÃO DE VAZÕES DE  
PROJETO**

**VITÓRIA  
2016**

**JOSELINE CORRÊA SOUZA**

**INFLUÊNCIA DOS REGISTROS FISIAGRÁFICOS E DAS  
ALTERNATIVAS DE MODELAGEM DE PROCESSOS  
HIDROLÓGICOS NA DETERMINAÇÃO DE VAZÕES DE PROJETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu - Mestrado Profissional em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, sob a orientação do Prof. Dr. José Antônio dos Reis Tosta.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Saúde Pública (Drenagem)

**VITÓRIA  
2016**

## RESUMO

Os modelos chuva-vazão são recorrentemente utilizados na apropriação de vazões de projeto em bacias que carecem de dados fluviométricos. A aplicação desses modelos exige uma série de decisões que envolvem a seleção das bases de dados de registros fisiográficos da área de interesse, a escolha de equações para determinação de tempos de concentração e de métodos de apropriação das equações de chuvas intensas que são utilizados na conformação de hietogramas, até culminar na escolha do método que será empregado na determinação dos hidrogramas a partir dos quais serão levantadas as vazões de pico. O presente estudo avaliou a influência que a combinação de diferentes registros fisiográficos e alternativas de modelagem de processos hidrológicos produz na determinação de vazões de projeto, aplicando a sequência de etapas metodológicas descritas anteriormente na bacia hidrográfica do rio Braço Norte Esquerdo, empregando bases de dados gratuitamente disponíveis, apropriando informações com o uso de sistemas de informações geográficas e o programa de modelagem HEC-HMS. A condução do estudo permitiu obter as vazões máximas associadas a períodos de retorno de 2 a 100 anos, e a partir da análise dessas informações, foi possível observar que, considerando as opções selecionadas para a composição dos cenários de simulação, a escolha dos registros e alternativas de modelagem promove grande dispersão nas vazões do projeto. Também se observou a relevância do método de apropriação da equação de chuvas intensas na variabilidade das referidas vazões.

**Palavras-chave:** Modelos chuva-vazão. Vazões de projeto. HEC-HMS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo .....	34
Figura 2 - Subdivisão da bacia em estudo .....	36
Figura 3 - Etapas seguidas na determinação do tempo de concentração.....	37
Figura 4 - Talvegues principais das regiões hidrográficas da rede de drenagem na escala 1:50.000 .....	47
Figura 5 - Talvegues principais das regiões hidrográficas da rede de drenagem na escala 1:250.000 .....	48
Figura 6 - Planilha produzida para apropriação dos hietogramas .....	63
Figura 7 - Cenários de modelagem .....	75
Figura 8 - Modelo da bacia.....	76
Figura 9 - Tela de entrada dos dados das regiões hidrográficas.....	77
Figura 10 - Tela de entrada de dados para o modelo de perdas Inicial e Constante	77
Figura 11 - Tela de entrada de dados para o modelo de perdas SCS <i>Curve Number</i> .....	77
Figura 12 - Tela de entrada de dados para o modelo do hidrograma unitário do SCS .....	78
Figura 13 - Identificador das séries de dados dos hietogramas .....	78
Figura 14 - Definição das informações sobre a série de dados.....	79
Figura 15 - Definição do intervalo de tempo da série de dados .....	79
Figura 16 - Entrada de dados e visualização dos hietogramas .....	79
Figura 17 - Criação dos modelos meteorológicos .....	80
Figura 18 - Definição padrão do modelo meteorológico.....	81
Figura 19 - Definição padrão do modelo meteorológico.....	81
Figura 20 - Configuração da simulação de um cenário .....	82
Figura 21 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 2 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel .....	91
Figura 22 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 5 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel .....	92

Figura 23 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 10 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel .....	92
Figura 24 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 20 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel .....	93
Figura 25 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 50 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel .....	93
Figura 26 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 100 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel .....	94
Figura 27 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 2 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio.....	95
Figura 28 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 5 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio.....	95
Figura 29 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 10 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio.....	96
Figura 30 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 20 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio.....	96
Figura 31 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 50 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio.....	97
Figura 32 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 100 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio.....	97
Figura 33 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB1 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	103
Figura 34 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB2 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	104

Figura 35 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB3 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	104
Figura 36 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB4 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	105
Figura 37 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB5 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	105
Figura 38 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB6 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	106
Figura 39 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB7 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	106
Figura 40 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB8 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos .....	107
Figura 41 - Hidrograma produzido para o exutório da área de estudo considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos.....	108
Figura 42 - Tabela resumo dos picos de vazão em cada elemento do modelo da bacia.....	109
Figura 43 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando todas os possíveis cenários de simulação .....	113
Figura 44 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o método de perdas Inicial e constante.....	114
Figura 45 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o método de perdas SCS Curve Number .....	114
Figura 46 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando a apropriação das equações de chuvas intensas pelo método Chow-Gumbel .....	116
Figura 47 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando a apropriação das equações de chuvas intensas pelo programa Plúvio.....	116
Figura 48 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o tempo de concentração obtido pela equação do US Corps of Engineers .....	117
Figura 49 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o tempo de concentração obtido pela equação do Tulsa District .....	118
Figura 50 - Variação dos valores de vazão considerando o tempo de concentração obtido pela equação de George Ribeiro.....	118
Figura 51 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de relevo provenientes do MDE de 90 metros de resolução.....	119

Figura 52 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de relevo provenientes do MDE de 30 metros de resolução.....	120
Figura 53 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de relevo provenientes do MDT obtido a partir de curvas de nível com equidistância de 20 metros .....	120
Figura 54 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de hidrografia na escala de 1:50.000 .....	121
Figura 55 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de hidrografia na escala de 1:250.000 .....	122
Figura 56 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de tipo de solo da Embrapa (1:400.000) .....	123
Figura 57 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de tipo de solo do GEOBASES (1:250.000) .....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Opções de modelagem disponíveis no HEC-HMS.....	19
Tabela 2 - Métodos indiretos para determinação do tempo de concentração de uma bacia.....	24
Tabela 3 - Regiões hidrográficas da área de estudo.....	36
Tabela 4 - Bases de dados selecionadas para a área de estudo.....	43
Tabela 5 - Percentual da área ocupada pelos diferentes tipos de uso e ocupação do solo.....	44
Tabela 6 - Áreas das regiões hidrográficas .....	46
Tabela 7 - Comprimento dos talwegues principais das regiões hidrográficas.....	49
Tabela 8 - Coordenadas dos pontos da cabeceira e exutório dos talwegues principais .....	50
Tabela 9 - Declividade dos talwegues principais obtidos da hidrografia na escala 1:50.000 .....	50
Tabela 10 - Declividade dos talwegues principais obtidos da hidrografia na escala 1:250.000 .....	51
Tabela 11 - Declividades equivalentes em m/m.....	54
Tabela 12 - Coordenadas dos exutórios e centroides e distâncias entre os pontos..	55
Tabela 13 - Valores da constante do nível de urbanização do método Tulsa District. ....	56
Tabela 14 - Razão entre a área coberta com vegetação e a área total de cada região hidrográfica.....	57
Tabela 15 - Estações pluviométricas com influência na área de estudo .....	58
Tabela 16 - Precipitações máximas de 1 dia da estação Usina Fortaleza .....	60
Tabela 17 - Relação entre as alturas pluviométricas para precipitações de mesma frequência e diferentes durações .....	61
Tabela 18 - Aspectos positivos e negativos dos métodos de apropriação de perdas do HEC-HMS.....	65
Tabela 19 - Taxas de infiltração .....	68
Tabela 20 - Classificação dos solos considerando as condições brasileiras. ....	69
Tabela 21 - Áreas ocupadas pelos diferentes grupos de solos .....	70
Tabela 22 - Valores de CN considerados no estudo .....	72

Tabela 23 - Critérios e valores balizadores de aplicabilidade dos métodos de apropriação do tempo de concentração .....	85
Tabela 24 - Resumo da avaliação da aplicabilidade dos métodos.....	86
Tabela 25 - Tempos de concentração (em minutos) obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:50.000 .....	88
Tabela 26 - Tempos de concentração (em minutos) obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:250.000 .....	88
Tabela 27 - Erros percentuais em relação ao cenário referencial .....	90
Tabela 28 - Comparação entre os picos dos hietogramas gerados a partir de diferentes equações de chuvas intensas – duração de 320 minutos .....	98
Tabela 29 - Taxa de infiltração resultante da média ponderada por área .....	99
Tabela 30 - Valores de CN e percentual de área impermeável para as diferentes regiões hidrográficas .....	100
Tabela 31 - Tempos de retardo obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:50.000 .....	101
Tabela 32 - Tempos de retardo obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:250.000 .....	101
Tabela 33 - Parâmetros e hietogramas correspondentes ao 1º cenário de simulação (T=2 anos).....	103
Tabela 34 - Valores de medidas de tendência central e dispersão para o exutório	109
Tabela 35 - Valores de medidas de tendência central e dispersão para as regiões hidrográficas.....	110

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1. Justificativa da pesquisa .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
3.1. Modelos chuva-vazão .....	16
3.2. Sistema de modelagem hidrológica HEC-HMS .....	18
3.3. Tempo de concentração .....	21
3.4. Sistemas de informações geográficas .....	30
3.5. Escala e resolução espacial .....	31
3.6. Dados geográficos, espaciais e geoespaciais .....	31
<b>4. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>34</b>
4.1. Subdivisão da bacia.....	35
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
5.1. Seleção de expressões aplicáveis à apropriação do tempo de concentração .....	37
5.1.1. Seleção de bases de dados .....	38
5.1.2. Apropriação de dados fisiográficos.....	44
5.1.3. Seleção dos métodos adequados à área de estudo.....	51
5.1.4. Apropriação de variáveis adicionais.....	52
5.2. Obtenção dos hietogramas das regiões hidrográficas.....	57
5.2.1. Determinação das equações de chuvas intensas .....	57
5.2.2. Construção dos hietogramas de projeto.....	62
5.3. Obtenção dos hidrogramas e das vazões máximas .....	64

5.3.1. Seleção dos métodos.....	64
5.3.2. Determinação de parâmetros e constantes de entrada adicionais .	67
5.3.3. Definições dos cenários de modelagem .....	74
5.3.4. Realização das simulações .....	75
5.4. Análise dos resultados .....	83
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	84
6.1. Seleção de métodos para apropriação dos tempos de concentração ..	84
6.2. Tempos de concentração das regiões hidrográficas.....	87
6.3. Equações de chuvas intensas e hietogramas de projetos.....	90
6.4. Apropriação de hidrogramas de Projeto .....	98
7. CONCLUSÕES .....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	127
ANEXO A – TABELAS DE VALORES DE CN .....	133
APÊNDICE A – TABELA DE CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO CONSIDERADOS ...	136
APÊNDICE B – PLANILHA DIGITAL HIETOGRAMAS .....	137
APÊNDICE C – TABELA DE VAZÕES MÁXIMAS ESTIMADAS .....	138
APÊNDICE D – TABELA DE ERROS PERCENTUAIS RELATIVOS AO CENÁRIO REFERENCIAL .....	139

## 1. INTRODUÇÃO

---

A vazão de projeto representa um parâmetro indispensável na previsão e controle de eventos de inundação e na elaboração de projetos de drenagem urbana, e está intimamente relacionada aos custos e a segurança desses projetos.

As vazões de projeto, por sua vez, estão vinculadas aos deflúvios máximos registrados em um determinado curso d'água. As vazões máximas estão invariavelmente associadas a uma frequência de ocorrência – um período de retorno. Deste modo, quando se deseja uma pequena probabilidade de ocorrência de um evento de vazão máxima, maior é o período de retorno que se assume como parâmetro de projeto, e conseqüentemente, maior é a segurança do projeto e o custo associado à sua implantação.

De acordo com Tucci (2009) a vazão máxima pode ser determinada a partir do ajuste de uma distribuição probabilística aos registros histórico de vazões, por meio de modelos matemáticos de conversão da precipitação em vazão (modelos chuva-vazão), ou a partir de estudos de regionalização hidrológica.

A apropriação da vazão máxima por métodos probabilísticos depende da existência de uma série de registros históricos de vazão que seja razoavelmente longa e estacionária, de modo que as condições da bacia não tenham sofrido alterações significativas ao longo do tempo (TUCCI, 2009).

O método de regionalização também apresenta certo grau de dependência da existência de séries históricas de vazões na região em que a bacia está inserida e apresenta limitações para aplicação em pequenas e micro bacias hidrográficas (TUCCI, 2002).

O método de apropriação das vazões máximas por meio de modelos matemáticos é útil quando as bacias em estudo sofrem modificações. Estes métodos estão baseados em parâmetros de um modelo chuva-vazão e dados de entrada que visam representar a precipitação e as características fisiográficas da bacia. Os modelos chuva-vazão são amplamente empregados em bacias de médio e pequeno porte que não dispõem de informações fluviométricas, o que é recorrente na realidade brasileira (TUCCI, 2005).

Comentado [JC1]: Confirmar

O processo de modelagem chuva-vazão é, em sua essência, repleto de incertezas que estão associadas, em grande parte, à aleatoriedade na distribuição espaço-temporal do fenômeno de precipitação. Entre as publicações da área de hidrologia observa-se uma concentração de estudos voltados para investigação dos aspectos da modelagem chuva-vazão com foco nos métodos de modelagem e dados de entrada relativos à precipitação. Ficam em segundo plano os trabalhos voltados para a investigação das interferências associadas aos dados de entrada que não estão relacionados à precipitação, como as informações que descrevem o relevo, o tipo de solo, a vegetação, dentre outros.

Nos últimos anos, a popularização dos Sistemas de Informação Geográfica e a maior facilidade de acesso a dados geoespaciais promoveu um aumento significativo da utilização de modelos chuva-vazão cujos parâmetros são apropriados a partir de bases de dados geoespaciais em formato digital. Entretanto, observa-se nos meios acadêmico e profissional, o uso de dados geoespaciais, em diferentes resoluções espaciais, para apropriação de parâmetros em bacias de diferentes tamanhos, sem a devida preocupação com os aspectos relacionados à representatividade dos dados referentes à superfície da bacia modelada. Além disso, alguns pesquisadores buscam contornar as deficiências associadas à apropriação de dados geoespaciais inadequados utilizando técnicas para ajustamento artificial e, atuando por meio de tentativas, buscam adequar a resposta do modelo à realidade que acreditam ser plausível.

Diante do disposto, a proposta da pesquisa é investigar o efeito da resolução espacial de dados fisiográficos de bacia uma bacia hidrográfica e de diferentes alternativas de modelagem dos processos hidrológicos, quando do emprego de modelo chuva-vazão nas estimativas de vazões de projeto.

### **1.1. Justificativa da pesquisa**

O dimensionamento de obras de engenharia para gerenciamento de recursos hídricos como, por exemplo, pontes, canais e sistemas de drenagem, passam por uma etapa fundamental de estudos hidrológicos necessários à determinação da vazão de projeto. Essa variável consiste na vazão máxima associada a um

determinado período de retorno, sendo indispensável para garantia das condições de segurança e determinação da viabilidade econômica dessas obras.

Em algumas situações, a apropriação da vazão de projeto demanda a utilização de modelos chuva-vazão. Entretanto, a utilização desses modelos apresenta incertezas que, segundo Haan (1989), decorrem dos dados de entrada e saída, dos parâmetros de modelagem e da própria estrutura do modelo hidrológico.

Diante disso, o presente trabalho visa investigar a influência de dois aspectos da modelagem chuva-vazão aplicada à determinação de vazões de projeto: 1º) a resolução espacial dos dados fisiográficos usados no processo de modelagem e 2º) a adoção de diferentes modelos disponíveis para representação dos processos hidrológicos. Com a realização desta pesquisa, espera-se contribuir com a geração de conhecimentos que poderão nortear a seleção de dados geoespaciais e de modelos hidrológicos mais adequados à apropriação de vazões de projeto.

## **2. OBJETIVOS**

---

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a influência dos dados fisiográficos e de diferentes alternativas de modelagem de processos hidrológicos na obtenção de vazões máximas utilizando-se a ferramenta HEC-HMS, em estudo de caso realizado na bacia hidrográfica do Braço Norte Esquerdo, localizada no Espírito Santo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para a consecução do objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Selecionar metodologias para apropriação de tempos de concentração e estimar tempos de concentração para diferentes regiões hidrográficas da área de estudo;
- Estabelecer hidrogramas e apropriar vazões máximas para as regiões hidrográficas da área de estudo considerando-se diferentes combinações de dados fisiográficos e processos hidrológicos;
- Avaliar a influência das diferentes combinações de dados fisiográficos e processos hidrológicos sobre o comportamento das vazões máximas na área de estudo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 3.1. Modelos chuva-vazão

De acordo com Tucci (2005), um modelo é uma representação de um objeto ou sistema, numa linguagem ou forma facilmente acessível e utilizável, com objetivo de compreender esse objeto ou sistema e buscar as respostas oferecidas para diferentes entradas. Para USACE (2000), um modelo relaciona um dado desconhecido (“saída”) a um dado conhecido (“entrada”).

É consenso entre vários autores que um modelo é uma representação aproximada da realidade e que, portanto, apresenta limitações em relação à precisão e acurácia da realidade que busca representar.

Na Hidrologia os modelos são amplamente usados como ferramenta para compreensão e representação do comportamento das bacias hidrográficas diante dos processos hidrológicos aos quais elas são naturalmente submetidas. Eles também são utilizados na previsão de eventos diante de cenários hipoteticamente estabelecidos (prognóstico).

Fan e Collischonn (2014) definem os modelos hidrológicos como “representações matemáticas do comportamento de sistemas hídricos”. Dentre os modelos hidrológicos, os autores destacam os modelos chuva-vazão, que tem como função representar os processos de transformação da chuva em escoamento, e a consequente propagação do escoamento em uma bacia hidrográfica. Este grupo de modelos constituirá o foco da próxima seção.

De acordo com Ferraz, Milde e Martati (1999), os modelos chuva-vazão determinam o deflúvio superficial de uma bacia hidrográfica a partir de séries históricas de dados de precipitação que ocorreram sobre a bacia. Os referidos autores indicam que os modelos chuva-vazão são usualmente empregados para complementação de séries de dados de vazão, determinação de hidrogramas para dimensionamento de projetos de engenharia, previsão de cheias e avaliação do uso do solo na bacia.

Canholi (2005) destaca que os modelos chuva-vazão disponíveis para drenagem urbana podem ser classificados como contínuos e discretos (ou por eventos). Os modelos contínuos são utilizados no dimensionamento de sistemas que requerem um o conhecimento mais detalhado sobre a distribuição da chuva no tempo, como reservatórios e bacias de retenção; desta forma, esses modelos requerem uma série de dados históricos contínuos, cuja disponibilidade é rara. Já nos modelos discretos, a simulação é feita utilizando-se eventos extremos, selecionados a partir da análise estatística de dados históricos, tomando-se como referência os picos e volumes associados a cheias. Essa abordagem também emprega a utilização de hietogramas de projeto produzidos com base em equações de chuvas intensas.

Tucci (2005), ao avaliar os modelos Stanford IV, IPH, SCS, e SSARR, observou os referidos modelos possuem características semelhantes, distinguindo-se entre si apenas pelas equações que utilizam para a representação dos processos hidrológicos. Registrou, adicionalmente, que a comparação entre modelos constitui perda de tempo desnecessária, uma vez que não conduz a conclusões consistentes e claramente definidas.

Dhami e Pandey (2013) realizaram um estudo comparando diversos modelos hidrológicos recentemente desenvolvidos, com atualização regular e amplamente documentados. O escopo do trabalho envolveu a avaliação dos processos hidrológicos que cada modelo é capaz de simular (dentre eles, a modelagem da conversão de chuva em vazão), as equações governantes utilizadas, os dados mínimos requeridos no processo de simulação e as escalas espaciais e temporais dos modelos. Dentre os diversos modelos existentes, os autores avaliaram o AnnAGNPS, GSSHA, HYPE, Hec-HMS, MIKE-SHE, PRMS, SWAT, WetSpa, e WinSRM. Dhami e Pandey (2013) registraram que os modelos MIKE-SHE, AnnAGNPS, HYPE, SWAT e WinSRM são exclusivamente usados para simulações contínuas do processo chuva-vazão, enquanto demais permitem a modelagem utilizando as duas abordagens – a contínua e a discreta. Não estabeleceram, no entanto, juízo de valor sobre a qualidade das respostas oferecidas pelos diferentes modelos analisados.

Dentre os modelos chuva-vazão disponíveis, o HEC-HMS oferece diversas opções para a representação funcional dos processos hidrológicos e, em decorrência da sua versatilidade, vem sendo amplamente utilizado em trabalhos de natureza técnica e

acadêmica como, por exemplo, Chen, Xie e Chen (2011), Tahmasbinejad et al. (2012), Halwatura e Najim (2013), Zhang et al. (2013), Yu et al. (2014) e Silva, Weerakoon e Herath (2014).

O tópico subsequente será dedicado ao modelo chuva-vazão HEC-HMS, ferramenta utilizada na obtenção dos hidrogramas estabelecidos no presente trabalho.

### **3.2. Sistema de modelagem hidrológica HEC-HMS**

O HEC-HMS (*Hidrologic Modeling System*) consiste em sistema de modelagem hidrológica criado pelo *Hidrologic Engineering Center*, pertencente ao Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. O programa foi desenvolvido para simular o processo de transformação da precipitação em escoamento em sistemas de bacias hidrográficas dendríticas com características diversas.

O HEC-HMS pode ser utilizados em uma ampla faixa de áreas geográficas, em aplicações variadas como estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de escoamentos, avaliação de impactos do processo de urbanização, projeto de vertedouros de reservatórios, redução de danos de enchentes, regulação de planos de drenagem e operação de sistemas de drenagem (USACE, 2000).

O programa HEC-HMS trabalha com os componentes do ciclo hidrológico em partes que podem ser separadamente trabalhadas. Deste modo, os fluxos de massa ou de energia presentes no ciclo hidrológico podem ser representados por modelos matemáticos diversos, que podem ser selecionados pelo usuário de acordo com o conhecimento das características da bacia de interesse, o objetivo do estudo e julgamento de engenharia. (USACE, 2000).

Para realizar a simulação da resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica o programa HEC-HMS requer quatro componentes: o modelo da bacia, o modelo meteorológico, as especificações de controle e os dados de entrada. Os dois primeiros componentes do HEC-HMS, o modelo da bacia e o modelo meteorológico, representam as escolhas das opções de modelagem mais significativas do referido sistema. Nessas etapas são manifestadas as decisões do usuário em relação às opções de modelagem que ele deseja adotar.

O modelo da bacia consiste na representação das características físicas da bacia, utilizando representações de subbacias, trechos, junções, fontes, sumidouros,

reservatórios e derivações como elementos hidrológicos. Esses elementos, por sua vez, fazem uso de modelos matemáticos para descrever os processos físicos produzidos na bacia. A Tabela 1 reúne as alternativas disponíveis no HEC-HMS para avaliações das perdas por infiltração, escoamento de base e escoamento direto, além das alternativas para descrição da propagação de ondas de cheia.

USACE (2013) oferece uma detalhada discussão acerca das diferentes alternativas de modelagem reunidas na Tabela 1, resumindo a abrangência e limitações de cada modelo, além de uma abrangente descrição das variáveis e parâmetros de entrada demandados.

Tabela 1 - Opções de modelagem disponíveis no HEC-HMS

Elemento hidrológico	Tipo de cálculo	Modelos disponíveis
Subbacias	Volume do escoamento (Perdas por infiltração)	Inicial e taxa constante Déficit e taxa constante (DC) SCS Curve Number (SCS CN) Green e Ampt Soil moisture accounting (SMA) Exponencial
	Escoamento direto	Hidrógrafa unitária de Clark Onda cinemática ModClark Hidrógrafa unitária SCS Hidrógrafa unitária de Snyder Hidrógrafa unitária definida pelo usuário
	Escoamento de base	Recessão limitada Constante mensal Reservatório linear Boussinesq não-linear Recessão
Trechos	Propagação	Onda cinemática Lag Puls modificado Muskingum-Cunge

Fonte: Adaptado de USACE (2013)

O modelo meteorológico consiste na representação dos fenômenos meteorológicos que ocorrem na bacia, tais como precipitação, radiação e evapotranspiração. Quando se trata da avaliação de vazões máximas, a precipitação é considerada o fenômeno de maior relevância no processo hidrológico em estudo.

Para representação do fenômeno de precipitação, o programa HEC-HMS oferece alternativas que visam prover aos usuários diversas formas de representar o

comportamento das chuvas na bacia em estudo. Deste modo, o sistema se ajusta à diferentes formas e dados de precipitação, permitindo adotar precipitação associada a uma frequência, registrada em pluviômetros com pesos (ponderado), representada em uma grade, obtida a partir da distribuição pelo Inverso da distância, representada em hietogramas especificados pelo usuário e determinadas para projeto (precipitações padrão, usual nos Estados Unidos). Essas alternativas são detalhadamente apresentadas e discutidas por (USACE, 2000).

Tahmasbinejad et al. (2012) utilizaram o HEC-HMS como ferramenta suporte para geração dos hidrogramas empregados na previsão de enchentes usando o modelo hidráulico (HEC-RAS). Esse trabalho foi realizado em bacias com áreas variando de 200 a 24.141 km<sup>2</sup>, localizadas na porção sudoeste do Iran. Segundo os referidos autores, o HEC-HMS apresentou-se como uma importante ferramenta de apoio ao processo de previsão de enchentes.

Halwatura e Najim (2013) aplicaram o HEC-HMS para a geração de séries de vazões em uma bacia com área de aproximadamente 340 km<sup>2</sup> utilizando diferentes opções de modelagem de processos hidrológicos disponíveis na ferramenta e aplicando três diferentes abordagens de calibração e validação dos modelos. Os resultados demonstram o alto nível de confiabilidade da ferramenta para realização de modelagem chuva-vazão e indicaram a viabilidade de utilização do HEC-HMS para realização de modelagem hidrológica em bacias de médio porte.

Zhang et al. (2013) também aplicaram o HEC-HMS para investigar o efeito da subdivisão da bacia hidrográfica na simulação de eventos de enchente em uma bacia do rio Mississipi (Estados Unidos). Nesse estudo foram considerados o desempenho de processamento, os parâmetros calibrados, a descrição dos processos hidrológicos e a interpretação dos componentes do balanço hídrico. Os resultados do trabalho apresentam evidências de que a adoção de parâmetros calibrados automaticamente pode produzir erros na descrição dos processos de escoamento e transporte da água. Chen, Xie e Chen (2011) também investigaram o efeito da discretização das bacias nos picos de vazão simulados pelo HEC-HMS.

Yu et al. (2014) utilizaram o HEC-HMS para investigar como a escala espacial e temporal dos dados dispostos em malha (dados tipo *raster*) afetam os resultados produzidos pela simulação de processos hidrológicos. Os resultados do trabalho

**Comentado [JC2]:** Identificar onde, que bacias e a principal conclusão.

indicaram que o efeito da escala está intimamente relacionado à variabilidade da elevação e da precipitação nas correspondentes escalas analisadas.

Silva, Weerakoon e Herath (2014) aplicaram o HEC-HMS em estudo de caso realizado numa bacia de aproximadamente 2.230 km<sup>2</sup>, localizada no Sri Lanka. O estudo empregou o HEC-HMS para a modelagem contínua e discreta dos processos hidrológicos. Os referidos autores indicaram que o HEC-HMS se mostrou adequado às duas abordagens de modelagem consideradas.

Segundo Silveira (2005) e Botelho e Júnior (2011), o tempo de concentração constitui parâmetro necessário para a determinação do pico e formato dos hidrogramas estabelecidos com auxílio de modelos chuva-vazão.

Silveira (2005) observa, adicionalmente, que a determinação dos tempos de concentração constitui tarefa de difícil condução, função de limitadas informações sobre a aplicabilidade de algumas das fórmulas empíricas disponíveis. Em decorrência destes aspectos, a seção subsequente terá como foco de discussão as alternativas disponíveis para apropriação de tempos de concentração.

### **3.3. Tempo de concentração**

Segundo Tucci (2009), o tempo de concentração consiste no intervalo de tempo necessário para que a água que precipita no ponto mais distante de uma bacia desloque-se até a seção principal tomada como referência. Ele também pode ser entendido como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma, ou seja, representa um dos valores de abcissa que caracteriza o hidrograma e o comportamento da bacia.

Villela e Mattos (1975) definem o tempo de concentração como o tempo necessário para que toda bacia contribua para o escoamento superficial na seção considerada.

Silveira (2005), por sua vez, afirma que o tempo de concentração é o tempo necessário para se estabelecer o regime permanente entre uma chuva efetiva de intensidade constante e o escoamento superficial por ela produzido.

Existem diversos métodos de obtenção do tempo de concentração de uma bacia. A maioria desses métodos são formulações empíricas obtidas a partir de estudos experimentais conduzidos em bacias com características específicas, de modo que

a sua reprodutibilidade requer condições semelhantes às condições para as quais as fórmulas foram estabelecidas.

Pruski, Brandão e Silva (2004) afirmam que os fatores que influenciam no tempo concentração são:

- Área da bacia;
- Comprimento do canal mais longo (principal);
- Declividade do canal mais longo (principal);
- Forma da bacia;
- Declividade média do terreno;
- Declividade dos afluentes;
- Comprimento dos afluentes;
- Rugosidade do canal;
- Tipo de cobertura vegetal; e
- Características da precipitação.

Portanto, as formulações para apropriação dos referidos tempos são calculadas, principalmente, em função dessas variáveis. Cabe salientar que, de acordo com Lancaster e Franco (1994), apud Botelho e Junior (2011), apesar de algumas equações adotarem a precipitação como variável na determinação do tempo de concentração, ele pode ser considerado como característica da bacia e, portanto, independente das características das chuvas.

A estimativa dos tempos de concentração pode ser feita segundo duas abordagens: a direta, que utiliza registros hidrometeorológicos ou traçadores; e a indireta, que utiliza formulações matemáticas previamente estabelecida para determinadas regiões (BOTELHO e JUNIOR, 2011).

Segundo Botelho e Junior (2011) os métodos diretos são muito utilizados quando se dispõe de registros hidrometeorológicos com intervalos de discretização inferior ao tempo de concentração, ou dados de traçadores coletados em campanhas de campo.

No Brasil, a disponibilidade desse tipo de informações é escassa, principalmente para regiões hidrográficas de médio e pequeno porte. Portanto, para regiões desse tipo, a alternativa que habitualmente é utilizada para a apropriação do tempo de concentração é a utilização dos métodos indiretos.

Mata-Lima *et al* (2007) divide as formulações características dos métodos indiretos em dois grupos de formulações: as empíricas e as semi empíricas. Segundo os autores as formulações empíricas resultam de correlações e tratamento estatístico de variáveis fisiográficas observadas em campo sem considerar o efeito das alterações no uso e ocupação do solo e, geralmente, não exigem dados de entrada detalhados. Já as formulações semi empíricas resultam de processo semelhante, entretanto, consideram os efeitos das alterações na dinâmica de uso e ocupação do solo e outras variáveis que se alteram ao longo do tempo.

A Tabela 2, estabelecida a partir de revisão da literatura técnica corrente, apresenta uma compilação de métodos indiretos de determinação de tempos de concentração para bacias hidrográficas.

Tabela 2 - Métodos indiretos para determinação do tempo de concentração de uma bacia

Método	Aplicabilidade, restrições e observações	Equação	Unid.	Variáveis e constantes	Referências
Kirpich	Formulação desenvolvida a partir de dados de 7 <b>pequenas bacias rurais</b> do Tennessee, com <b>declividades variando de 3 a 10</b> e áreas de no máximo <b>0,5 km²</b> . Quando <b>L &gt; 10</b> km a fórmula parece <b>subestimar</b> o valor de $t_c$ . Recomendável para <b>pequenas bacias rurais, canais bem definidos e declividades altas</b> .	$t_c = 3,989 L^{0,77} S^{-0,385}$	min	<b>L:</b> comprimento do talvegue (km) <b>S:</b> declividade do talvegue (m/m)	Porto et al. (2014, p. 817)
		$t_c = 57 L^{0,77} S^{-0,385}$	min	<b>L:</b> comprimento do talvegue (km) <b>S:</b> declividade do talvegue (m/km)	Genovez (2001, p. 67)
		$t_c = 57 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	min	<b>L:</b> comprimento do talvegue (km) <b>H:</b> diferença de cotas entre o exutório da bacia e o ponto mais distante do talvegue (m)	Porto et al. (2014, p. 417)
California Culverts Practice	Modificação da equação de Kirpich substituindo-se S por <b>L/H</b> , desenvolvida para <b>pequenas bacias montanhosas da Califórnia</b> .	$t_c = 57 L^{1,155} H^{-0,385}$	min	<b>L:</b> comprimento do talvegue (km) <b>H:</b> diferença de cotas entre a saída da bacia e o ponto mais distante do talvegue (m)	Porto et al. (2014, p. 817) Genovez (2001, p. 68)
Federal Aviation Agency	Formulação desenvolvida para drenagem de aeroportos. Uso recomendado para <b>pequenas bacias com escoamento</b> predominantemente em <b>superfícies</b> . Usada recorrentemente para <b>bacias urbanas</b> .	$t_c = 22,73 (1,1 - C) L^{0,50} S^{-0,33}$	min	<b>C:</b> coeficiente de escoamento do método racional (adimensional); <b>L:</b> comprimento do talvegue (km); <b>S:</b> declividade do talvegue (m/km)	Porto et al. (2014, p. 818)
		$t_c = 222 (1,1 - C) L^{0,50} S^{-0,333}$	min	<b>C:</b> coeficiente de escoamento do método racional (adimensional); <b>L:</b> comprimento do talvegue (km); <b>S:</b> declividade do talvegue (m/km)	Genovez (2001, p. 68)
Onda cinemática	Equação deduzida a partir das equações de onda cinemática aplicada a superfícies, utilizando-se a hipótese de precipitação constante igual ao $t_c$ e a equação de Manning. Adequada para <b>pequenas bacias</b> (onde o <b>método racional pode ser aplicado</b> ) com <b>escoamento</b> predominantemente <b>superficial</b> . Existe tendência de <b>superestimar</b> o valor de $t_c$ à medida que a bacia aumenta. Processo iterativo, uma vez que para determinar $t_c$ é necessário conhecer a duração da chuva que é igual ao tempo de concentração. Fórmula desenvolvida para comprimentos de superfícies entre 15 e 30 metros	$t_c = 447 (n L)^{0,6} S^{-0,3} I^{-0,4}$	min	<b>n:</b> coeficiente de rugosidade de Manning ( $\text{sm}^{-1/3}$ ) <b>L:</b> comprimento do talvegue (km) <b>S:</b> declividade do talvegue (m/km) <b>I:</b> intensidade da precipitação (mm/h)	Porto et al. (2014, p. 818)
		$t_c = 3504 (n L)^{0,6} S^{-0,3} I^{-0,4}$	min	<b>n:</b> coeficiente de rugosidade de Manning ( $\text{sm}^{-1/3}$ ) <b>L:</b> comprimento do talvegue (km) <b>S:</b> declividade do talvegue (m/km) <b>I:</b> intensidade da precipitação (mm/h)	Genovez (2001, p. 68)

Tabela 2 - Métodos indiretos para determinação do tempo de concentração de uma bacia

Método	Aplicabilidade, restrições e observações	Equação	Unid.	Variáveis e constantes	Referências
SCS Lag	Equação desenvolvida para <b>bacias rurais</b> com <b>áreas de drenagem de até 8 km<sup>2</sup></b> e reflete, fundamentalmente, o <b>escoamento</b> sobre a <b>superfície do terreno</b> . Para <b>aplicações em bacias urbanas o SCS sugere procedimentos para ajuste</b> de acordo com a área impermeabilizada e da parcela dos canais que sofreram modificações. <b>Superestima</b> o $t_c$ em comparação a Kirpich e Dooge, isso ocorre principalmente para valores de CN pequenos. Os resultados apresentam-se compatíveis quando <b>CN <math>\geq</math> 100 e L &lt; 10 km</b> , que corresponde a bacias com <b>A &lt; 15 km<sup>2</sup></b> . Apresenta <b>bons resultados para áreas completamente pavimentadas</b> , entretanto <b>superestima</b> o resultado em áreas mistas.	$t_c = 3,42 L^{0,8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} S^{-0,5}$	min	L: comprimento do talvegue (km) CN: número da curva (método do SCS) S: declividade do talvegue (m/m)	Porto et al. (2014, p. 818)
		$t_c = 108,2 L^{0,8} \left( \frac{S_L}{25,4} + 1 \right)^{0,7} S_L^{-0,5}$	min	L: comprimento do talvegue (km) CN: número da curva (método do SCS) S <sub>L</sub> : obtido da relação S <sub>L</sub> =25400/CN-254 (m/m)	Genovez (2001, p. 68)
SCS – Método cinemático ou Método da Velocidade Média	Baseia-se no fato de que o tempo de concentração resulta do somatório dos tempos de trânsito dos diversos trechos que compõem o talvegue. Na parte superior da bacia, em que predomina o escoamento superficial sobre o terreno, recomenda-se o uso dos valores apresentados em tabela específica e, nos canais bem definidos e galerias, recomenda-se usar a fórmula de Manning. Considerado o método mais correto sob o ponto de vista conceitual, contudo é trabalhoso, pois exige a divisão dos canais em trechos uniformes e a determinação de suas características hidráulicas.	$t_c = \frac{1000}{60} \sum \frac{L_i}{V_i}$	min	L <sub>i</sub> : comprimento do i-ésimo trecho do talvegue (km) V <sub>i</sub> : velocidade média no i-ésimo trecho do talvegue (m/s)	Porto et al. (2014, p. 818) Genovez (2001, p. 68)
Dooge	Equação determinada a partir de dados de 10 bacias <b>rurais</b> com <b>áreas de 140 a 930 km<sup>2</sup></b> . Indicada para <b>bacias médias</b> e com <b>escoamento predominante em canais</b> .	$t_c = 21,88 A^{0,41} S^{-0,17}$	min	A: área de drenagem (km <sup>2</sup> ) S: declividade do talvegue (m/km)	Porto et al. (2014, p. 819)
Ven Te Chow	Equação obtida para pequenas bacias hidrográficas rurais, com <b>área de até 24,28 km<sup>2</sup></b> , localizadas em Illinois (EUA)	$t_c = 25,20 \left( \frac{L}{S_0} \right)$	min	L: comprimento do talvegue (km) S <sub>0</sub> : declividade média do talvegue (m/m)	Genovez (2001, p. 70)
		$t_c = 52,64 \left( \frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,64}$	min	L: comprimento do talvegue (km) S <sub>0</sub> : declividade média do talvegue (m/km)	Prusky; Brandão; Silva (2004, p.23)

Comentado [JC3]: Verificar

Tabela 2 - Métodos indiretos para determinação do tempo de concentração de uma bacia

Método	Aplicabilidade, restrições e observações	Equação	Unid.	Variáveis e constantes	Referências
		$t_c = 25,2 \left( \frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,64}$	min	L: comprimento do talvegue (km) S <sub>0</sub> : declividade média do talvegue (m/km)	DNIT (2005, p. 85)
Picking	Bacias rurais (SILVEIRA, 2005)	$t_c = 5,3 \left( \frac{L^2}{S_0} \right)^{1/3}$	min	L: comprimento do talvegue (km) S <sub>0</sub> : declividade média do talvegue (m/m)	Genovez (2001, p. 70)
		$t_c = 51,79 \left( \frac{L^2}{S_0} \right)^{1/3}$	min	L: comprimento do talvegue (km) S <sub>0</sub> : declividade média do talvegue (m/km)	Prusky; Brandão; Silva (2004, p.23)
Izzard	Equação indicada para bacias pequenas, com escoamento laminar, sem canais definitivos. Utilizada para projeto de obras de urbanização, loteamentos, etc. Tempo de concentração calculado de modo iterativo. Aplicável para situações em que o produto (Im L) < 3,871 mm/h m Valores de Cr recomendados nas <b>tabela y</b>	$t_c = \frac{526,42 b L^{\frac{1}{3}}}{(C I_m)^{\frac{2}{3}}}$ $b = \frac{0,0000276 I_m + C_r}{S^{1/3}}$	min	L': comprimento do trecho em que ocorre o escoamento superficial, distância entre a saída da bacia e o ponto mais remoto da seção considerada (m); I <sub>m</sub> : intensidade máxima média de precipitação (mm/h) C: coeficiente de escoamento superficial (adimensional) H': diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue (m) S': declividade média da superfície, desde o ponto mais remoto até a sua saída, (m/m) S' = H'/L' Cr: coeficiente de retardo (adimensional)	Prusky; Brandão; Silva (2004, p.24)
Giandotti	Não identificado em nenhuma literatura consultada.	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5 L}{0,8 \sqrt{H}}$	h	A: área de drenagem (km²) L: comprimento do talvegue (km) H: diferença de cotas entre o exutório da bacia e o ponto mais distante do talvegue (m)	Prusky; Brandão; Silva (2004, p.26) DNIT (2005, p. 87)

Tabela 2 - Métodos indiretos para determinação do tempo de concentração de uma bacia

Método	Aplicabilidade, restrições e observações	Equação	Unid.	Variáveis e constantes	Referências
Arnell	Baseado em estudos desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas e Obras Públicas do Ministério da Construção do Japão, que considerou 85 registros de escoamento em 23 bacias hidrográficas urbanas contendo 14 rios, considerando um intervalo de tempo de 10 minutos. As equações são definidas em função do tipo de bacia.	Bacias naturais com $0,50 \leq C \leq 0,70$ $t_c = 1,67 \cdot 10^{-3} \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,7}$ Bacias urbanas com $0,70 \leq C \leq 0,90$ $t_c = 2,4 \cdot 10^{-4} \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,7}$	h	L: comprimento do talvegue (m); S: declividade do talvegue (m/km).	Santos (2010)
Bransby-Williams	Indicado para áreas rurais.	$t_c = 14,6 L A^{-0,1} S^{-0,2}$	min	A: área de drenagem (km <sup>2</sup> ) L: comprimento do talvegue (km) S: declividade do talvegue (m/m)	Santos (2010) Farias Junior; Botelho (2011, p. 6)
Jhonstone	Desenvolvido na Escócia a partir de dados de bacias rurais com áreas de 65 as 4200 km <sup>2</sup>	$t_c = 20,17 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,5}$	min	L: comprimento do talvegue (km); S: declividade do talvegue (m/m).	Santos (2010) Silveira (2005, p.10)
Tsuchiya	Desenvolvido para projetos de bacias hidrográficas no Japão, a partir do estudo de 235 bacias com áreas de 0,001 a 0,002 km <sup>2</sup> urbanizadas e não urbanizadas.	Para áreas urbanizadas: $t_c = 0,83 \frac{L}{S^{0,6}}$ Para áreas não urbanizadas: $t_c = 0,36 \frac{L}{S^{0,5}}$	min	L: comprimento do talvegue (km); S: declividade do talvegue (m/m).	Santos (2010)
Riverside Country	Área de drenagem entre 5 e 1600 km <sup>2</sup>	$t_c = K_r \left( \frac{0,0053 L L_{CA}}{\sqrt{S_{eq}}} \right)$	h	L: comprimento do talvegue (km) S <sub>eq</sub> : declividade média equivalente (m/m) K <sub>r</sub> : coeficiente do tempo de pico (em função da área impermeável) L <sub>CA</sub> : comprimento do talvegue a partir do centróide da bacia (km)	Farias Junior; Botelho (2011, p. 6)

Tabela 2 - Métodos indiretos para determinação do tempo de concentração de uma bacia

Método	Aplicabilidade, restrições e observações	Equação	Unid.	Variáveis e constantes	Referências
Pasini	Não identificado em nenhuma literatura consultada.	$t_c = \frac{0,108(AL)^{1/3}}{S^{0,5}}$	h	A: área de drenagem (km <sup>2</sup> ) L: comprimento do talvegue (km) S <sub>0</sub> : declividade média do talvegue (m/m)	DNIT (2005, p. 86)
DNOS	Áreas inferiores á 0,45 km <sup>2</sup> , declividade de 3 a 10 e comprimento de talvegue inferior a 1,2 km.	$t_c = \frac{10 A^{0,3} L^{0,2}}{K S^{0,4}}$	min	A: área de drenagem (ha) L: comprimento do talvegue (m) S: declividade (°) K: parâmetro das características do terreno	DNIT (2005, p. 85) Silveira (2005, p.10)
US Corps of Engineers	Recomendado para bacias com áreas de até 3000 km <sup>2</sup>	$t_c = 0,3 \left( \frac{L}{S_{eq}^{0,25}} \right)^{0,76}$	h	L: comprimento do talvegue (km) S <sub>eq</sub> : declividade média equivalente (m/m)	DNIT (2005, p. 84)
Carter Lag equation for Partially Sewered	Bacias urbanas com área de drenagem inferior a 20,7 km <sup>2</sup> , comprimento de talvegue principal inferior a 11,26 km, declividade inferior a 0,5 e coeficientes de Manning entre 0,013 e 0,025	$t_c = 100 \frac{L^{0,6}}{S^{0,3}}$	min	L: comprimento do talvegue (milha) S: declividade do talvegue (pé/milha)	Farias Junior; Botelho (2011, p. 7) Silveira (2005, p.10)
Williams	Área de drenagem inferior a 129,5 km <sup>2</sup>	$t_c = 21,3 \frac{L}{A^{0,1} S^{0,2}}$	min	A: área de drenagem (milha <sup>2</sup> ) L: comprimento do talvegue (milha) S: declividade do talvegue (pé/pé)	Farias Junior; Botelho (2011, p. 7)
Ventura	Recomendado pela École National des Ponts et Chaussées. Aplicável a bacias rurais.	$t_c = 0,127 \sqrt{\frac{A}{S}}$	h	A: área de drenagem (km <sup>2</sup> ) S: declividade do talvegue (m/m)	DNIT (2005, p. 87) Farias Junior; Botelho (2011, p. 7) Silveira (2005, p.10)
McCuen	Utiliza o parâmetro intensidade de precipitação como dado de entrada. Aplicável a bacias urbanas com áreas entre 0,4 e 16 km <sup>2</sup> , com declividade inferior a 4 e comprimento de talvegue inferior a 10 km.	$t_c = 0,01462 \frac{L^{0,5552}}{I_2^{0,7164} S^{0,207}}$	h	L: comprimento do talvegue (pé) S: declividade do talvegue (pé/milha) I <sub>2</sub> : intensidade da precipitação para um período de retorno de 2 anos (polegada/hora)	Farias Junior; Botelho (2011, p. 7) Silveira (2005, p.10)
IPH II	Bacias urbanas com área de drenagem variando de 2,5 a 137 km <sup>2</sup>	$t_c = 18,628 \frac{L^{0,882}}{A_i^{0,272}}$	min	L: comprimento do talvegue (km) A <sub>i</sub> : fração da área impermeável da bacia(°)	Farias Junior; Botelho (2011, p. 7)

Tabela 2 - Métodos indiretos para determinação do tempo de concentração de uma bacia

Método	Aplicabilidade, restrições e observações	Equação	Unid.	Variáveis e constantes	Referências
Putnam	Área de drenagem entre 0,75 e 340 km <sup>2</sup> , $A_i$ inferior a 30 e valor da razão do talvegue e raiz da inclinação deve estar entre 1 e 9.	$t_c = 0,49 \left( \frac{45,15 L}{\sqrt{S_{eq}}} \right)^{0,50} A_i^{-0,37}$	h	L: comprimento do talvegue (km) $S_{eq}$ : declividade média equivalente (m/m) A <sub>i</sub> : fração da área impermeável (0 a 1);	Farias Junior; Botelho (2011, p. 7)
Tulsa District	Área de drenagem entre 1 e 1300 km <sup>2</sup> , declividade média equivalente entre 0,0008 e 0,180 m/m, e comprimento do talvegue entre 1,6 e 96 km	$t_c = K' \left( \frac{0,053 L L_{CA}}{\sqrt{S_{eq}}} \right)^{0,39}$	h	L: comprimento do talvegue (km) $S_{eq}$ : declividade média equivalente (m/m) L <sub>CA</sub> : comprimento do talvegue a partir do centróide da bacia (km) K': constante variando segundo nível de urbanização	Farias Junior; Botelho (2011, p. 7)
Denver	Área de drenagem inferior a 13 km <sup>2</sup> e declividade moderada	$t_c = C_t \left( \frac{0,386 L L_{CA}}{\sqrt{S_{eq}}} \right)^{0,48}$	h	L: comprimento do talvegue (km) $S_{eq}$ : declividade média equivalente (m/m) C <sub>t</sub> : coeficiente do tempo de pico (em função da área impermeável) L <sub>CA</sub> : comprimento do talvegue a partir do centróide da bacia (km)	Farias Junior; Botelho (2011, p. 7)
George Ribeiro	Equação adaptada de Bransby-Williams e Kerby. Aplicável a bacias com áreas menores que 19000 km <sup>2</sup> , declividades variando de 1 a 10 e comprimento de talvegue inferior a 250 km.	$t_c = \frac{16 L}{(1,05 - 0,2p)(100 S_0)^{0,004}}$	min	L: comprimento do talvegue (km) $S_0$ : declividade média do talvegue (m/m) p: razão entre a área coberta com vegetação e a área total da bacia (decimal)	Genovez (2001, p. 69) Farias Junior; Botelho (2011, p. 8)
Hathaway	Não identificado em nenhuma literatura consultada.	$t_c = 0,606 \frac{(L n)^{0,467}}{S_{eq}^{0,234}}$	h	L: comprimento do talvegue (km) $S_{eq}$ : declividade média equivalente (m/m) n: coeficiente de rugosidade de Manning (sm <sup>-1/3</sup> )	Farias Junior; Botelho (2011, p. 8)

A caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas constitui tarefa fundamental para diferentes etapas que conformam o emprego de modelos chuva-vazão, dentre as quais encontra-se, por exemplo, a apropriação de tempos de concentração. Função do recorrente emprego de sistemas de informações geográficas como ferramenta de apoio para apropriação de variáveis fisiográficas, as seções subsequentes serão reservadas para uma breve apresentação dos referidos sistemas e de assuntos correlatos.

### **3.4. Sistemas de informações geográficas**

Ferraz, Milde e Martati (1999) investigaram o acoplamento de modelos hidrológicos a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e destacaram esse uso combinado de ferramentas como a maior tendência em aplicações de modelagem hidrológica. Segundo os autores, a principal função do SIG é determinar os parâmetros hidrológicos por meio da análise topográfica do terreno usando dados geoespaciais referentes à elevação e características da cobertura da superfícies terrestres.

Segundo Câmara et al. (2004), o termo Sistemas de Informações Geográficas se aplica aos sistemas que atuam no tratamento computacional de dados geográficos, armazenamento da geometria e atributos desses dados. É relevante registrar que esses dados se referem a elementos localizados na superfície terrestre e representados em uma projeção cartográfica dessa superfície, o que equivale a dizer que os dados são georreferenciados.

A representação cartográfica de elementos geográfico, em papel ou em formato digital, só é possível por meio da utilização de uma escala de representação. Considerando a relevância do conceito de escala para os usuários de dados geoespaciais, a seção seguinte será reservada a apresentação sumária deste conceito.

### 3.5. Escala e resolução espacial

Longley *et al.* (2011) apresentam vários significados para o termo escala. Segundo os autores, a escala pode ser entendida como resolução espacial, que corresponde ao nível de detalhe espacial dos dados. Outro significado para escala é a sua associação ao conceito de extensão ou escopo de um projeto. Um terceiro significado admissível, de acordo com os autores, se refere ao conceito de escala na visão dos cartógrafos, que a definem como a razão entre uma distância linear representada em um produto cartográfico (mapa, planta, carta, etc.) e a respectiva distância no terreno.

Neste trabalho será adotado o conceito de escala associado ao nível de detalhamento que um determinado plano de informação possui. Nesse sentido, para dados matriciais, o conceito de escala será considerado equivalente ao de resolução espacial. Segundo Fitz (2008), essa resolução pode ser entendida como a área do terreno que corresponde a um *pixel* na imagem.

Um importante aspecto destacado por Fitz (2008) é o fato de que, quando se trabalha com mapas digitais, a escala pode ser facilmente transformada para diversos valores. Essa liberdade faz com que a preocupação com a escala seja deixada em segundo plano. Entretanto, o autor ressalta a necessidade de cautela ao se trabalhar com esse tipo de estrutura, pois a realidade representada em um mapa digital está intimamente vinculada à escala do produto que o deu origem, e que, portanto, não pode assumir precisão superior à permitida pela escala original.

### 3.6. Dados geográficos, espaciais e geoespaciais

Os dados geográficos podem ser divididos em três categorias: espacial, descritivo e temporal. O dado espacial é um elemento com localização espacial definida de acordo com um sistema de coordenadas pré-definido, que se refere à localização, à forma e às relações entre entidades espaciais. O dado descritivo se refere às características da entidade espacial, também denominadas atributos. O dado temporal se refere ao período de ocorrência do fenômeno ou fato geográfico (MENDES e CIRILO, 2001).

Fitz (2008) define os dados espaciais como aqueles que são passíveis de representação espacial, ou seja, de representação na forma gráfica. Segundo o autor os dados podem ser imagens, mapas temáticos ou planos de informações apresentados em estrutura matricial (*raster*) ou vetorial.

Os dados na estrutura matricial apresentam o espaço geográfico descrito na forma de matriz de células, que possuem valores atribuídos a cada célula, também denominada pixel (contração de *picture element*). Alguns exemplos de dados matriciais são imagens de satélite, fotografias digitais e mapas digitalizados (MENDES e CIRILO, 2001; FITZ, 2008).

Os dados na estrutura vetorial descrevem os objetos na forma de vetores (pontos, linhas e áreas) e podem ser associados a um conjunto de atributos (MENDES e CIRILO, 2001).

Segundo Mendes e Cirilo (2001), os dados espaciais são posicionais, uma vez que caracterizam a posição de um objeto; são topológicos, visto que caracterizam relacionamentos ou conexões entre objetos; e são amostrais, pois caracterizam grandezas físicas ou outras propriedades obtidas em pontos de amostragem.

A denominação “dados geoespaciais”, largamente empregada neste trabalho, é utilizada para designar os dados espaciais que possuem uma referência geográfica, ou seja, que estão georreferenciados.

Melo et al. (2008) enumera os dados geoespaciais referentes ao tipo e uso do solo, cobertura vegetal, relevo e distribuição das feições hidrológicas, dentre os dados que são recorrentemente utilizados como entrada em modelos hidrológicos e que podem ser fornecidos pela ferramenta SIG.

Dentre os dados geoespaciais utilizados em modelagem hidrológica, um que merece destaque são os modelos digitais de elevação (MDE), definido por Ferraz, Milde e Moratti (1999) como uma representação matemática da distribuição espacial da altimetria do terreno em estudo, produzida a partir da interpolação de pontos topográficos ou curvas de nível.

Miceli et al. (2011) realizou a comparação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação disponibilizados gratuitamente na internet em diferentes escalas, considerando duas áreas com características geomorfológicas distintas. Os

resultados do estudo mostraram que os modelos analisados apresentaram diferentes padrões de acuracidade vertical, e que a escolha de bases de dados geoespaciais neste formato tem influência direta na apropriação de parâmetros como a declividade, que tem extrema relevância para o processo de modelagem chuva-vazão.

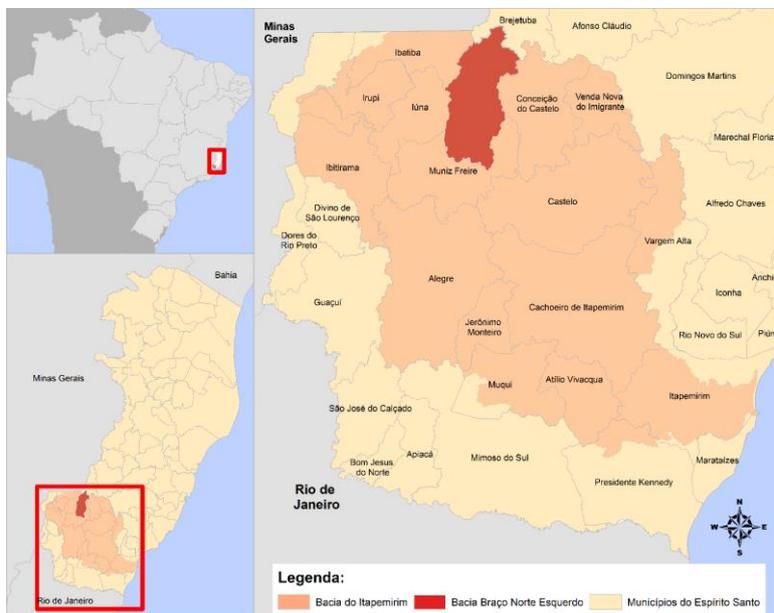
## 4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo consiste em uma bacia hidrográfica de porte médio denominada Bacia do Braço Norte Esquerdo, que possui área de aproximadamente 333,52 km<sup>2</sup> e perímetro de 111,71 km. Ela se localiza na porção sudoeste do estado do Espírito Santo, na região do Caparaó, na porção norte do município de Muniz Freire, conforme pode ser observado na Figura 1.

A região apresenta relevo variando de fortemente ondulado a montanhoso, com predominância de solos classificados como Latossolo Vermelho e Latossolo Amarelo distrófico, que veem sendo degradados pelo avanço de pastagens extensivas, abandono de culturas de café degradadas e implementação de novas culturas anuais, além da construção e manutenção de estradas com tecnologias inadequadas (INCAPER, 2011).

Segundo Incaper (2011), o clima da região onde se encontra a área de estudo é o temperado seco, com pluviosidade média anual de 1.371 mm.

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Autora

Os limites da bacia foram obtidos a partir do conjunto de ottobacias de nível 5, disponibilizadas no Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do estado do Espírito Santo (GEOBASES).

A bacia tem como principal curso d'água o rio Braço Norte Esquerdo, um dos afluentes do rio Itapemirim. Na Figura 1, a região destacada na cor laranja representa a porção capixaba da bacia hidrográfica do Itapemirim. A porção destacada em vermelho, por sua vez, representa a bacia do rio Braço Norte Esquerdo<sup>1</sup>.

#### **4.1. Subdivisão da bacia**

Visando possibilitar a análise comparativa da resposta hidrológica de bacias de diferentes tamanhos às diferentes combinações de dados de entrada e planos de informação, optou-se por adotar uma subdivisão da bacia em regiões hidrográficas menores.

Para isso adotou-se a subdivisão oficial disponível no Portal GEOBASES, visando garantir a adoção limites compatíveis com os que são utilizados para o planejamento dos recursos hídricos no Estado e produzir informações que possam ter correspondência com essas unidades de planejamento.

A referida subdivisão corresponde as ottobacias de nível 6, que é realizada adotando-se o divisor topográfico como critério para separação das regiões hidrográficas existentes na bacia.

Portanto, adotou-se a subdivisão da área de estudo em oito regiões hidrográficas apresentadas na Tabela 3, cujos limites estão apresentados na Figura 2.

---

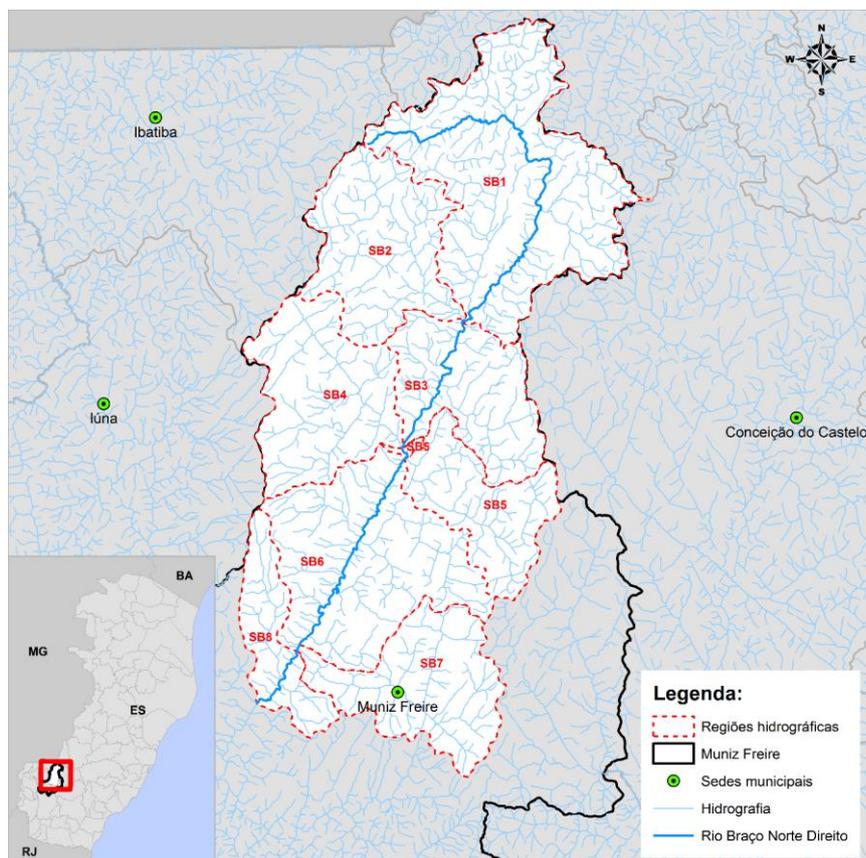
<sup>1</sup> Ottobacia nível 5 cujo código é 77168.

Tabela 3 - Regiões hidrográficas da área de estudo

IDENTIFICAÇÃO	CÓDIGO OTTOBACIA NÍVEL 6	NOME DA REGIÃO
SB1	771689	Sem nome
SB2	771688	Córrego Mata-Pau
SB3	771687	Sem nome
SB4	771686	Córrego Tombos
SB5	771684	Córrego Rico
SB6	771683	Sem nome
SB7	771682	Ribeirão Vargem Grande
SB8	771681	Sem nome

Fonte: Autora

Figura 2 - Subdivisão da bacia em estudo



Fonte: Autora

## 5. METODOLOGIA

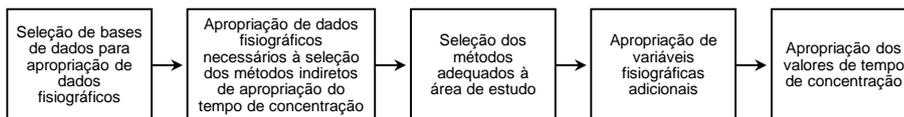
Nesta seção são apresentadas informações referentes às etapas metodológicas que conformaram a condução do trabalho. Cabe salientar que foram estabelecidas duas premissas básicas para implementação das diferentes etapas da metodologia empregada. São elas:

- Adoção de metodologias de baixo custo e fácil reprodutibilidade, priorizando o uso de ferramentas computacionais gratuitas, sempre que possível; e
- Utilização de informações de domínio público gratuitamente disponibilizada por instituições públicas, buscando-se não utilizar dados ou informações de domínio privado.

### 5.1. Seleção de expressões aplicáveis à apropriação do tempo de concentração

A determinação do tempo de concentração das 8 regiões hidrográficas da área de estudo seguiu as etapas apresentadas na Figura 3. Mais adiante são detalhadas as atividades realizadas em cada uma das etapas.

Figura 3 - Etapas seguidas na determinação do tempo de concentração



Fonte: Autora

Nas seções subsequentes serão descritas as etapas que precederam a apropriação do tempo de concentração (quatro primeiras etapas do fluxograma apresentado na Figura 3). Nestas seções, sempre que necessário, serão reunidas as informações obtidas diretamente de bases de dados ou da manipulação de arquivos em formato *shapefile* associados às características fisiográficas da área de estudo, informações que, de fato, permitirão a apropriação do tempo de concentração.

### 5.1.1. Seleção de bases de dados

O conjunto de expressões disponíveis para apropriação dos tempos de concentração permitiu identificar as variáveis necessárias para determinação dos referidos tempos nas regiões hidrográficas de interesse. Deste modo, esta etapa consistiu na busca de dados fisiográficos da área de estudo junto às bases públicas de instituições responsáveis pela aquisição e armazenamento desse tipo de informações.

Os dados fisiográficos representam as características físicas da bacia como o relevo, a rede de drenagem, a cobertura vegetal, o solo, o uso e ocupação da superfície, dentre outras. Essas características geralmente são extraídas de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélites.

Nesta etapa optou-se pela utilização de dados provenientes de bases cartográficas digitais. Esses dados correspondem a arquivos digitais contendo planos de informações em formato *raster* ou vetorial (formato *shapefile*), que podem ser manipulados por meio de Sistema de Informações Geográficas.

Desta forma, realizou-se uma pesquisa de bases de dados com disponibilidade de planos de informações referentes ao relevo, rede de drenagem, tipo de solo e uso e ocupação do solo.

Após identificação das bases de dados, foi realizado *download* e o levantamento das informações sobre os arquivos obtidos visando identificar: a origem dos dados, a sua escala ou resolução espacial, o sistema de projeção utilizado na representação dos dados, o sistema de referência horizontal e vertical (Datum) e o período de aquisição dos dados.

Os arquivos de procedência duvidosa ou com baixo nível de detalhamento (escalas muito pequenas) foram previamente descartados e demais arquivos foram submetidos a um processo de análise da consistência dos atributos e da representação geométrica das feições. Essa análise envolveu a conferência das informações, a comparação entre os arquivos, a correção de falhas topológicas, e transformações de sistemas de projeção e coordenadas visando trabalhar com os dados em um mesmo sistema de coordenadas e Datum (SIRGAS 2000).

#### 5.1.1.1. Relevo

A representação do relevo de uma região pode ser feita de diversas formas, dentre as quais destacam-se:

- Pontos cotados - pontos de cota conhecida distribuídos de maneira aleatória ou sistemática;
- Curvas de nível - são linhas que ligam pontos de mesma cota altimétrica com intervalos fixo entre as linhas;
- Modelos digitais de elevação e modelos digitais de terreno - são modelos digitais composto por dados matriciais, geralmente imagens, que possuem um valor de altitude associado a cada *pixel*.

Deste modo, foram realizadas buscas de planos de informações dessa natureza na internet, encontrando-se uma grande diversidade de fontes gratuitas de modelos digitais de elevação (MDE) com resolução de 90 metros, provenientes do projeto SRTM (em inglês, *Shuttle Radar Topography Mission*); e com resolução de 30 metros, provenientes do projeto conhecido como TOPODATA e do sensor ASTER. Em ambos os casos, os MDE foram gerados a partir de levantamentos utilizando interferometria de radar.

Além dos modelos digitais descritos anteriormente, também foi identificada a existência de plano de informação digital contendo curvas de nível com equidistância de 20 metros para a área de estudo.

Diante da diversidade de dados e fontes disponíveis optou-se pela seleção de três tipos de dados: um MDE com resolução de 90 metros, um MDE com resolução de 30 metros e um arquivo vetorial de curvas de nível com equidistância de 20 metros, todos disponibilizados por instituições públicas.

O MDE com resolução de 90 metros selecionado para o estudo foi o arquivo correspondente à folha SF-24-V-A, resultante do projeto “Brasil em Relevo” e livremente disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Essa escolha se deu devido à ampla documentação disponibilizada sobre o arquivo no site da instituição e por conta do processo de refinamento dos dados brutos realizado pela mesma. Esse processo remove depressões espúrias, picos anômalos e pontos com dados ausentes do arquivo original, e produz um

arquivo “tratado”, com informações mais consistentes e sem a necessidade de realização de correção por parte do usuário.

Em relação ao MDE com resolução de 30 metros, selecionou-se o arquivo disponibilizado na página do projeto ASTER GDEM. Essa escolha deveu-se ao baixo nível de confiabilidade da informação disponibilizada pelas outras fontes. Vale ressaltar que, por conta da falta de informações sobre o refinamento dos dados, realizou-se o processo de preenchimento de falhas utilizando recursos de software de SIG.

O plano de informações referente às curvas de nível com equidistância de 20 metros corresponde à vetorização das curvas de nível disponíveis nas cartas SF-24-V-A-II-1 e SF-24-V-A-II-3, produzidas por meio de restituição fotogramétrica com escala de 1:50.000. Esse arquivo é disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e no Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo (GEOBASES). Por uma questão de facilidade de acesso, optou-se pela utilização do arquivo disponibilizado pelo GEOBASES.

#### **5.1.1.2. Rede de drenagem**

A rede de drenagem representa os caminhos por onde passam os cursos d’água, geralmente localizados nos fundos dos vales. Essa rede de drenagem consiste na hidrografia da bacia e pode ser representada por um conjunto de linhas interligadas que formam a rede que conduz o fluxo de água para o exutório da bacia.

Essa rede pode ser obtida a partir de bases cartográficas produzidas por restituição fotogramétrica, ou a partir de processamento de modelos digitais de elevação utilizando SIG.

Em um primeiro momento realizou-se uma busca de planos de informação de redes de drenagem na base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA). Contudo identificou-se que as escalas dos planos disponíveis (1:1.000.000) não permitiam um nível de detalhamento satisfatório, além de apresentarem diversas inconsistências e ausência de informações referentes aos nomes dos cursos d’água.

Em seguida partiu-se para o levantamento de dados da base do IBGE e foram encontrados planos de informação de rede de drenagem disponíveis em duas escalas: 1:250.000, pertencente a um mapeamento sistemático de todo território brasileiro na referida escala atualizado em 2015 (carta SF-24-V-A); e 1:50.000, proveniente da vetorização dos trechos cartas SF-24-V-A-II-1 e SF-24-V-A-II-3.

O arquivo referente à hidrografia com escala 1:50.000 também se encontra disponível no portal do GEOBASES. Por possuir maior detalhamento em relação a identificação dos cursos d'água, optou-se pela utilização dos dados disponibilizados pelo GEOBASES.

Cabe salientar que foram realizadas tentativas de geração de redes de drenagem a partir dos modelos digitais de elevação obtidos na etapa anterior. Todavia, verificou-se que quando se buscava aumentar o nível de detalhamento da rede, utilizando processamento em software de SIG, os fundos de vales começam a apresentar um aspecto retificado, com traçados muito diferentes daqueles apresentados nos planos de informações vetorizados, considerados como parâmetro de referência.

Diante desses fatos optou-se pela utilização dos dados vetoriais disponíveis, uma vez que se acredita que a rede de drenagem obtida a partir de modelos digitais de elevação com resoluções de 90 metros e 30 metros apresentam um menor nível de detalhe que os apresentados nas escalas disponíveis.

Após obtenção dos planos de informações vetoriais de rede de drenagem analisou-se a consistência dos atributos e a correção topológica da rede. A partir dessas atividades foi possível identificar falhas nos dados disponíveis na escala 1:50.000, que apresentaram inconsistências na direção do escoamento dos cursos d'água e descontinuidade entre os elementos da rede. Visando mitigar os efeitos decorrentes dessas falhas optou-se por corrigir as falhas de descontinuidade do plano de informações; contudo, manteve-se o sentido do escoamento original.

#### **5.1.1.3. Tipo de solo**

O tipo de solo oferece informações importantes sobre a capacidade de infiltração da água na bacia. Alguns solos apresentam composição e estrutura que favorecem a

entrada e o armazenamento de água em suas camadas, enquanto outros oferecem resistência à penetração da água.

No Brasil, as instituições que coletam e armazenam informações sobre o tipo de solo, geralmente, estão ligadas ao desenvolvimento e produção agrícola. Deste modo, a preocupação dessas instituições muitas vezes está concentrada na composição e aptidão do uso para cultivo, de modo que alguns aspectos estruturais do solo, que são importantes para análise de seu comportamento hidrológico, acabam sendo negligenciados.

Para obtenção de dados referentes à pedologia da área de estudo foram concentrados esforços de pesquisa nas bases de dados das instituições IBGE, EMBRAPA e GEOBASES.

Os dados disponíveis na base do IBGE apresentam baixo nível de detalhamento, indicando para praticamente toda a região o mesmo tipo de solo. Após essa constatação, descartou-se a utilização dos planos de informação provenientes dessa fonte.

Na base de dados da EMBRAPA foram identificados dois planos de informação relativos ao tipo de solo. Um deles, relativo a um mapeamento de solos do Espírito Santo produzido em 1978, com escala 1:400.000. O outro corresponde a um mapeamento em escala nacional de 1: 5.000.000, produzido em 2011.

Esse último, assim como os disponíveis na base de dados do IBGE, apresenta escala com nível de detalhe muito grosseiro, de modo que sua aplicação em estudos de bacias pequenas e médias pode ser considerado inadequado.

Por último, analisou-se o plano de informações de solos disponível no portal do GEOBASES, que tem como base o Mapa Exploratório de Solos do Radam Brasil na escala 1:250.000, com o acréscimo e correção de informações a partir do cruzamento de informações com outros mapeamentos realizados.

Ao final do processo de análise das bases foram selecionados os arquivos de tipo de solo disponibilizados nas escalas 1:400.000 (EMBRAPA) e 1:250.000 (GEOBASES), sendo este último o dado de maior escala livremente disponível para a região de interesse.

#### 5.1.1.4. Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo interfere significativamente no comportamento hidrológico de uma bacia, uma vez que a destinação que é dada ao solo influencia na sua capacidade de infiltração e escoamento superficial da água. Ambientes urbanizados apresentam alto nível de impermeabilização e canalização, enquanto que ambientes rurais permitem maior infiltração.

Essa informação é considerada em muitos dos métodos que buscam garantir que o tempo de concentração da bacia reflita os efeitos sobre as mudanças no seu uso e ocupação.

Após pesquisa de planos de informações de uso e ocupação disponíveis na internet e na base de dados do IBGE, foram identificados alguns arquivos sem informações consistentes sobre sua origem e data de produção, ou com escalas de baixo nível de detalhamento.

Foi realizada visita ao setor de geoprocessamento do IEMA e obteve-se o plano de informações referente ao mapeamento de uso e ocupação obtido a partir do ortofotomosaico produzido entre 2008 e 2010, na escala 1:15:000.

Cabe salientar que o processo de busca de dados foi realizado no princípio de 2015. Existe, portanto, a possibilidade de que dados mais atualizados tenham sido disponibilizados após a fase de coleta.

A Tabela 4 apresenta um resumo das bases de dados selecionadas para implementação das etapas subsequentes.

Tabela 4 - Bases de dados selecionadas para a área de estudo

Tema	Dado geospacial	Tipo de dado	Resolução espacial/escala	Fonte
Relevo	Modelo Digital de Elevação	Matricial	90 metros	EMBRAPA
	Modelo Digital de Elevação	Matricial	30 metros	ASTER GEDEM
	Curvas de nível	Vetorial	1:50.000	GEOBASES
Rede de drenagem	Trechos de drenagem	Vetorial	1:50.000	GEOBASES
		Vetorial	1:250.000	IBGE
Tipo de Solo (Pedologia)	Pedologia ES (1978)	Vetorial	1:400.000	EMBRAPA
	Pedologia ES (Radam)	Vetorial	1:250.000	GEOBASES
Uso e ocupação	Uso do solo (2008-2010)	Vetorial	1:10.000	IEMA

Fonte: Autora

### 5.1.2. Apropriação de dados fisiográficos

A partir do levantamento das expressões aplicáveis a estimativa dos tempos de concentração foi possível observar que a aplicabilidade dos métodos identificados se baseia em quatro variáveis básicas: o tipo de ocupação da bacia, a área da bacia, a declividade e o comprimento do talvegue.

Neste item está descrita a apropriação de cada uma dessas variáveis, etapa que fornecerá as informações necessárias para a seleção dos métodos indiretos de apropriação do tempo de concentração.

#### 5.1.2.1. Tipo de ocupação da bacia

O tipo de ocupação da bacia consiste na informação em relação ao uso e ocupação do solo predominante na bacia, permitindo a sua classificação como urbana ou rural. Uma bacia rural tem o uso do solo caracterizado pela presença de cultivos, matas e pastagens, com baixo nível de urbanização e impermeabilização. Por sua vez, uma bacia classificada como urbana, apresenta alto nível de impermeabilização com o uso do solo caracterizado pela presença de edificações e ruas pavimentadas.

Para determinar o tipo de ocupação das regiões hidrográficas foram levantadas as áreas correspondentes a cada classe de uso utilizando-se o plano de informação de uso e ocupação do solo apropriado na etapa anterior.

A partir desse levantamento foi produzida a Tabela 5, que apresenta os percentuais das áreas com os diferentes tipos de uso e ocupação.

Tabela 5 - Percentual da área ocupada pelos diferentes tipos de uso e ocupação do solo

Uso do Solo	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
Afloramento Rochoso	1,95	1,87	5,89	5,72	5,61	5,74	10,10	2,20
Área Edificada	0,05	0,00	0,49	0,00	0,00	0,28	1,91	0,00
Brejo	0,33	0,59	0,04	0,01	0,05	0,03	0,15	0,00
Campo Rupestre/Altitude	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,02	0,00	0,04
Cultivo Agrícola - Banana	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cultivo Agrícola - Café	11,74	9,10	28,39	24,61	15,09	12,06	14,02	14,90
Cultivo Agrícola - Coco-Da-Baía	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Permanentes	0,63	1,13	0,51	0,52	0,16	0,14	0,42	0,13
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Temporários	7,10	2,60	1,67	0,82	1,11	0,53	1,03	0,96

Tabela 5 - Percentual da área ocupada pelos diferentes tipos de uso e ocupação do solo

Uso do Solo	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
Extração Mineração	0,05	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
Macega	16,28	11,35	11,39	6,76	10,00	8,15	6,58	5,31
Massa D'Água	0,11	0,07	0,29	0,00	0,11	0,34	0,03	0,46
Mata Nativa	22,18	16,85	8,90	25,57	9,66	16,32	17,09	26,76
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	5,17	7,16	3,35	8,79	3,88	6,21	7,58	7,87
Outros	3,17	1,41	3,11	1,70	1,66	1,31	2,44	1,58
Pastagem	22,93	31,02	32,32	20,50	50,77	47,00	37,26	38,30
Reflorestamento - Eucalipto	5,73	14,79	2,47	4,30	1,59	1,20	0,78	1,29
Reflorestamento - Pinus	0,71	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo Exposto	1,82	1,96	1,14	0,61	0,27	0,67	0,61	0,19

Fonte: Autora

A partir dos valores apresentados na Tabela 5 foi possível observar que todas as regiões hidrográficas apresentam a predominância de uso destinado a atividade agropastoril e matas. A presença de áreas edificadas é praticamente desprezível na maior parte das regiões; apenas na região SB7 as áreas edificadas ocupam aproximadamente 2% da região, sendo os percentuais menores nas demais regiões da área de estudo. Portanto, todas as regiões hidrográficas da área de estudo foram classificadas como rurais.

Vale ressaltar que, foi realizada uma busca por imagens de satélites atualizadas da região de estudo disponibilizadas no Google Earth. A partir da análise dessas imagens foi possível observar que, apesar dos avanços da urbanização, a área de estudo ainda apresenta ocupação predominantemente rural.

#### 5.1.2.2. Área da bacia

As áreas das regiões hidrográficas foram apropriadas a partir do arquivo contendo os limites das otobacias de nível 6, adotados como subdivisão da área de estudo, conforme mencionado no item 4.1. A partir da manipulação dos arquivos em software SIG, obteve-se a área projetada das regiões adotando-se o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator e o Datum SIRGAS 2000.

Os valores das áreas resultantes do processamento realizado encontram-se disponível na Tabela 6.

Tabela 6 - Áreas das regiões hidrográficas

Região hidrográfica	Área (km²)
SB1	82.3321
SB2	39.6985
SB3	32.9396
SB4	40.3444
SB5	27.3308
SB6	57.8157
SB7	35.2837
SB8	17.7716

Fonte: Autora

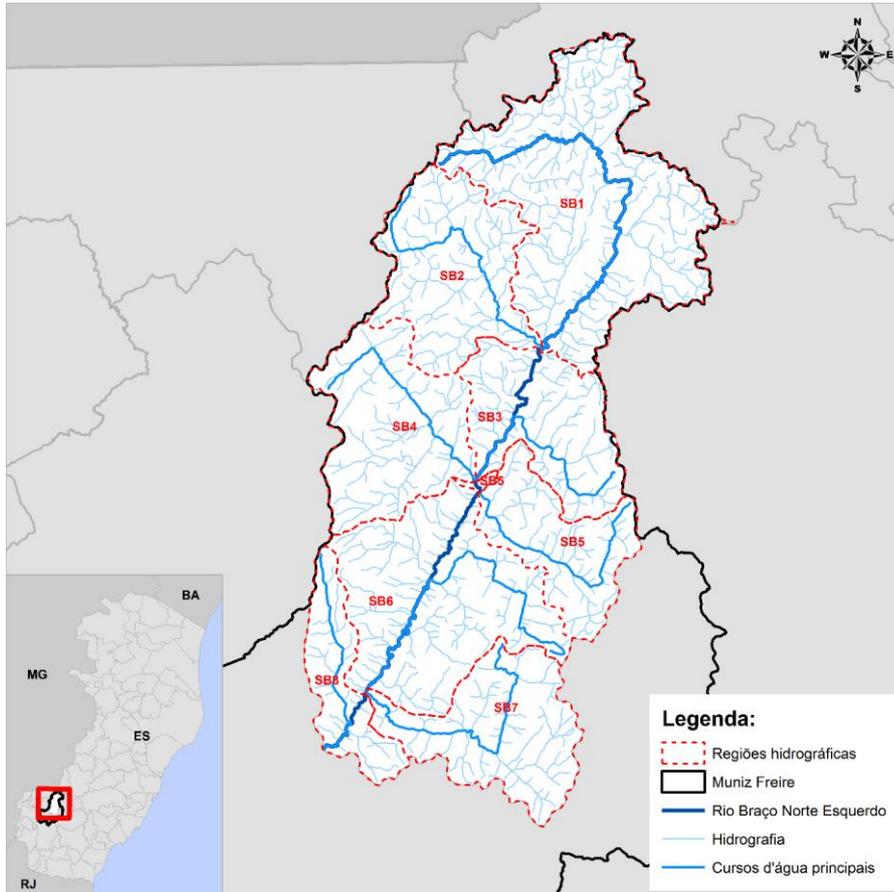
### 5.1.2.3. Comprimento do talvegue

O comprimento do talvegue principal de cada região hidrográfica foi apropriado por meio da soma dos trechos da rede de drenagem que apresentam maior comprimento a partir do exutório da bacia. Para isso, foram determinadas as seções de deságue de cada região e aplicou-se um procedimento de análise de redes para encontrar o caminho mais extenso a ser percorrido no deslocamento ao longo dos cursos d'água.

Como foram selecionados dois planos de informações de rede de drenagem com escalas diferentes, a metodologia foi aplicada para cada um dos casos.

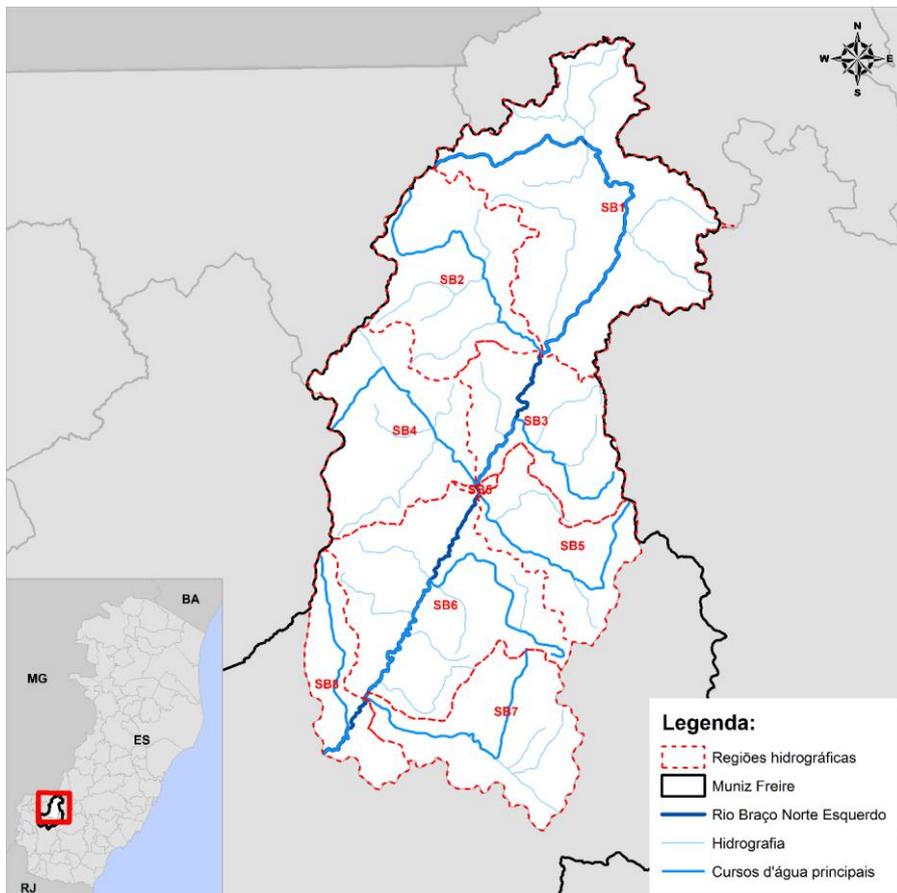
Os talvegues principais de cada região hidrográfica estão representados na Figura 4, considerando-se a rede de drenagem representadas na escala 1:50.000, e na Figura 5, considerando-se a escala 1:250.000.

Figura 4 - Talvegues principais das regiões hidrográficas da rede de drenagem na escala 1:50.000



Fonte: Autora

Figura 5 - Talvegues principais das regiões hidrográficas da rede de drenagem na escala 1:250.000



Fonte: Autora.

O resultado do processamento realizado nesta etapa encontra-se disponível na Tabela 7.

Tabela 7 - Comprimento dos talwegues principais das regiões hidrográficas

Região hidrográfica	Talvegue principal	Comprimento do talvegue (km)		Erro	
		1:50.000	1:250.000	Absoluto (km)	Relativo* (%)
SB1	Rio Braço Norte Esquerdo	21,64	20,55	1,0982	5,07
SB2	Córrego estrondo e Trecho do Córrego Mata-Pau	13,36	13,12	0,2426	1,82
SB3	Sossego e Trecho do Braço Norte Esquerdo	10,768	10,68	0,0752	0,70
SB4	Córrego Piaçu ou Cantagalo e Trecho do Córrego Tombos	10,46	10,26	0,1944	1,86
SB5	São João e Trecho do Córrego Rico	11,33	11,38	0,0456	0,40
SB6	Córrego Mata do Barão e Trecho do Braço Norte Esquerdo	17,93	17,85	0,0747	0,42
SB7	Córrego Águas Claras e Trecho do Ribeirão Vargem Grande	13,49	12,06	1,4378	10,66
SB8	Córrego Seio de Abraão e Trecho do Braço Norte Esquerdo	10,07	9,91	0,1630	1,62

\* Adotou-se como medida de referência o comprimento obtido na maior escala (1:50.000)

Fonte: Autora

#### 5.1.2.4. Declividade

A declividade representa variável empregada por diferentes métodos de determinação do tempo de concentração. Como a maior parte dos métodos que apresentam restrições em relação à declividade adota a declividade média do talvegue como variável, optou-se por utilizar o valor de declividade do talvegue como critério padrão para a análise da aplicabilidade das fórmulas.

Deste modo, foram apropriadas as coordenadas dos pontos correspondentes à cabeceira e exutório dos cursos d'água principais de cada sub-região hidrográfica, considerando o traçado da rede de drenagem disponíveis nas escalas 1:50.000 e 1:250.000. As referidas coordenadas estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Coordenadas dos pontos da cabeceira e exutório dos talweges principais

Região	Hidrografia 1:50.000				Hidrografia 1:250.000			
	Coordenada cabeceira*		Coordenada exutório*		Coordenada cabeceira*		Coordenada exutório*	
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)
SB1	246959,7	7759383,1	251170,6	7751651,0	246837,6	7759464,2	251198,1	7751569,8
SB2	245805,3	7758416,8	251170,6	7751651,06	245747,4	7758513,3	251198,1	7751569,8
SB3	254313,5	7746485,5	248495,6	7746066,6	254242,0	7746657,7	248528,6	7746073,2
SB4	242348,5	7749934,6	248495,6	7746066,6	242521,6	7748442,6	248528,6	7746073,2
SB5	254941,2	7745210,6	248586,1	7745565,5	254886,9	7745387,8	248626,9	7745709,4
SB6	251577,9	7738971,0	243881,5	7737125,9	251621,7	7738994,4	243891,5	7737035,0
SB7	249627,3	7739283,8	243881,5	7737125,9	250617,1	7739248,9	243891,5	7737035,0
SB8	242048,1	7743069,6	242136,1	7734792,6	242069,0	7743122,7	242166,3	7734783,6

\* - Sistema de coordenadas UTM / Datum SIRGAS 2000 FUSO 24 S. Fonte: Autora

Em seguida foram obtidas as cotas altimétricas correspondentes aos pontos de cabeceira e exutório de cada talvegue principal, considerando-se as diferentes fontes de informação referentes ao relevo. A partir das cotas obtidas foram determinados os valores de declividade de cada um dos talweges principais.

As cotas e os correspondentes valores de declividade obtidos estão apresentadas na Tabela 9 (escala 1:50.000) e Tabela 10 (escala 1:250.000).

Tabela 9 - Declividade dos talweges principais obtidos da hidrografia na escala 1:50.000

Região hidrográfica	Cota cabeceira (m)			Cota exutório (m)			Declividade (m/m)		
	MDE 30 m	MDE 90	MDT	MDE 30 m	MDE 90	MDT	MDE 30 m	MDE 90	MDT
SB1	1236,0	1275,0	1208,8	606,0	624,0	617,6	0,0291	0,0301	0,0273
SB2	1309,0	1371,0	1302,1	606,0	624,0	617,6	0,0526	0,0559	0,0512
SB3	1015,0	1049,0	1046,5	523,0	536,0	530,6	0,0457	0,0477	0,0480
SB4	1262,0	1250,0	1264,4	523,0	536,0	530,6	0,0707	0,0683	0,0702
SB5	990,0	1051,0	1016,7	487,0	508,0	491,2	0,0444	0,0479	0,0464
SB6	998,0	989,0	1000,5	405,0	419,0	399,9	0,0331	0,0318	0,0335
SB7	654,0	734,0	670,4	405,0	419,0	399,9	0,0185	0,0233	0,0200
SB8	1326,0	1352,0	1318,5	377,0	396,0	369,4	0,0942	0,0949	0,0943

Fonte: Autora

Tabela 10 - Declividade dos talwegues principais obtidos da hidrografia na escala 1:250.000

Região hidrográfica	Cota cabeceira (m)			Cota exutório (m)			Declividade (m/m)		
	MDE 30 m	MDE 90	MDT	MDE 30 m	MDE 90	MDT	MDE 30 m	MDE 90	MDT
SB1	1302,0	1333,0	1323,6	609,0	617,0	617,6	0,0337	0,0348	0,0344
SB2	1362,0	1377,0	1364,4	609,0	617,0	617,6	0,0574	0,0579	0,0569
SB3	1038,0	1066,0	1058,9	529,0	536,0	533,8	0,0476	0,0496	0,0492
SB4	1247,0	1261,0	1259,6	529,0	536,0	533,8	0,0699	0,0706	0,0707
SB5	1066,0	1100,0	1116,4	488,0	499,0	489,7	0,0508	0,0528	0,0551
SB6	994,0	979,0	997,6	405,0	417,0	399,9	0,0330	0,0315	0,0335
SB7	702,0	676,0	687,1	405,0	417,0	399,9	0,0246	0,0215	0,0238
SB8	1332,0	1352,0	1324,8	384,0	396,0	371,8	0,0957	0,0965	0,0962

Fonte: Autora

Pode-se observar que a declividade do talvegue é uma característica que depende de dois fatores principais: da rede de drenagem ou hidrografia, que estabelece o traçado dos cursos d'água, e serve como base para apropriação do comprimento dos talwegues; e das informações referentes ao relevo, que fornecem as informações referentes à altimetria. A informação referente rede de drenagem apresenta duas variações de escala (1:50.000 e 1:250.000), e as informações referentes às cotas altimétricas advém de três diferentes fontes (curva de nível, MDE de 30 metros de resolução e MDE de 90 metros de resolução), de modo que cada região hidrográfica apresenta seis diferentes possíveis valores de declividade de talvegue principal.

### 5.1.3. Seleção dos métodos adequados à área de estudo

Para a seleção do método de apropriação do tempo de concentração da área de estudo foram comparadas as restrições de cada método com relação ao tipo de ocupação, área, declividade e comprimento do talvegue.

Uma vez conhecidos os limites de aplicação de cada método, realizou-se a comparação entre os valores estabelecidos para cada método e os valores de tipo de ocupação, área da bacia, comprimento do talvegue e declividade do talvegue principal de cada região hidrográfica.

Para cada comparação foram estabelecidos três possíveis resultados:

- Aplicável: quando a região apresentou valor do critério igual ou dentro da faixa de aplicabilidade estabelecida para cada método;
- Não aplicável: quando a região apresentou valor do critério diferente ou fora da faixa de aplicabilidade estabelecida para cada método;
- Restrição não identificada: quando não foi identificada restrição para utilização do método na literatura consultada.

Por exemplo: alguns métodos são indicados para bacias cujo critério tipo de ocupação é rural, logo, todas as regiões hidrográficas classificadas como rurais recebem o status “Aplicável” nesse critério. As bacias urbanas receberam o status “Não aplicável”. Caso não tenha sido identificada restrição de aplicabilidade para o método, a região hidrográfica receberia o status “Restrição não identificada”.

Após classificar todas as regiões hidrográficas em relação aos valores estabelecidos para cada um dos critérios de julgamento da aplicabilidade de cada método, realizou-se uma reavaliação dos critérios considerando-se a aplicabilidade do método para todas as regiões simultaneamente. Deste modo, se pelo menos uma das regiões apresentasse o status “ Não aplicável” o status correspondente ao critério para um determinado método assumiria o status “Não aplicável”.

#### **5.1.4. Apropriação de variáveis adicionais**

Alguns dos métodos disponíveis para apropriação do tempo de concentração, além do comprimento do talvegue e de sua declividade, também demandam a declividade média equivalente, o comprimento do talvegue a partir do centróide da bacia, a constante do nível de urbanização e a razão entre a área coberta com vegetação e a área total da bacia.

Os tópicos subsequentes apresentam o procedimento empregado para a apropriação de cada umas das referidas variáveis, bem como os valores encontrados para as referidas variáveis em cada região hidrográfica da área de estudo.

#### 5.1.4.1. Declividade média equivalente

A declividade média equivalente corresponde ao valor obtido traçando-se uma linha no gráfico do perfil longitudinal de um determinado talvegue de modo que a área sob essa linha seja igual à área sob a curva do perfil.

Para obter os valores de declividade média equivalente foram traçados os perfis dos talvegues principais de cada região hidrográfica a partir de pontos de cota conhecida, coletados sob o traçado da rede de drenagem dos talvegues, considerando-se um intervalo de 100 metros entre os pontos.

Cabe salientar que a coleta das informações das cotas desses pontos foi realizada considerando-se os três planos de informações sobre o relevo selecionados para este estudo: o modelo digital de elevação de 30 metros, o modelo digital de elevação de 90 metros e o modelo digital de terreno obtido a partir das curvas de nível com espaçamento de 20 metros.

Após coleta das cotas dos pontos de interesse foi implementado algoritmo utilizando o software Octave para calcular a área sob a curva correspondente a cada perfil. Esse algoritmo consiste em uma rotina que calcula a integral de uma curva utilizando o método trapezoidal, fornecendo o valor correspondente à área sob a curva. Vale ressaltar a importância de ser descontar o valor correspondente à cota mínima de cada talvegue visando garantir que o perfil inicie na coordenada 0,0. De outro modo, a área correspondente ao retângulo formado entre o zero e o valor da cota será adicionado à área do perfil, o que representa uma incorreção.

Após obtenção da área obteve-se a declividade equivalente empregando-se, em sequência, as expressões (01), (02) e (03).

$$\text{Área sob linha} = \text{Área sob perfil} \quad (01)$$

$$\frac{L \times H'}{2} = \text{Área sob perfil} \quad (02)$$

$$H' = \frac{2 \times \text{Área sob perfil}}{L} \quad (03)$$

Comentado [JC4]: comando trapz()

$L$ : comprimento do talvegue principal (m);

$H'$ : cota máxima da linha traçada (m);

A declividade equivalente ( $S_{eq}$ ) em m/m é calculada usando-se a relação (04).

$$S_{eq} = H'/L. \quad (04)$$

Substituindo o valor de  $H'$  obtido pela equação (03) na equação (04), obteve-se:

$$S_{eq} = \frac{(2 \times \text{Área sob perfil})/L}{L} = \frac{2 \times \text{Área sob perfil}}{L^2} \quad (05)$$

Os valores de declividade média equivalente obtidos nesta etapa estão reunidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Declividades equivalentes em m/m

Região hidrográfica	Hidrografia 50000			Hidrografia 250000		
	MDE ASTER 30 m	MDE SRTM 90 m	MDT	MDE ASTER 30 m	MDE SRTM 90 m	MDT
SB1	0,0260	0,0264	0,0239	0,0256	0,0268	0,0241
SB2	0,0609	0,0616	0,0577	0,0603	0,0624	0,0577
SB3	0,0172	0,0199	0,0165	0,0175	0,0213	0,0171
SB4	0,0533	0,0553	0,0506	0,0544	0,0580	0,0524
SB5	0,0328	0,0342	0,0333	0,0346	0,0376	0,0355
SB6	0,0118	0,0113	0,0111	0,0122	0,0123	0,0117
SB7	0,0185	0,0203	0,0182	0,0177	0,0198	0,0175
SB8	0,0594	0,0609	0,0611	0,0605	0,0628	0,0622

Fonte: Autora

#### 5.1.4.2. Comprimento do talvegue a partir do centróide da bacia

O comprimento do talvegue a partir do centroide da bacia foi apropriado calculando-se a distância horizontal entre os pontos correspondentes ao exutório da região hidrográfica e o centroide da mesma.

As coordenadas dos exutórios das regiões hidrográficas foram identificadas na etapa 5.1.2.4 e estão apresentados na Tabela 8. As coordenadas dos pontos correspondentes aos centroides das bacias foram apropriadas a partir do plano de

informações correspondente aos limites das regiões hidrográficas, aplicando-se recurso automático de determinação de centroides disponível no Quantum GIS.

A partir desses elementos, calculou-se a distância entre os pontos utilizando a equação (06):

$$\text{Distância entre dois pontos} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (06)$$

A Tabela 12 apresenta as coordenadas utilizadas na determinação do comprimento de interesse e os valores correspondentes obtidos para cada uma das regiões hidrográficas em estudo. Vale ressaltar que foram calculadas as distâncias considerando-se as coordenadas dos exutórios obtidas a partir das redes de drenagem disponíveis nas escalas 1:50.000 e 1:250.000.

Tabela 12 - Coordenadas dos exutórios e centroides e distâncias entre os pontos.

Região hidrográfica	Centróides		Hidrografia (1:50.000)			Hidrografia (1:250.000)		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	Distância (m)	E (m)	N (m)	Distância (m)
SB1	253165,2	7757722,6	251170,6	7751651,0	6390,8	251198,1	7751569,8	6459,6
SB2	247543,3	7754921,2	251170,6	7751651,0	4883,7	251198,1	7751569,8	4958,8
SB3	251353,5	7748464,1	248495,6	7746066,6	3730,3	248528,6	7746073,2	3700,8
SB4	244954,7	7748366,0	248495,6	7746066,6	4222,0	248528,6	7746073,2	4246,2
SB5	251974,6	7743525,5	248586,1	7745565,5	3955,2	248626,9	7745709,4	3997,1
SB6	246894,2	7741040,8	243881,5	7737125,9	4939,9	243891,5	7737035,0	5006,2
SB7	249439,0	7735664,5	243881,5	7737125,9	5746,4	243891,5	7737035,0	5714,3
SB8	242984,5	7737725,1	242136,1	7734792,6	3052,8	242166,3	7734783,6	3053,2

Fonte: Autora

#### 5.1.4.3. Constante do nível de urbanização

Na etapa foram obtidos os valores da constante do nível de urbanização ( $K'$ ) mais adequados para as regiões hidrográficas em estudo. Para isso foi realizada uma busca na literatura e identificou-se uma tabela de valores referenciais fornecidos por Farias Junior (2010), cujos valores estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores da constante do nível de urbanização do método Tulsa District.

<b>Nível de urbanização</b>	<b>K'</b>
Bacias naturais em área rural	1,42
Bacias 50 % urbanizadas	0,92
Bacias totalmente urbanizadas	0,59

Fonte: Farias Junior (2010).

O valor da constante do nível de urbanização depende das características de uso e ocupação da bacia, que foram abordadas no item 5.1.2.1. No tópico mencionado observou-se que as regiões hidrográficas em estudo apresentaram ocupação predominantemente rural, com baixo nível de urbanização. Com base nesta informação, assumiu-se o valor da constante  $K' = 1,42$ , que é adimensional, como valor padrão para toda área de estudo.

#### **5.1.4.4. Razão entre a área coberta com vegetação e a área total da bacia**

A razão entre a área coberta com vegetação e a área total da bacia foi obtido a partir das informações referentes ao tipo de uso e ocupação do solo apresentados na Tabela 5, obtida na etapa descrita no item 5.1.2.1. Nessa tabela foram identificados os usos correspondentes a áreas florestadas, tanto nativas quanto reflorestamentos e obteve-se a razão entre a área coberta com vegetação e área total da bacia somando-se os percentuais das áreas florestadas.

Na Tabela 5 foram somadas as categorias correspondentes aos seguintes usos do solo:

- Mata Nativa
- Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração
- Reflorestamento - Eucalipto
- Reflorestamento - Pinus

Cabe salientar que as áreas de macega, pastagens e cultivos agrícolas não foram consideradas áreas vegetadas, uma vez que estão mais sujeitas a alterações relacionadas ao manejo e cultivo agrícola, de modo que podem hora estar cobertas com vegetação e hora não.

Os somatórios dos percentuais das áreas consideradas vegetadas para cada região hidrográfica da área de estudo estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Razão entre a área coberta com vegetação e a área total de cada região hidrográfica

Uso do Solo	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
Mata Nativa	22,18	16,85	8,9	25,57	9,66	16,32	17,09	26,76
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	5,17	7,16	3,35	8,79	3,88	6,21	7,58	7,87
Reflorestamento - Eucalipto	5,73	14,79	2,47	4,3	1,59	1,2	0,78	1,29
Reflorestamento - Pinus	0,71	0,1	0	0	0	0	0	0
Total	33,79	38,9	14,72	38,66	15,13	23,73	25,45	35,92

Fonte: Autora

## 5.2. Obtenção dos hietogramas das regiões hidrográficas

### 5.2.1. Determinação das equações de chuvas intensas

#### 5.2.1.1. Seleção de estações pluviométricas

Os registros pluviométricos utilizados para a conformação das equações de chuvas intensas foram obtidos na base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), por meio do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb).

Para seleção das estações pluviométricas relevantes para a área de estudo foram considerados, como critérios de seleção a localização e disponibilidade de dados.

A identificação das estações pluviométricas localizadas na área de estudo e entorno foi conduzida utilizando-se como referência o arquivo digital em formato *shapefile* da Bacia 5 (Atlântico, Trecho Leste)<sup>2</sup>, que apresenta a distribuição espacial das estações de monitoramento hidrometeorológico disponíveis na base de dados da ANA.

Na sequencia foram gerados os polígonos de Thiessen correspondentes às estações pluviométricas identificadas, determinando-se a região de influência de cada estação. A comparação das áreas dos polígonos e da bacia selecionada para o

<sup>2</sup> Arquivos digitais disponíveis no sítio <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?Tocltem=4100>

estudo, permitiu identificar as áreas de interseção e, conseqüentemente, as estações pluviométricas de interesse para a bacia.

Como resultado desta etapa produziu-se a Tabela 15, na qual estão apresentadas as estações pluviométricas selecionadas de acordo com o critério de localização.

Tabela 15 - Estações pluviométricas com influência na área de estudo

<b>Código</b>	<b>Nome da Estação</b>
2041018	Usina Fortaleza
2041013	Íluna
2041011	Conceição do Castelo
2041019	Itaici
2041061	Muniz Freire
2041050	Muniz Freire (inativa)
2041019	PCH Viçosa-Castelo

Fonte: Autora

Identificadas as estações associadas à área de estudo, avaliou-se a disponibilidade de registros pluviométricos de cada estação considerando-se os aspectos de qualidade e quantidade. A qualidade dos registros foi interpretada como disponibilidade de dados consistidos e sem falhas ou registros duvidosos. Deste modo, foram mantidos apenas os anos sem falhas e com dados consistidos.

Estabeleceu-se, como requisito mínimo para a quantidade, séries históricas com extensões de, no mínimo, 30 anos.

Após realização da análise da localização e disponibilidade de dados foram selecionadas as estações Usina Fortaleza (2041018), Íluna (2041013), Conceição do Castelo (2041011) e Itaici (2041019). As estações Muniz Freire (2041061 e 2041050) e PCH Viçosa-Castelo (2041019) foram descartadas por não atenderem aos requisitos de quantidade e/ou extensão das séries históricas de registros pluviométricos.

Reavaliando-se os polígonos de Thiessen produzidos após a remoção das estações que não atenderam aos critérios estabelecidos, observou-se que a maior parte da área de estudo está sob influência da estação Usina Fortaleza. Desta forma, considerou-se dispensável realizar qualquer processo de ponderação por área na apropriação da precipitação e, como medida simplificadora, optou-se por utilizar os registros dessa estação para representar a precipitação em toda área de estudo.

### 5.2.1.2. Apropriação da equação de chuvas intensas

Uma etapa fundamental na determinação das vazões de projeto é a definição de equações de chuvas intensas para a área de estudo. Ainda que a condição ideal seja o estabelecimento de equações de chuvas intensas a partir de registros pluviográficos, como nos trabalhos estabelecidos por Chen (1983), Kothyari e Garde (1992), Alila (2000), Silva et al. (2002) e Singh e Zhang (2007), a literatura técnica corrente discute diferentes métodos expeditos (Oliveira et al. (2005)), Santos et al. (2009), Campos et al. (2014) e Fachine et al. (2014)) para conformação de equações em regiões em que o monitoramento das precipitações ocorre por meio de pluviômetros, condição característica da área de estudo deste trabalho.

Neste trabalho foram obtidas equações de chuvas intensas associadas à área de estudo a partir de dois modos:

- A partir da aplicação do método de Chow-Gumbel (CETESB, 1986).
- A partir do Plúvio, programa desenvolvido e gratuitamente disponibilizado pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa.

Para aplicação do método de Chow-Gumbel foi manipulada a série histórica de valores máximos de precipitação registrados em 1 dia, na estação Usina Fortaleza. Estes registros foram manipulados com auxílio do programa computacional HIDRO, versão 1.2., programa de domínio público produzido e disponibilizado pela ANA. A série histórica de precipitações máximas anuais de 1 dia da estação está apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Precipitações máximas de 1 dia da estação Usina Fortaleza

Ano	Precipitação máxima de 1 dia (mm)	Ano	Precipitação máxima de 1 dia (mm)
1959	74,00	1979	94,40
1961	68,00	1980	116,00
1962	121,00	1981	103,60
1963	90,20	1982	127,40
1964	57,00	1983	90,10
1965	77,40	1984	63,40
1966	74,60	1985	67,90
1967	88,80	1986	59,00
1968	91,00	1987	67,60
1969	100,50	1989	72,40
1970	64,40	1993	82,20
1971	102,50	1996	76,20
1973	80,40	1997	98,80
1974	61,40	1998	52,60
1975	69,40	1999	78,30
1976	84,40	2000	94,00
1977	68,00	2001	84,60
1978	84,10	2002	64,60

Fonte: Autora

Na sequência, realizou-se análise de frequência dos totais precipitados aplicando-se o ajuste da distribuição probabilística de Gumbel à série de dados de precipitações máximas de 1 dia. Nesta etapa foram estimadas as precipitações máximas anuais de 1 dia considerando-se os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Na etapa subsequente, realizou-se a conversão das precipitações máximas anuais de 1 dia associadas aos diferentes períodos de retorno, em precipitações máximas de 24 horas utilizando-se o fator de conversão de 1,14, conforme sugerido por CETESB (1986).

A partir das precipitações máximas de 24 horas foram obtidas as precipitações máximas com durações variando de 5 minutos a 24 horas. Nesta etapa foram empregados os coeficientes de desagregação de chuvas reunidos na Tabela 17, coeficientes também sugeridos por CETESB (1986).

Tabela 17 - Relação entre as alturas pluviométricas para precipitações de mesma frequência e diferentes durações

Relação entre as alturas pluviométricas	Coefficiente de conversão
5 min / 30 min	0,34
10 min / 30 min	0,54
15 min / 30 min	0,70
20 min / 30 min	0,81
25 min / 30 min	0,91
30 min / 1 h	0,74
1 h / 24 h	0,42
6 h / 24 h	0,72

Fonte: CETESB (1986)

A partir da desagregação das chuvas, os valores de alturas pluviométricas (associados à diferentes durações e períodos de retorno) foram convertidas em intensidades pluviométricas, cujos valores permitiram a definição de equação de chuvas intensas no formato da expressão (07).

$$i = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad (07)$$

Na equação (07),  $i$  representa a intensidade máxima média (mm/min),  $T$  o período de retorno (anos),  $t$  a duração (minutos) e  $K$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os parâmetros que localmente se deseja determinar. O ajuste do modelo estabelecido per meio da equação (07) foi realizado com auxílio de Programação Não Linear (PNL), aplicada, neste trabalho, com auxílio da ferramenta computacional Solver, disponível no Microsoft Excel.

Para aplicação da PNL estabeleceu-se uma função objetivo que buscou minimizar o erro total entre os valores de intensidade pluviométricas estimados do processo de desagregação das precipitações ( $i_{\text{método}}$ ) e as intensidades estimadas com auxílio da equação (07) ( $i_{\text{equação}}$ ), conforme equação (08). Os parâmetros  $K$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  constituíram as variáveis de decisão do problema de otimização, com valores pertencentes ao conjunto  $\mathfrak{R}^+$ .

$$\min f_0 = \sum_T \sum_t (i_{\text{método}} - i_{\text{equação}}) \quad (08)$$

Para a garantia de determinação do ótimo global – neste trabalho, o menor valor possível para somatório dos erros – foram testados diferentes valores iniciais para os parâmetros  $K$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$ . De uma tentativa para outra os valores iniciais dos referidos parâmetros foram aleatoriamente modificados em, no mínimo, uma ordem de grandeza. O processo de otimização conduzido com auxílio da PNL foi repetido por 10 vezes, conforme sugerido por Almeida, Reis e Mendonça (2015).

Para obtenção da equação IDF a partir do programa Plúvio foi realizada consulta dos parâmetros da equação correspondentes à localidade de Muniz Freire, parâmetros fornecidos diretamente pelo programa a partir das coordenadas geográficas do local de interesse.

### **5.2.2. Construção dos hietogramas de projeto**

Para a construção os hietogramas, elementos gráficos que representam a distribuição da precipitação ao longo do tempo, foi empregado o método de blocos alternados. Esse método consiste em uma maneira simples de se apropriar os hietogramas de projeto a partir de relações de intensidade, duração e frequência, e são largamente empregados quando não se dispõe de dados provenientes de pluviógrafos.

Para obtenção dos hietogramas aplicando-se o método dos blocos alternados elaborou-se uma planilha no Microsoft Excel (Figura 6) na qual foram implementadas as etapas de cálculo previstas na aplicação do método e que foram descritas por Chow, Maidment e Mays (1988).

Figura 6 - Planilha produzida para apropriação dos hietogramas

HIETOGRAMAS - BLOCOS ALTERNADOS													
Dados das Equações de Chuvas Intensas					Incremento de tempo (Δt)	Período de Retorno (anos)	Duração (min)	Intensidade (mm/h)	Alturas acumuladas (mm)	Alturas incrementais (mm)	Tempo (min)	Precipitação (mm)	Ordenação
Localidade	Método	K	a	b	c	S	min						
Muniz Freire	Cheva-Gumbel	14.376	0.143	10.594	0.743								
Equação padrão: $i = \frac{K \cdot T^a}{(T + b)^c}$													
Sendo:													
i: intensidade em mm/minuto;													
T: período de retorno em anos;													
t: período de duração em minutos.													
							5	2.05	10.27	10.27	0-5	0.275	71
							10	1.67	16.70	6.43	5-10	0.282	69
							15	1.42	21.31	4.63	10-15	0.289	67
							20	1.24	24.89	3.57	15-20	0.295	65
							25	1.11	27.80	2.91	20-25	0.303	63
							30	1.01	30.26	2.45	25-30	0.311	61
							35	0.93	32.38	2.12	30-35	0.320	59
							40	0.86	34.25	1.87	35-40	0.329	57
							45	0.80	35.92	1.67	40-45	0.339	55
							50	0.75	37.44	1.52	45-50	0.349	53
							55	0.71	38.83	1.39	50-55	0.360	51
							60	0.67	40.11	1.29	55-60	0.372	49
							65	0.64	41.29	1.19	60-65	0.385	47
							70	0.61	42.40	1.11	65-70	0.400	45
							75	0.58	43.44	1.04	70-75	0.415	43
							80	0.56	44.43	0.98	75-80	0.432	41
							85	0.53	45.35	0.93	80-85	0.450	39
							90	0.51	46.24	0.88	85-90	0.471	37
							95	0.50	47.09	0.84	90-95	0.493	35
							100	0.48	47.89	0.80	95-100	0.519	33
							105	0.46	48.65	0.77	100-105	0.547	31
							110	0.45	49.39	0.74	105-110	0.575	29
							115	0.44	50.09	0.71	110-115	0.616	27
							120	0.42	50.78	0.68	115-120	0.669	25
							125	0.41	51.44	0.66	120-125	0.739	23
							130	0.40	52.07	0.64	125-130	0.788	21
							135	0.39	52.69	0.62	130-135	0.840	19
							140	0.38	53.29	0.60	135-140	0.909	17

Fonte: Autora

O hietograma produzido define a altura da precipitação que ocorre em “n” intervalos sucessivos de tempo, com intervalos de duração  $\Delta t$ , de tal modo que a duração total ( $T_d$ ) corresponde àquela apropriada por meio da equação (09).

$$T_d = n \cdot \Delta t \quad (09)$$

A partir de um período de retorno desejado, determinou-se a intensidade da precipitação associada a cada uma das durações  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ ...  $n\Delta t$  utilizando-se as equações de chuvas intensas definidas conforme procedimento apresentado na seção precedente.

A partir do produto entre a intensidade e a duração da chuva obteve-se a altura da precipitação correspondente a cada intervalo de tempo. A etapa seguinte consistiu em se calcular as diferenças entre as alturas de precipitação sucessivas, de modo que a quantidade de precipitação a ser somada para cada unidade adicional de tempo  $\Delta t$  pode ser determinada. Esses incrementos, também denominados “blocos”, foram reordenados em uma sequência cronológica de modo que a intensidade máxima ocorra no centro da duração total, com os blocos remanescentes arranjados em ordem decrescente alternadamente, hora para direita e hora para esquerda do bloco central, dando origem ao hietograma.

Para definição das respostas das regiões hidrográficas à precipitação incidente assumiu-se que o tempo de duração da precipitação corresponderia aos tempos de concentração determinados para cada região.

No presente estudo adotou-se um intervalo de tempo  $\Delta t$  de 5 minutos, de modo que os tempos de duração total das precipitações sempre fossem múltiplos de 5. Para contornar o fato de que os valores de tempo de concentração obtidos nem sempre são múltiplos de 5, foi realizado um arredondamento desses valores de modo que eles correspondessem ao múltiplo de 5 imediatamente superior aos valores obtidos a partir das equações usadas na determinação dos tempos de concentração. Essa decisão foi tomada com base no fato de que o maior erro que esse arredondamento promoveu em relação ao tempo de concentração originalmente calculado foi de aproximadamente 2,75%.

### **5.3. Obtenção dos hidrogramas e das vazões máximas**

Para obtenção dos hidrogramas e as vazões máximas associadas foi utilizado o software HEC-HMS, em sua versão 3.5. Nos tópicos seguintes serão apresentados os critérios adotados para a seleção dos métodos utilizados na modelagem das perdas e do escoamento superficial, quando da geração dos referidos hidrogramas.

Considerando-se **a)** a ausência de medições de campo e **b)** o fato de que o objetivo principal do presente estudo é a avaliação da dispersão das estimativas de vazões produzidas a partir de diferentes dados de entrada e alternativas de modelagem, não foi realizada a etapa de calibração do modelo HEC-HMS.

#### **5.3.1. Seleção dos métodos**

Para seleção do modelo de perdas foram avaliadas as informações a respeito da aplicabilidade e limitações de cada disponíveis no Manual de Referências Técnicas do HEC-HMS. Nesta etapa foram analisados os pontos positivos e negativos apresentados para cada modelo disponível, cuja síntese está apresentada na Tabela

18. Vale ressaltar que não foram considerados os métodos distribuídos de estimativa de perdas.

Tabela 18 - Aspectos positivos e negativos dos métodos de apropriação de perdas do HEC-HMS

<b>Método</b>	<b>Aspectos Positivos</b>	<b>Aspectos Negativos</b>
Inicial e Constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método "maduro" que vem sendo utilizado com sucesso em vários estudos realizados nos Estados Unidos;</li> <li>- Fácil de configurar e usar;</li> <li>- Método parcimonioso, que inclui poucos parâmetros para explicar a variação do volume do escoamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificuldade de aplicação em áreas sem monitoramento devido à falta de uma relação física direta entre os parâmetros e as propriedades da bacia;</li> <li>- Método pode ser muito simples para prever perdas associadas a um evento, mesmo que preveja bem as perdas totais.</li> </ul>
Déficit e Constante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Similar ao anterior;</li> <li>- Pode ser usado para simulações de longos prazo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Similar ao anterior.</li> </ul>
SCS Curve Number	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método simples, previsível e estável;</li> <li>- Depende de apenas um parâmetro que varia em função do grupo do solo e do seu uso e ocupação, além da condição de humidade antecedente;</li> <li>- Características facilmente obtidas e dados de entradas razoavelmente bem documentados (nos EUA);</li> <li>- Método bem estabelecido e largamente aceito nos EUA e fora dele;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valores previstos não estão de acordo com a teoria clássica do fluxo em meio insaturado;</li> <li>- Taxa de infiltração se aproximará de zero durante uma chuva de longa duração, em vez da esperada taxa constante;</li> <li>- Desenvolvida a partir de dados de pequenas bacias agrícolas no meio oeste americano, de forma que aplicações em outros lugares se torna incerta;</li> <li>- A abstração inicial padrão não depende de características de tempestade ou duração.</li> <li>- A intensidade da chuva não é considerada (a mesma perda ocorre para 25 mm de chuva em 1 hora ou 1 dia)</li> </ul>
Green e Ampt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parâmetros podem ser estimados para bacias não monitoradas, desde que se tenha informações sobre o seu solo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é amplamente usado, portanto apresenta baixa maturidade, com baixo nível de conhecimento pelos profissionais de modelagem;</li> <li>- Menos parcimonioso que os modelos empíricos mais simples.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de USACE (2000).

A partir da análise das informações da Tabela 18 e da avaliação dos parâmetros de entrada requeridos para implementação de cada um dos métodos, optou-se por seleccionar dois deles para aplicação no presente estudo: o método Inicial de

Constante e o método SCS *Curve Number*, cujos parâmetros de entrada podem ser obtidos a partir de tabelas e ou bases de dados digitais disponíveis.

Os métodos Déficit e Constante e Green e Ampt foram descartados uma vez que exigem dados de entrada que requerem informações detalhadas a respeito da evaporação e percolação (demanda do método Déficit e Constante), e características do solo como condutividade e saturação (informações necessárias para aplicação do método de Green e Ampt). Informações detalhadas sobre a constituição dos solos e evaporação não estão usualmente disponíveis.

Para apropriação do escoamento superficial direto, o HEC-HMS apresenta seis opções de modelagem: o hidrograma unitário especificado pelo usuário, o hidrograma unitário de Clark, o hidrograma de Snyder, o hidrograma do SCS, o método ModClark e o método da onda cinemática. Diante dessa variedade de métodos, foram selecionados, em caráter preliminar, os métodos de obtenção de hidrogramas unitários sintéticos, aplicáveis nas situações em que não se dispõe de uma série histórica de registros fluviométricos.

O método ModClark não foi considerado uma vez que representa um modelo distribuído e que só pode ser utilizado quando os dados de entrada estão distribuídos no espaço (em grade), incluindo-se a precipitação. Como o dado de precipitação disponível é pontual, a utilização do método ModClark para apropriação dos hidrogramas foi descartada.

O HEC-HMS disponibiliza o método da onda cinemática como um modelo conceitual que serve de alternativa para os usuários que não desejam aplicar um modelo empírico. Contudo, o método exige várias informações sobre os canais de drenagem que não são facilmente obtidos. Função deste aspecto, o referido método teve seu uso desconsiderado.

Segundo Chow, Maidment e Mays (1988), o método de Snyder é indicado para bacias com áreas entre 30 e 30.000 km<sup>2</sup>, o que torna o método inadequado para duas das oito regiões hidrográficas em estudo. Além disso, McCuen (1998) recomenda fortemente que os coeficientes adotados sejam calibrados. Por conta das restrições apresentadas, o método de Snyder teve a sua aplicação descartada.

A pesquisa sobre o método do hidrograma sintético de Clark não identificou restrições para sua aplicação em relação ao tamanho das bacias; contudo, o método é considerado trabalhoso por muitos autores, e requer calibração para apropriação adequada de seus coeficientes. Em decorrência da indisponibilidade de medições de campo que permitam a calibração dos coeficientes que são necessários à aplicação do método, optou-se por não utilizar o método de Clark no presente estudo.

Após identificar as restrições dos outros métodos selecionados preliminarmente, observou-se que o método do hidrograma unitário do SCS pode ser aplicado em bacias de até 250 km<sup>2</sup>, e que a calibração não é obrigatória para obtenção de seus parâmetros, embora seja desejável para melhorar a acurácia dos valores produzidos.

Devido a indisponibilidade de informações também foram desconsiderados os métodos para apropriação do escoamento de base e a da interceptação.

### **5.3.2. Determinação de parâmetros e constantes de entrada adicionais**

Após a seleção dos métodos de modelagem das perdas e do escoamento superficial, foram identificadas as informações referentes aos parâmetros necessários para aplicação dos métodos e as respectivas formas de determinação desses parâmetros. Estas tarefas são descritas nos tópicos subsequentes.

- **Perda inicial e taxa de infiltração constante**

O método de perda Inicial e constante apresenta um parâmetro e uma condição inicial, que representam a) as propriedades físicas da bacia, associadas com o solo e seu uso e ocupação (taxa constante de infiltração), e b) a condição inicial referente à perda inicial relacionada ao nível de saturação do solo.

O valor correspondente à perda inicial pode ser obtido a partir de valores disponíveis na literatura. De acordo com Horton (1935), em áreas agrícolas ou florestadas, o valor da perda inicial varia de 0,5 a 1,5 polegadas, ou seja, de 12,7 a 38,1 milímetros. Como, todas as bacias apresentam uso e ocupação predominantemente rural, optou-se por adotar o valor médio da faixa, 25,4 milímetros, como valor de perda inicial padrão para toda a área de estudo.

Os valores das taxas constantes de infiltração podem ser apropriados a partir da Tabela 19.

Tabela 19 - Taxas de infiltração

<b>Grupo de solo</b>	<b>Características</b>	<b>Faixa de valores das taxas de infiltração (mm/h)</b>
A	Areia profunda, loesse profundo, siltes agregados	7,62 a 11,43
B	Loesse raso, solo arenoso	3,81 a 7,62
C	Solo argiloso, solo arenoso raso, solo com baixo teor de matéria orgânica, e solo com alto teor de argila	1,27 a 3,81
D	Solos que expandem significativamente quando são molhados, argilas altamente plásticas e alguns solos salinos	0,00 a 1,27

Fonte: Adaptado de SCS (1986) e Skaggs e Khaleel (1982) apud USACE (2000).

Entretanto, para a seleção da taxa de infiltração adequada se faz necessário conhecer os diferentes grupos de solo existentes na área de estudo. Como as bases de dados relativos ao tipo de solo disponíveis não apresentam essa informação, fez-se necessário realizar a classificação de cada tipo de solo visando determinar os seus grupos correspondentes, de acordo com a Classificação de Solos estabelecida pelo SCS.

A classificação dos tipos de solo apresentados nos planos de informações da EMBRAPA e do GEOBASES foram classificados de acordo com a Tabela 20, produzida por Sartori (2005), e que leva em consideração as condições dos solos brasileiros.

Tabela 20 - Classificação dos solos considerando as condições brasileiras.

Grupo de Solo	Características	Tipos de solos que se enquadram
A	Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); Solos de textura média; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macro porosidade em todo o perfil; Solos bem drenados ou excessivamente drenados; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macro porosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	Solos profundos (100 a 200 cm); Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macro porosidade em todo o perfil; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMA-RELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.	ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBIS-SOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; Solos rasos (prof. < 50 cm); Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta) Solos orgânicos.	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Sartori (2005).

Com base nas informações contidas na Tabela 20 realizou-se a classificação de cada tipo de solo de acordo com o seu respectivo grupo. Essa informação foi inserida como atributo nos planos de informações de tipo de solo da EMBRAPA e do GEOBASES, visando possibilitar a apropriação dos valores de CN, cuja metodologia de apropriação será descrita em seção subsequente.

A partir desses planos de informações determinou-se a área de cada região hidrográfica ocupada pelos diferentes grupos de solo preconizados pelo SCS, considerando-se os planos provenientes da EMBRAPA e do GEOBASES. As áreas obtidas nesta etapa do trabalho encontram-se reunidas na Tabela 21.

Tabela 21 - Áreas ocupadas pelos diferentes grupos de solos

Região Hidrográfica	ÁREAS (km <sup>2</sup> )							
	EMBRAPA				GEOBASES			
	A	B	C	D	A	B	C	D
SB1	66,10	14,93	1,30	0,00	41,57	24,75	-	16,01
SB2	35,18	2,60	-	1,92	0,45	4,39	-	34,86
SB3	20,36	12,58	-	-	-	14,60	7,67	10,67
SB4	36,42	2,08	-	1,85	-	3,04	-	37,30
SB5	19,95	7,38	-	-	-	2,88	20,10	4,35
SB6	27,55	29,92	-	0,34	-	23,71	0,71	33,40
SB7	28,48	2,30	-	4,51	-	1,01	8,63	25,65
SB8	13,53	4,12	-	0,12	-	9,58	-	8,19

Fonte: Autora

Para determinação da taxa de infiltração de cada região hidrográfica assumiu-se como valor da taxa de infiltração de cada tipo de solo o valor médio das faixas apresentadas na Tabela 19. Em seguida calculou-se a média ponderada por área ocupada pelos diferentes tipos de solo e obteve-se um valor de taxa de infiltração representativo para cada região hidrográfica.

- **Abstração inicial e valor de CN**

A aplicação do método do SCS *Curve Number* demanda valores de abstração inicial e do número da curva (*Curve Number* ou *CN*).

O valor da abstração inicial consiste no volume da precipitação que deve cair antes de que seja produzido um excesso de precipitação. Quando não se assume um

valor para esse parâmetro o HEC-HMS assume automaticamente o valor correspondente a 0,2 vezes a retenção potencial, obtida a partir do valor de CN.

De acordo com USDA (1986), o valor CN é um número de 0 a 100 que busca retratar a capacidade de infiltração da área em função do tipo de solo, do tipo de uso e ocupação e das condições de umidade de uma área.

Para apropriar o valor de CN de uma determinada área se faz necessário cruzar as informações do grupo de solo com o tipo de uso e ocupação, e apropriar o valor correspondente da tabela de valores de referência fornecidos pelo SCS (atualmente denominado NRCS).

A seleção da tabela é feita de acordo com as condições de umidade antecedentes que se deseja assumir, que podem ser:

- Condição I: solo seco, sem atingir ponto de murcha;
- Condição II: situação média das condições do solo;
- Condição III: solo saturado;

O manual técnico do HEC-HMS (USACE, 2000) adota como valor de referência a condição média de umidade, correspondente à condição II. As referidas tabelas, que serviram de fonte para apropriação dos valores de CN utilizados no presente estudo, estão disponíveis no Anexo A.

Antes da apropriação os valores de CN das referidas tabelas foi realizada uma etapa preliminar, que consistiu na correlação entre as classes de uso e ocupação disponíveis no plano de informação consultado e as classes apresentadas nas tabelas do SCS. Para isso foi analisado cada uso existente e, na sequência, buscou-se na tabela a classificação que melhor representasse esse uso. Essa informação foi inserida como atributo na tabela do plano de informação de uso e ocupação selecionado para o presente estudo.

A Tabela 22 apresenta a classificação do uso do solo dos planos de informações e a classificação que se assumiu como correspondente na tabela do SCS, bem como os valores de CN relativos a essa classificação. Embora essas informações representem resultados parciais, optou-se por antecipá-los nesta seção com o objetivo de facilitar o entendimento da metodologia empregada para apropriação do CN.

Tabela 22 - Valores de CN considerados no estudo

Uso do solo (Plano de informação)	Uso do solo (Livre tradução da tabela do SCS)	A	B	C	D
Afloramento Rochoso	Área impermeável	-	-	-	-
Área Edificada	Área impermeável	-	-	-	-
Brejo	Área impermeável	-	-	-	-
Campo Rupestre/Altitude	Campos (condições hidrológicas boas)	30	48	65	73
Cultivo Agrícola - Banana	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Café	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Coco- Da-Baía	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Permanentes	Cultivos de árvores frutíferas ou similares (condições hidrológicas normais)	43	65	76	82
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Temporários	Cultivos em fileiras próximas e curvas (condições hidrológicas boas)	55	69	78	83
Extração Mineração	Solo exposto	77	86	91	94
Macega	Campos (condições hidrológicas normais)	35	56	70	77
Massa D'Água	Área impermeável	-	-	-	-
Mata Nativa	Áreas florestadas (condições hidrológicas boas)	30	55	70	77
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	Áreas florestadas (condições hidrológicas normais)	36	60	73	79
Outros	Chácaras e estradas	59	74	82	86
Pastagem	Pasto em condições normais	49	69	79	84
Reflorestamento - Eucalipto	Áreas florestadas (condições hidrológicas normais)	36	60	73	79
Reflorestamento - Pinus	Áreas florestadas (condições hidrológicas normais)	36	60	73	79
Solo Exposto	Solo exposto	77	86	91	94

Fonte: Autora.

Após complementar o plano de informações (base de dados) de tipo de solo com as informações referentes a classificação dos grupos de solo, e do plano de informação de uso e ocupação com denominação das classes de uso correspondentes à tabela do SCS, realizou-se uma interseção dos planos visando cruzar as informações contidas nos planos.

Essa interseção espacial produziu dois planos adicionais de informações: um resultante do cruzamento das informações entre o uso e ocupação do solo do plano de informação de disponibilizado pelo IEMA com o grupo de solo do plano de

informações de tipo de solo obtidas no GEOBASES, e outro resultante do cruzamento realizado substituindo-se o plano de informações de tipo de solo pelos obtidos da EMBRAPA.

Após esta etapa foi calculada a área de cada polígono resultante da interseção entre os planos de informação, e determinou-se o valor de CN correspondente ao grupo de solo e à classe de uso de cada polígono.

Esses valores foram exportados para uma planilha onde puderam ser manipulados para obtenção do valor de CN composto de cada região hidrográfica.

A obtenção do CN composto foi realizada utilizando-se a equação (10).

$$CN_{\text{composto}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (10)$$

Na equação (10):

- $CN_{\text{composto}}$ : valor de CN representativo para a toda a região hidrográfica;
- $CN_i$ : valor de CN dos polígonos de cada região hidrográfica;
- $A_i$ : área dos polígonos.

Vale salientar que, por recomendação do Manual do HEC-HMS (USACE, 2010), a área impermeável não foi considerada na determinação do CN composto. Isso porque ela é considerada no percentual da área impermeável, que consiste em outro dado de entrada que o HEC-HMS considera no processo de modelagem.

- **Percentual da área impermeável**

O percentual da área impermeável em cada região hidrográfica foi apropriado a partir da soma das áreas dos polígonos de cada bacia que estavam enquadrados nessa classe. Esse parâmetro é requerido pelos dois modelos de determinação de perdas selecionados.

- **Tempo de retardo do SCS (*Lag time*)**

O tempo de retardo necessário para aplicação do método do hidrograma unitário do SCS pode ser determinado por calibração, quando se dispõe de dados históricos.

Na ausência dessas informações, o SCS *Technical Report 55* (1986), recomenda o seguinte tempo, estimado com auxílio da equação (11).

$$t_{lag} = 0,6 \times t_c \quad (11)$$

Na expressão (11):

- $t_{lag}$ : tempo de retardo do SCS (min);
- $t_c$ : tempo de concentração (min).

A partir dos tempos de concentração obtidos na etapa descrita em 5.1, foram determinados os tempos de retardo para cada uma das regiões hidrográficas.

### 5.3.3. Definições dos cenários de modelagem

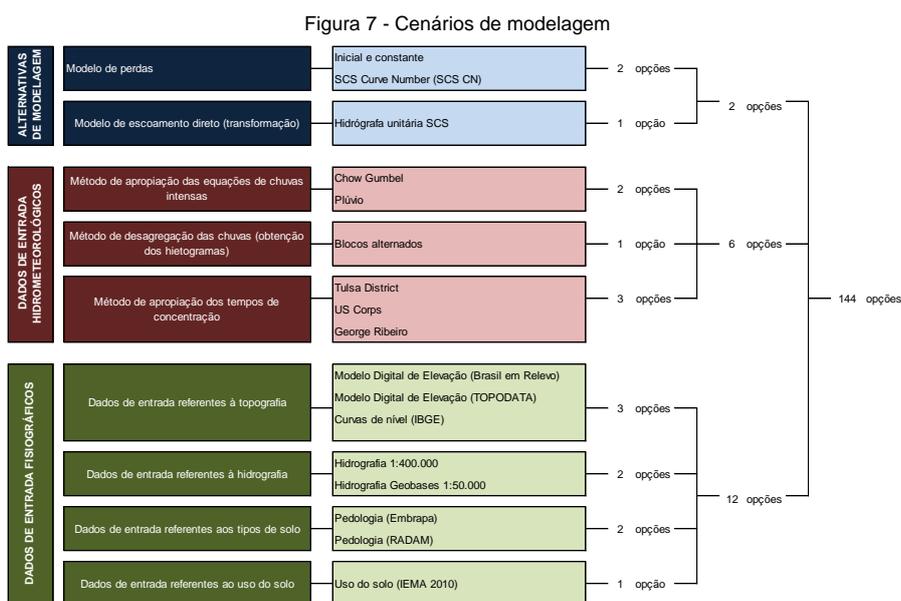
Após obtenção dos dados de entrada necessários à modelagem do escoamento superficial em cada região hidrográfica, foi empreendido um esforço na organização dos resultados obtidos nas etapas anteriores e na definição dos cenários de modelagem que seriam implementados com auxílio do HEC-HMS.

Os cenários de modelagem para obtenção das vazões máximas foram conformados a partir da combinação dos modelos selecionados para a simulação de processos hidrológicos na bacia hidrográfica com os hietogramas resultantes da combinação entre diferentes equações de chuvas intensas e tempos de concentração, considerando-se os períodos de retorno variando entre 2 e 100 anos.

Os parâmetros de entrada dos modelos selecionados e hietogramas obtidos para realização do processo de modelagem foram apropriados a partir de planos de informações de diferentes fontes e escalas/resolução, utilizando-se diferentes métodos de apropriação de chuvas intensas e tempos de concentração. Deste modo, os parâmetros e hietogramas usados como dados de entrada no HEC-HMS carregam as interferências resultantes das combinações de dados de entrada e métodos selecionados na sua apropriação, produzindo efeitos nos valores de vazão máxima que serão gerados.

Desta forma, cada cenário consiste em uma possível combinação de decisões que um projetista interessado em conhecer o valor da vazão máxima poderia

estabelecer, considerando-se os planos de informações (bases de dados) identificados e as características das regiões de estudo. A Figura 7 apresenta o número de cenários possíveis realizando-se a combinação dos dados e métodos selecionados para apropriação dos hidrogramas com auxílio do HEC-HMS.



Fonte: Autora

Visando organizar as informações e o subsequente processo de simulação, foi produzida uma planilha contendo a configuração dos cenários de modelagem previstos. Nesta planilha, cada linha corresponde a um cenário de simulação. A relação de cenários de simulação utilizados está disponível no Apêndice A.

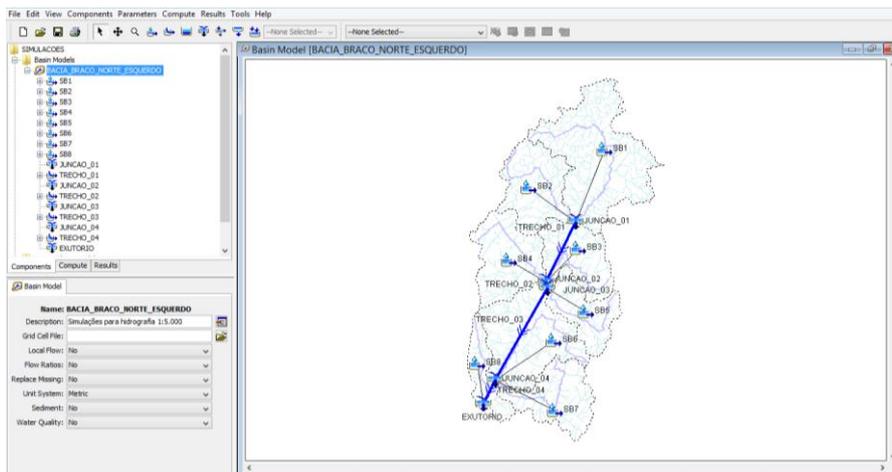
#### 5.3.4. Realização das simulações

Nesta etapa foram realizadas as simulações dos cenários definidos na etapa anterior utilizando-se a ferramenta HEC-HMS. Essas simulações foram realizadas com o objetivo de se obter os hidrogramas associados a cada cenário e de se apropriar as vazões máximas correspondentes aos picos desses hidrogramas.

O primeiro passo para realização das simulações consistiu na elaboração do modelo representativo da bacia hidrográfica do Braço Norte Esquerdo, considerando as oito regiões hidrográficas que a compõe. Cada região hidrográfica foi inserida como uma subbacia, e os pontos onde essas regiões se encontram foram representados por junções.

As junções foram conectadas por trechos que representam os talwegues por onde ocorre a propagação da vazão que chega às junções. No exutório da bacia foi colocada uma junção para possibilitar a apropriação da vazão resultante de todas as áreas de contribuição. A Figura 8 apresenta o modelo da bacia utilizado, obtida a partir da captura de tela do ambiente de simulação do HEC-HMS.

Figura 8 - Modelo da bacia



Fonte: Autora

Na etapa seguinte foram inseridas as informações referentes à área de cada subbacia e indicados os métodos de apropriação das perdas e do escoamento direto correspondentes ao cenário selecionado para simulação.

A Figura 9 apresenta a tela do HEC-HMS onde são inseridas as informações referentes à bacia e onde são selecionadas as opções de modelagem que serão aplicadas pelo software.

Figura 9 - Tela de entrada dos dados das regiões hidrográficas

Fonte: Autora

Com base nas opções selecionadas são habilitadas as abas destacadas em vermelho na Figura 9. Nessas abas são mostrados os parâmetros de entrada requeridos pelo método selecionado na tela anterior. Em função do grande volume de dados optou-se pela inserção dos parâmetros em bloco, de modo que os valores correspondentes à cada região hidrográfica pudessem ser alterados simultaneamente. As figuras 10 e 11 apresentam as telas de entrada de dados para os modelos de apropriação de perdas previstas nos cenários de modelagem, e a figura 12 apresenta a tela de entrada do modelo de apropriação do escoamento superficial.

Figura 10 - Tela de entrada de dados para o modelo de perdas Inicial e Constante

Subbasin	Initial Loss (mm)	Constant Rate (mm/hr)	Impervious (%)
SB1	25,4	8,77	2,440
SB2	25,4	8,85	2,530
SB3	25,4	8,07	6,710
SB4	25,4	8,92	5,740
SB5	25,4	8,90	5,770
SB6	25,4	7,90	6,390
SB7	25,4	8,14	12,180
SB8	25,4	8,58	2,670

Fonte: Autora

Figura 11 - Tela de entrada de dados para o modelo de perdas SCS Curve Number

Subbasin	Initial Abstraction (mm)	Curve Number	Impervious (%)
SB1	45,54		2,440
SB2	44,68		2,530
SB4	42,92		5,740
SB3	51,84		6,710
SB5	48,98		5,770
SB6	54,12		6,390
SB7	48,96		12,180
SB8	46,28		2,670

Fonte: Autora

Figura 12 - Tela de entrada de dados para o modelo do hidrograma unitário do SCS

Subbasin	Graph Type	Lag Time (hrs)
SB1	Standard	223.59
SB2	Standard	131.86
SB3	Standard	140.23
SB4	Standard	112.25
SB5	Standard	130.80
SB6	Standard	225.28
SB7	Standard	166.56
SB8	Standard	166.83

Fonte: Autora

Nesta etapa foram inseridos os parâmetros correspondentes ao cenário selecionado para cada região hidrográfica. Cabe destacar que os métodos previstos em um determinado cenário foram aplicados em todas as subbacias, de modo que não foi considerada a possibilidade de aplicar combinações de diferentes métodos para diferentes bacias.

Após inserção dos parâmetros de entrada do modelo da bacia foram criadas as séries históricas correspondentes aos hidrogramas produzidos. Nesta etapa utilizou-se um padrão de nomenclatura que permitisse identificar cada série. Esse padrão consistiu na combinação das informações referentes a equação de chuvas intensas, ao período de retorno e ao tempo de duração que deu origem ao hidrograma, conforme pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Identificador das séries de dados dos hidrogramas

Fonte: Autora

Uma vez criadas as séries de dados correspondentes aos hidrogramas, foram definidos a forma de apropriação dos valores, as unidades de entrada e o intervalo de tempo entre os valores que se pretende informar, conforme tela de entrada apresentada por meio da Figura 14. Importante observar que o valor informado para o intervalo de tempo foi o mesmo utilizado na construção dos hidrogramas (5 minutos).

Figura 14 - Definição das informações sobre a série de dados

Time-Series Gage

**Gage Name:** CHOW\_002\_180

Description:

Data Source: Manual Entry

Units: Incremental Millimeters

Time Interval: 5 Minutes

Latitude Degrees:

Latitude Minutes:

Latitude Seconds:

Longitude Degrees:

Longitude Minutes:

Longitude Seconds:

Fonte: Autora

Na sequência, foi habilitada uma janela de dados onde foram inseridas as informações de início e fim da série. Como se trata de uma série de dados artificial, produzida a partir de um hietograma, manteve-se a data e horário de início e alterou-se a data e hora de fim, considerando essa última como o tempo de duração utilizado na obtenção do hietograma em horas. A Figura 15 apresenta a tela onde foram inseridas as informações referentes a duração do hietograma.

Figura 15 - Definição do intervalo de tempo da série de dados

Time-Series Gage | Time Window | Table | Graph

**Gage Name:** CHOW\_180\_02

\*Start Date (ddMMYYYY): 01jan2000

\*Start Time (HH:mm): 00:00

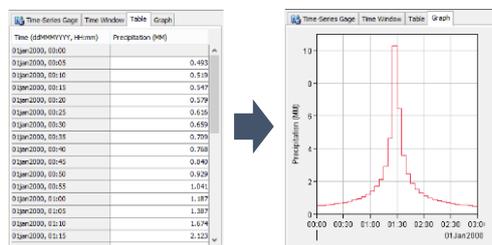
\*End Date (ddMMYYYY): 01jan2000

\*End Time (HH:mm): 03:00

Fonte: Autora

Na aba denominada *Table* foram inseridos os valores correspondentes às alturas da precipitação ao longo do tempo. Esses dados dão origem ao gráfico representativo do hietograma, que pode ser visualizado na aba *Graph*, conforme exemplo apresentado por meio da Figura 16.

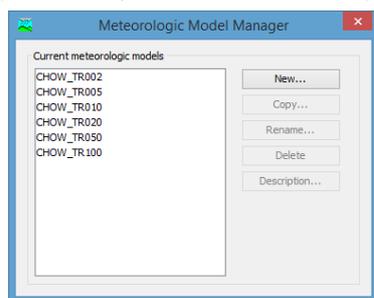
Figura 16 - Entrada de dados e visualização dos hietogramas



A criação e inserção das séries de dados representativas do hietograma foi uma etapa fundamental para a definição do modelo meteorológico da bacia. Esse modelo meteorológico é fundamental para que o HEC-HMS possa conhecer qual o regime de precipitação que deve ser aplicado à cada região hidrográfica no processo de simulação.

Como nas etapas anteriores, o primeiro passo consistiu na criação do modelo meteorológico. Visando garantir a identificação dos modelos criados adotou-se como nomenclatura padrão uma a combinação de um identificador da equação de chuvas intensas e de um identificador do período de retorno aplicados na obtenção dos hietogramas das regiões hidrográficas (Figura 17).

Figura 17 - Criação dos modelos meteorológicos



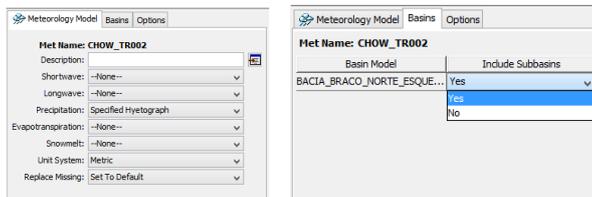
Fonte: Autora

Após criação foram inseridas as definições associadas a cada modelo meteorológico, inserindo-se informações sobre o formato do dado de precipitação (Hietograma Especificado), e sobre o sistema de unidades adotado (Métrico).

Cabe ressaltar que, seguindo a recomendação de Román (2015), foi selecionada a opção *Set To Default*, no campo denominado *Replace Missing*. Essa medida foi realizada para contornar uma falha que ocorre quando se adota um tempo de simulação maior que a duração da precipitação, fazendo com que o HEC-HMS interrompa o processamento quando detecta a inexistência de dados de precipitação. Para se observar a resposta da bacia ao evento de precipitação, sempre se faz necessário adotar um tempo de simulação maior que o tempo de duração da chuva, uma vez que a resposta da bacia nunca é imediata.

Após essas definições foi realizada a associação entre o modelo da bacia e o modelo meteorológico criado, selecionando-se a opção *Yes* no campo *Include Subbasin*, disponível na aba *Basin*. A Figura 18 apresenta a tela correspondente às definições mencionadas nos três últimos parágrafos.

Figura 18 - Definição padrão do modelo meteorológico

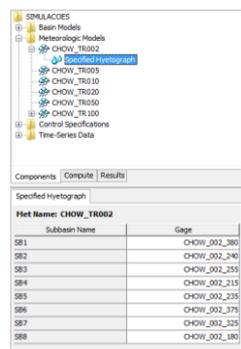


Fonte: Autora

Uma última etapa realizada para a definição do modelo meteorológico foi a associação dos hietogramas (séries históricas) com cada subbacia, uma vez que elas apresentam diferentes tempos de concentração e, portanto, possuem uma resposta diferenciada à precipitação incidente. Os cenários de modelagem criados apresentam configurações diferentes para os hietogramas associados a cada região hidrográfica; deste modo, essas configurações foram atualizadas para cada cenário simulado.

A Figura 19 apresenta um exemplo de configuração aplicada para um determinado cenário de modelagem. Deve-se observar que, para um cenário referente a uma determinada equação de chuvas intensas e um determinado período de retorno, foram utilizados hietogramas (séries históricas) compatíveis.

Figura 19 - Definição padrão do modelo meteorológico



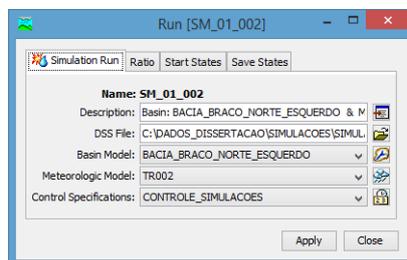
Fonte: Autora

Depois de se definir o modelo da bacia e o modelo meteorológico criou-se um arquivo de controle das simulações. Esse arquivo contém as informações referentes ao tempo total de simulação e o intervalo de tempo durante o qual se pretende observar os resultados. Como o intervalo de tempo utilizado nos dados de entrada foi de 5 minutos, optou-se por utilizar o mesmo intervalo de tempo para os dados de saída (resultados).

A definição do tempo de duração da simulação foi realizada seguindo-se uma regra recomendada em vários manuais do HEC-HMS, adotar um tempo de simulação de 3 a 5 vezes o valor do tempo de concentração.

Realizadas as configurações e entrada de dados de todos os parâmetros requeridos para a simulação no HEC-HMS, foram criados os arquivos de simulação informando para o software o modelo de bacia, o modelo meteorológico e o arquivo de controle que deveria ser empregado na simulação, conforme apresentado no exemplo da Figura 20.

Figura 20 - Configuração da simulação de um cenário



Fonte: Autora

Ao final da realização de todas essas etapas foram obtidos 144 hidrogramas e valores de vazões máximas, correspondentes aos picos desses hidrogramas, para cada uma das oito regiões hidrográficas, e para o exutório da bacia. Como esse processo foi realizado considerando-se os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, foram obtidos 144 resultados, para cada período de retorno.

#### 5.4. Análise dos resultados

Os diferentes cenários de simulação permitiram a conformação de hidrogramas de cheia a partir dos quais foram apropriadas as vazões de projetos associadas aos diferentes períodos de retorno.

Uma vez estabelecidas as séries de vazões de projeto, foram empregadas medidas de tendência central (média e mediana) e de dispersão (amplitude, desvio padrão) para dar suporte à discussão dos resultados.

Para a representação gráfica da tendência central e de dispersão dos valores de vazão de projeto obtidas nos cenários de simulação foram empregados, adicionalmente, diagramas Box-plot, que permitem uma interpretação visual da dispersão dos valores analisados. As medidas de tendência central e de dispersão e os diagramas Blox-plot, detalhadamente discutidos por Levine et al. (2005), foram apropriados com auxílio da planilha eletrônica Excel

Adicionalmente foram apropriados os erros percentuais das vazões máximas de projeto em relação a um cenário de referência, estabelecido pelo conjunto de bases de dados com maior nível de detalhamento para a hidrografia, topografia e tipo de solo.

Desta forma, no presente estudo, o cenário referencial foi composto por hidrografia na escala 1:50.000 (GEOBASES), tipo de solo na escala 1:250.000 (GEOBASES) e relevo composto pelo MDT gerado a partir de curvas de nível na escala 1:50.000 (GEOBASES). A conformação dos hietogramas demanda, adicionalmente, a adoção de uma equação de chuvas intensas e da apropriação do tempo de concentração. Para apropriação de chuvas intensas optou-se pelo método de Chow-Gumbel, métodos que emprega registros pluviométricos locais e que, segundo diferentes autores (GRECO *et al.*, 2012; ALMEIDA; REIS; MENDONÇA, 2015), não superestima intensidades pluviométricos como ocorre quando do emprego do programa Plúvio para determinadas combinações de duração e período de retorno. Dentre os métodos disponíveis para apropriação do tempo de concentração será empregado aquele que se apresentar mais adequado para a área de estudo, conforme critérios de escolha estabelecidos na seção 5.1.3 (“Seleção dos métodos adequados à área de estudo”).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 6.1. Seleção de métodos para apropriação dos tempos de concentração

A partir da revisão bibliográfica realizada foram identificados métodos indiretos aplicáveis à determinação de tempos de concentração. Também foram apropriadas, quando disponíveis nas literaturas consultadas, informações referentes à aplicabilidade e restrições de cada método selecionado. Essas informações foram consolidadas e encontram-se apresentadas na Tabela 2.

É relevante observar que, durante a revisão bibliográfica, foram encontradas algumas divergências entre as equações apresentadas por diferentes autores. Nesses casos procedeu-se a análise das equações verificando-se possíveis erros nas unidades das variáveis envolvidas, nos valores dos coeficientes adotados e nos sinais matemáticos empregados. Sempre que identificada alguma divergência entre as formulações apresentadas buscou-se uma terceira fonte para confirmação das informações. Quando essa alternativa não se mostrou suficiente para esclarecer a disparidade, foi realizada comparação dos resultados apresentados pelas formulações utilizando um mesmo conjunto de dados hipotéticos. Essa estratégia permitiu identificar erros em unidades e corrigir algumas equações que apresentavam erros de digitação nas fontes consultadas.

A partir da simples inspeção da Tabela 2 pode-se observar que, na maior parte dos casos, a aplicação dos métodos indiretos de apropriação dos tempos de concentração é dependente de quatro variáveis. São elas:

- Tipo de ocupação da bacia: rural ou urbana;
- Área da bacia;
- A Declividade; e
- Comprimento do talvegue.

As referidas variáveis e seus respectivos valores de referência para os métodos de apropriação do tempo de concentração estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Critérios e valores balizadores de aplicabilidade dos métodos de apropriação do tempo de concentração

Métodos	Tipo de ocupação	Área (km <sup>2</sup> )	Declividade (%)	Comprimento talvegue (km)
Kirpich	Rural	<0.5	3 - 10	<10
California Culverts Practice	Rural	<0.5	3 - 10	<10
Federal Aviation Agency	Urbana	-	-	0.015 - 0.030
Onda cinemática	Urbana	Mesmo do Método racional	-	-
SCS Lag	Rural	< 8	-	-
SCS – Método cinemático	-	-	-	-
Dooge	Rural	140 - 930	-	-
Ven Te Chow	Rural	<24,28	-	-
Picking	Rural	-	-	-
Izzard	Urbana	-	<4	<0,02
Giandotti	-	-	-	-
Arnell	Urbana	0.2 - 50	-	-
Bransby-Williams	Rural	-	-	-
Jhonstone	Rural	65 - 4200	-	-
Tsuchiya	Rural/Urbana	0,001 - 0,002	-	-
Riverside Country	-	5 - 1600	-	-
Pasini	-	-	-	-
DNOS	-	0.45	3 - 10	<1.2
US Corps of Engineers	-	<3000	-	-
Carter Lag equation for Partially Sewered	Urbana	< 20,7	<0,5	<11,26
Williams	-	<129,5	-	-
Ventura	Rural	-	-	-
McCuen	Urbana	0,4 - 16	<4	<10
IPH II	Urbana	2,5 - 137	-	-
Putnam	-	0,75 - 340	-	-
Tulsa District	-	1-1300	0,08 - 18	1,6 - 96
Denver	-	< 13	Moderada	-
George Ribeiro	Rural	<19000	1 - 10	<250
Hathaway	-	-	-	-

Fonte: Autora

Conhecidos os limites para aplicação de cada método e observando-se o procedimento estabelecido na seção 5.1.3, estabeleceu-se a Tabela 24, por meio da qual indica-se, por variáveis que conformam os métodos de apropriação dos tempos de concentração, a aplicabilidade ou não do método.

Tabela 24 - Resumo da avaliação da aplicabilidade dos métodos

Métodos	Critérios			
	Tipo de ocupação	Área	Declividade	Comprimento do talvegue
Kirpich	Aplicável	Não aplicável	Aplicável	Não aplicável
California Culverts Practice	Aplicável	Não aplicável	Aplicável	Não aplicável
Federal Aviation Agency	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Não aplicável
Onda cinemática	Não aplicável	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
SCS Lag	Aplicável	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
SCS – Método cinemático	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Dooge	Aplicável	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Ven Te Chow	Aplicável	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Picking	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Izzard	Não aplicável	Restrição não identificada	Não aplicável	Não aplicável
Giandotti	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Arnell	Não aplicável	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Bransby-Williams	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Jhonstone	Aplicável	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Tsuchiya	Aplicável	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Riverside Country	Restrição não identificada	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Pasini	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada
DNOS	Restrição não identificada	Não aplicável	Aplicável	Não aplicável
US Corps of Engineers	Restrição não identificada	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Carter Lag equation for Partially Sewered	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Williams	Restrição não identificada	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Ventura	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada
McCuen	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
IPH II	Não aplicável	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Putnam	Restrição não identificada	Aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
Tulsa District	Restrição não identificada	Aplicável	Aplicável	Aplicável
Denver	Restrição não identificada	Não aplicável	Restrição não identificada	Restrição não identificada
George Ribeiro	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável
Hathaway	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada	Restrição não identificada

Fonte: Autora

Os métodos que apresentaram restrição em relação a pelo menos um dos critérios avaliados foram considerados inadequados, e foram descartados como opção para determinação do tempo de concentração das regiões hidrográficas de interesse. São eles: Kirpich, California Culverts Practice, Federal Aviation Agency, Onda cinemática, SCS Lag, Dooge, Ven Te Chow, Izzard, Arnell, Jhonstone, Tsuchiya, DNOS, Carter Lag equation for Partially Sewered, McCuen, IPH II e Denver.

Também foram descartados os métodos que apresentaram o status “Restrição não identificada” para todos os critérios, ou seja, os métodos: SCS – Método cinemático ou Método da Velocidade Média, Giandotti, Pasini e Hathaway. Essa decisão foi tomada a favor da segurança, uma vez que a ausência de informações sobre os critérios para aplicabilidade dos métodos é um indicativo de que existe incerteza sobre às condições que o método apresenta boa resposta.

Após a remoção dos métodos considerados não aplicáveis ou incertos restaram nove métodos que apresentaram pelo menos um dos critérios com status aplicável. Dentre esses métodos restantes, foram selecionados três métodos para aplicação no presente estudo. O primeiro método selecionado foi o George Ribeiro que se mostrou aplicável de acordo com todos os critérios avaliados. O método Tulsa District mostrou-se aplicável de acordo com três dos quatro critérios, e por isso também foi selecionado. Por último foi selecionado o método do US Corps of Engineers dentre os métodos com apenas um critério considerado aplicável e com os demais critérios sem restrições de uso. Essa escolha foi realizada com base nas indicações de uso do referido método nos manuais e referências técnicas do programa HEC-HMS, ferramenta selecionada para obtenção dos hidrogramas.

Os métodos de Picking, Bransby-Williams, Riverside Country, Williams, Ventura e Putnam, embora considerados adequados em pelo menos um dos critérios avaliados, não foram utilizados na determinação dos tempos de concentração.

## **6.2. Tempos de concentração das regiões hidrográficas**

Os tempos de concentração obtidos utilizando-se os três métodos de apropriação selecionados para o estudo (item 5.1.3) estão compilados nas tabelas 25 e 26. A

Tabela 25 apresenta os valores obtidos utilizando-se as informações de hidrografia disponíveis na escala 1:50000, enquanto a Tabela 26 apresenta os valores correspondentes à utilização da hidrografia na escala 1:250000.

Tabela 25 - Tempos de concentração (em minutos) obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:50.000

Região Hidrográfica	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (min)								
	US Corps of Engineers			Tulsa District			George Ribeiro		
	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT
SB1	372,65	371,62	378,63	377,54	376,47	383,76	350,99	350,94	<b>351,08</b>
SB2	219,76	219,25	222,05	238,60	238,03	241,15	218,49	218,44	<b>218,52</b>
SB3	237,05	230,41	238,91	252,67	245,40	254,70	167,63	167,61	<b>167,60</b>
SB4	187,08	185,75	188,91	210,26	208,74	212,37	170,70	170,73	<b>170,71</b>
SB5	218,00	216,25	217,43	232,46	230,54	231,84	176,70	176,65	<b>176,67</b>
SB6	375,46	378,30	379,34	370,35	373,23	374,28	284,72	284,76	<b>284,71</b>
SB7	277,60	272,87	278,32	321,90	316,27	322,77	215,57	215,37	<b>215,50</b>
SB8	178,04	177,20	177,12	178,73	177,86	177,78	163,25	163,24	<b>163,25</b>

Tabela 26 - Tempos de concentração (em minutos) obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:250.000

Região Hidrográfica	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (min)								
	US Corps of Engineers			Tulsa District			George Ribeiro		
	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT
SB1	359,31	356,15	363,41	372,68	369,32	377,06	332,98	332,94	332,96
SB2	217,10	215,72	218,94	238,74	237,18	240,81	214,45	214,45	214,46
SB3	234,81	226,20	235,81	250,12	240,71	251,22	166,44	166,41	166,42
SB4	183,71	181,50	185,01	208,35	205,79	209,87	167,54	167,53	167,53
SB5	216,46	213,09	215,40	231,37	227,67	230,20	177,32	177,29	177,26
SB6	371,81	371,06	374,37	369,17	368,40	371,77	283,54	283,59	283,52
SB7	257,04	251,62	257,40	310,14	303,43	310,59	192,38	192,48	192,40
SB8	175,24	174,03	174,31	176,97	175,72	176,01	160,60	160,59	160,59

A partir da simples inspeção das tabelas 25 e 26 pode-se observar que os valores dos tempos de concentração em cada região hidrográfica apresentam variações que dependem do método selecionado para apropriação do tempo de concentração, da resolução espacial empregada para descrever o relevo utilizado na apropriação da declividade e da escala da rede de drenagem utilizada. Nas duas tabelas é possível observar que a influência do método de apropriação do tempo de concentração apresenta-se mais significativa nas regiões hidrográficas SB3, SB6, SB6 e SB7, regiões que apresentam declividades mais pronunciadas

A variação provocada pela alteração das informações relacionadas ao relevo, considerando-se um mesmo método de apropriação do tempo de concentração não se mostrou significativa. O mesmo padrão pode ser observado ao se comparar os valores nas tabelas 25 e 26, comparação que permite avaliar o efeito da variação da escala da rede de drenagem nos tempos de concentração.

Para análise cuidadosa das variações nos valores de tempo de concentração recorreu-se ao cenário referencial, correspondente aos tempos de concentração obtidos pelos planos de informação com maior nível de detalhamento (maior escala ou resolução) e pelo método que se apresenta aplicável a partir de todos os critérios avaliados. Este cenário foi composto pelo tempo de concentração determinado pelo método de George Ribeiro, utilizando-se a hidrografia na escala 1:50000 e modelo digital de terreno apropriado a partir das curvas de nível com equidistância de 20 metros.

Calculou-se o erro percentual de todos os valores de tempo de concentração em relação ao cenário referencial. Os resultados foram dispostos em uma matriz de erros apresentada na Tabela 27.

Tabela 27 - Erros percentuais em relação ao cenário referencial

Região Hidrográfica	Hidrografia	ERROS PERCENTUAIS								
		US Corps of Engineers			Tulsa District			George Ribeiro		
		MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT
SB1	1:50000	6,145	5,851	7,848	7,537	7,231	9,308	-0,025	-0,039	-
SB2		0,570	0,335	1,615	9,192	8,929	10,357	-0,011	-0,035	-
SB3		41,438	37,474	42,547	50,755	46,420	51,968	0,019	0,002	-
SB4		9,589	8,813	10,660	23,171	22,277	24,407	-0,003	0,011	-
SB5		23,392	22,399	23,072	31,578	30,492	31,227	0,018	-0,013	-
SB6		31,877	32,876	33,240	30,082	31,093	31,462	0,005	0,021	-
SB7		28,816	26,620	29,153	49,376	46,764	49,777	0,033	-0,061	-
SB8		9,063	8,548	8,498	9,484	8,953	8,902	0,000	-0,003	-
SB1	1:250000	2,343	1,443	3,514	6,153	5,195	7,399	-5,154	-5,167	-5,161
SB2		-0,649	-1,282	0,191	9,254	8,540	10,203	-1,860	-1,863	-1,857
SB3		40,098	34,959	40,695	49,236	43,620	49,887	-0,696	-0,712	-0,709
SB4		7,614	6,321	8,375	22,053	20,548	22,939	-1,858	-1,861	-1,862
SB5		22,523	20,615	21,918	30,959	28,866	30,295	0,366	0,351	0,334
SB6		30,596	30,330	31,493	29,667	29,396	30,581	-0,411	-0,392	-0,416
SB7		19,276	16,761	19,442	43,919	40,806	44,124	-10,729	-10,680	-10,717
SB8		7,345	6,604	6,775	8,407	7,640	7,817	-1,625	-1,628	-1,627

Fonte: Autora

Os valores reunidos na Tabela 27 indicam que os Métodos de Tulsa District e US Corps of Engineers conduzem a erros que variam de 16 a 52% em relação ao cenário adotado como referência nas regiões hidrográficas SB3, SB5, SB6 e SB7. Esse comportamento pode ser percebido tanto na utilização da escala 1:50.000 da hidrografia, quando na escala 1:250.000. Contudo, cabe destacar que os maiores erros relativos foram registrados na escala 1:50.000.

### 6.3. Equações de chuvas intensas e hietogramas de projetos

Os hietogramas associados à área de estudo foram apropriados a partir das equações de chuvas intensas definidas a partir da aplicação do método de Chow-Gumbel (equação 11) e a partir do programa computacional Plúvio (equação 12).

$$i = \frac{14,32612 T^{0,143229}}{(t+10,59422)^{0,743296}} \quad (11)$$

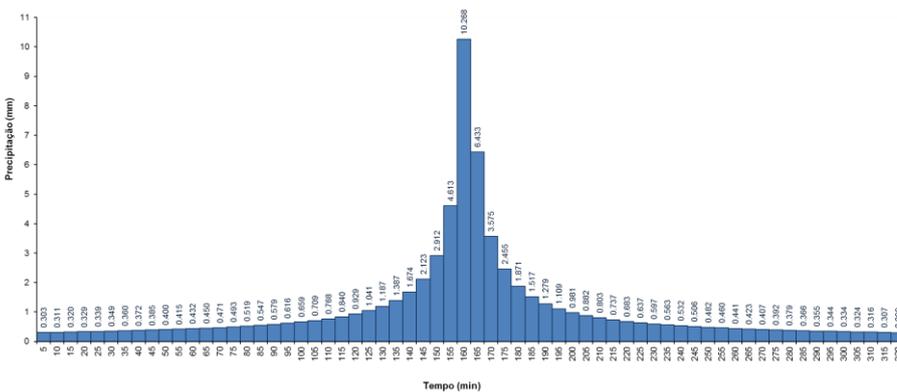
$$i = \frac{3228,293 T^{0,213}}{(t+28,976)^{0,945}} \tag{12}$$

É relevante observar que ressaltar que a equação de chuvas intensas obtida pelo método de Chow-Gumbel fornece a intensidade da chuva em mm/min, enquanto a equação obtida a partir do programa Plúvio fornece a intensidade da chuva em mm/h.

A partir das equações (11) e (12) foram obtidos os hietogramas para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Esses hietogramas foram produzidos considerando-se a duração da chuva equivalente tempo de concentração de cada região hidrográfica.

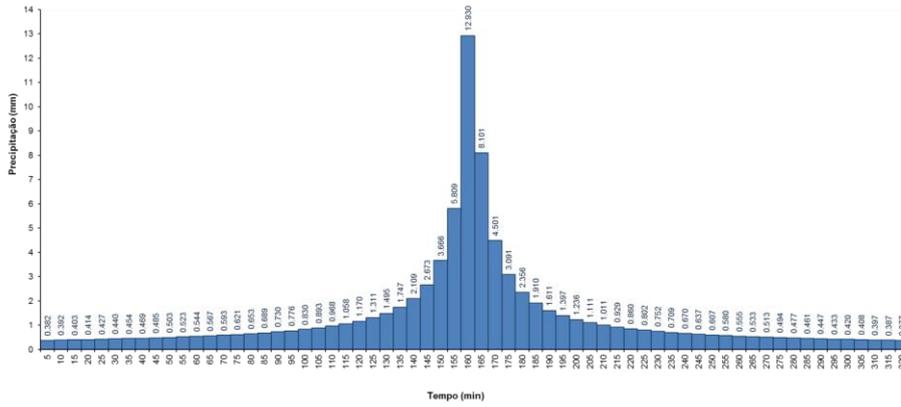
As figuras de 21 a 26 apresentam hietogramas obtidos para um tempo de concentração de 320 minutos, tempo de concentração estimado para a região hidrográfica SB 7 aplicando-se o método de Tulsa District, utilizando-se dados de hidrografia provenientes do GEOBASES na escala de 1:50000, dados de relevo provenientes do Modelo Digital de Elevação com resolução de 90 metros, e considerando a equação de chuvas intensas desenvolvida com auxílio do método Chow-Gumbel.

Figura 21 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 2 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel



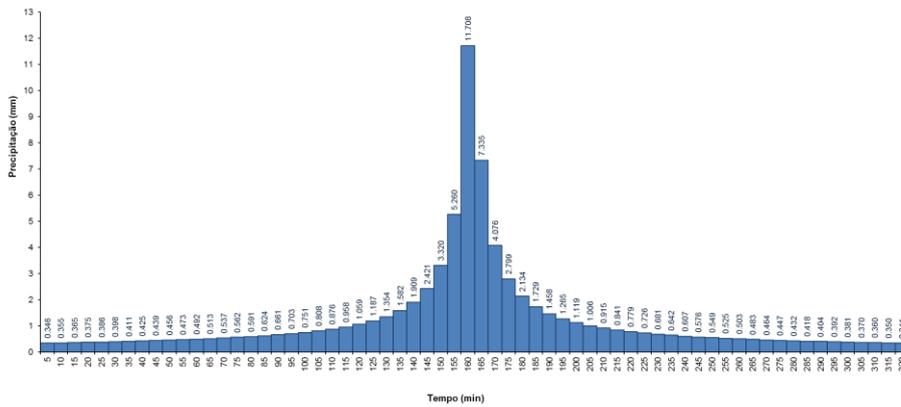
Fonte: Autora

Figura 22 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 5 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel



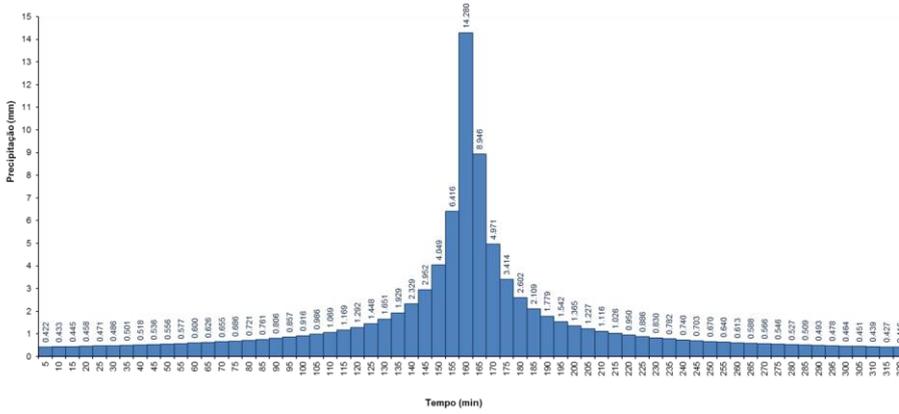
Fonte: Autora

Figura 23 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 10 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel



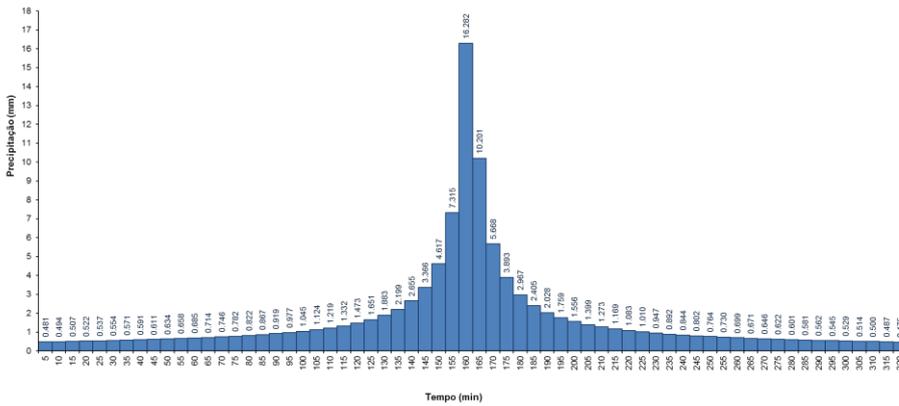
Fonte: Autora

Figura 24 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 20 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel



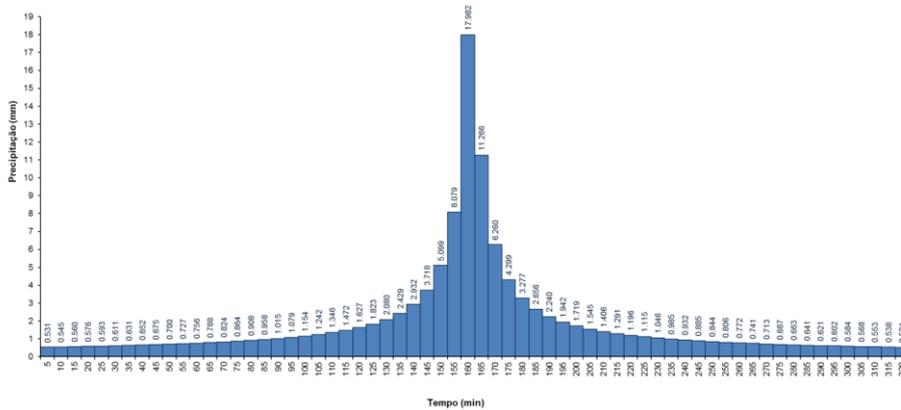
Fonte: Autora

Figura 25 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 50 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel



Fonte: Autora

Figura 26 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 100 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do método Chow-Gumbel



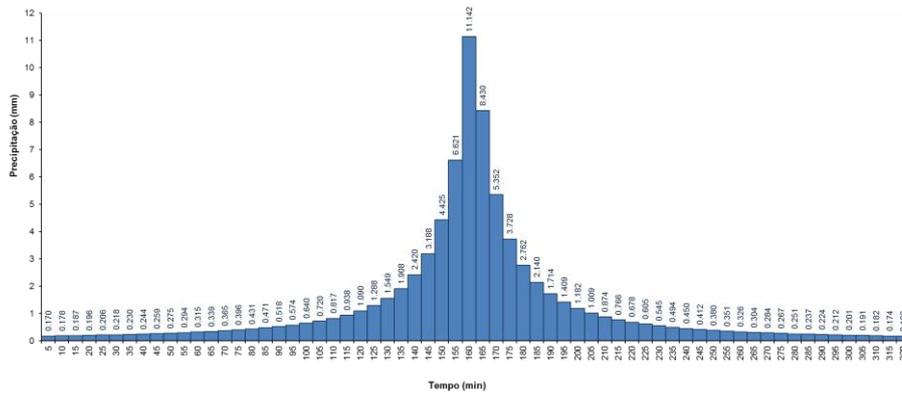
Fonte: Autora

Nas figuras de 21 a 26, os valores correspondentes ao pico do hietograma constituem a maior altura incremental obtida na definição do bloco principal, a partir do qual os demais blocos serão alternados. Esse valor apresenta um pequeno aumento à medida que o período de retorno aumenta, função da influência do período de retorno na equação de chuvas intensas.

As figuras de 27 a 32 apresentam hietogramas produzidos a partir da equação de chuvas intensas definida com auxílio do programa Pluvio. Também para este grupo de hietogramas foi considerado o tempo de concentração estimado para a região hidrográfica SB7 com auxílio do método Tulsa District, hidrografia do GEOBASES (1:50.000) e modelo digital de elevação com resolução de 90 metros.

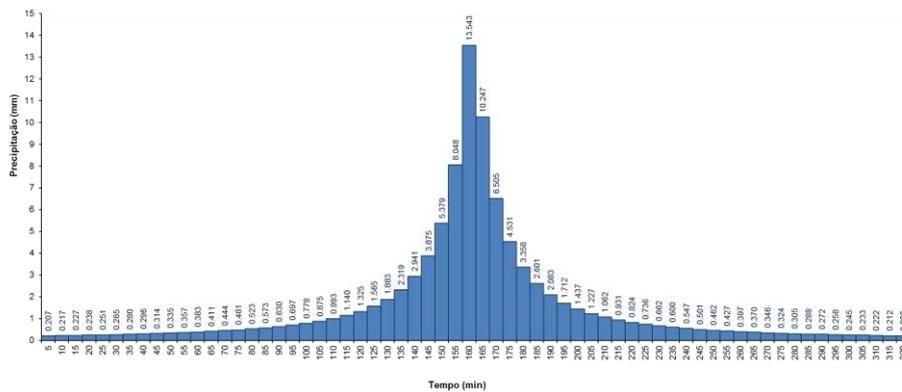
É relevante observar que hietogramas similares foram produzidos para todas as regiões hidrográficas da área de estudo. Nesta etapa foram empregadas as diferentes expressões aplicáveis a determinação de tempo de concentração e intensidade pluviométrica e diferentes fontes de informação para relevo e hidrografia. Os referidos hietogramas estão reunidos no Apêndice B (planilha digital).

Figura 27 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 2 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio



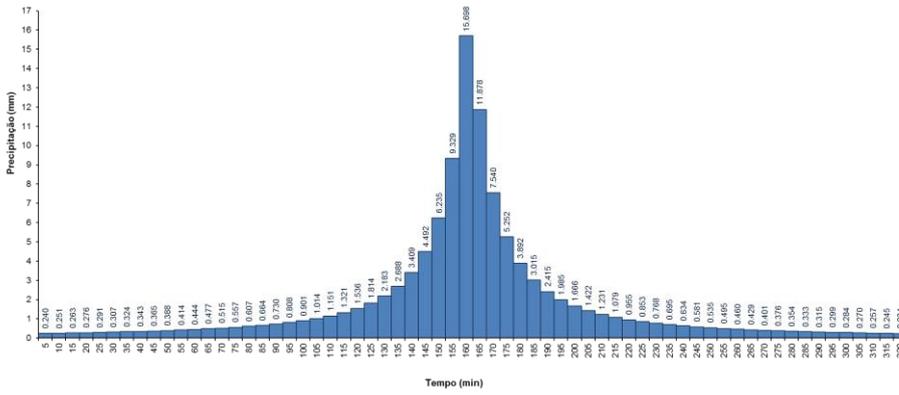
Fonte: Autora

Figura 28 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 5 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio



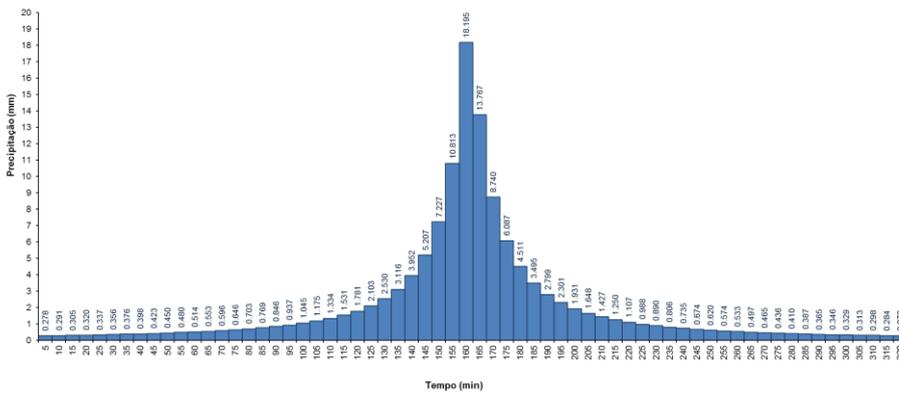
Fonte: Autora

Figura 29 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 10 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio



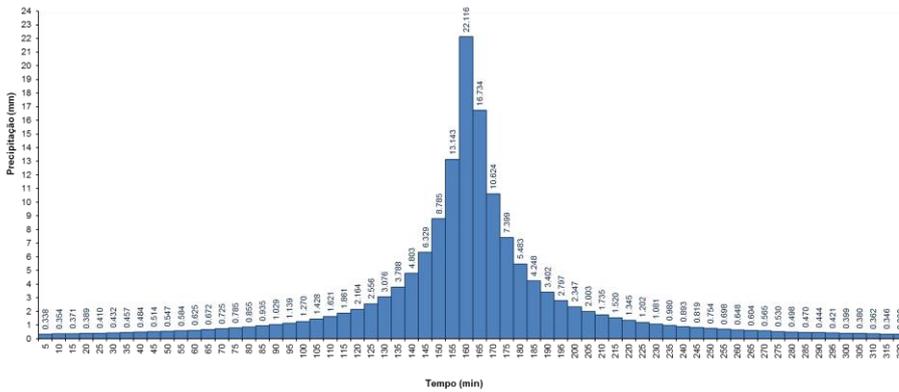
Fonte: Autora

Figura 30 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 20 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio



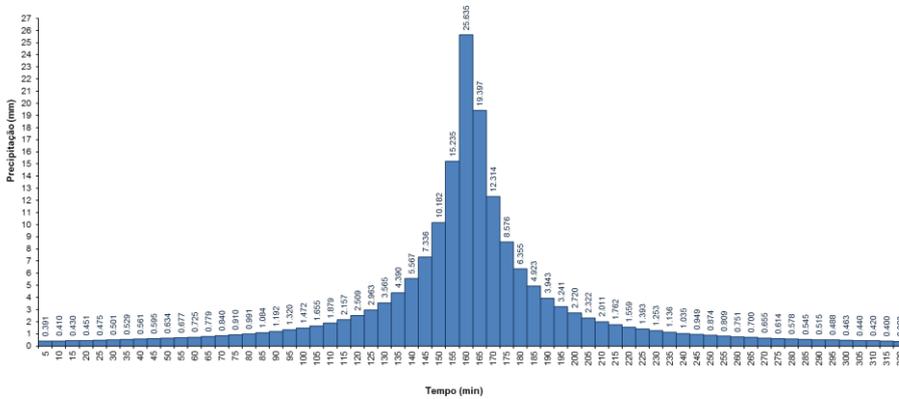
Fonte: Autora

Figura 31 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 50 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio



Fonte: Autora

Figura 32 - Hietograma correspondente ao período de retorno de 100 anos, duração de 320 minutos e emprego da equação de chuvas intensas definida com auxílio do Programa Plúvio



Fonte: Autora

A partir da análise das figuras de 27 a 32 observou-se que os valores dos picos dos hietogramas apresentaram valores superiores aos obtidos utilizando-se a equação de chuvas intensas obtida pelo método de Chow-Gumbel.

A simples inspeção da Tabela 28 permite observar que a medida que se aumenta o período de retorno, nos hietogramas gerados a partir da equação do programa PLúvio os valores de pico aumentam em uma taxa superior à apresentada quando se aplica a equação obtida a partir do método de Chow-Gumbel.

Tabela 28 - Comparação entre os picos dos hietogramas gerados a partir de diferentes equações de chuvas intensas – duração de 320 minutos

Período de Retorno (anos)	Picos dos hietogramas (mm)	
	Chow-Gumbel	Plúvio
2	10,27	11,14
5	11,71	13,54
10	12,93	15,70
20	14,28	18,20
50	16,28	22,12
100	17,98	25,64

Fonte: Autora

Outro aspecto interessante que pode ser observado a partir a partir da soma dos blocos dos hietograma é o fato de que aqueles que foram apropriados a partir da equação de chuvas intensas definida com auxílio do programa PLúvio apresentam volumes totais de precipitação superiores.

## 6.4. Apropriação de hidrogramas de Projeto

### 6.4.1. Perda inicial e taxa de infiltração constante

Considerando-se o fato de que o plano de informações de uso e ocupação do solo utilizado como referência indicou que a área de estudo apresentava uso e ocupação predominantemente rural, optou-se por adotar como valor da perda inicial padrão a média da faixa recomendada na literatura (25,4 milímetros), conforme estabelecido na seção 5.3.2.

Os valores apropriados como representativos da taxa de infiltração, a partir dos tipos de solo identificados para a área de estudo, estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Taxa de infiltração resultante da média ponderada por área

Região Hidrográfica	TAXAS DE INFILTRAÇÃO (mm/h)	
	EMBRAPA	GEOBASES
SB1	8,72	6,65
SB2	8,85	1,30
SB3	8,07	3,33
SB4	8,92	1,02
SB5	8,50	2,57
SB6	7,50	2,74
SB7	8,14	1,25
SB8	8,58	3,37

Fonte: Autora.

É relevante observar que a taxa de infiltração depende unicamente do tipo de solo da área de estudo. Deste modo, o nível de detalhamento dessas informações influenciou diretamente os valores estimados para precipitação efetiva, variável apropriada como a diferença entre a precipitação incidente e a perda por infiltração.

A simples avaliação dos valores da Tabela 29 mostra que a resolução e classificação dos solos apropriados a partir do plano de informações disponibilizado por GEOBASES (escala 1:250.000) produziram valores de infiltração menores que os produzidos tomando-se como base o plano de informação obtido de EMBRAPA (escala 1:400.000). Para algumas regiões hidrográficas o valor obtido a partir do plano de informação da EMBRAPA chegou a ser cerca de 8,75 vezes maior que o obtido a partir do plano de informações de GEOBASES, como ocorre em SB4.

Além do nível de detalhamento da escala dos planos de informações utilizados, também pode-se perceber a falta de detalhamento sobre afloramentos rochosos no plano de informações da EMBRAPA, aspecto que contribuiu para as variações observadas, uma vez que essa classe conduz a uma classificação do grupo de solo com menor capacidade de infiltração.

#### 6.4.2. Abstração inicial e valor de CN

Para aplicação do método do SCS foram necessários os valores de abstração inicial e do número da curva (*Curve Number*).

O valor da abstração inicial consiste no volume da precipitação que deve cair antes de se produzir um excesso de precipitação. Quando não se assume um valor para esse parâmetro o HEC-HMS assume automaticamente o valor correspondente a 0,2 vezes a retenção potencial, obtida a partir do valor de CN. Esse foi valor adotado como padrão no presente estudo.

A partir das informações sobre as características do uso e ocupação e tipo de solo foram apropriados os valores de CN compostos de todas as regiões hidrográficas da bacia, considerando-se os diferentes planos de informações de tipo de solo selecionados. Além dos valores de CN, o plano de informação de uso e ocupação também serviu para a determinação do percentual das áreas impermeáveis. Esses valores estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores de CN e percentual de área impermeável para as diferentes regiões hidrográficas

Regiões hidrográficas	CN composto		Área impermeável
	EMBRAPA	GEOBASES	
SB1	45,54	55,26	2,44%
SB2	44,69	78,48	2,53%
SB3	51,84	72,76	6,71%
SB4	42,92	79,08	5,74%
SB5	49,95	76,02	5,77%
SB6	54,22	74,58	6,39%
SB7	48,90	79,40	12,18%
SB8	46,29	71,76	2,67%

Fonte: Autora.

A Tabela 30 permite observar que os valores de CN apropriados a partir do plano de informações referentes ao tipo de solo disponibilizado pela EMBRAPA (escala 1:400.000) foram inferiores aos obtidos quando se utilizou o plano de informações de tipo de solo do GEOBASES (escala 1:250.000). É relevante registrar que os valores de CN obtidos a partir do plano de informações da EMBRAPA são coerentes com as taxas de infiltração previamente estimadas (Tabela 29), uma vez que ambas as variáveis (CN e taxa de infiltração) são influenciadas pelos grupos de solos predominantes em uma determinada região.

O percentual da área impermeável de cada região hidrográfica foi obtido a partir de um único plano de informações de uso e ocupação do solo; portanto, não variou com

as diferentes combinações realizadas com os planos de informações de tipo de solo. Os resultados apresentados na tabela mostram que a região SB7 apresenta maior grau de impermeabilização. Esse resultado é decorrente da presença de áreas urbanizadas e afloramentos rochosos na referida região hidrográfica.

### 6.4.3. Tempo de retardo

Com base nos tempos de concentração apresentados nas tabelas 25 e 26 foram calculados os tempos de retardo, cujos valores estão reunidos nas tabelas 31 e 32.

Tabela 31 - Tempos de retardo obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:50.000

Região Hidrográfica	TEMPO DE RETARDO (minutos)								
	US Corps of Engineers			Tulsa District			George Ribeiro		
	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT
SB1	372,65	371,62	378,63	226,52	225,88	230,25	210,59	210,57	210,65
SB2	219,76	219,25	222,05	143,16	142,82	144,69	131,10	131,06	131,11
SB3	237,05	230,41	238,91	151,60	147,24	152,82	100,58	100,56	100,56
SB4	187,08	185,75	188,91	126,16	125,24	127,42	102,42	102,44	102,42
SB5	218,00	216,25	217,43	139,48	138,33	139,11	106,02	105,99	106,00
SB6	375,46	378,30	379,34	222,21	223,94	224,57	170,83	170,86	170,82
SB7	277,60	272,87	278,32	193,14	189,76	193,66	129,34	129,22	129,30
SB8	178,04	177,20	177,12	107,24	106,72	106,67	97,95	97,95	97,95

Fonte: Autora

Tabela 32 - Tempos de retardo obtidos utilizando-se hidrografia na escala 1:250.000

Região Hidrográfica	TEMPO DE RETARDO (minutos)								
	US Corps of Engineers			Tulsa District			George Ribeiro		
	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT	MDE 30	MDE 90	MDT
SB1	359,31	356,15	363,41	223,61	221,59	226,23	199,79	199,76	199,78
SB2	217,10	215,72	218,94	143,24	142,31	144,49	128,67	128,67	128,68
SB3	234,81	226,20	235,81	150,07	144,43	150,73	99,86	99,85	99,85
SB4	183,71	181,50	185,01	125,01	123,47	125,92	100,52	100,52	100,52
SB5	216,46	213,09	215,40	138,82	136,60	138,12	106,39	106,38	106,36
SB6	371,81	371,06	374,37	221,50	221,04	223,06	170,12	170,15	170,11
SB7	257,04	251,62	257,40	186,09	182,06	186,35	115,43	115,49	115,44
SB8	175,24	174,03	174,31	106,18	105,43	105,61	96,36	96,35	96,36

Fonte: Autora

A simples análise dos valores das tabelas 31 e 32 mostra que os tempos de retardo – parcela do tempo de concentração – apresentam um comportamento semelhante

ao apresentado pelos tempos de concentração permitindo, portanto, reprodução de discussão apresentada para os tempos de concentração.

#### **6.4.4. Hidrogramas de projeto e variação das vazões de pico**

Os cenários de simulação estabelecidos na seção 5.3.3 (Definições dos cenários de modelagem) foram levados a termo, produzindo-se as diferentes simulações reunidas no Apêndice A. Neste apêndice estão apresentadas as diferentes combinações realizadas ao longo do processo de modelagem para obtenção de hidrogramas de projeto e vazões máximas, considerando-se a adoção de planos de informações de diferentes fontes e escalas, a adoção de diferentes métodos de apropriação de tempos de concentração, de diferentes equações de chuvas intensas, e de diferentes métodos para a modelagem de perdas. Dessa maneira, cada cenário de simulação compõe um conjunto de opções que contribuem sinergicamente para a produção de uma informação de vazão.

A etapa de simulação consistiu na apropriação dos hidrogramas de projeto e correspondentes vazões máximas para cada região hidrográfica e exutório da área de estudo. Nesta etapa, para cada cenário de simulação considerado, foram estimadas intensidades pluviométricas associadas aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Os resultados desta etapa do trabalho estão sumarizados no Apêndice C.

A simulação de cada cenário produziu um conjunto de hidrogramas correspondentes às respostas de cada elemento representativo da área de estudo ao evento de chuva descrito pelo hietograma de projeto utilizado, considerando-se os parâmetros de modelagem apropriados de acordo com o as escolhas que conformam o referido cenário de simulação. A Tabela 33 reproduz o conjunto de dados de entrada correspondentes ao primeiro cenário de simulação listado na tabela do Apêndice A. As figuras de 34 a 41 apresentam o hietograma e os hidrogramas para o exutório de cada região hidrográfica, assumindo-se período de retorno de 2 anos. Hidrogramas similares foram gerados para os demais cenários de simulação e períodos de retorno assumidos. Nas figuras de 34 a 41, os gráficos apresentados acima de cada

hidrograma correspondem às alturas da precipitação incidente (em azul) e a precipitação perdida (em vermelho).

Tabela 33 - Parâmetros e hietogramas correspondentes ao 1º cenário de simulação (T=2 anos)

Subbacia	Perda inicial (mm)	Taxa de infiltração constante (mm/h)	Área impermeável (%)	Método de apropriação de chuvas intensas	Duração da precipitação (min)
SB1	25.4	8.72	2.4365	CHOW-GUMBEL	375
SB2	25.4	8.85	2.5268	CHOW-GUMBEL	220
SB3	25.4	8.07	6.7077	CHOW-GUMBEL	240
SB4	25.4	8.92	5.7365	CHOW-GUMBEL	190
SB5	25.4	8.50	5.7656	CHOW-GUMBEL	220
SB6	25.4	7.50	6.3930	CHOW-GUMBEL	380
SB7	25.4	8.14	12.1841	CHOW-GUMBEL	280
SB8	25.4	8.58	2.6663	CHOW-GUMBEL	180

Figura 33 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB1 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos

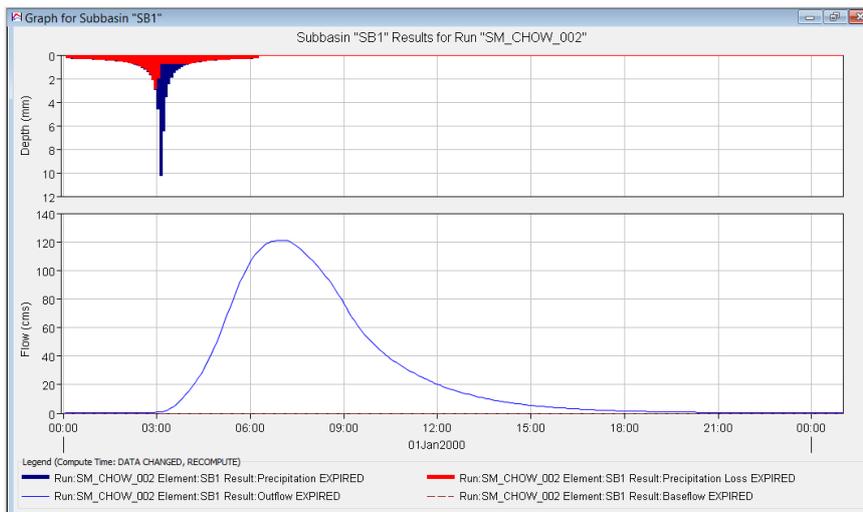


Figura 34 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB2 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos

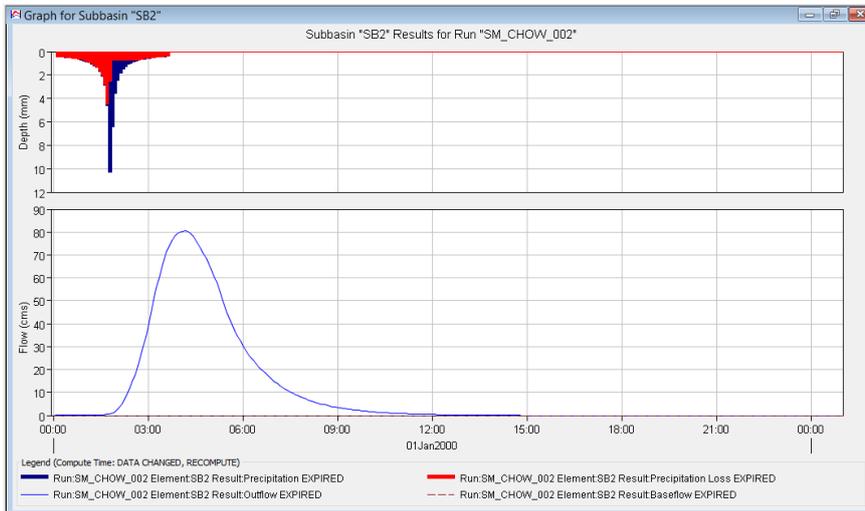


Figura 35 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB3 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos

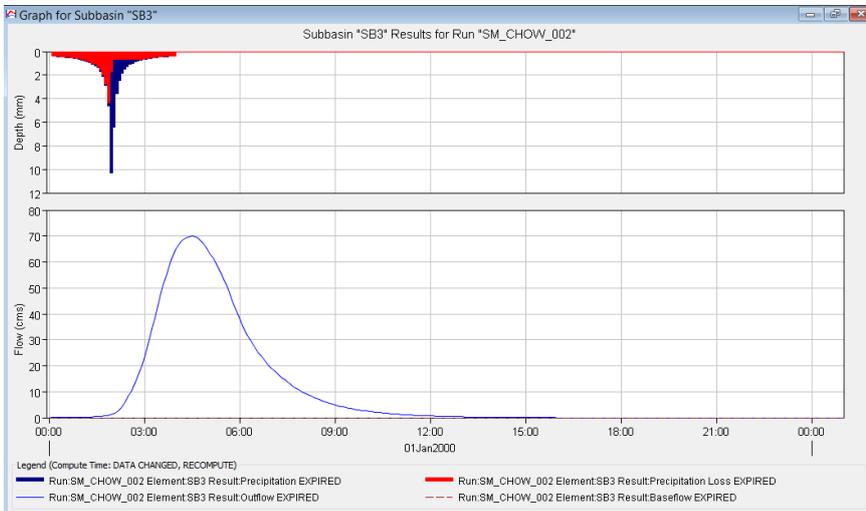


Figura 36 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB4 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos

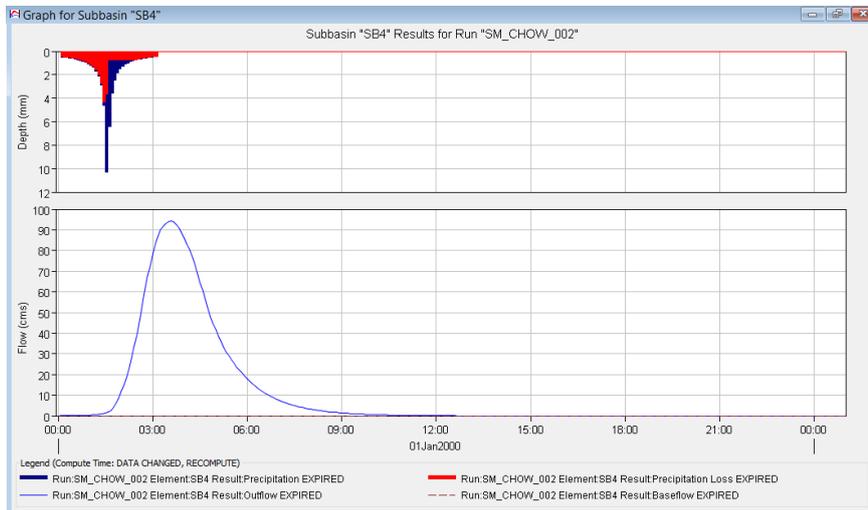


Figura 37 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB5 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos

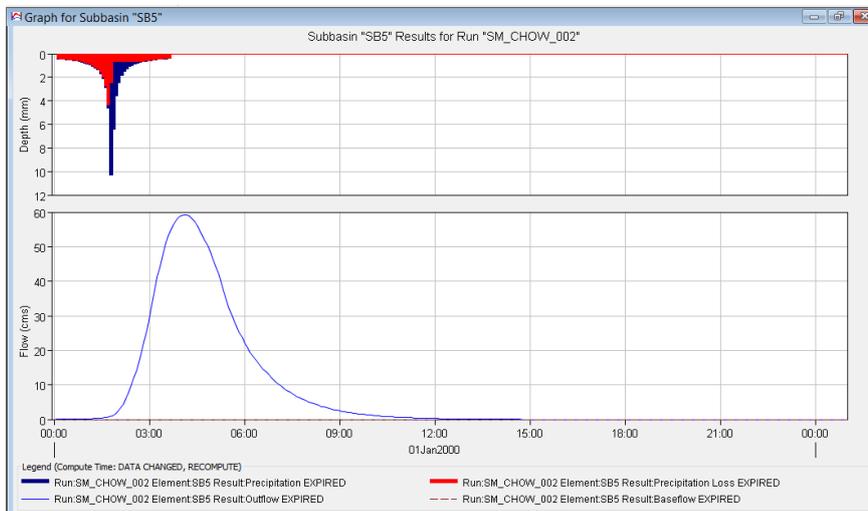


Figura 38 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB6 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos

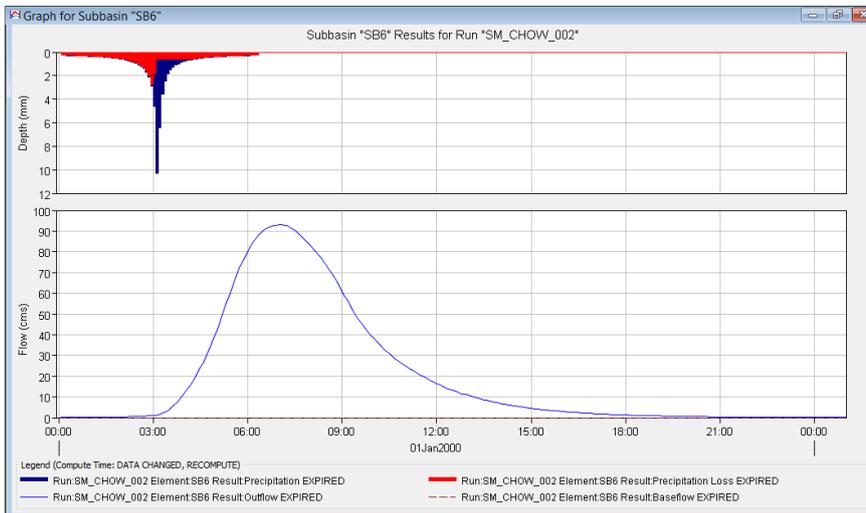


Figura 39 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB7 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos

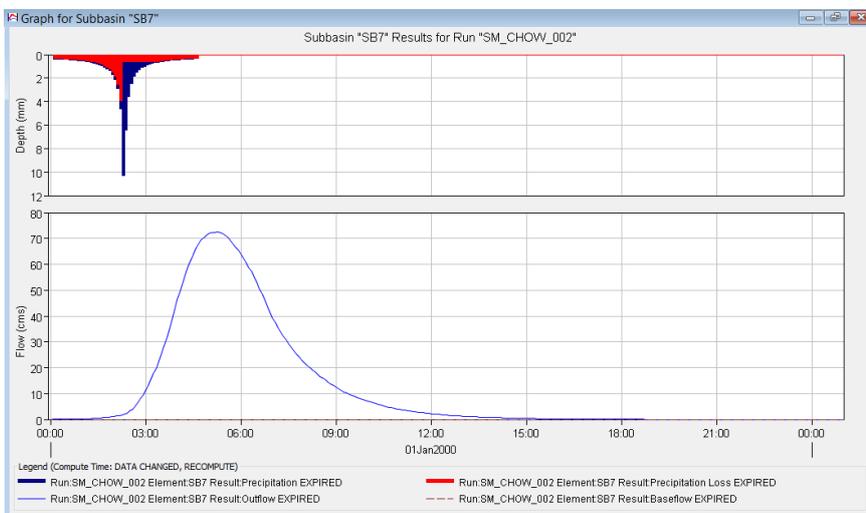
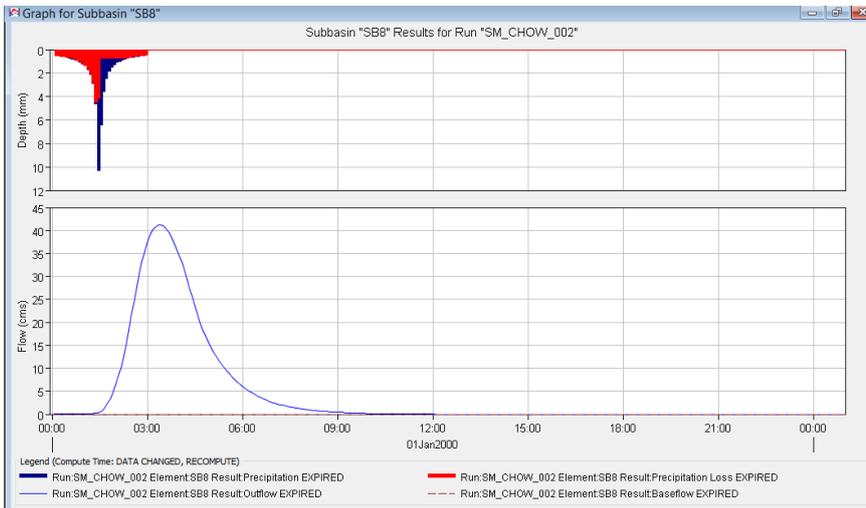


Figura 40 - Hidrograma produzido para o exutório da região hidrográfica SB8 considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos



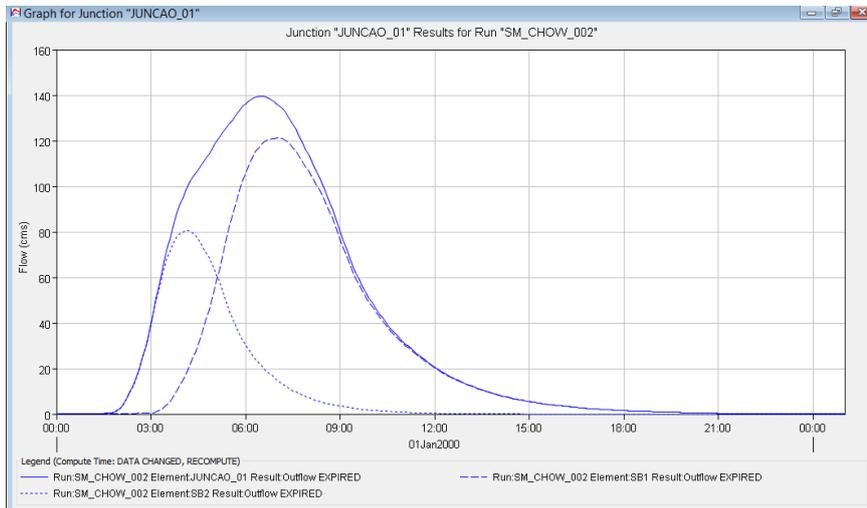
~~A simples análise das figuras de 34 a 41 permitiu observar o formato dos hidrogramas produzidos a partir dos dados de entrada correspondentes ao primeiro cenário de simulação para o período de retorno de 2 anos. Também pode-se observar os gráficos apresentados acima de cada hidrograma, que correspondem às alturas da precipitação incidente (em azul) e a precipitação perdida (em vermelho). Deste modo, pode-se visualmente ter uma noção da precipitação efetiva correspondente à porção em azul que não é sobreposta pela porção vermelha.~~

O HEC-HMS produziu, adicionalmente, um hidrograma para o exutório da área de estudo. A linha contínua apresentada na Figura 41 representa o referido hidrograma.

**Comentado [JC5]:** Remover?

**Comentado [Revisor6]:** Jose, sugeri a remoção. Parte deste parágrafo foi reposicionado no parágrafo imediatamente acima da Tabela 33 (Trecho que você conservou assinalado em amarelo).

Figura 41 - Hidrograma produzido para o exutório da área de estudo considerado primeiro cenário de simulação e período de retorno de 2 anos



A partir dos hidrogramas resultantes do processo de simulação, o HEC-HMS apropria os valores dos picos em cada um dos elementos representativos da bacia, conforme pode observado na Figura 42, que apresenta a tela correspondente aos picos de vazão dos hidrogramas correspondentes ao primeiro cenário de simulação, considerando-se o período de retorno de 2 anos.

Figura 42 - Tabela resumo dos picos de vazão em cada elemento do modelo da bacia

Project: SIMULACOES Simulation Run: SM\_CHOW\_002

Start of Run: 01jan2000, 00:00 Basin Model: BACIA\_BRACO\_NORTE\_ESQUERDO  
 End of Run: 02jan2000, 01:00 Meteorologic Model: CHOW\_TR002  
 Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: CONTROLE\_SIMULACOES

Show Elements: All Elements Volume Units:  MM  1000 M3 Sorting:

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
EXUTORIO	333.517	411.364	01jan2000, 04:20	25.782
JUNCAO_01	122.030	139.589	01jan2000, 06:30	25.369
JUNCAO_02	195.314	248.325	01jan2000, 04:10	24.695
JUNCAO_03	222.645	307.594	01jan2000, 04:10	24.584
JUNCAO_04	315.745	386.700	01jan2000, 04:35	26.062
SB1	82.332	121.165	01jan2000, 07:00	26.908
SB2	39.698	80.555	01jan2000, 04:10	22.177
SB3	32.940	70.021	01jan2000, 04:30	25.356
SB4	40.344	94.175	01jan2000, 03:35	22.115
SB5	27.331	59.270	01jan2000, 04:10	23.791
SB6	57.816	92.956	01jan2000, 07:05	29.982
SB7	35.284	72.498	01jan2000, 05:15	28.970
SB8	17.772	41.266	01jan2000, 03:25	20.796
TRECHO_01	122.030	139.589	01jan2000, 06:30	25.369
TRECHO_02	195.314	248.325	01jan2000, 04:10	24.695
TRECHO_03	222.645	307.594	01jan2000, 04:10	24.584
TRECHO_04	315.745	386.700	01jan2000, 04:35	26.062

Fonte: Autora

Os valores destacados na Figura 42 foram na planilha de resultados disponível no Apêndice C. Esses resultados foram objeto de análise, conforme parágrafos subsequentes.

A Tabela 34 apresenta medidas de tendência central e dispersão associados às vazões máximas no exutório da área de estudo. Os valores apropriados para as diferentes porções da área de estudo estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores de medidas de tendência central e dispersão para o exutório

Medidas	VAZÕES MÁXIMAS (m³/s)					
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
Máximo	960,85	1287,65	1579,37	1918,18	2449,99	2926,57
3º Quartil	639,21	865,49	1067,03	1327,16	1744,21	2126,86
Mediana	445,28	630,38	785,31	923,15	1143,19	1324,74
1º Quartil	156,99	227,47	307,63	410,07	618,53	814,41
Mínimo	60,31	77,52	98,15	124,20	179,15	231,51
Média	442,14	595,32	734,04	892,95	1163,97	1405,47
Amplitude	900,54	1210,14	1481,22	1793,99	2270,84	2695,06
Desvio Padrão	260,75	349,69	425,32	514,38	648,22	769,71

Fonte: Autora

Tabela 35 - Valores de medidas de tendência central e dispersão para as regiões hidrográficas

Região Hidrográfica	VAZÕES MÁXIMAS (m³/s)						
	Medidas	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
SB1	Máximo	205,96	283,60	353,86	435,75	564,91	681,17
	3ºQuartil	164,35	224,73	278,57	341,18	439,46	527,58
	Mediana	77,31	108,94	139,41	176,80	239,23	298,31
	1º Quartil	15,15	28,61	44,19	61,78	92,92	123,96
	Mínimo	7,51	11,78	17,30	25,12	39,56	54,20
	Média	88,36	122,72	154,86	193,54	256,67	315,32
	Amplitude	198,45	271,82	336,56	410,64	525,36	626,97
	Desvio Padrão	73,16	96,66	116,69	139,01	172,92	202,84
SB2	Máximo	168,48	225,21	275,88	334,26	425,54	507,30
	3ºQuartil	121,07	164,89	207,49	258,07	338,49	411,45
	Mediana	88,58	121,88	147,11	172,97	211,25	243,61
	1º Quartil	21,45	31,49	43,42	60,08	91,52	124,29
	Mínimo	4,63	5,59	7,43	10,67	17,58	25,13
	Média	82,85	111,54	137,86	168,89	218,46	263,57
	Amplitude	163,85	219,62	268,45	323,60	407,96	482,17
	Desvio Padrão	52,61	70,39	85,86	103,29	130,03	153,68
SB3	Máximo	161,84	218,47	268,78	326,99	418,35	500,10
	3ºQuartil	104,08	139,39	171,81	211,94	278,45	339,14
	Mediana	69,71	93,43	120,37	148,11	179,14	205,31
	1º Quartil	27,81	42,29	58,18	79,59	103,31	136,80
	Mínimo	11,56	15,84	20,41	26,34	36,65	46,66
	Média	70,94	96,34	119,68	147,19	191,19	231,27
	Amplitude	150,28	202,64	248,37	300,65	381,71	453,44
	Desvio Padrão	42,67	57,09	69,57	83,81	105,98	125,95
SB4	Máximo	207,70	277,28	339,18	410,71	522,37	622,10
	3ºQuartil	140,72	193,06	242,74	300,91	393,64	479,53
	Mediana	106,46	143,92	171,13	167,98	245,85	283,45
	1º Quartil	31,99	42,26	54,99	63,52	108,45	145,47
	Mínimo	11,63	13,26	14,94	13,36	24,08	31,38
	Média	100,67	134,30	164,89	192,05	258,28	310,51
	Amplitude	196,07	264,02	324,24	397,34	498,29	590,72
	Desvio Padrão	60,18	81,56	100,31	124,55	154,15	182,85

Tabela 35 - Valores de medidas de tendência central e dispersão para as regiões hidrográficas

Região Hidrográfica	VAZÕES MÁXIMAS (m³/s)						
	Medidas	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
SB5	Máximo	130,53	175,66	215,84	262,24	334,76	399,58
	3ºQuartil	89,10	120,91	151,16	187,83	246,15	299,14
	Mediana	63,90	89,18	109,16	128,84	157,72	180,58
	1º Quartil	21,73	32,56	44,59	60,80	90,37	116,26
	Mínimo	8,02	10,79	14,02	18,37	26,20	33,98
	Média	61,25	82,88	102,71	126,07	163,36	197,29
	Amplitude	122,51	164,87	201,82	243,87	308,56	365,60
	Desvio Padrão	36,29	48,61	59,29	71,42	90,22	107,05
SB6	Máximo	192,77	258,40	317,14	385,04	491,29	586,33
	3ºQuartil	132,60	177,38	217,42	267,82	350,39	428,59
	Mediana	93,61	127,16	163,73	198,42	238,13	271,69
	1º Quartil	43,24	64,92	87,67	117,26	154,62	193,54
	Mínimo	20,16	28,39	36,58	46,78	63,91	80,11
	Média	94,19	126,38	156,03	190,85	246,34	296,74
	Amplitude	172,61	230,02	280,56	338,26	427,38	506,22
	Desvio Padrão	49,42	64,62	78,06	93,48	117,84	140,10
SB7	Máximo	170,01	224,73	273,56	329,84	417,87	496,50
	3ºQuartil	109,96	145,69	177,20	216,37	276,66	330,70
	Mediana	84,62	109,77	130,08	151,35	181,53	206,18
	1º Quartil	39,78	54,26	69,86	90,49	127,21	152,31
	Mínimo	17,15	21,39	25,79	31,44	41,13	50,47
	Média	80,13	104,98	127,62	154,17	196,35	234,55
	Amplitude	152,86	203,33	247,77	298,41	376,74	446,03
	Desvio Padrão	40,34	53,65	65,35	78,74	99,66	118,50
SB8	Máximo	87,71	119,29	147,32	179,75	230,40	275,66
	3ºQuartil	66,26	91,32	113,57	139,20	183,45	223,74
	Mediana	39,49	56,05	71,36	90,35	111,73	129,45
	1º Quartil	8,37	13,49	19,78	28,73	45,80	63,76
	Mínimo	2,67	3,14	4,03	5,72	9,36	13,35
	Média	39,46	54,47	68,25	84,60	110,87	134,89
	Amplitude	85,04	116,16	143,29	174,03	221,04	262,31
	Desvio Padrão	27,89	37,78	46,26	55,81	70,39	83,28

A partir da análise dos resultados reunidos nas tabelas 33 e 34 é possível verificar que os valores de vazão máxima estimados com auxílio do modelo HEC-HMS apresentam relevante dispersão entorno dos valores médios. Independentemente da porção analisada na área de estudo ou do período de retorno associado a vazão de projeto, os valores de amplitude e desvio padrão apresentaram-se substancialmente elevados.

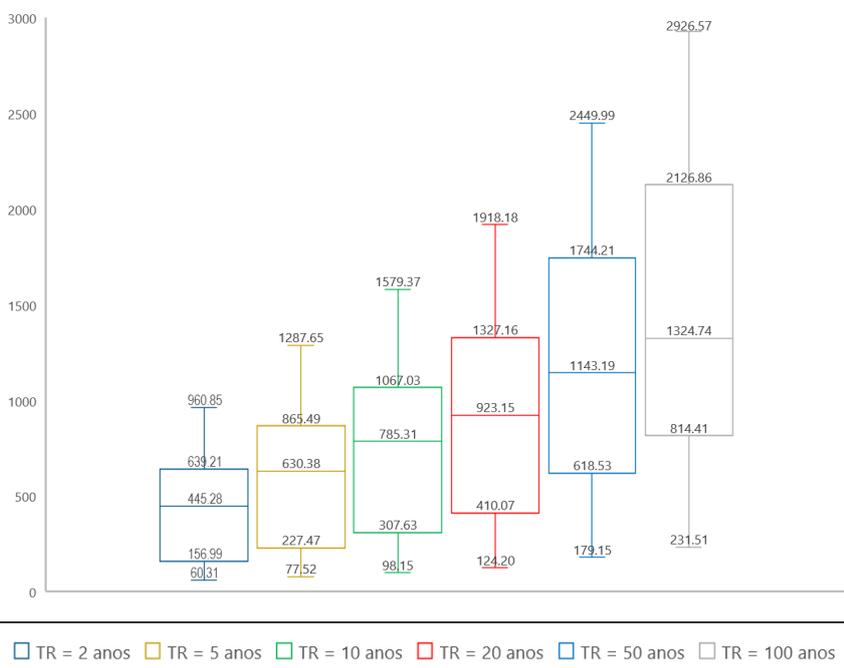
O cenário que produziu os menores valores de vazão máxima associada aos períodos de retorno entre 10 e 100 anos foi aquele em que se utilizou **a)** hidrografia do GEOBASES na escala 1:50000, **b)** plano de informação do tipo de solo da EMBRAPA, **c)** Modelo Digital de Elevação com resolução de 90 metros, **d)** tempo de concentração apropriado a partir da equação do *US Corps of Engineers*, **e)** método de perda do SCS *Curve Number* e **f)** hietograma produzido a partir de equações de chuvas intensas obtidas pelo método de Chow-Gumbel. Para os períodos de retorno de 2 e 5 anos o valor mínimo ocorreu em um cenário similar, substituindo-se o modelo digital de elevação pelo modelo digital de terreno obtido a partir de curvas de nível com equidistância de 20 metros.

O cenário que produziu os maiores valores de vazão máxima associada aos períodos de retorno entre 2 e 100 anos foi aquele em que se utilizou **a)** hidrografia do GEOBASES na escala 1:250.000, **b)** plano de informação do tipo de solo da GEOBASES, **c)** Modelo Digital de Elevação com resolução de 30 metros, **d)** tempo de concentração apropriado a partir da equação de George Ribeiro, **e)** método de perda do SCS *Curve Number* e **f)** hietograma produzido a partir de equações de chuvas intensas obtidas pelo programa PLúvio. Para os períodos de retorno de 2 e 5 anos o valor mínimo ocorreu em um cenário similar, substituindo-se o modelo digital de elevação pelo modelo digital de terreno obtido a partir de curvas de nível com equidistância de 20 metros.

A partir da Tabela 12 foi possível verificar que a região SB1 apresentou maior dispersão dos valores de vazão máxima, enquanto a menor dispersão ocorre em SB8. Essas regiões apresentam, respectivamente, a maior e a menor região hidrográfica da área de estudo.

Gráficos do tipo Box-plot foram empregados para ilustrar a variação nos valores de vazões máximas estimadas para o exutório da área de estudo, quando fixadas possíveis decisões que compõem cada cenário de simulação. O gráfico da Figura 43 apresenta a faixa de variação dos valores de vazão máxima considerando-se todas combinações simuladas.

Figura 43 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando todas os possíveis cenários de simulação



O gráfico apresentado na Figura 43 permite observar que as vazões máximas estimadas podem variar em até três ordens de grandeza

As figuras 44 e 45 apresentam os gráficos box-plot obtidos quando se opta por utilizar, respectivamente, o método de perdas Inicial e constante e os métodos de perdas SCS *Curve Number*.

Figura 44 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o método de perdas Inicial e constante

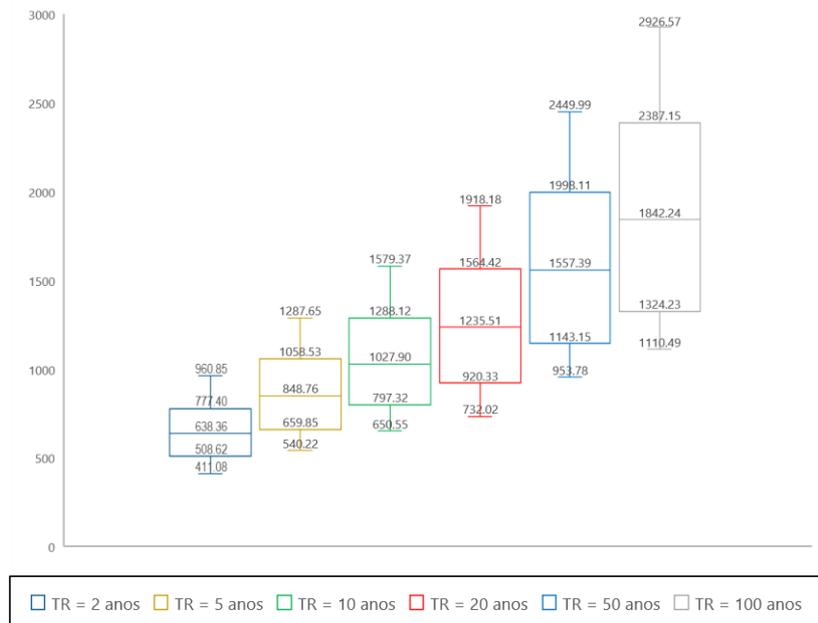
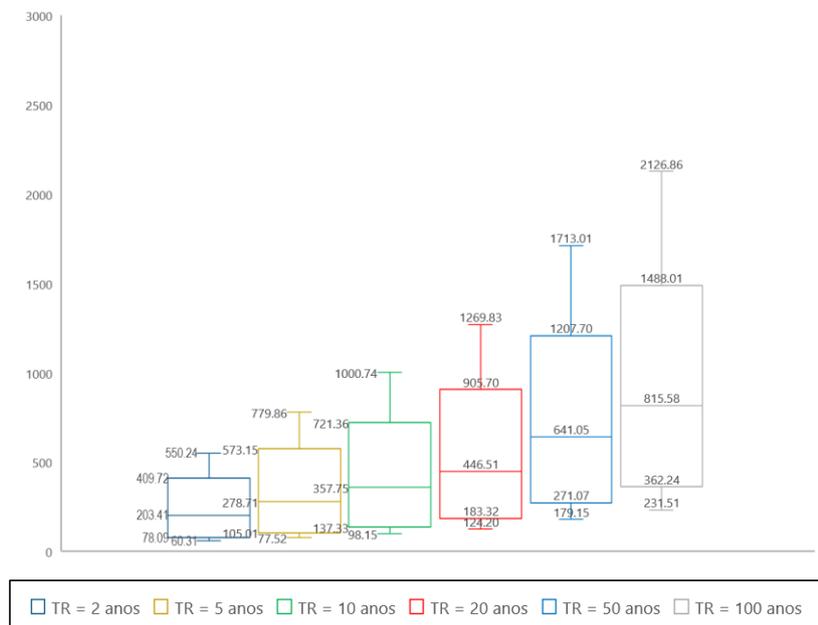


Figura 45 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o método de perdas SCS Curve Number



Comparando-se as figuras 44 e 45 é possível observar que o método Inicial e Constante apresenta valores mínimos maiores aqueles apresentados pelo método SCS. As variações entre valores mínimos de vazão flutuaram entre aproximadamente 5 vezes (para vazões associadas ao período de retorno de 100 anos) e 7 vezes (período de retorno de 2 anos).

Em relação aos valores máximos o método do SCS também apresentou valores inferiores aos produzidos pelo método inicial e constante. Contudo, a razão entre os valores máximos apresentado pelos métodos, considerando os diferentes períodos de retorno, variaram entre aproximadamente 1,4 e 1,8.

Em relação às faixas de distribuição dos valores de vazões produzidos a partir dos dois métodos analisados pode-se observar que o método de perdas inicial e constante apresenta maior dispersão de valores de vazões nos períodos de retorno de 2 a 20 anos. Porém, quando considerados períodos de retorno de 50 e 100 anos, as maiores amplitudes foram associadas à seleção do método de perdas SCS *Curve Number*.

Considerando-se a distribuição dos valores de vazão em relação à mediana, observou-se que o método de perdas Inicial e constante apresentou distribuição mais homogênea dos valores, com quantidade de valores localizados entre o primeiro e terceiro quartil equivalentes (aproximadamente 50% acima e 50% abaixo da mediana). Esse comportamento não é observado quando se opta pelo método do SCS, que concentra um percentual de valores maior entre a mediana e o terceiro quartil.

As figuras 38 e 39 apresentam os gráficos box-plot obtidos quando se opta por utilizar, respectivamente, o método de apropriação de equações de chuvas intensas Chow-Gumbel e a partir do programa Plúvio.

Figura 46 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando a apropriação das equações de chuvas intensas pelo método Chow-Gumbel

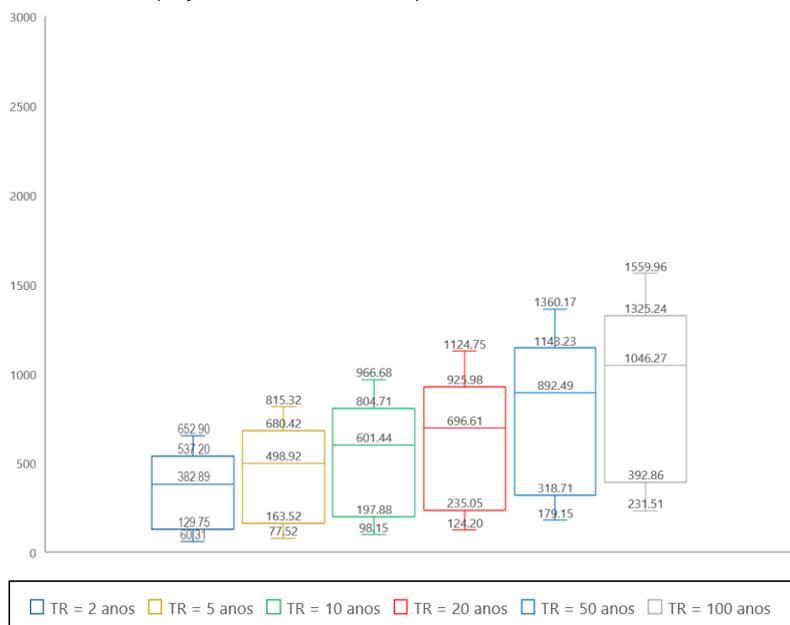
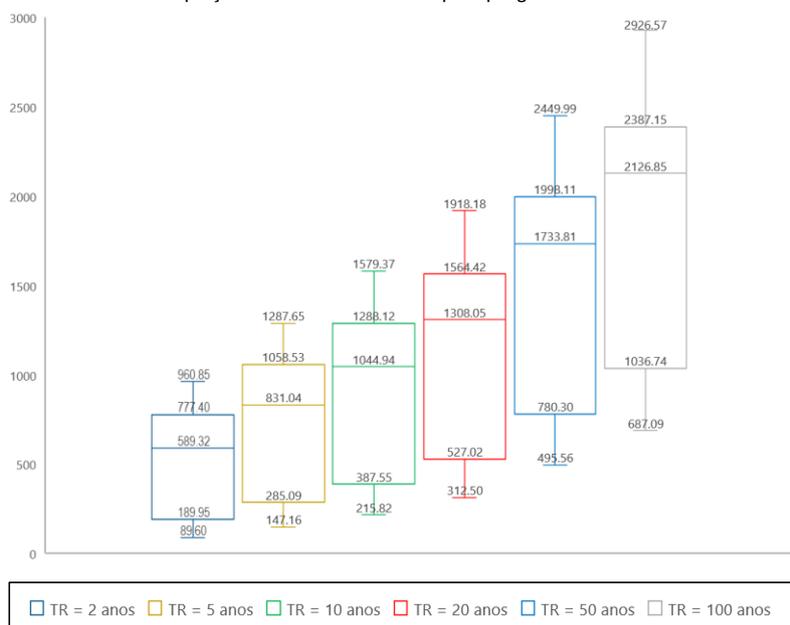


Figura 47 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando a apropriação das equações de chuvas intensas pelo programa Plúvio



A comparação das figuras 46 e 47 permite observar que, quando se opta pela apropriação de chuvas intensas pelo método Chow-Gumbel, as vazões máximas obtidas apresentam menor dispersão que as apresentadas pelos cenários de simulação que consideraram o uso do programa Plúvio. Adicionalmente, os gráficos indicam que, quando se utiliza o Plúvio, a diferença entre as vazões máximas associadas a diferentes períodos de retorno cresce em uma taxa superior à apresentada quando da definição de equações de chuvas intensas a partir do método de Chow-Gumbel. Esse comportamento reflete o efeito do tempo de concentração, aspecto discutido em seções precedentes.

Considerando-se a distribuição dos valores de vazão em relação à medida de tendência central, observou-se que ambos métodos apresentaram uma concentração de valores abaixo da mediana.

As figuras 48, 49 e 50 apresentam os gráficos box-plot obtidos da apropriação do tempo de concentração utilizando-se, respectivamente, a equação do US Corps of Engineers, a equação do Tulsa District e a equação de George Ribeiro.

Figura 48 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o tempo de concentração obtido pela equação do US Corps of Engineers

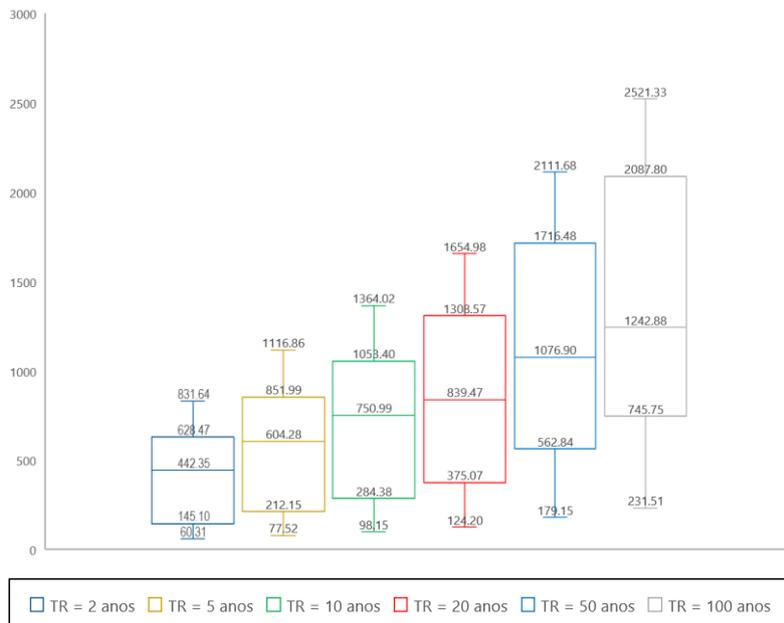


Figura 49 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando o tempo de concentração obtido pela equação do Tulsa District

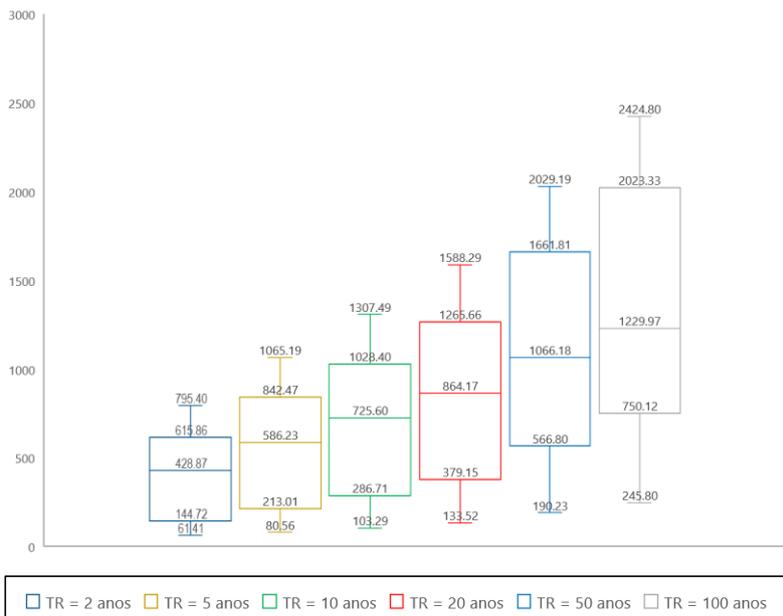
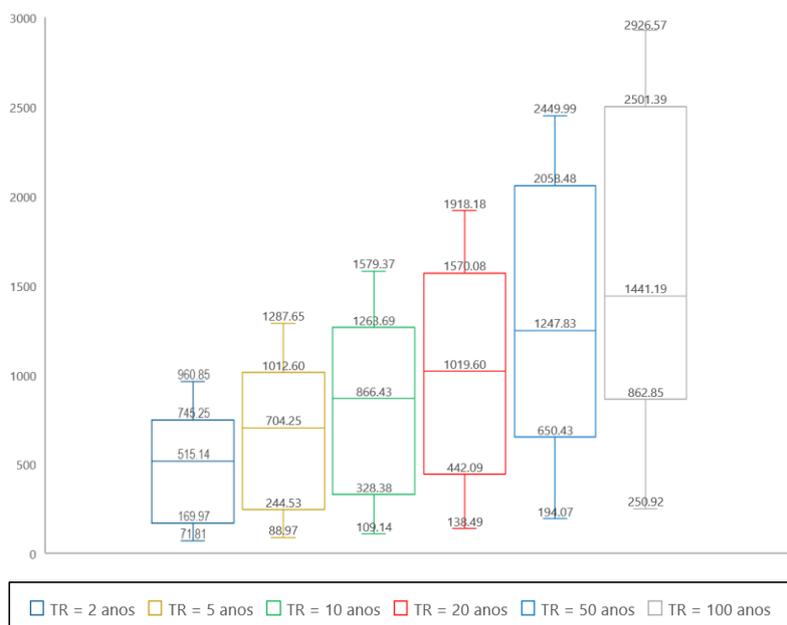


Figura 50 - Variação dos valores de vazão considerando o tempo de concentração obtido pela equação de George Ribeiro



Os gráficos reunidos pelas figuras 40, 49 e 51 permitem observar que o método de George Ribeiro produz valores mínimos e máximos de vazões de projeto superiores aqueles estimados pelos demais métodos utilizados para apropriação dos tempos de concentração. Um aspecto relevante é o aumento da faixa de variação que ocorre à medida que se aumenta o período de retorno. A Figura 41 permite observar que esse aumento é superior quando se opta pelo método de George Ribeiro.

As figuras 51, 52 e 53 apresentam as faixas de variação dos valores de vazão quando diferentes alternativas para descrição do relevo.

Figura 51 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de relevo provenientes do MDE de 90 metros de resolução

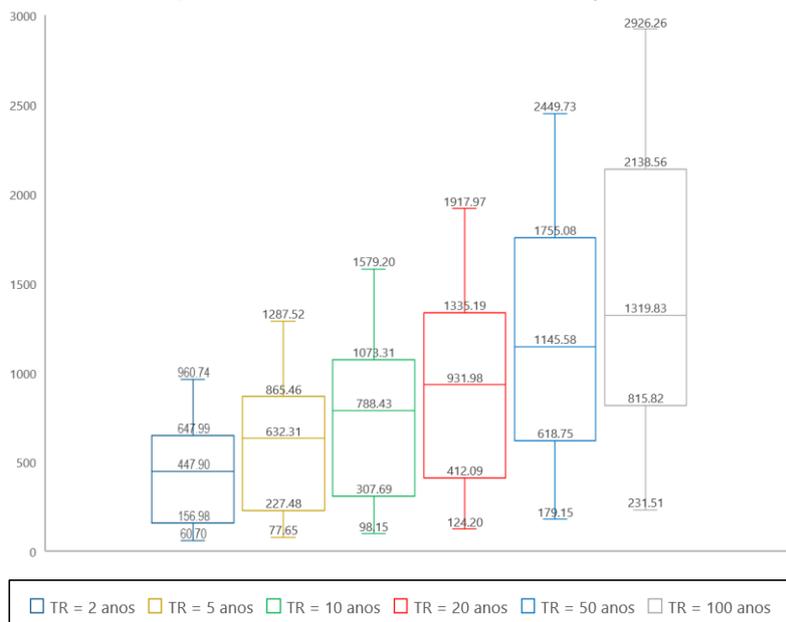


Figura 52 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de relevo provenientes do MDE de 30 metros de resolução

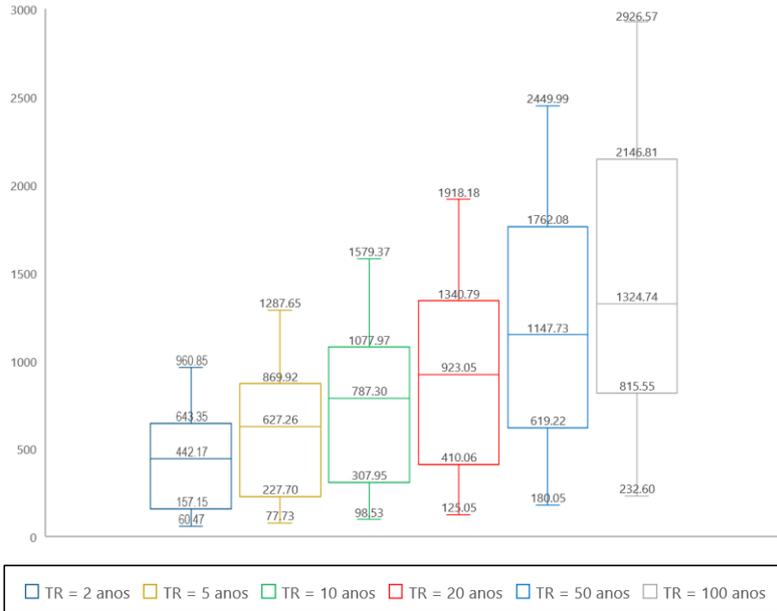
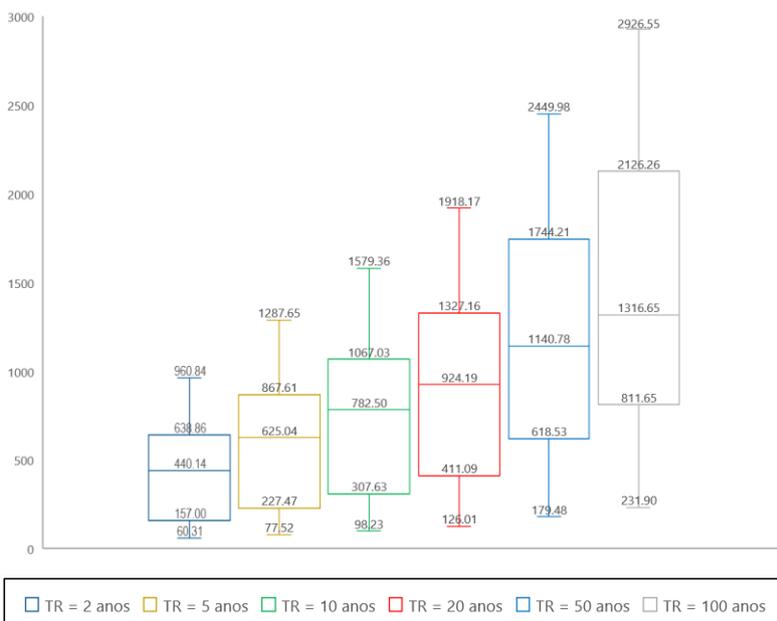


Figura 53 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de relevo provenientes do MDT obtido a partir de curvas de nível com equidistância de 20 metros



As três últimas figuras apresentam- variações-pouco significativas entre os valores da faixa de variação das vazões máximas estimadas, diferenças que não ultrapassam  $10^1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esse resultado indica que, quando da apropriação das vazões máximas das regiões hidrográficas da área de estudo, a escolha de um plano de informação de relevo não produziu variações tão significativas nas vazões máximas como aquelas decorrentes da variação dos outros planos de informação

As figuras 54 e 55 ilustram as variações dos valores de vazões máximas simulados considerando-se a fixação da escala do plano de informação de hidrografia utilizado para apropriar informações como o comprimento do talvegue e coordenadas de cabeceiras e exutório.

Figura 54 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de hidrografia na escala de 1:50.000

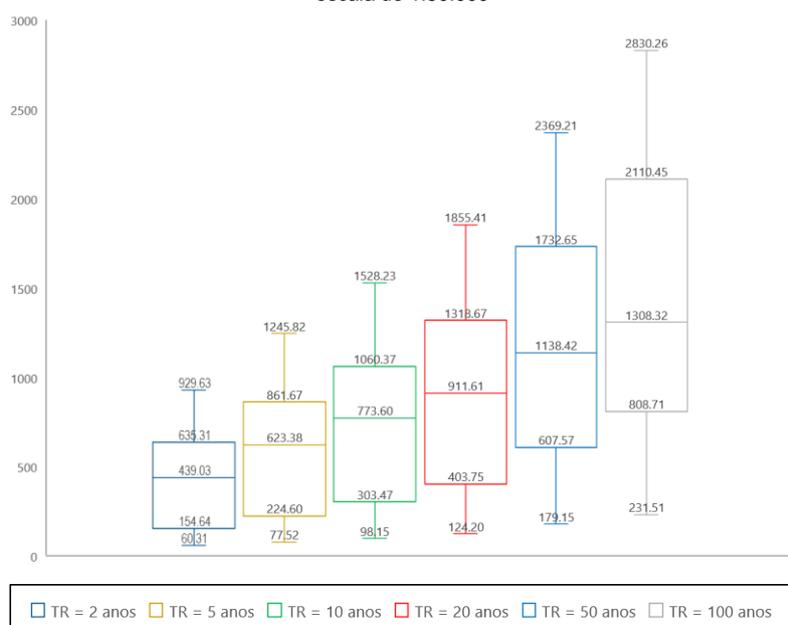
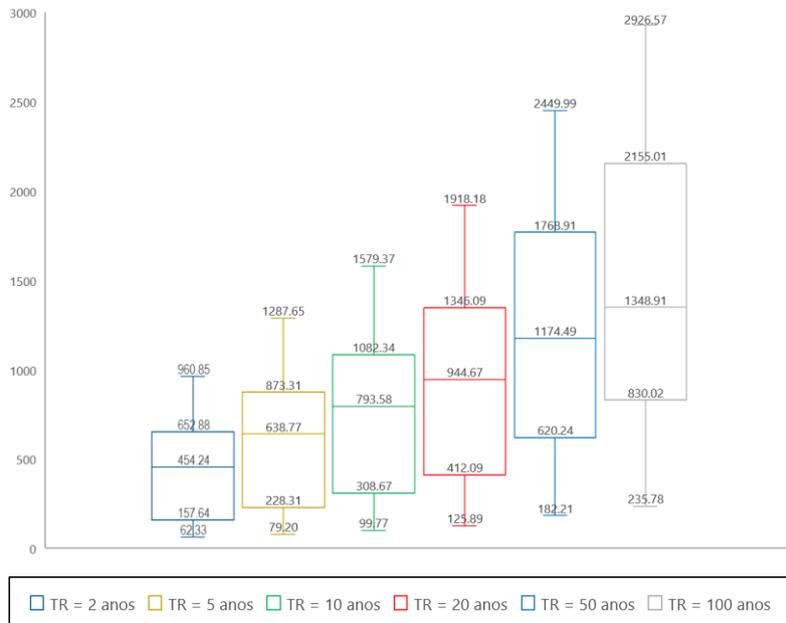


Figura 55 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de hidrografia na escala de 1:250.000



A partir da confrontação das faixas de variação representadas pelos gráficos reunidos nas duas últimas figuras, é possível observar que a escala utilizada para descrever a hidrografia da área de estudo não produziu variações significativas para a distribuição dos valores de vazões de projeto.

Figura 56 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de tipo de solo da Embrapa (1:400.000)

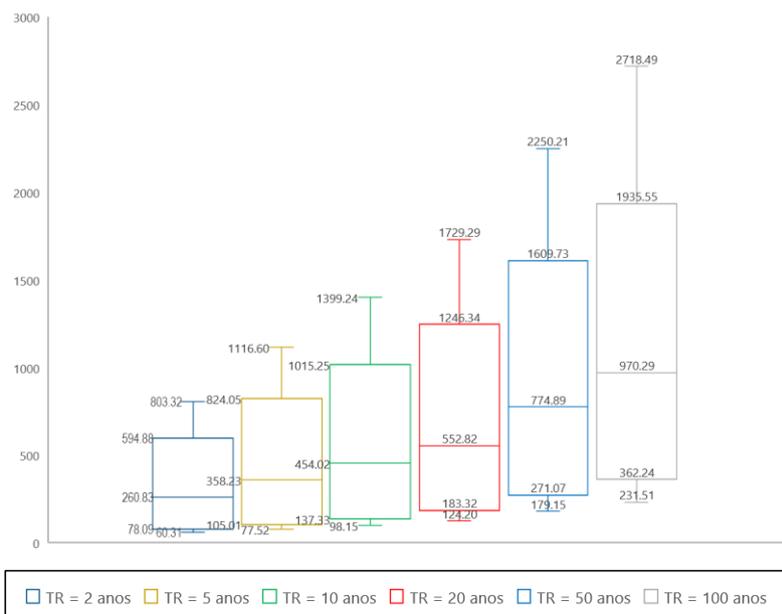
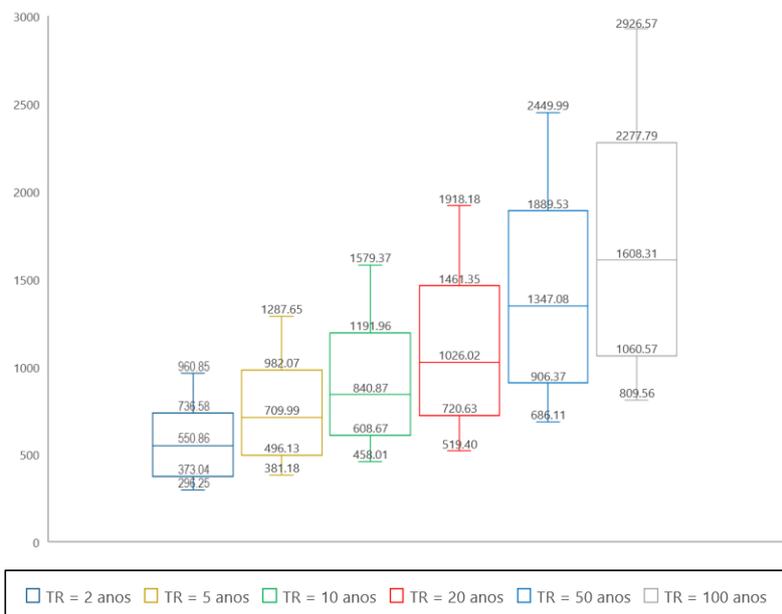


Figura 57 - Variação dos valores de vazão máxima no exutório considerando dados de tipo de solo do GEObases (1:250.000)



Em relação à variação dos cenários produzidas em relação ao tipo de solo (Figuras 56 e 57), a dispersão dos resultados se mostrou significativa quando da utilização dos dois planos de informações selecionados (GEOBASES e EMBRAPA).

Contudo, observou-se que o uso do plano de informação da EMBRAPA conduz a valores de perdas por infiltração superiores aos apresentados quando se opta pelo uso do GEOBASES, produzindo vazões de pico inferiores.

No Apêndice D estão apresentados os erros percentuais relativos a comparação entre os cenários simulados e o cenário referencial para o exutório da área de estudo. Conforme indicado na seção 5.4 (Análise dos resultados), o cenário referencial foi composto por hidrografia na escala 1:50.000 (GEOBASES), tipo de solo na escala 1:250.000 (GEOBASES), relevo composto pelo MDT gerado a partir de curvas de nível na escala 1:50.000 (GEOBASES), intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel e tempo de concentração apropriado a partir da expressão proposta por George Ribeiro. A partir da análise dos referidos percentuais foi possível observar que os máximos desvios percentuais em relação ao cenário referencial variaram entre 175% e 565% para períodos de retorno compreendidos entre 2 e 100 anos, respectivamente.

## 7. CONCLUSÕES

---

A realização do presente estudo permitiu identificar os métodos de apropriação de tempos de concentração aplicáveis às regiões hidrográficas que compõem a área de estudo, considerando as suas características de ocupação do solo, área, comprimento e declividade do talvegue principal. Dentre os métodos identificados, o método de George Ribeiro, Tulsa District e do US Corps of Engineers, foram considerados mais adequados às referidas características, na ordem em foram mencionados.

Os tempos de concentração obtidos apresentaram valores que variaram em, no máximo, 52%, considerando-se as variáveis apropriadas a partir de diferentes planos de informação. Também foi possível concluir que existe equivalência entre as equações do Tulsa District e US Corps of Engineers para as regiões hidrográficas de estudo, e que a variação das fontes de informação referentes ao relevo e hidrográfica não produziu efeito significativo na apropriação dos tempos de concentração.

O estudo também permitiu a apropriação de hidrogramas a partir dos quais foram apropriadas as vazões máximas para as regiões hidrográfica e exutório da área de estudo, considerando a combinação de diferentes métodos de modelagem de processos hidrológico e dados fisiográficos provenientes diferentes bases de dados e escalas/resoluções.

A distribuição dos valores de vazão máxima produzidos permitiu observar que, nas regiões hidrográficas da área de estudo, a menor variação entre os valores de vazão máxima – 85,04 m<sup>3</sup>/s – ocorreu na região SB8, para o período de retorno de 2 anos. Os desvios foram substancialmente elevados com aumento do período de retorno.

A seleção do método de apropriação das chuvas intensas constituiu decisão que apresentou maior influência na dispersão dos valores de vazões máximas estimadas. O emprego de equação de chuvas intensas definida a partir do método de Chow-Gumbel proporcionou a menor dispersão nos valores de vazões máximas estimados com auxílio do HEC-HMS.

A seleção dos planos de informações referentes ao tipo de solo, hidrografia e relevo exerceram menor influência na dispersão dos valores de vazões máximas estimadas com auxílio do modelo HEC-HMS que aquela exercida pelo método de determinação de intensidade pluviométrica. Contudo, observou-se que dentre os referidos planos de informação, o tipo de solo é o que conduz às maiores diferenças entre as vazões máximas estimadas, função da sua relação direta com o processo de apropriação de perdas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALILA, Y. Regional rainfall depth duration frequency equations for Canada. *Water Resources Research*, v. 36, n. 7, p. 1767-1778, 2000.

ALMEIDA, K. N.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. . Avaliação do desempenho dos métodos expeditos de determinação de equações de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 35, p. 63-77, 2015.

CÂMARA, G. et al. Análise Espacial e Geoprocessamento. In: DRUCK, S. et al. (Ed.). *Análise especial de dados geográficos*, Planaltina/DF:Embrapa, 2004.

CAMPOS, A.R.; SANTOS,G.G.; SILVA, S.B.C.; FILHO, J. I.; LOURA. D. S. Equações de intensidade-duração-frequência de chuva para o estado do Piauí. *Revista Ciência e Agronomia*, v. 45, n.3, p. 488-498, 2014.

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

CETESB. *Drenagem Urbana: Manual de Projeto*. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 1979

CETESB. *Drenagem Urbana – Manual de Projeto*. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986.

CHEN, C. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 109, n. 12, p. 1603-1621, 1983.

CHEN, F.; XIE, J.; CHEN, X. Effects of spatial scale on distributed flood simulation based on HEC-HMS model: a case of Jinjian watershed. IEEE Geoinformatics, 2011 19th International Conference on, Fijian/China, IEEE, 2011.

DHAMI, B. S.; PANDEY, A. Comparative review of recently developed hydrologic models. Journal of Indian Resources Society, Índia, v. 33, n. 3, p.34-42, abr. 2013.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre/RS, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan./mar. 2014

FARIAS JUNIOR, J. E. F. ; BOTELHO, R. G. M. . Análise comparativa do tempo de concentração: estudo de caso rio Cônego, município de Nova Friburgo/RJ. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 2011, Maceió. Anais do XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 2011.

FECHINE SOBRINHO,V.;RODRIGUES, J.O.;MENDONÇA,L. A.R. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração e Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, n.7, p.727-734, 2014

FERRAZ, F. F. B.; MILDE, L. C. E.; MORATTI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informações geográficas: um estudo de caso. Revista de Ciência & Tecnologia, Piracicaba /SP, v. 7, n. 14, p. 45-56, nov. 1999.

FERRAZ, F. F. B.; MILDE, L. C. E.; MORATTI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informações geográficas: um estudo de caso. Revista de Ciência & Tecnologia, Piracicaba /SP, v. 7, n. 14, p. 45-56, nov. 1999.

FITZ, P. R. Geoprocessamento sem complicação. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GENOVEZ, A. M. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2001

GRECCO, L. B.; MANDELLI, M. S.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Influência da Seleção de Variáveis Hidrológicas no Projeto de Sistemas Urbanos de Macrodrenagem - Estudos de Caso para o Município de Vitória/ES. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 4, p. 197-206, 2012.

HAAN, C. T. Parametric Uncertainty in Hydrologic Modeling. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), St. Joseph/MI, v.32, n.1, p.137-145, jan. 1989.

HALWATURA, D. ; NAJIM, M. M. M. Aplicação de HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. Environmental Modelling & Software, v.46, p.155-162, 2013.

LEVINE, D.M.; STEPHAN, D. ; KREHBIEL, T.C.; BERENSON, M.L. Estatística – Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2005.

LONGLEY, P. A. et al. Geographic Information Systems and Science.3.ed. Nova York: John Wiley and Sons, 2011.

LONGLEY, P. A. et al. Geographic Information Systems and Science.3.ed. Nova York: John Wiley and Sons, 2011.

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H.;MARQUES, A.; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas:integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. Rev. Esc. Minas 60 (3), pp. 525-536,2007.

MC CUEN, R. H., WONG, S. L., RAWLS, W. J. Estimating urban time of concentration. *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (7), pp 887-904, 1984

MELO, H. A. et al. Modelos Hidrológicos e Sistema de Informação Geográfica (SIG): Integração possível. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

MICELI, B. S. et al. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.63, n.01, p.191-201, 2011.

OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; BARBOSA, F. O. A.; ROMÃO, P. A.; CARVALHO D. F. Estimativa das equações de chuvas intensas para algumas localidades no Estado de Goiás pelo método da desagregação de chuvas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 30, n.1, p. 23-27, 2000.

PORTO, R. et al., Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2014.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. *Escoamento superficial*. Viçosa: Editora UFV, 2004.

SANTOS, G.G.; FIGUEIREDO, C.C.; OLIVEIRA, L.F.C.; GRIEBELER, N.P. Intensidade-duração-frequência de chuvas para o Estado de Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.899-905, 2009.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A.M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solo brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos - parte 2: aplicação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n. 4, p.19-29, 2005

SILVA, D.D.; FILHO, R.R.G.; PRUSKI, F.F.; PEREIRA, S.B.; NOVAES, L.F. Chuvas intensas no estado da Bahia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, p.362-367, 2002.

SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, S. Modelling of event and continuous flow hydrographs with HEC-HMS: case study in Kelani River Basin, Sri Lanka. Journal of Hydrologic Engineering, v.19, n. 4, p. 800-806, abr. 2014.

SILVEIRA, A.L.L. Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n.1, p.5-23, 2005.

SINGH, V. P.; ZHANG, L. IDF curves using the Frank Archimedean copula. Journal of Hydrologic Engineering, v. 12, n. 6, p. 651-662, 2007.

TAHMASBINEJAD, H. et al. Rainfall-runoff simulation and modeling of Karun river using HEC-RAS e HEC-HMS models, Izeh District, Iran. Journal of Applied Sciences, v. 12, n. 18, p.1900-1908, 2012.

TUCCI, C. E. A. M. Modelos hidrológicos. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. A. M.(Org.) Hidrologia: ciência e aplicação.4.ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009.

TUCCI, Carlos E.M. Regionalização de vazões. 1.ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. Davis/CA, 2000.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. Davis/CA, 2013

Villela, S. M.; Mattos, A. Hidrologia Aplicada, São Paulo:Editora Mc Graw Hill, 1975

YEN, B. C.; CHOW, V. T. Design Hyetographs for small Drainage structures. Journal of the Hydraulics Division, v. 106, n. 6, p.1055-1076, 1980.

YU, Z. et al. Spatial and temporal scale effect in simulating hydrologic process in a watershed. Journal of Hydrologic Engineering, v.19, n.1, p. 99-107, jan. 2014.

ZHANG, H.L. et al. The effect of watershed scale on HEC-HMS calibrated parameters: a case study in the Clear Creek watershed in Iowa, US. Hydrology and Earth System Sciences, v.17, p. 2735-2745, jul. 2013.

## ANEXO A – TABELAS DE VALORES DE CN

**SCS TR-55 Table 2-2a – Runoff curve numbers for urban areas<sup>1</sup>**

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area <sup>2</sup>	A	B	C	D
<i>Fully developed urban areas</i>					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) <sup>3</sup> :					
Poor condition (grass cover < 50%) . . . . .		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%) . . . . .		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%) . . . . .		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way) . . . . .		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way) . . . . .		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way) . . . . .		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way) . . . . .		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way) . . . . .		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only) <sup>4</sup> . . . . .		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders) . . . . .		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business . . . . .	85	89	92	94	95
Industrial . . . . .	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size					
1/8 acre or less (town houses) . . . . .	65	77	85	90	92
1/4 acre . . . . .	38	61	75	83	87
1/3 acre . . . . .	30	57	72	81	86
1/2 acre . . . . .	25	54	70	80	85
1 acre . . . . .	20	51	68	79	84
2 acre . . . . .	12	46	65	77	82
<i>Developing urban areas</i>					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation) <sup>5</sup> . . . . .		77	86	91	94
Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in table 2-2c)					

<sup>1</sup> Average runoff condition, and  $I_a = 0.2S$ .

<sup>2</sup> The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition. CN's for other combinations of conditions may be computed using figure 2-3 or 2-4.

<sup>3</sup> CN's shown are equivalent to those of pasture. Composite CN's may be computed for other combinations of open space cover type.

<sup>4</sup> Composite CN's for natural desert landscaping should be computed using figures 2-3 or 2-4 based on the impervious area percentage (CN = 98) and the pervious area CN. The pervious area CN's are assumed equivalent to desert shrub in poor hydrologic condition.

<sup>5</sup> Composite CN's to use for the design of temporary measures during grading and construction should be computed using figure 2-3 or 2-4, based on the degree of development (imperviousness area percentage) and the CN's for the newly graded pervious areas.

SCS TR-55 Table 2-2b – Runoff curve numbers for cultivated agricultural lands<sup>1</sup>

Cover description			Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Treatment <sup>2</sup>	Hydrologic condition <sup>3</sup>	A	B	C	D
Fallow	Bare soil	–	77	86	91	94
	Crop residue cover (CR)	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row crops	Straight row (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & terraced (C & T)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
C & T + CR	Poor	65	73	79	81	
	Good	61	70	77	80	
Small grain	SR	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	SR + CR	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	C	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	C + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	C & T	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
C & T + CR	Poor	60	71	78	81	
	Good	58	69	77	80	
Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow	SR	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	C	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
	C & T	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80

<sup>1</sup> Average runoff condition, and  $la = 0.2S$ .

<sup>2</sup> Crop residue cover applies only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year.

<sup>3</sup> Hydrologic condition is based on combination of factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of year-round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes in rotations, (d) percent of residue cover on the land surface (good  $\geq 20\%$ ), and (e) degree of surface roughness.

Good: Factors impair infiltration and tend to increase runoff.

Poor: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.

SCS TR-55 Table 2-2c – Runoff curve numbers for other agricultural lands<sup>1</sup>

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type and hydrologic condition	Hydrologic condition	A	B	C	D
Pasture, grassland, or range – continuous forage for grazing. <sup>2</sup>	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow – continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay.	–	30	58	71	78
Brush – brush-weed mixture with brush the major element. <sup>3</sup>	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30 <sup>4</sup>	48	65	73
Woods – grass combination (orchard or tree farm). <sup>5</sup>	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods. <sup>6</sup>	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30 <sup>4</sup>	55	70	77
Farmsteads – buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	–	59	74	82	86

<sup>1</sup> Average runoff condition, and  $I_a = 0.25$ .

<sup>2</sup> *Poor*: <50% ground cover or heavily grazed with no mulch.

*Fair*: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.

*Good*: >75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

<sup>3</sup> *Poor*: <50% ground cover.

*Fair*: 50 to 75% ground cover.

*Good*: >75% ground cover.

<sup>4</sup> Actual curve number is less than 30; use  $CN=30$  for runoff computations.

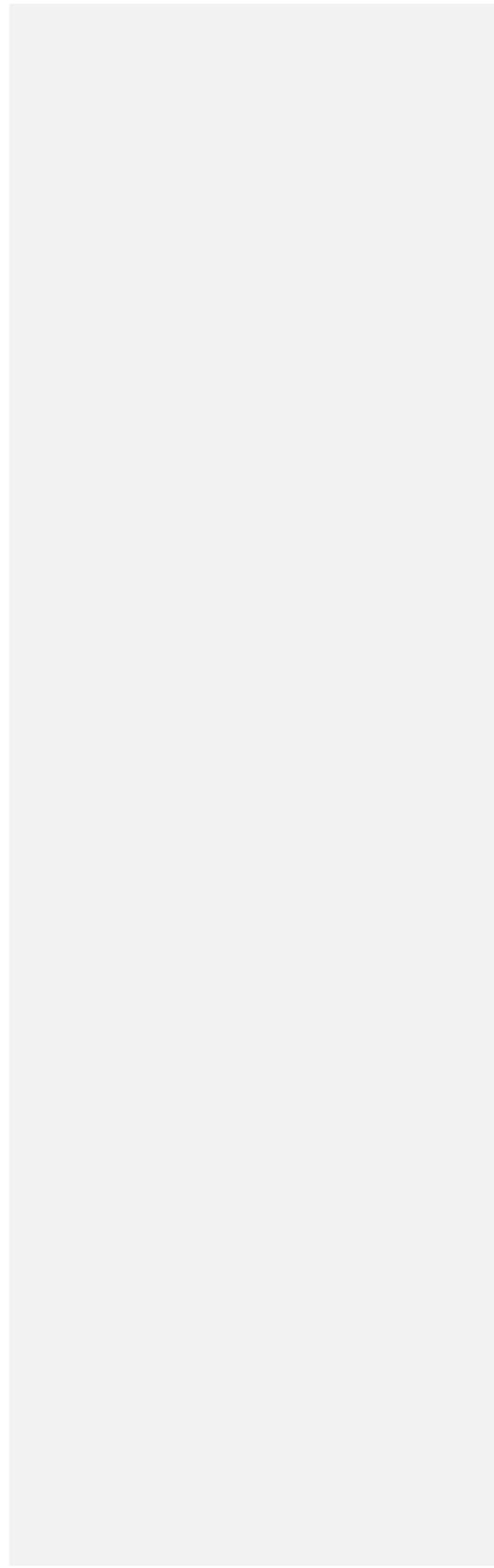
<sup>5</sup> CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be computed from the CN's for woods and pasture.

<sup>6</sup> *Poor*: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning.

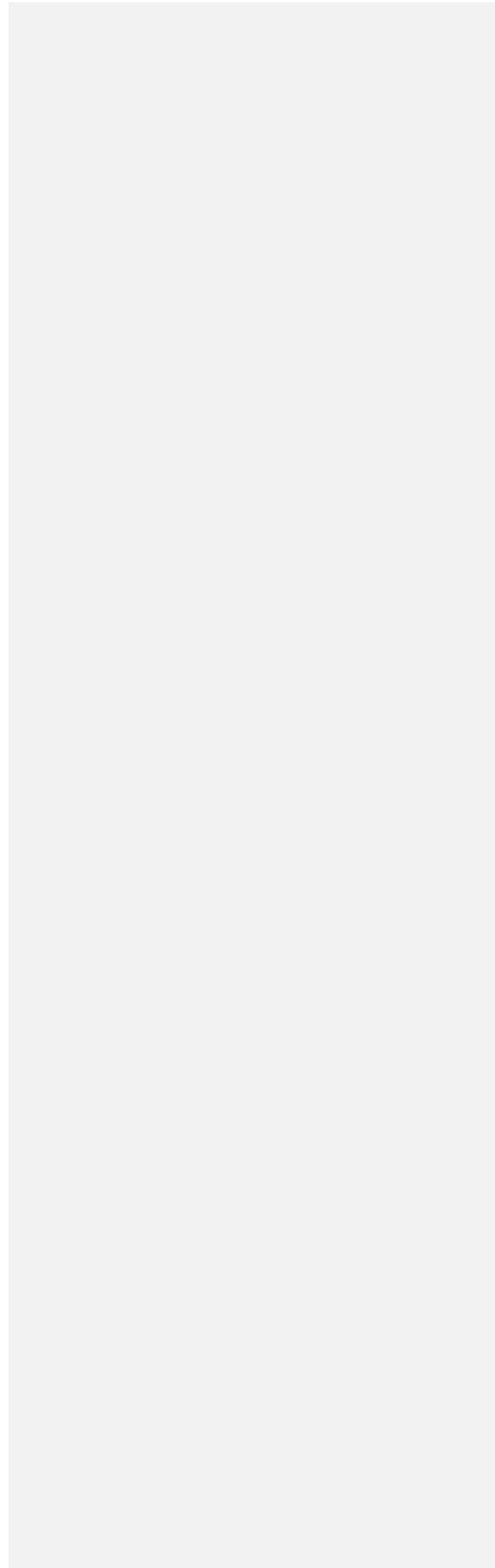
*Fair*: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil.

*Good*: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

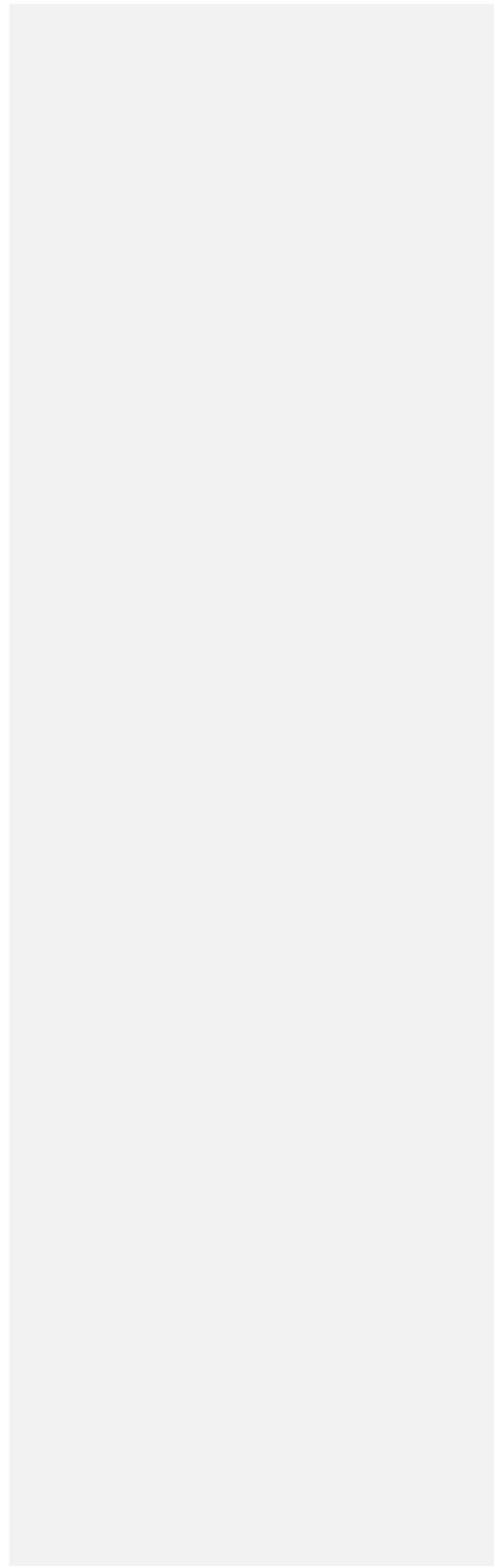
**APÊNDICE A – TABELA DE CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO  
CONSIDERADOS**



**APÊNDICE B – PLANILHA DIGITAL HIETOGRAMAS**



**APÊNDICE C – TABELA DE VAZÕES MÁXIMAS ESTIMADAS**



**APÊNDICE D – TABELA DE ERROS PERCENTUAIS RELATIVOS AO  
CENÁRIO REFERENCIAL**