UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

COLEGIADO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

SARA APARECIDA FRANCISCO

ESTIMATIVA DE VAZÕES MÁXIMAS NO RIO BENEVENTE (ES) COM AUXÍLIO DE MODELO CHUVA-VAZÃO

VITÓRIA

2013

SARA APARECIDA FRANCISCO

ESTIMATIVA DE VAZÕES MÁXIMAS NO RIO BENEVENTE (ES) COM AUXÍLIO DE MODELO CHUVA-VAZÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis

VITÓRIA

2013

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de agradecer primeiramente a Deus, por ter iluminado meus passos e me dado muita força e perseverança nesta etapa da minha vida. Agradeço também a meus pais, Lucia e Vantuil, e ao meu irmão Ivan, pela compreensão nos momentos de stress, pela dedicação, pelo amor dado a mim e por todas as coisas que eles fizeram e têm feito para que essa fase seja a mais tranquila e menos conturbada possível e também a toda minha família que, de perto ou de longe, oraram por mim e me deram muita força para que eu me torne uma profissional de caráter e de competência.

Obrigada aos meus amigos pela força, companheirismo e ajuda nas horas em que precisei, tanto em apoio emocional, quanto em compartilhamento de conhecimento acadêmico, em especial à Joseline, que me deu completo apoio na realização da etapa de geoprocessamento dos dados e na confecção dos mapas. Não posso deixar de agradecer também ao meu namorado Caio que, mesmo na correria do final de curso e no dia-a-dia, me deu e tem me dado muito apoio, sendo um companheiro e tanto!

Por fim, deixo minha eterna gratidão ao meu Orientador, José Antônio, pelo conhecimento compartilhado, pelo incentivo acadêmico e pela exemplar influência acadêmica e profissional que tem sido, não só para mim, mas também para todos os seus alunos.

“A maior dádiva para o estudante é o saber adquirido, nenhum outro dom faria valer a pena tanto esforço e dedicação.”

Jéni Quintal

RESUMO

As enchentes são caracterizadas por fenômenos em que são verificados valores extremos de vazão ou nível, associados a inundações das planícies ou de áreas adjacentes ao canal principal dos cursos de água. Chuvas intensas podem ocasionar esses grandes picos de escoamento, principalmente em áreas mais ocupadas, cujos sistemas de drenagem têm menor eficiência, em função da redução da infiltração da água no solo. Neste contexto, os modelos chuva-vazão podem constituir importantes ferramentas de apoio às atividades de gerenciamento dos recursos hídricos. O presente trabalho teve por objetivo estimar, com auxílio do Método estabelecido pelo *Soil Conservation Service (*SCS), vazões máximas para uma região hidrográfica do rio Benevente, importante curso d'água da porção centro-sul do estado do Espírito Santo. As informações pluviométricas foram obtidas da estação Matilde (DNOS), mantida pela Agência Nacional das Águas, e as características fisiográfricas de por meio de *shapefiles* fornecidos pelo GEOBASES e pela EMBRAPA. Para a determinação das equações de chuvas intensas, foram empregados os métodos de Bell, de Chow-Gumbel e o *Software* Pluvio. A apropriação dos tempos de concentração envolveu a aplicação dos métodos de Dooge, Johnstone e Bransby-Williams. Os resultados indicaram que, ainda que o Método SCS constitua alternativa versátil para estimativa de vazões máximas, a combinação de diferentes padrões de uso e ocupação do solo, tempos de concentração e intensidades pluviométricas podem produzir valores de vazão que divergem substancialmente entre si e que são substancialmente maiores quando da determinação por métodos probabilísticos.

Palavras-chave: Vazões Máximas, Método SCS, rio Benevente.

ABSTRACT

Floods are characterized by phenomena that occurs extremes flows or levels, associated with flood areas or areas adjacent to the main channel of watercourses. Heavy rains can cause these large runoff peaks, especially in urban areas whose drainage systems have lower efficiency, due to the reduction of water infiltration into the soil. In this context, the rainfall-runoff models can be important tools to support the activities of water resources management. This study aimed to estimate, using the method established by the Soil Conservation Service (SCS), peak flows for the Benevente basin, major watercourse of the south-central portion of the state of Espírito Santo. The precipitation data were obtained from the station Matilde (DNOS), maintained by the National Water Agency, and the physiographic characteristics through shapefiles provided by GEOBASES and EMBRAPA. To determine the equations of intense rains, we employed the methods of Bell, Chow-Gumbel and Software Pluvio. The appropriation of times of concentration involved the application of methods Dooge, Johnstone and Bransby-Williams. The results indicated that, although the SCS method constitutes useful and versatile alternative to estimate peak flows, the combination of different patterns of use and occupation, time of concentration and rainfall intensities can produce flow values that differ substantially from each other and which are substantially higher when determined by the probabilistic methods.

Key words: Runoff, SCS, Benevente basin.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores do coeficiente de escoamento (C) em função do período de retorno e do tipo de superfície. 27
Tabela 2: Média aritmética e desvio-padrão da variável reduzida y. 40
Tabela 3: Relações entre as alturas pluviométricas, proposta por CETESB (1986). 40
Tabela 4: Relação entre as alturas pluviométricas de 24h e de 1 dia de duração, proposta por CETESB (1986). 41
Tabela 5: Enquadramento das atuais classes gerais de solo, para cada grupo hidrológico do solo, conforme Tucci (2004). 45
Tabela 6: Valores da taxa de infiltração mínima usadas na identificação do grupo hidrológico do solo. 46
Tabela 7: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas. 47
Tabela 8: Valores de CN para bacias rurais. 48
Tabela 9: Intensidades de chuva (mm/min) estimadas pelo *Software* Plúvio. 53
Tabela 10: Intensidades de chuva (mm/min) estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 54
Tabela 11: Intensidades de chuva (mm/min) estimadas pelo método de Bell. 54
Tabela 12: Tempos de concentração estimados para a região de estudo. 57
Tabela 13: Registros fisiográficos da região de estudo para a estimativa do valor de CN. 57
Tabela 14: Características fisiográficas consideradas para os cálculos dos tempos de concentração das sub-bacias em estudo. 61
Tabela 15: Tempos de concentração estimados para as diferentes sub-bacias da área de estudo. 62
Tabela 16: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 3. 63
Tabela 17: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 2 anos. 67
Tabela 18: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 5 anos. 68
Tabela 19: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 10 anos. 68
Tabela 20: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 25 anos. 68
Tabela 21: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 50 anos. 69

Tabela 22: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 100 anos. 69
Tabela 23: Precipitações máximas anais registradas na estação Matilde (DNOS). 80
Tabela 24: Vazões máximas anais registradas na estação Matilde. 81
Tabela 25: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 1..... 84
Tabela 26: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 2..... 84
Tabela 27: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 4..... 85
Tabela 28: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 5..... 85
Tabela 29: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 6..... 85
Tabela 30: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 7..... 86
Tabela 31: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 8..... 86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Porção da bacia hidrográfica do rio Benevente considerada no presente estudo. 32
Figura 2: Rede de drenagem da região estudada. 34
Figura 3: Mapa de tipos de solo da região estudada. 35
Figura 4: Mapa de uso e ocupação do solo da região estudada. 36
Figura 5: Mapa de declividades da região estudada. 37
Figura 6: Interface do Programa Computacional Pluvio 1.2. 42
Figura 7: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 2 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS). 55
Figura 8: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 50 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS). 55
Figura 9: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 100 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS). 56
Figura 10: Vazões Máximas associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração - Intensidades pluviométricas estimadas a partir do método de Chow-Gumbel. 58
Figura 11: Vazões Máximas associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração - Intensidades pluviométricas estimadas a partir do método de Bell. 58
Figura 12: Vazões Máximas associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração - Intensidades pluviométricas estimadas a partir do *software* Pluvio. 59
Figura 13: Mapa hidrológico das sub-bacias estudadas. 60
Figura 14: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 3, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 64
Figura 15: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 3, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 64
Figura 16: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 3, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 65
Figura 17: Vazões máximas associadas a diferentes períodos de retorno, considerando tempo de concentração apropriado pela expressão proposta por Dooge e intensidade pluviométrica estimada pelo método de Chow-Gumbel. 66

Figura 20: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Chow-Gumbel e da adoção de tempo de concentração apropriado por Dooge. 70
Figura 21: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Bell e da adoção de tempo de concentração apropriado por Dooge. 70
Figura 22: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada pelo *Software* Pluvio e da adoção de tempo de concentração apropriado por Dooge. 71
Figura 23: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 5 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS). 82
Figura 24: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 10 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS). 82
Figura 25: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 25 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS). 83
Figura 26: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 1, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 87
Figura 27: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 1, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 87
Figura 28: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 1, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 88
Figura 29: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 2, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 88
Figura 30: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 2, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 89
Figura 31: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 2, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 89
Figura 32: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 4, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 90

Figura 33: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 4, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 90
Figura 34: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 4, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 91
Figura 35: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 5, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 91
Figura 36: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 5, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 92
Figura 37: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 5, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 92
Figura 38: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 6, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 93
Figura 39: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 6, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 93
Figura 40: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 6, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 94
Figura 41: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 7, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 94
Figura 42: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 7, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 95
Figura 43: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 7, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 95
Figura 44: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 8, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel. 96

Figura 45: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 8, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell. 96
Figura 46: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 8, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio. 97
Figura 53: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Chow-Gumbel e da adoção de tempo de concentração apropriado por Johnstone. 98
Figura 54: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Bell e da adoção de tempo de concentração apropriado por Johnstone. 98
Figura 55: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada pelo *Software* Pluvio e da adoção de tempo de concentração apropriado por Johnstone. 99
Figura 56: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Chow-Gumbel e da adoção de tempo de concentração apropriado por Bransby-Williams. 99
Figura 57: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Bell e da adoção de tempo de concentração apropriado por Bransby-Williams. 100
Figura 58: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada pelo *Software* Pluvio e da adoção de tempo de concentração apropriado por Bransby-Williams. 100

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
2 OBJETIVOS 20
2.1 Objetivo geral 20
2.2 Objetivos específicos 20
3 REVISÃO DA LITERATURA 21
3.1 Inundações: aspectos gerais 21
3.2 Chuvas intensas 22
3.3 Escoamento superficial a partir de dados de chuva 25
3.3.1 Método Racional 26
3.3.2 Método do hidrograma unitário proposto pelo soil conservation service 28
3.4 Métodos probabilísticos 29
4 ÁREA DE ESTUDO 31
5 METODOLOGIA 33
5.1 Características hidrológicas 33
5.2 Características fisiográficas 33
5.3 Divisão das sub-bacias 37
5.4 Equações de chuvas intensas 38
5.4.1 Método de Chow-Gumbel 38
5.4.2 Método de Bell 41
5.4.3 Programa computacional Pluvio 42
5.5 Tempos de concentração 43
5.6 Método SCS 43
5.7 Vazões máximas estimadas pelos métodos probabilísticos 51
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 53
7 CONCLUSÕES 73

8 REFERÊNCIAS 75

APÊNDICE A – REGISTROS HIDROLÓGICOS 80

APÊNDICE B – INTENSIDADES PLUVIOMÉTRICAS 82

APÊNDICE C - TIPO DE SOLO, USOS E OCUPAÇÃO DO SOLO E VALOR DE CN PARA AS SUB-BACIAS 84

APÊNDICE D – VAZÕES MÁXIMAS DAS SUB-BACIAS 87

APÊNDICE E – COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO SCS E AS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE 98

1 INTRODUÇÃO

Chuvas intensas podem ocasionar grandes picos de escoamento (enchentes ou cheias), principalmente em áreas mais ocupadas, cujos sistemas de drenagem têm menor eficiência em função da redução da infiltração da água no solo (LUCAS *et al.*, 2009). Outros fatores como a inclinação do terreno, a cobertura vegetal e o uso do solo também são determinantes nas condições de infiltração da água no solo de uma bacia e, por consequência, na amplitude dos picos de vazão.

Os picos de vazão, por sua vez, podem ser responsáveis por impactos negativos numa região hidrográfica, tais como assoreamento dos rios, aumento da produção de sedimentos, degradação da qualidade da água drenada devido ao transporte de poluentes agregados ao sedimento, danos ao desenvolvimento e ao patrimônio público e privado e, principalmente, perdas de vidas humanas (GENOVEZ, 2003; SANTOS 2010; TUCCI *et al*., 1995).

A variabilidade espacial e temporal com que os fenômenos de cheia acontecem leva, frequentemente, ao uso de modelos matemáticos para a sua representação. A partir dos resultados oferecidos pelos modelos, é possível um melhor entendimento do que acontece na bacia por ocasião dos picos de escoamento e, desta forma, a interpretação dos resultados pode ser útil no estabelecimento de diretrizes de qualquer plano de intervenção, servindo como instrumento para o planejamento urbano e regional da bacia hidrográfica (LOU, 2010).

Em um projeto de sistema de drenagem ou de controle de cheias, os modelos hidrológicos são utilizados, geralmente, para se definir uma vazão máxima de projeto, informação necessária para o cálculo de seções hidráulicas ou de hidrogramas afluentes a uma estrutura de reservação (CANHOLI, 2005). De acordo com Tucci *et al*. (2004), para o controle ou a atenuação das cheias, a estimativa de vazões máximas é indispensável quando da determinação de custos e da segurança de projetos de engenharia.

Na literatura, muitos métodos de estimativa de vazão máxima de projeto estão disponíveis. Dentre os mais antigos encontram-se aqueles propostos por Goodrich (1927), Gibrat (1932), Weibull (1939), Gutenberg e Richter (1944), Jenkison (1955), Gumbel (1958), Kottegoda e Rosso (1997).

De acordo com Scharffenberg e Fleming (2010), os hidrogramas produzidos pelo modelo chuva-vazão estabelecido pelo *Soil Convervation Service* (SCS) pode constituir uma ferramenta útil para previsão de picos de vazão, de impactos provocados pela urbanização de uma bacia, de modificações causadas por projetos de vertedouros de reservatórios, para avaliação da redução de danos associados à inundação e para a determinação da planície de inundação e de áreas de risco.

O presente trabalho objetiva estimar, com auxílio do modelo proposto pelo SCS, vazões máximas para a porção superior da Bacia Hidrográfica do rio Benevente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar, com auxílio do modelo chuva-vazão do *Soil Conservation Service* (SCS), vazões máximas para a porção superior da Bacia Hidrográfica do rio Benevente.

2.2 Objetivos específicos

Para a consecução do trabalho proposto foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar, a partir de revisão da literatura, as condições usuais de aplicação do modelo SCS;
- Estabelecer equações de chuvas intensas para a área de estudo;
- Estimar vazões máximas para a área de estudo a partir do emprego do modelo SCS considerando diferentes divisões da área de estudo;
- Comparar as vazões máximas estimadas pelo modelo do SCS com as vazões máximas estimadas a partir do ajuste de distribuições de probabilidade.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Inundações: aspectos gerais

Entende-se por bacia hidrográfica toda a área de captação natural da água da chuva que escoa superficialmente para um corpo de água ou seu contribuinte. Os limites da bacia hidrográfica são definidos pelo relevo, considerando-se como divisores de águas as áreas mais elevadas.

Atualmente se reconhece a adoção da bacia hidrográfica como unidade de gestão territorial e de recursos hídricos, uma vez que os processos hidrológicos, onde a geração de escoamentos se insere, ocorrem dentro dos limites de uma bacia hidrográfica. Sendo assim, o conhecimento dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica é de grande importância, e torna-se fator condicionante, por exemplo, da ocupação urbana ou rural de uma bacia. Processos como a erodibilidade dos solos, a ocorrência de enchentes, dentre outras características, podem influenciar vigorosamente as ações e as intervenções a serem praticadas pelo homem (LOU, 2010).

As enchentes, de acordo com Vianna (2000), são caracterizadas por fenômenos em que são verificados valores extremos de vazão ou nível, associados a inundações das planícies ou de áreas adjacentes ao canal principal dos cursos de água. As cheias ocorrem também quando o nível de água de lagos, diques, reservatórios ou estuários excede um valor crítico e inunda áreas vizinhas.

Em uma bacia hidrográfica rural o fluxo de água é retido pela vegetação, infiltrando-se no solo e a parcela excedente escoa sobre a superfície gradualmente, produzindo variações lentas de vazão e moderados picos de enchentes. Conhecendo-se o processo das enchentes naturais, é necessário planejar a ocupação do espaço urbano (TUCCI *et al*., 1995).

A urbanização desordenada pode agravar consideravelmente o problema das enchentes, uma vez que intensifica o desmatamento e aumenta as áreas impermeáveis. O desmatamento desordenado faz com a interceptação da água seja reduzida, fazendo-a cair diretamente no solo que, sem a cobertura vegetal,

intensifica o escoamento superficial e, por consequência, os picos de vazões. Os picos de vazão podem trazer impactos negativos, visto que provocam perdas econômicas, aumento da produção de sedimentos, degradação da qualidade da água drenada devido ao transporte de poluentes agregados ao sedimento, danos ao desenvolvimento e ao patrimônio público e privado e, principalmente, perdas de vidas humanas (GENOVEZ, 2003; SANTOS, 2010; TUCCI *et al*., 1995).

3.2 Chuvas intensas

Segundo Tucci *et al*. (1995), as chuvas intensas, ou precipitações máximas, são definidas como "aquelas chuvas cujas intensidades ultrapassam um determinado valor mínimo". As principais características desse tipo de chuva são o total precipitado, sua frequência de ocorrência e sua distribuição espacial e temporal que, a partir da sua interação com o tempo de resposta da bacia hidrográfica, vai determinar os valores de vazão máxima do hidrograma gerado por uma chuva.

Para se obter a distribuição temporal das precipitações máximas é de grande importância que se tenham registros de redes pluviográficas ou de radares meteorológicos, ou que se disponha de relações intensidade-duração-frequência (IDF) para a região de Interesse (TUCCI *et al*., 1995). Contudo, vale ressaltar que a metodologia para obtenção de registros exige um exaustivo trabalho de tabulação, análise e interpretação de uma grande quantidade de pluviogramas. Por esta razão, poucos trabalhos no Brasil têm sido desenvolvidos com esta finalidade (OLIVEIRA *et al*., 2008).

A representação da distribuição temporal de uma chuva intensa de projeto é dada pelos hietogramas. Segundo Tucci *et al.* (1995), dentre os métodos existentes na literatura para a distribuição temporal de uma chuva, encontram-se os métodos de Huff, de Pilgrim e Cordery, de Chicago, do SCS, dos Blocos Alternados e do Hietograma Triangular. Os dois últimos métodos relacionados, no entanto, são os de mais fácil utilização (TUCCI *et al*., 1995).

O método dos Blocos Alternados, segundo Tucci *et al*. (1995) determina a distribuição temporal utilizando-se de dados das relações IDF e propondo a distribuição de totais de chuva em intervalos e tempo contidos na duração total do

evento de precipitação. Assim, após a definição da duração total da chuva e de seu período de retorno, são calculadas, com base nas relações IDF, as intensidades médias para diversas durações até a duração total.

No método dos Blocos Alternados, as intensidades médias são transformadas em alturas de chuva e representam valores acumulados até o último intervalo de duração. Os incrementos entre um valor acumulado e outro são calculados e rearranjados, de forma que o maior valor se localize no centro da duração total da chuva, e os demais sejam dispostos em ordem decrescente, sempre um à direita e outro à esquerda do bloco central, alternadamente (BEMFICA *et al*., 2000).

Já o método do hietograma triangular foi proposto por Yen e Chow (1980) e baseia-se em uma análise estatística dos momentos que descrevem a geometria do hietograma. Os autores propuseram a utilização apenas do primeiro momento, que gera uma distribuição triangular da intensidade de chuva na qual a base do triângulo consiste na duração do evento de precipitação. A posição do pico do triângulo é dada por um coeficiente *r* determinado a partir da análise de eventos históricos reais (TUCCI *et al*., 1995; BEMFICA *et al*., 2000). A altura do Triângulo, por sua vez, é determinada com auxílio da expressão (01).

$$\mathrm{H} = \frac{2\mathrm{P}}{\mathrm{t_d}} \qquad (01)$$

Na expressão (01), H representa a altura do triângulo, P o total precipitado e t_d a duração da chuva.

De acordo com Bemfica *et al*. (2000), uma vez conhecidas a altura total precipitada e a duração do evento, o método do hietograma triangular se torna a forma mais simples de se caracterizar uma distribuição temporal.

Segundo Rigetto (1998), a intensidade, a duração e o período de retorno de uma chuva intensa são variáveis que se relacionam numa equação cuja forma geral é estabelecida pela expressão (02).

$$\mathrm{i} = \frac{\mathrm{KT^a}}{(\mathrm{t+b})^{\mathrm{c}}} \qquad (02)$$

Na expressão (02), *i* é a intensidade de precipitação máxima (mm/h),*T* é o período de retorno (anos), *t* é o tempo da duração da chuva (minutos) e *k*, *a*, *b* e *c* são parâmetros a serem determinados para cada região, estabelecidos usualmente com auxílio de análises de regressão.

O conhecimento da equação que relaciona intensidade, duração e frequência das precipitações, apresenta grande interesse de ordem técnica nos projetos de obras hidráulicas, como dimensionamento de vertedores, retificação de cursos d'água, galerias de águas pluviais, bueiros, sistemas de drenagem agrícola, urbana e rodoviária, dentre outros (MELLO *et al*., 2003).

Em contrapartida, segundo Oliveira *et al*. (2008), existe grande dificuldade para a obtenção das equações de chuvas intensas, decorrente de limitações referentes aos dados disponíveis, tanto em termos de densidade da rede pluviográfica, como em relação ao pequeno período de observações disponível. Em adição, para a determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas é necessário exaustivo trabalho de análise, interpretação e codificação de grande quantidade de dados (SANTOS, 2010).

A literatura apresenta alguns métodos para se estabelecer a equação de chuva intensa a partir de pluviômetros, dentre os quais se destacam o método de Chow-Gumbel e o método de Bell. O método de Chow-Gumbel faz uso da média aritmética e do desvio-padrão de uma série anual de precipitações máximas diárias, a partir dos quais busca ajustar a distribuição probabilística de Gumbel. O método de Bell, por sua vez, faz associação da altura pluviométrica de uma chuva intensa, para um determinado tempo de duração e período de retorno, à chuva intensa padrão, com duração de 60 minutos e dois anos de período de retorno.

Silva *et al*. (1999), empregaram o método de Chow-Gumbel para a determinação de equações de chuvas intensas para o Espírito Santo e Rio de Janeiro. Oliveira *et al*. (2000),utilizaram a distribuição de Gumbel para a determinação de equação de chuva intensa para diversas localidades de Goiás. Oliveira *et al*. (2008) aplicaram o método de Bell para a determinação de equação de chuva intensa para o Estado de Goiás. Rebouças e Reis (2008) estabeleceram equações de chuvas intensas para Bacia Hidrográfica do Rio Doce (ES) pelos métodos de Chow-Gumbel e de Bell. Segundo os autores, o método de Bell conduziu às equações que estimaram os

menores valores de intensidade pluviométrica para a área estudada. Adicionalmente, indicaram que o padrão espacial de distribuição das chuvas intensas foi similar quando consideradas as intensidades estimadas para ambos os métodos.

Outra alternativa também disponível para a determinação da equação de chuva intensa é o *Software* Pluvio*,* programa produzido e disponibilizado pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa. Atualmente, na versão 2.0, o programa já possui um banco de dados que permite a obtenção de equações para os Estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, São Paulo e Tocantins.

Fiorio *et al*. (2012) compararam as precipitações geradas por equações estabelecidas por MARTINEZ e MAGNI (1999) com aquelas obtidas com o programa Pluvio 2.1, considerando as primeiras como padrão. Foram comparadas chuvas intensas de 10, 20, 30, 60, 120 e 1440 minutos, e períodos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos, para 30 localidades do estado de São Paulo. Os resultados revelaram que, principalmente para as chuvas de 24 horas e período de retorno de 100 anos, ocorreram desvios importantes para quatro postos localizados na região central e a leste do estado. Para as demais localidades o programa Pluvio 2.1 apresentou bom desempenho.

Magalhães *et al*. (2010), por sua vez, estimaram empregaram o programa Pluvio 2.1 na apropriação de intensidades pluviométricas da micro-bacia do córrego Atalaia em Macaé (RJ) a fim de auxiliar na estimativa da vazão da referida micro-bacia.

3.3 Escoamento superficial a partir de dados de chuva

Nos estudos das enchentes há grande interesse em se conhecer o hidrograma de projeto associado a um período de retorno especificado. Desta forma, deseja-se determinar o hidrograma associado a uma chuva de projeto, hidrograma que pode ser estabelecido por meio de modelos chuva-vazão.

Existem diferentes alternativas de se obter dados de vazão a partir dos registros de chuva. Constituem exemplos dessa abordagem o método Racional e o método do Hidrograma Unitário proposto pelo SCS.

Apesar da incerteza da transformação dos dados de chuva em vazão, a indisponibilidade de dados fluviométricos em bacias hidrográficas de interesse faz com que se busquem métodos que permitam transformar os dados de chuva, geralmente disponíveis em maior quantidade, em dados de vazão. Algumas metodologias, por se apresentarem de simples aplicação, são largamente utilizadas para a realização de obras de drenagem, apesar de receberem críticas por parte de alguns hidrólogos devido à limitação da metodologia, muitas vezes produzindo erros relevantes quando não utilizadas de maneira adequada e criteriosa (LOU, 2010).

O método Racional e os métodos baseados no Hidrograma Unitário, alternativas mais usualmente empregadas para a apropriação de vazões máximas a partir de registros de chuva, serão sumariamente discutidos nas seções subsequentes.

3.3.1 MÉTODO RACIONAL

O método racional é um dos mais simples e mais utilizados para a transformação de chuva em vazão (LOU, 2010). De acordo com Tucci *et al*. (1995), esse método é largamente utilizado na determinação da vazão máxima de projeto para bacias de áreas menores que 2 km². Já Pinto *et al*. (1973) consideram o método Racional aplicável para bacias com áreas de 2 a 5 km² e tempo de concentração menor que 1 hora. Em contrapartida, Pinto *et al*. (1976) aplicaram o método Racional no projeto de bueiros de estrada para áreas de drenagem de até 25 km².

O princípio básico do método Racional é de que a duração da precipitação máxima é igual ao tempo de concentração da bacia em estudo. Para que esta condição seja válida, deve-se admitir que a bacia seja pequena, uma vez que a duração é inversamente proporcional à intensidade. Desta maneira, de acordo com Tucci (1995), o método Racional não avalia o volume da cheia e a distribuição temporal das vazões, não se adequando a bacias maiores, onde a incerteza associada à aplicação do modelo aumentaria consideravelmente.

A vazão máxima estimada pelo método racional é avaliada com auxílio da expressão (03):

$$\mathrm{Q} = 0{,}278 \times \mathrm{C} \times \mathrm{I} \times \mathrm{A} \qquad (03)$$

Na última expressão Q é obtido em m³/s, I é a intensidade em mm/h, A é a área da bacia em km² e C é o coeficiente de escoamento, determinado com base nas características da bacia, uma vez que nela geralmente ocorrem perdas de chuva devido a interceptação, ao empoçamento e a infiltração. O coeficiente de escoamento corresponde à relação entre o volume escoado e o volume precipitado na bacia de interesse (RIGHETTO, 1998). A Tabela 1 apresenta valores típicos de Cem função do período de retorno e do tipo de superfície.

Tabela 1: Valores do coeficiente de escoamento (C) em função do período de retorno e do tipo de superfície.

Tipos de Superfície	Período de Retorno em Anos						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas Urbanas							
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Concreto/telhado	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97	1,00
Áreas com Grama (gramados, parques, etc).							
Condições pobres (Gramas cobrindo menos que 50 % da área)							
Plana, 0 a 1%	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Média, 2 a 7%	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
Inclinada, >7%	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
Condições médias (Gramas cobrindo de 50 % a 75 %da área)							
Plana, 0 a 1%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Média, 2 a 7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Inclinada, >7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Boas condições (Gramas cobrindo mais do que 75 %da área)							
Plana, 0 a 1%	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Média, 2 a 7%	0,29	0,32	0,35	39,00	0,42	0,46	0,56
Inclinada, >7%	0,34	0,37	0,40	44,00	0,47	0,51	0,58
Áreas Rurais							
Campos Cultivados							
Plana, 0 a 1%	0,31	0,31	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Média, 2 a 7%	0,35	0,35	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Inclinada, >7%	0,39	0,39	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastos							
Plana, 0 a 1%	0,25	0,25	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Média, 2 a 7%	0,33	0,33	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Inclinada, >7%	0,37	0,37	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Florestas / Reflorestamento							
Plana, 0 a 1%	0,22	0,22	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Média, 2 a 7%	0,31	0,31	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Inclinada, >7%	0,35	0,35	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

Fonte: Tucci *et al*. (1995).

3.3.2 MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO PROPOSTO PELO SOIL CONSERVATION SERVICE

O modelo chuva-vazão proposto pelo *Soil Convervation Service* (SCS, 1966) é empírico e foi desenvolvido pelo Departamento Americano de Agricultura para estimar o escoamento superficial direto resultante de um evento de chuva intensa. Neste modelo, o escoamento superficial é calculado em função do tipo de solo e das condições de cobertura vegetal de uma bacia retratadas por meio do parâmetro CN. Esse parâmetro, por sua vez, varia de 0 a 100, sendo definido em função de fatores como os grupos hidrológicos do solo, o tipo de cobertura vegetal e as condições antecedentes de umidade da bacia.

O modelo SCS é detalhadamente apresentado nos trabalhos estabelecidos por Genovez (2003), Tucci (2004) e DNER (1990).

De acordo com Wilken (1978), McCuen (1982) e Genovez (2003), o modelo SCS é apropriado para bacias com áreas menores que 2.600 km². Em contrapartida, Ramos (1999) considera o modelo aplicável para bacias com áreas compreendidas entre 3 e 250 km².

Segundo Tucci (2007), existem incertezas embutidas na determinação dos parâmetros do modelo, que são: (a) CN de separação do escoamento, (b) distribuição temporal da chuva de projeto e (c) tempo de concentração.

Para Carvalho *et al*. (2000), o sucesso da aplicação depende da determinação do CN em função das características hidrológicas do solo da região estudada. O modelo SCS reúne os solos em quatro grandes grupos, divididos conforme sua capacidade de infiltração e produção de escoamento. Sartori *et al*. (2005), no entanto, destaca a necessidade de se adaptar a classificação hidrológica do solo associada ao modelo, classificação originalmente estabelecida a partir dos principais tipos de solo dos Estados Unidos, às características dos solos brasileiros.

Adicionalmente, de acordo com o *United States Department of Agriculture* (USDA, 1986), se o evento de precipitação usado é uma tempestade histórica, a precisão do modelo diminui. Ademais, quando o parâmetro CN ponderado é inferior a 40 e quando o escoamento é inferior a 12,7 mm (0,5 polegada), o modelo SCS não deve ser utilizado para se determinar o escoamento.

Santos (2010) estimou vazões de projeto para diferentes bacias hidrográficas no estado do Espírito Santo (bacias com áreas de aproximadamente 400 Km²) a partir da aplicação dos métodos SCS, Racional e probabilísticos. A autora concluiu que método SCS, em geral, estimou valores inferiores aos obtidos pelos métodos probabilísticos, enquanto que o método Racional superestimou os valores de vazão.

Jabur e Rizzi (2011) realizaram a estimativa de vazão máxima com uso do modelo SCS para uma bacia hidrográfica com área de 68,26 Km² no alto do rio Ligeiro, no município de Pato Branco (PR). Damé (2010), por sua vez, utilizou o modelo SCS para a localidade de Pelotas, RS, em uma bacia com área de 7 km².

Pinto *et al*. (2008) determinaram o escoamento diário da bacia hidrográfica do Rio das Pedras (SE), de 55,45 Km² de área, com auxílio do modelo SCS, tendo como subsídio um sistema de informações geográficas. A aplicação do modelo, de acordo com os autores, mostrou-se completamente eficaz, apresentando resultados que correspondem à realidade da bacia.

Garcia e Ramos (2007), por sua vez, utilizaram o modelo SCS para estimar a vazão na bacia hidrográfica do rio Morro Alto, no município de Joinville (SC) e avaliar custos de obras de macrodrenagem. O trabalho mostrou que o dimensionamento, quando da adoção do método SCS para a estimativa das vazões, induz uma economia da ordem de um milhão de reais em comparação com os resultados associados ao método Racional.

3.4 Métodos probabilísticos

Uma vez que, no futuro, o comportamento exato das vazões não pode ser rigorosamente previsto, as leis de probabilidade são usualmente empregadas de modo a se estabelecer as prováveis variações de vazões. A análise estatística para a determinação de vazões de enchente emprega os eventos de descargas observadas num dado período, como meio para se efetuar a sua projeção para um período de tempo maior (MARTINS *et al*., 2001).

Os métodos probabilísticos são, por conseguinte, métodos de previsões de cheias futuras, associadas a um período de recorrência, baseados nos registros de série histórica. O enfoque estatístico para se determinar a magnitude das vazões

máximas consiste em definir uma relação entre descargas máximas e as correspondentes frequências de ocorrência, a partir do estudo de uma série de dados observados. A suposição básica desses métodos é de que as cheias verificadas durante um determinado período possam ocorrer em um período futuro de características hidrológicas similares, isto é, com uma expectativa de repetição. Na aplicação de modelos probabilísticos, quanto maior é a série, maior a segurança do modelo, uma vez que os eventos extremos, como as grandes vazões estão diretamente relacionados ao período de retorno (MARTINS *et al*., 2001).

Para a maioria das distribuições de frequência, a vazão de cheia é expressa em função da média e do desvio padrão dos eventos amostrados e de um fator de frequência K_T, conforme proposto por meio da equação (04) (KITE, 1978).

$$\mathrm{X_T} = \overline{\mathrm{X}} + \mathrm{SK_T} \qquad (04)$$

Na expressão anterior, X_T representa a vazão máxima com o período de retorno T, $\bar{X}$a média dos eventos amostrados, S o desvio padrão dos eventos amostrados e K_T o fator de frequência, que pode ser determinados para diferentes distribuições de probabilidade, dentre as quais merecem destaque para avaliação das vazões máximas as distribuições Log-Normal Tipo II, Log-Normal Tipo III, Pearson 3 e Log-Pearson Tipo III.

4 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Benevente localiza-se ao sul do Estado do Espírito Santo, situada entre os meridianos 40º33' e 41º00' de Longitude Oeste e entre os paralelos 20º26' e 21º49' de Latitude Sul. Tem uma área de drenagem de cerca de 1.190 km², abrangendo os municípios de Anchieta, Alfredo Chaves, Iconha, Guarapari e Piúma.

A porção superior da bacia se insere na Unidade Hidrográfica Benevente, que inclui as bacias da Lagoa Mãe-bá e do rio Meaípe, em Guarapari (IEMA, 2008). Sua geologia é considerada como bem representativa do estado do Espírito Santo, sendo composta, em sua maior parte, por rochas cristalinas Pré-Cambrianas (RADAMBRASIL, 1983).

O rio Benevente, que constitui uma importante fonte de abastecimento de água das cidades que integram sua bacia, percorre uma extensão aproximada de 34 km entre a sua nascente, na Serra do Tamanco (entre os municípios de Alfredo Chaves e Vargem Alta) até a foz, localizada na cidade de Anchieta, onde se situa um dos maiores manguezais do Espírito Santo (manguezal com cerca de 6,5 km de extensão e uma área aproximada de 4,6 km²).Dentre os afluentes mais importantes destacam-se, na margem direita, os rios Pongal, Joéba, São Joaquim, Maravilha e Crubixá e, na margem esquerda, os rios Salinas, Grande Corindiba, Caco de Pote e Batatal (FERREIRA, 1998).

A porção da bacia hidrográfica do Rio Benevente considerada nesse trabalho (área hachurada na Figura 1) possui área de aproximadamente 377,70 Km², comprimento do talvegue de 25,21 km e declividade de 0,080 m/m.

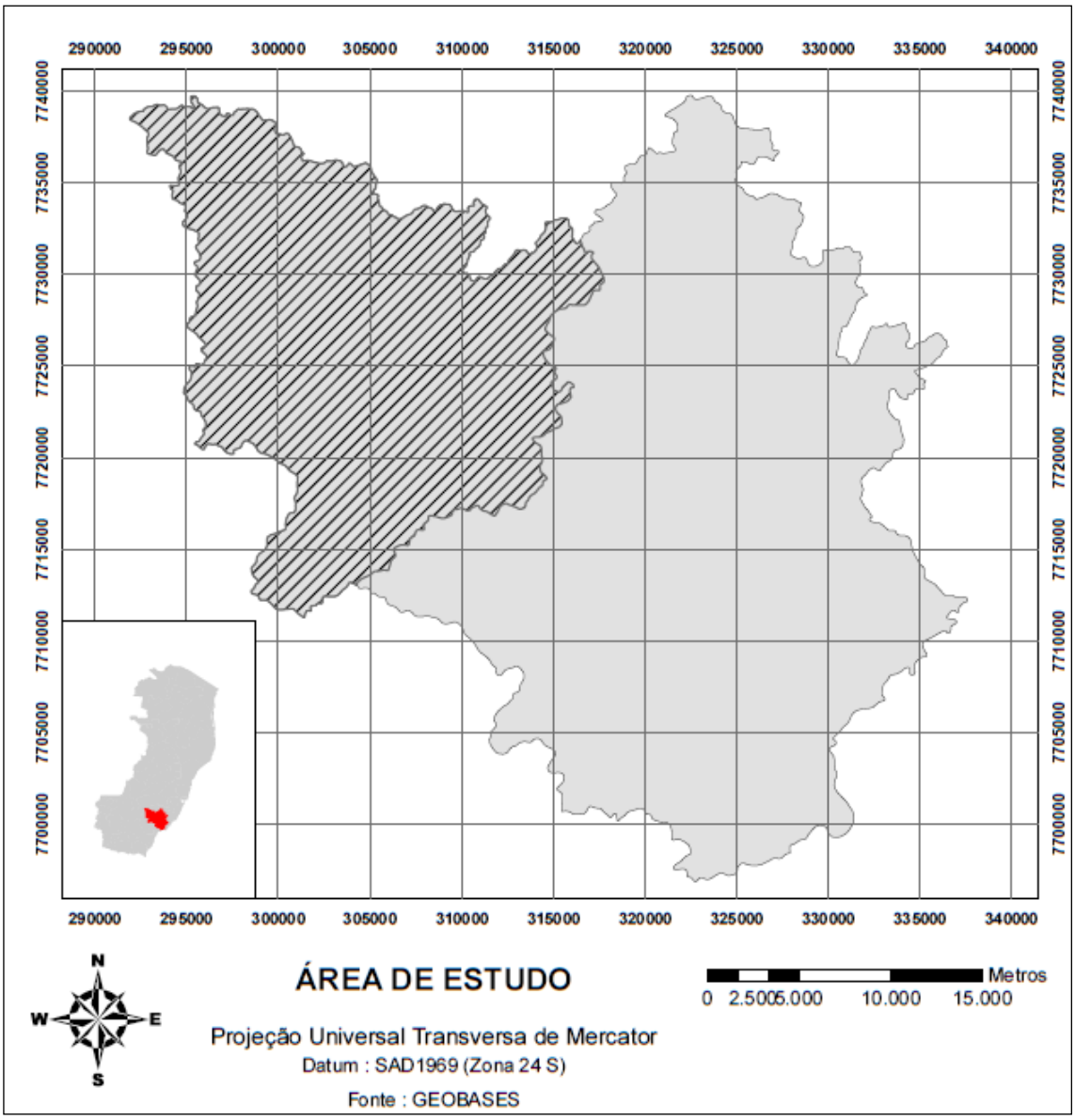

Figura 1: Porção da bacia hidrográfica do rio Benevente considerada no presente estudo.

5 METODOLOGIA

5.1 Características hidrológicas

As informações pluviométricas consideradas neste estudo foram obtidas a partir da estação Matilde (DNOS), instalada no Município de Alfredo Chaves, mantida pela Agência Nacional de Águas (ANA) e operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Dessa estação, foram selecionados 50 registros consistidos de precipitações máximas anuais, compreendendo o período entre os anos de 1961 e 2011. As precipitações máximas anuais selecionadas estão apresentadas no Apêndice A.

Em contrapartida, as informações fluviométricas foram obtidas da estação Matilde, estação que define bacia hidrográfica com área de drenagem de 206 km². A estação também está instalada no Município de Alfredo Chaves, também mantida pela ANA e operada pelo CPRM. Dessa estação, foram considerados todos os registros de vazão e de velocidade média da seção transversal para o período compreendido entre os anos de 1950 e 2005. As vazões máximas selecionadas estão reunidas no Apêndice A.

A Figura 2 ilustra a rede de drenagem da região de estudo, bem como a localização das estações fluviométrica e pluviométrica consideradas.

5.2 Características fisiográficas

As características fisiográficas da região de estudo foram obtidas por meio de *shapefiles* disponibilizados pelo Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo (GEOBASES) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) [1]. Todos os *shapefiles* foram processados com auxílio do aplicativo computacional *ArcGIS 9.3*, desenvolvido pelo *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, os mapas de tipos de solo, uso e ocupação do solo e de declividade da região estudada.

[1] Dados do Projeto Brasil em Relevo (MIRANDA, 2005)

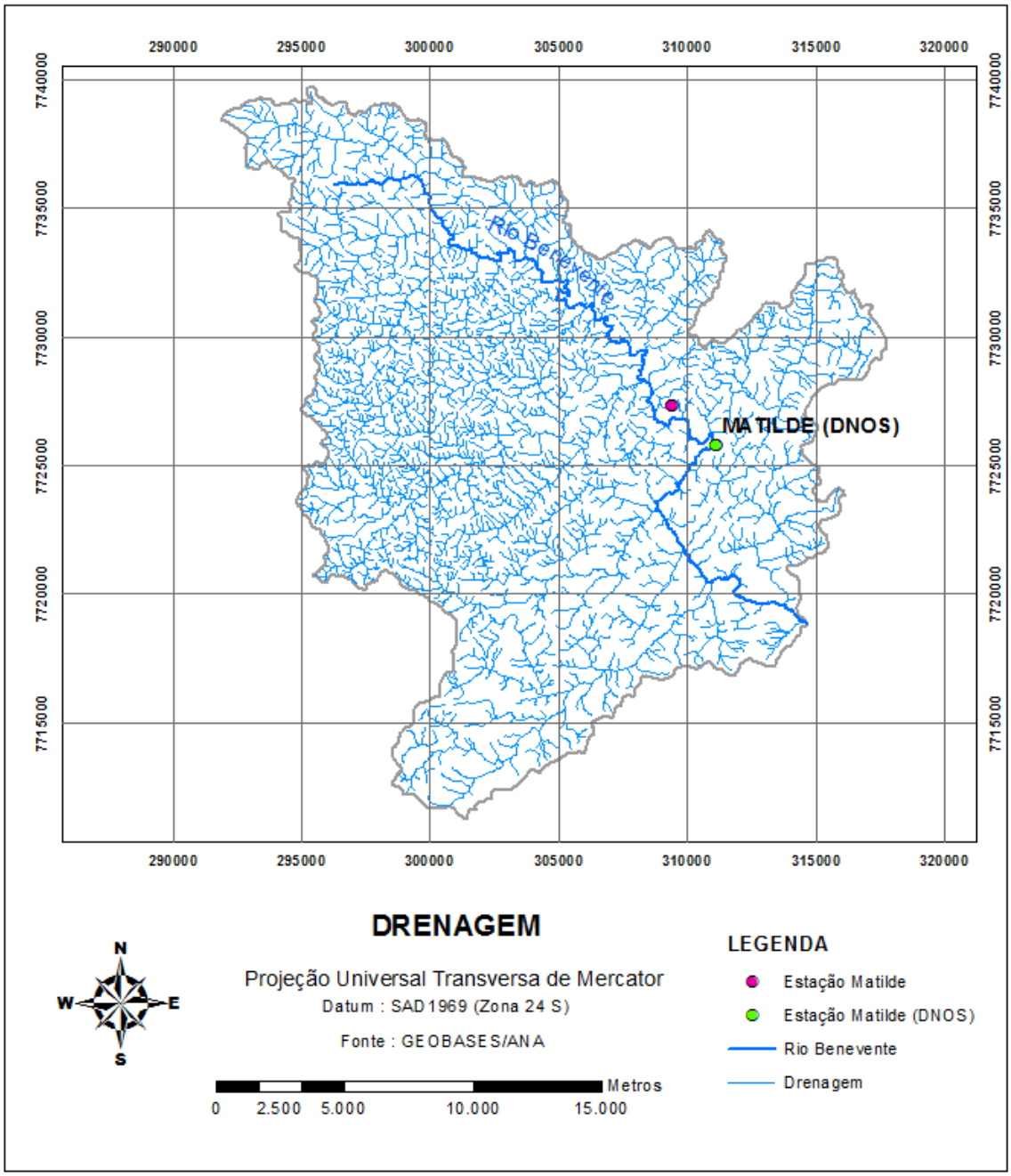

Figura 2: Rede de drenagem da região estudada.

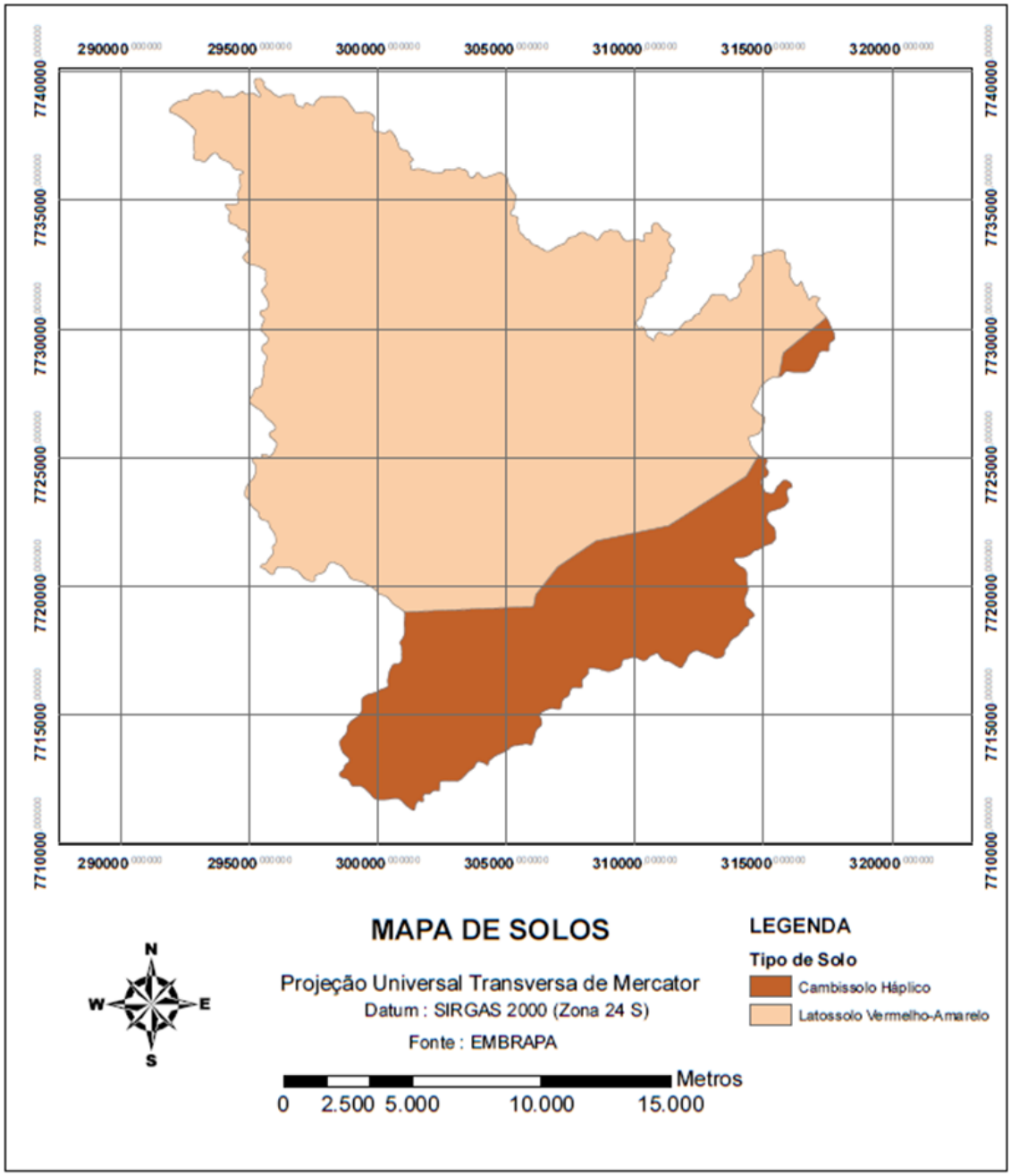

Figura 3: Mapa de tipos de solo da região estudada.

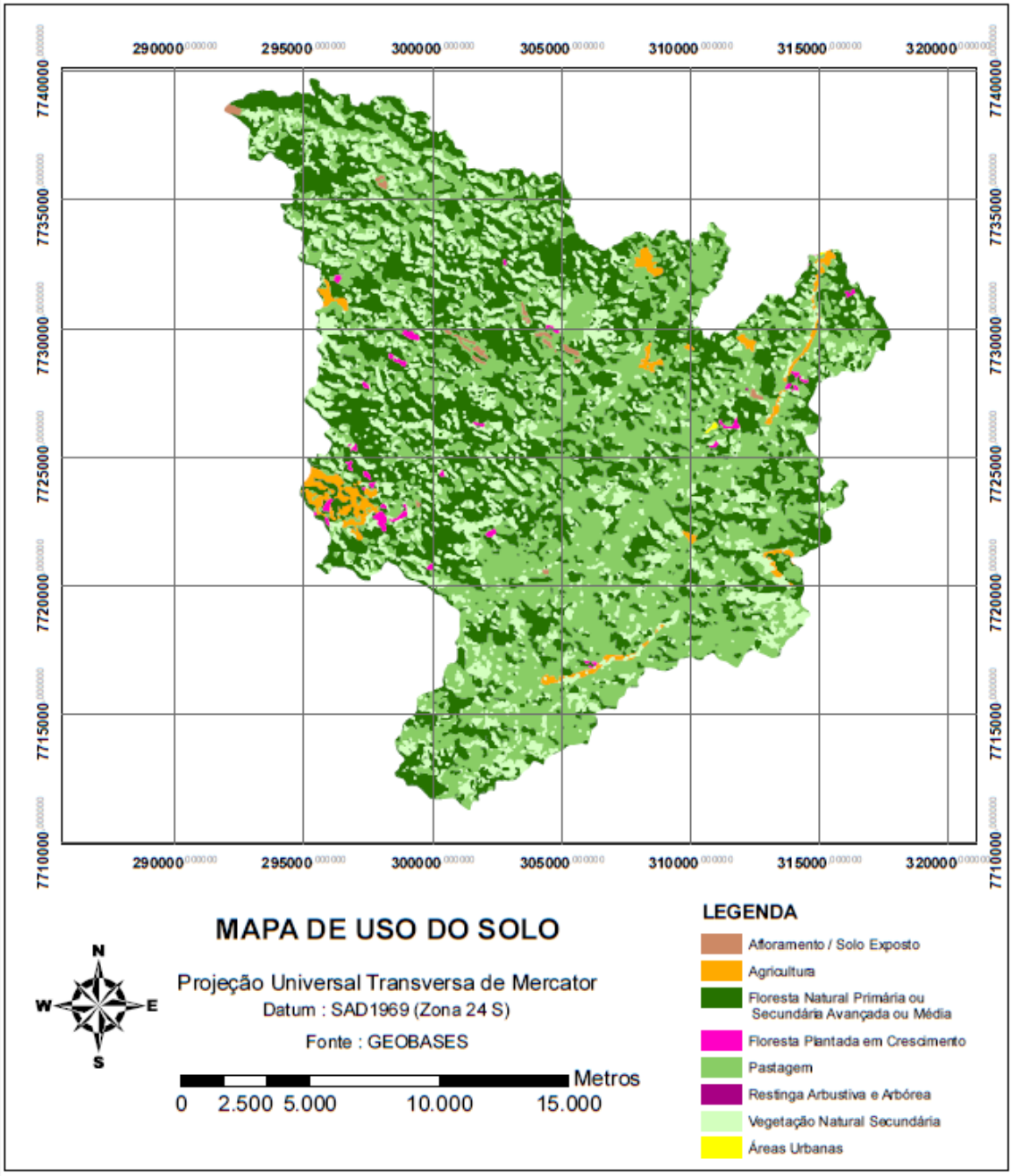

Figura 4: Mapa de uso e ocupação do solo da região estudada.

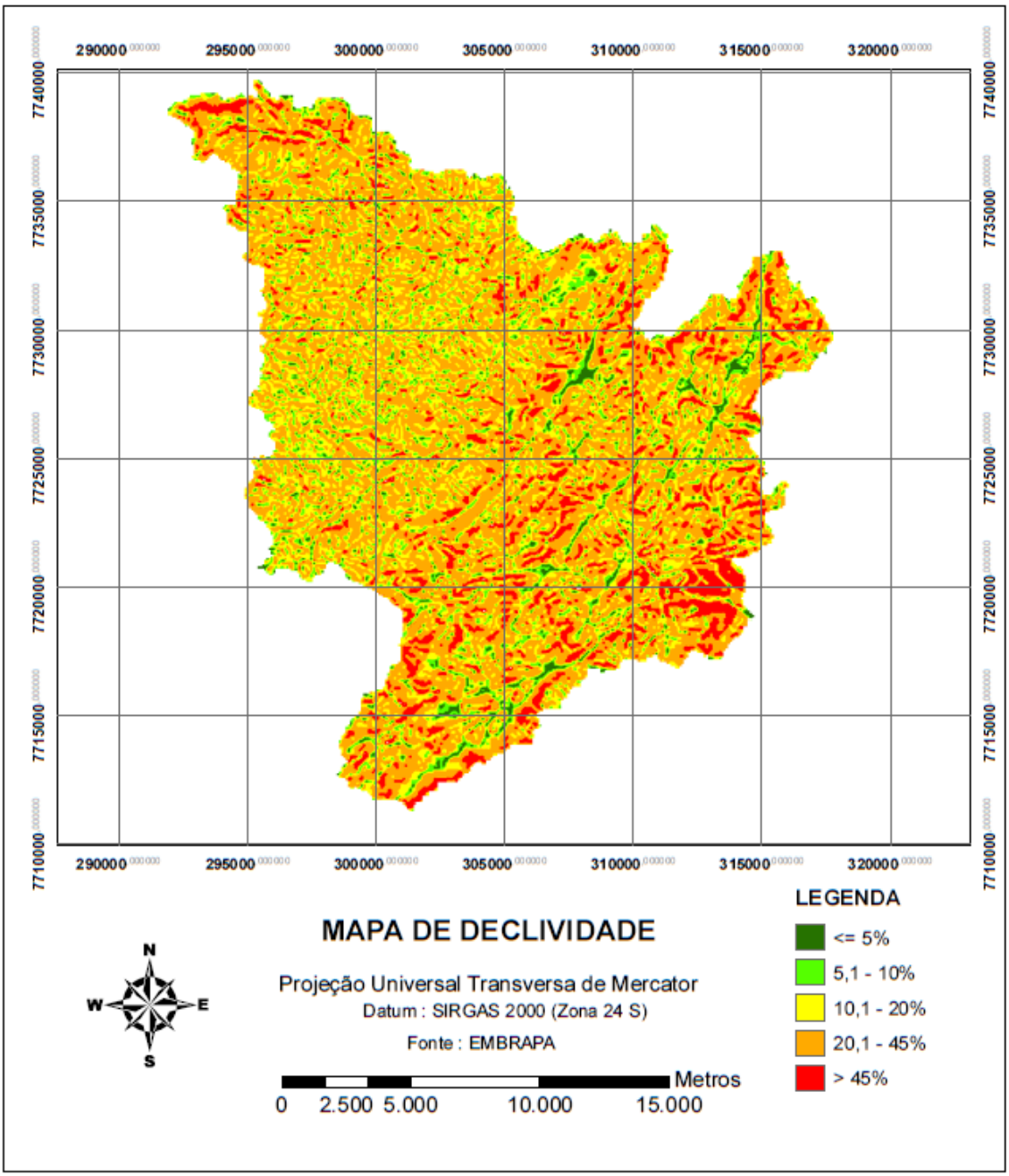

Figura 5: Mapa de declividades da região estudada.

5.3 Divisão das sub-bacias

Para a divisão da área de estudo em sub-bacias foi criado um modelo digital de elevação do terreno (MDE) a partir do *shapefile* de curvas de nível fornecido pelo EMBRAPA. Da interpolação das curvas de nível, gerou-se uma estrutura de grade triangular que representa uma superfície por meio de conjuntos de faces triangulares que, posteriormente, foi transformada em um arquivo *raster*.

Do arquivo *raster* de elevação do terreno, determinou-se a direção do fluxo de escoamento para cada célula que compõe o MDE com auxílio da opção "*Flow Direction*" da ferramenta *Hydrology*. Em seguida, determinou-se o fluxo acumulado do escoamento de maior abrangência possível com auxílio da opção "*Flow Accumulation*" da ferramenta *Hydrology*.

A partir do fluxo acumulado e da área delimitada da região de estudo, delimitaram-se as sub-bacias com auxílio da opção "*Watershed*" da ferramenta *Hydrology Modeling*.

5.4 Equações de chuvas intensas

Para a determinação das equações de chuvas intensas, foram empregados os métodos de Bell (RIGHETO, 1998) e de Chow-Gumbel (CETESB, 1996) e o *Software* Pluvio, alternativas sumariamente descritas nos itens subsequentes.

5.4.1 MÉTODO DE CHOW-GUMBEL

As etapas consideradas para a obtenção da equação de chuva intensa pelo método de Chow-Gumbel reproduziram procedimento estabelecido por CETESB (1996). São elas:

- As precipitações máximas anuais foram ordenadas em ordem decrescente de valores e, a cada valor de precipitação, foi associada uma probabilidade (P) de ocorrência e um período de retorno (T), conforme as expressões (05) e (06)

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{n+1}} \tag{05}$$

$$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{n+1}}{\mathrm{m}} \tag{06}$$

  Nas duas últimas expressões m é o número de ordem e n a extensão da série anual de precipitações máximas.

- A partir das probabilidades, ajustou-se às precipitações a distribuição de Gumbel (distribuição I de Fisher-Tippet), de acordo com a expressão (7).

$$\mathrm{P} = 1 - \mathrm{e}^{-\mathrm{e}^{-\mathrm{y}}} \tag{7}$$

Sendo *y* a variável reduzida. Manipulando-se a equação (7), pode-se obter a variável *y*, conforme expressão (08).

$$y = -\ln[-\ln(1 - P)] \quad (8)$$

- Estimaram-se os valores de da variável auxiliar K, a partir da expressão (9).

$$K = \frac{(y - \bar{y})}{S_y} \quad (9)$$

Na expressão (09) $\bar{y}$ e S_y são a média aritmética e desvio-padrão da variável reduzida, respectivamente. Estes valores são obtidos a partir da extensão da série histórica de precipitações, conforme Tabela 2.

- Interpolaram-se os valores de K com os valores de período de retorno (T), a fim de se encontrar os valores da variável K para cada período de retorno desejado.
- A partir dos valores encontrados da variável K, para cada T desejado, foram encontradas as precipitações, em milímetros, de um dia de duração, a partir da expressão (10).

$$P = \bar{x} + KS_x \quad (10)$$

Na expressão (10) $\bar{x}$ e S_x são a média aritmética e o desvio-padrão das precipitações máximas anuais, de um dia de duração, respectivamente.

- Determinaram-se as alturas pluviométricas, em milímetros, para diferentes durações e períodos de retorno. As relações entre as diferentes durações de chuva utilizados neste estudo foram obtidas de CETESB (1996), conforme Tabelas 3 e 4.

Tabela 2: Média aritmética e desvio-padrão da variável reduzida y.[2]

n	μ_y	S_y	n	μ_y	S_y	n	μ_y	S_y
10	0,4952	0,9496	24	0,5296	1,0865	38	0,5424	1,1365
11	0,4996	0,9676	25	0,5309	1,0914	39	0,5430	1,1290
12	0,5035	0,9833	26	0,5321	1,0961	40	0,5436	1,1413
13	0,5070	0,9971	27	0,5332	1,1005	41	0,5442	1,1436
14	0,5100	1,0095	28	0,5343	1,1147	42	0,5448	1,1458
15	0,5128	1,0206	29	0,5353	1,1086	43	0,5453	1,1479
16	0,5154	1,0306	30	0,5362	1,1124	44	0,5458	1,1499
17	0,5177	1,0397	31	0,5371	1,1159	45	0,5463	1,1518
18	0,5198	1,0481	32	0,5380	1,1193	46	0,5468	1,1537
19	0,5217	1,0557	33	0,5388	1,1225	47	0,5472	1,1555
20	0,5236	1,0628	34	0,5396	1,1256	48	0,5477	1,1573
21	0,5252	1,0694	35	0,5403	1,1285	49	0,5481	1,1590
22	0,5268	1,0755	36	0,5411	1,1313	50	0,5485	1,1607
23	0,5282	1,0812	37	0,5417	1,1339			

Tabela 3: Relações entre as alturas pluviométricas, proposta por CETESB (1986).

Relações entre as alturas pluviométricas, para diferentes durações	Valores encontrados pelo DNOS
5min/30min	0,34
10min/30min	0,54
15min/3min	0,70
20min/30min	0,81
25min/30min	0,91
30min/1h	0,74
1h/24h	0,42
6h/24h	0,72
8h/24h	0,78
10h/24h	0,82
12h/24h	0,85

[2]Adaptado de Silveira e Silveira (2003).

Tabela 4: Relação entre as alturas pluviométricas de 24h e de 1 dia de duração, proposta por CETESB (1986).

Período de retorno (anos)	5	10	25	50	75	100
Relação entre as alturas pluviométricas para chuvas máximas de 24h e 1 dia de duração	1,13	1,13	1,14	1,15	1,14	1,15

- A partir dos valores de precipitação, foram estimadas as intensidades de chuva, para cada período de retorno desejado e, a partir da análise de regressão, determinou-se a equação de chuvas intensa, na forma estabelecida pela equação (02).

5.4.2 MÉTODO DE BELL

Segundo Rigetto (1998), pelo método de Bell, as alturas pluviométricas de uma chuva intensa são estimadas com auxílio da equação (11).

$$\mathrm{h}_{(\mathrm{t},\mathrm{T_r})} = [\alpha \ln(\mathrm{Tr}) + \beta_1] \times [\beta_2 \mathrm{t}^{\gamma} - \beta_3] \times \mathrm{h}_{(60,2)} \qquad (11)$$

Na expressão anterior:

- $h_{(t,T_r)}$ representa a altura pluviométrica (mm) de chuva intensa, de duração *t* e período de retorno Tr;
- $h_{(60,2)}$ constitui a altura pluviométrica (mm) padrão de 60 minutos de duração e período de retorno de 2, calculada a partir da equação (12);

  $$\mathrm{h}_{(60,2)} = \mathrm{K}\, \mathrm{h}_{(\mathrm{dia},2)} \qquad (12)$$

  Na equação (12) K = 0,51 (RIGHETTO, 1998) e $h_{(dia,2)}$ representa a altura pluviométrica de chuva intensa com um dia de duração e 2 anos de período de retorno, precipitação que pode ser obtida pela distribuição probabilística de Gumbel.

- α, β_1, β_2, β_3 e γ são parâmetros regionais, cujos valores indicados por Rigetto (1998) para o Brasil são 0,30; 0,70; 0,38; 0,39 e 0,31, respectivamente.

5.4.3 PROGRAMA COMPUTACIONAL PLUVIO

Segundo o Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa (UFV, 2011), o programa Pluvio permite, utilizando-se de interpolação pelo Método do Inverso da Quinta Potência da Distância, a estimativa dos coeficientes da equação de chuvas intensas para diversas localidades. dos Estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, São Paulo e Tocantins.

A equação de chuva intensa obtida nesse estudo foi determinada pela versão 1.2 do referido *software*. Manipulando-se apenas os dados de latitude e longitude da localidade desejada, o programa determina os parâmetros da equação de chuvas intensas, conforme ilustrado com auxílio da Figura 6. A localidade selecionada nesse estudo foi Alfredo Chaves, município onde a estação pluviométrica Matilde (DNOS) está instalada.

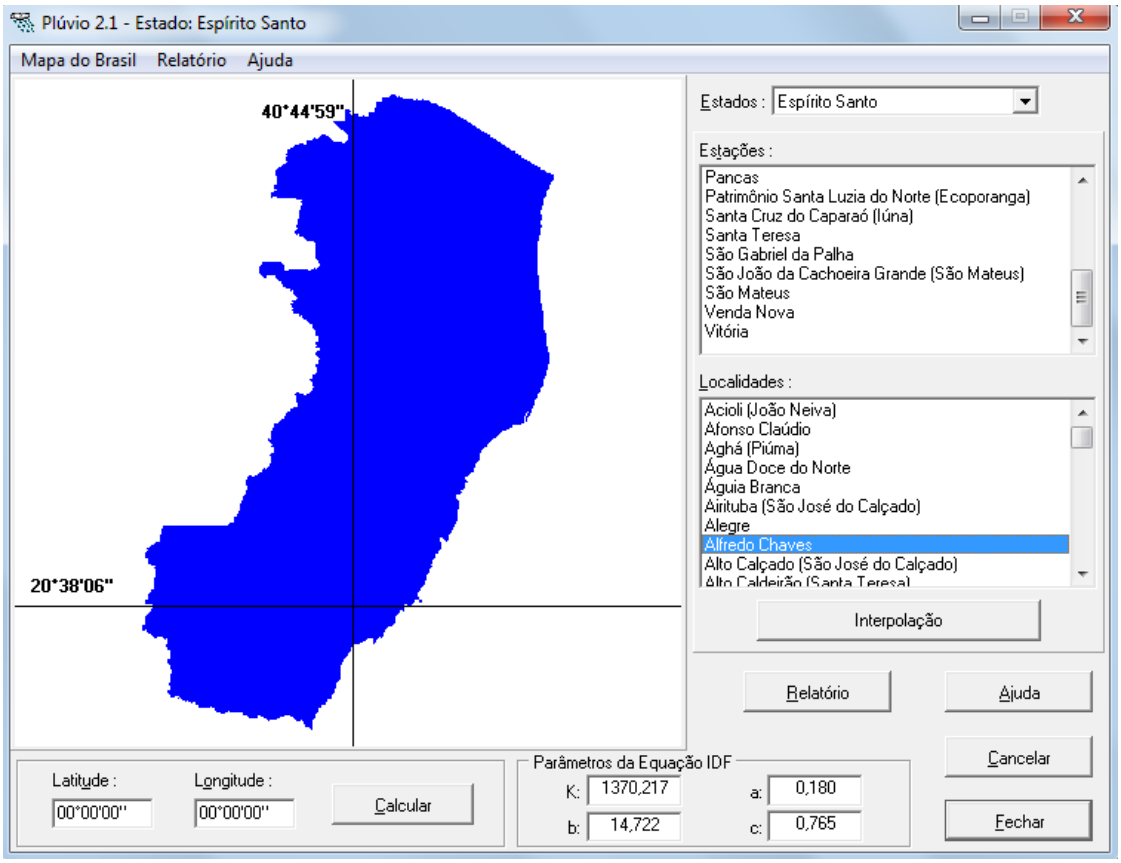

Figura 6: Interface do Programa Computacional Pluvio 1.2.

5.5 TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO

Neste estudo, a apropriação dos tempos de concentração envolveu a aplicação dos métodos de Dooge (expressão 13), Johnstone (expressão 14) e Bransby-Williams (expressão 15).

$$t_c = 21{,}88 . \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}} \tag{13}$$

$$t_c = 20{,}17 . \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,5} \tag{14}$$

$$t_c = 14{,}6 . \frac{L}{A^{0,1} S^{0,2}} \tag{15}$$

Nas expressões (13), (14) e (15), L representa o comprimento do talvegue (em Km), A a área da bacia (Km²) e S o declividade do talvegue (m/m).

Conforme observa Franco (2004), a expressão (13) é aplicável a bacias rurais variando com áreas variando de 140 a 930 Km² e a expressão (14) a bacias com áreas variando de 65 a 4200 Km². Ainda segundo o mesmo autor, a expressão (15) é melhor indicada para bacias hidrográficas com características rurais. Farias Junior (2010), por sua vez, ressalta que a última equação apresenta bons resultados para aplicação em bacias de pequeno-médio porte, cerca de 30 Km², em regiões de alta declividade.

5.6 Método SCS

O escoamento superficial ocorre quando a taxa de precipitação é maior que a taxa de infiltração, depois que as demandas iniciais de interceptação, infiltração e armazenamento tenham sido satisfeitas. Influenciam no escoamento, desta maneira, principalmente, o uso da terra, o tipo de solo, a geologia, as condições de umidade do solo e a cobertura vegetal (TUCCI, 2007; GRUNWALD, 2000).

No método *SCS*, mais conhecido como *SCS Curve Number*, o escoamento é calculado em função do tipo de uso e ocupação do solo, do tipo de solo e sua capacidade de infiltração, das condições de cobertura vegetal, do volume precipitado

e das condições de umidade antecedentes da bacia (GENOVEZ, 2003; TUCCI, 2007).

De acordo com Tucci (2004), os solos brasileiros podem ser separados em quatro grupos hidrológicos (Tabela 5), de acordo com suas características geológicas e capacidade de infiltração:

- Solo A, que produz baixo escoamento superficial e alta infiltração. São solos arenosos profundos com pouco silte e argila;
- Solo B, menos permeáveis do que o A. São solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com permeabilidade superior à média;
- Solo C, que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila, pouco profundo;
- Solo D, que contém argilas expansivas e pouco profundas com muito baixa capacidade de infiltração, gerando maior proporção de escoamento superficial.

As taxas de infiltração utilizadas para a classificação dos solos, de acordo com McCuen (1982) *apud* Genovez (2003), estão indicadas na Tabela 6.

A umidade antecedente da bacia pode ser retratada em três condições: Condição I, situação na qual os solos da bacia estão secos, porém não até o ponto de murchamento das plantas; condição II, situação média das condições dos solos das bacias que precederam a ocorrência de cheia máxima anual em numerosas bacias; e condição III, quando choveu muito nos 5 dias anteriores a tormenta, e o solo está quase saturado. Neste trabalho, a condição III de umidade foi considerada para retratar as condições antecedentes da bacia.

Tabela 5: Enquadramento das atuais classes gerais de solo, para cada grupo hidrológico do solo, conforme Tucci (2004).

Grupo hidrológico do solo	Classes Gerais de solo
A	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso;
B	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZÊNICO; ARGILOSSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa, argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta;
C	ARGILOSSOLOS pouco profundos, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGILOSSOLO VERMELHO, ARGILOSO VERMELHO AMARELO e ARGILOSSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS; ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO;
D	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no grupo C; ARGILOSSOLO VERMELHO AMARELO e ARGILOSO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Tabela 6: Valores da taxa de infiltração mínima usadas na identificação do grupo hidrológico do solo.

Grupo Hidrológico do solo	Taxa de infiltração (mm/H)
A	7,6 – 11,4
B	3,8 – 7,6
C	1,3 – 3,8
D	0,0 – 1,3

Para retratar a capacidade máxima de infiltração do solo da bacia, o método considera o parâmetro CN, que varia de 0 a 100, sendo este definido em função de fatores como os grupos hidrológicos do solo, o tipo de cobertura vegetal e as condições antecedentes de umidade da bacia (USDA, 1986). Tucci (2004) apresenta diversos valores de CN, registrados nas Tabelas 7 e 8, para a condição III de umidade antecedente.

Neste estudo, o parâmetro CN foi estimado a partir da análise dos dados de área, uso e ocupação do solo e tipos de solo, já mencionados no item 5.2. Para isso, os dados foram extraídos dos *shapefiles*, através do Programa *ArcGIS 9.3*, exportando-se as informações contidas nas tabelas de atributos.

Para cada tipo de solo, identificaram-se os usos e as ocupações do solo e suas respectivas áreas de abrangência e, com auxílio das Tabelas 7 e 8, apropriaram-se os valores de CN para cada uso. A partir desses valores, fez-se a média ponderada dos valores de CN para a área de abrangência, encontrando-se o CN correspondente à área de estudo.

Tabela 7: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.

Uso e ocupação do solo		Tipos de solo			
		A	**B**	**C**	**D**
Zonas cultivadas:	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos baldios:	Em más condições	68	79	86	89
	Em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais:	Cobertura ruim	45	66	77	83
	Cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios (em boas condições):					
	Com relva mais de 75% de área	39	61	74	80
	Com relva 50 a 75% de área	49	69	79	84
Zonas comerciais, escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais:					
Tamanho do lote (m²)	% média impermeável				
Até 500 m²	65%	77	85	90	92
500 a 1000 m²	38%	61	75	83	87
1000 a 1300 m²	30%	57	72	81	86
1300 a 2000 m²	25%	54	70	80	85
2000 a 4000 m²	20%	51	68	79	84
Estacionamentos pavimentados, viadutos, telhados, etc.					
Ruas e estradas:					
	Asfaltadas com drenagem fluvial	98	98	98	98
	Pavimentadas de paralelepípedos	76	85	89	91
	De terra	72	82	87	89

Tabela 8: Valores de CN para bacias rurais.

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

De acordo com o método, a capacidade de infiltração do solo é estimada pela expressão (16).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (16)$$

Na expressão (16) S indica a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (mm) e CN o número de curva do escoamento (admensional).

A capacidade máxima de armazenamento, por sua vez, condiciona a determinação da precipitação excedente no solo, sendo avaliada com auxílio da equação (17).

$$P_c = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} - 254 \quad (17)$$

Na última expressão S é a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (mm) e P é a altura pluviométrica total resultante do evento de chuva (mm), cujo valor é calculado, por sua vez, a partir da expressão (18).

$$P = It_c \quad (18)$$

Na expressão (18) I representa a intensidade de chuva (mm/min) e t_c o tempo de concentração do hidrograma (min).

Para determinar o escoamento superficial, por fim, é empregada a expressão (19).

$$Q = 0,208\frac{(AP_c)^2}{T_p} - 254 \quad (19)$$

Na última expressão Q é a vazão (m³/s), A é a área da bacia (Km²), P_c é a precipitação excedente no solo (mm) e T_p é o tempo de ascensão do hidrograma unitário (h). O valor de T_p é avaliado com auxílio da equação (20).

$$T_p = \frac{D}{2} + 0,2t_c \quad (20)$$

Na equação (20) T_p representa o tempo de ascensão (h), T_c o tempo de concentração (h) e D é o intervalo de discretização (h), cuja estimativa é conduzida a partir do emprego da equação (21).

$$\mathrm{D} = \frac{t_c}{7{,}5} \tag{21}$$

O método SCS foi aplicado com o objetivo de se estimar a vazão máxima no exutório da área de estudo considerando-se duas perspectivas:

- Aplicação do método uma única vez e para toda a área de drenagem da bacia hidrográfica;
- Aplicação do método a partir de divisão da área de estudo em sub-bacias.

A aplicação do método SCS a partir da divisão da área de estudo em sub-bacias considerou a perspectiva da avaliação do efeito de duas variáveis (área de drenagem e tempo de concentração) que atuam de maneira oposta quando das estimativas de vazão. Desta forma, a segmentação da área de estudo envolveu seguintes aspectos:

- As vazões máximas apresentam relação direta com a área de drenagem. A partir da equação (19) é possível observar que os valores de vazão dependem do quadrado da área de drenagem considerada para aplicação do método SCS. Desta forma, menores áreas de drenagem conduzirão, invariavelmente, a menores valores de vazão;
- As vazões máximas apresentam relação inversa com o tempo de pico dos hidrogramas (equação (20)) que, por sua vez, apresentam relação direta com os tempos de concentração. Desta forma, menores áreas de drenagem conduzirão a menores valores tempos de concentração (observar equações (13), (14) e (15)) e, por conseguinte, a maiores valores de vazões máximas.

Quando da delimitação de sub-bacias, a vazão no exutório da área de estudo foi estimada considerando-se duas possibilidades:

- A partir da soma das vazões máximas estimadas para as sub-bacias da área de estudo, ignorando-se a necessidade de propagação dos picos de cheia ao longo do sistema hídrico, da foz de cada sub-bacia até o exutório da área de estudo. Esta hipótese é rigorosa, em se considerando o fato de que os picos de cheia de cada sub-bacia atingiriam o exutório da área de estudo em diferentes momentos a partir do início de um evento de precipitação intensa;
- A partir da soma das vazões das máximas produzidas em cada sub-bacia, considerando-se a translação dos hidrogramas de cheia de cada sub-bacia para o exutório da área de estudo. Nesta etapa do trabalho foram definidos, por sub-bacia, hidrogramas triangulares conforme metodologia estabelecida pelo método SCS. A translação de cada hidrograma para o exutório da área de estudo envolveu a observação do valor do tempo de concentração de cada sub-bacia, a apropriação da distância entre o exutório de cada sub-bacia e o exutório da área de estudo e a apropriação da velocidade média de escoamento no Rio Benevente, velocidade estimada a partir da média de 444 (quatrocentos e quarenta e quatro) registros de velocidade disponíveis para a estação fluviométrica de Matilde.

5.7 Vazões máximas estimadas pelos métodos probabilísticos

Para a determinação das vazões máximas a partir de métodos probabilísticos, a série histórica de vazões máximas obtidas na estação Matilde foi submetida a uma análise probabilística conduzida com auxílio do Sistema Computacional para Análises Hidrológicas, versão 1.0 (SisCAH, 1.0), software desenvolvido pelo GPRH da UFV.

Na estimativa das vazões máximas, o SisCAH 1.0 permite a análise do ajuste das distribuições de probabilidade de Gumbel, Log-normal II, Log-normal III, Pearson III, Log-Pearson III e Weibull. Estas distribuições estão detalhadamente apresentadas e discutidas por Naghettini e Pinto (2007).

No presente estudo, a partir do emprego das diferentes distribuições probabilísticas disponíveis no programa SisCAH 1.0, foram apropriadas vazões máximas com períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

É importante registrar que as vazões máximas apropriadas nesta etapa estão associadas à estação fluviométrica Matilde, seção que define área de drenagem ligeiramente inferior àquela a partir da qual foram estimadas as vazões máximas pelo método SCS. A transposição espacial das vazões para o exutório da área de estudo foi realizada por equivalência de áreas, admitindo-se que toda a bacia se comporte de maneira hidrologicamente homogênea.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações (22), (23) e (24) constituem as relações Intensidade-Duração-Frequência determinadas para a estação Matilde (DNOS) pelo *Software* Plúvio e pelos métodos de Chow-Gumbel e de Bell, respectivamente.

$$I = \frac{1370{,}21 T_r^{0{,}180}}{(t+11)^{0{,}765}} \quad (22)$$

$$I = \frac{14{,}841 T_r^{0{,}1793}}{(t+11)^{0{,}746}} \quad (23)$$

$$I = [0{,}3 \ln(Tr) + 0{,}7] \times [0{,}38\, t^{0{,}31} - 0{,}39] \times 44{,}12 \quad (24)$$

Na equação (22), I representa a intensidade (mm/h), T_r o período de retorno (anos) e t a duração (minutos). Nas expressões (23) e (24), I representa a intensidade (mm/min), T_r o período de retorno (anos) e t a duração (minutos).

As tabelas 9, 10 e 11 apresentam as intensidades de chuva (mm/min) estimadas pelo *Software* Plúvio e pelos métodos de Chow-Gumbel e de Bell, respectivamente.

Tabela 9: Intensidades de chuva (mm/min) estimadas pelo *Software* Plúvio.

Duração (min)	**Período de Retorno (anos)**					
	2	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**
5	2,6435	3,1176	3,5318	4,1651	4,7186	5,3457
15	1,9316	2,2780	2,5807	3,0434	3,4478	3,9060
30	1,4131	1,6665	1,8879	2,2265	2,5223	2,8575
60	0,9542	1,1253	1,2748	1,5034	1,7032	1,9295
120	0,6079	0,7169	0,8121	0,9577	1,0850	1,2292
180	0,4586	0,5408	0,6127	0,7225	0,8186	0,9273
360	0,2779	0,3278	0,3713	0,4379	0,4961	0,5620
720	0,1661	0,1958	0,2218	0,2616	0,2964	0,3358
1440	0,0985	0,1161	0,1316	0,1551	0,1758	0,1991

Tabela 10: Intensidades de chuva (mm/min) estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

Duração (min)	Período de Retorno (anos)					
	2	5	10	25	50	100
5	2,1240	2,5033	2,8346	3,3407	3,7828	4,2834
15	1,4787	1,7427	1,9733	2,3256	2,6334	2,9819
30	1,0527	1,2407	1,4048	1,6557	1,8748	2,1229
60	0,6989	0,8237	0,9327	1,0992	1,2447	1,4094
120	0,4425	0,5216	0,5906	0,6960	0,7881	0,8924
180	0,3340	0,3937	0,4458	0,5254	0,5949	0,6736
360	0,2036	0,2399	0,2717	0,3202	0,3625	0,4105
720	0,1227	0,1446	0,1638	0,1930	0,2186	0,2475
1440	0,0736	0,0867	0,0982	0,1157	0,1311	0,1484

Tabela 11: Intensidades de chuva (mm/min) estimadas pelo método de Bell.

Duração (min)	Período de Retorno (anos)					
	2	5	10	25	50	100
5	1,8894	2,4615	2,8942	3,4662	3,8990	4,3317
15	1,3079	1,7039	2,0035	2,3995	2,6990	2,9986
30	0,9356	1,2188	1,4331	1,7163	1,9306	2,1448
60	0,6423	0,8368	0,9839	1,1784	1,3255	1,4726
120	0,4293	0,5593	0,6577	0,7877	0,8860	0,9843
180	0,3362	0,4380	0,5150	0,6168	0,6938	0,7708
360	0,2188	0,2850	0,3351	0,4014	0,4515	0,5016
720	0,1408	0,1835	0,2157	0,2583	0,2906	0,3228
1440	0,0899	0,1171	0,1377	0,1649	0,1855	0,2061

As Figuras 7, 8 e 9 representam graficamente as intensidades determinadas pelas equações estabelecidas neste trabalho quando da adoção de períodos de retorno de dois, cinquenta e cem anos. Os gráficos das intensidades determinadas pelas equações estabelecidas quando da adoção de períodos de retorno de cinco, dez e vinte e cinco anos encontram-se no Apêndice B.

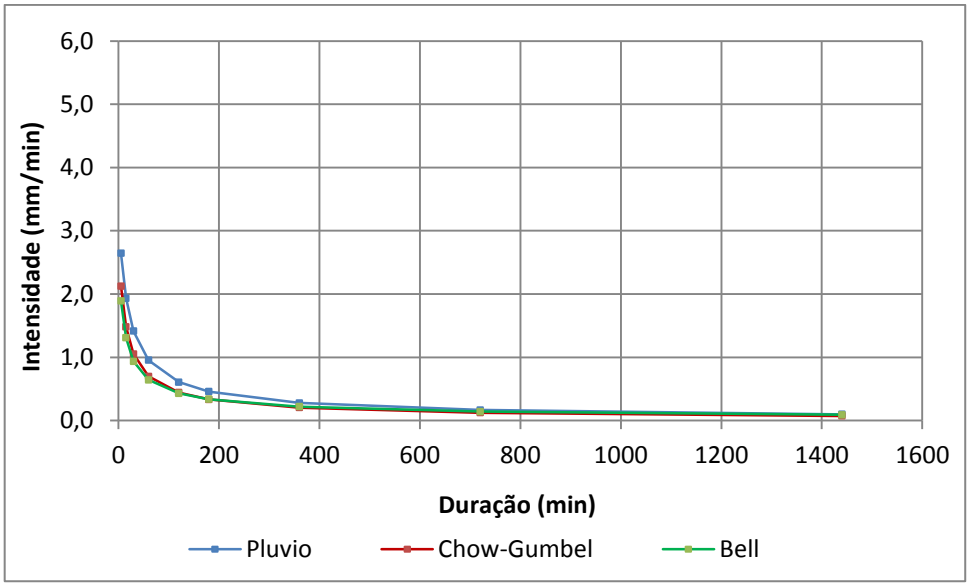

Figura 7: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 2 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS).

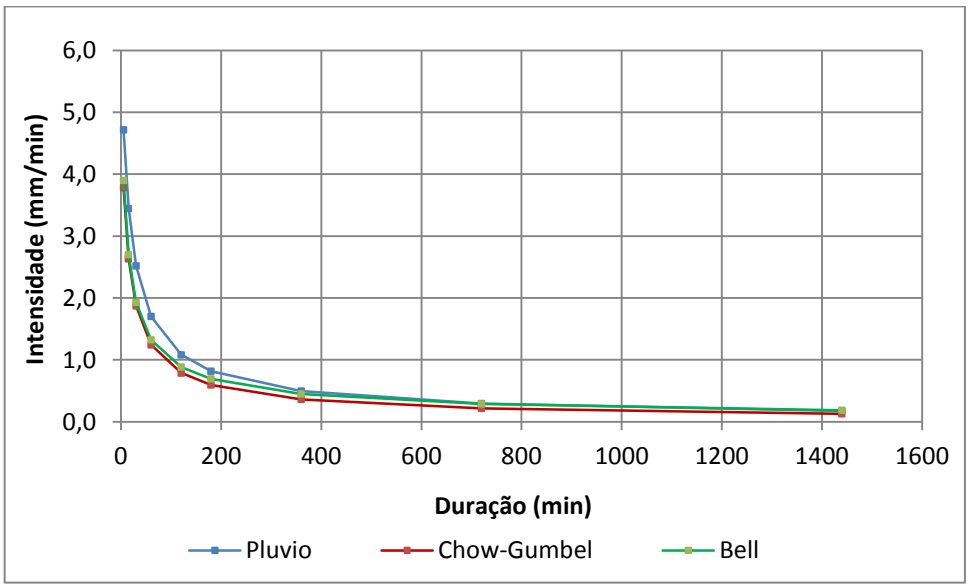

Figura 8: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 50 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS).

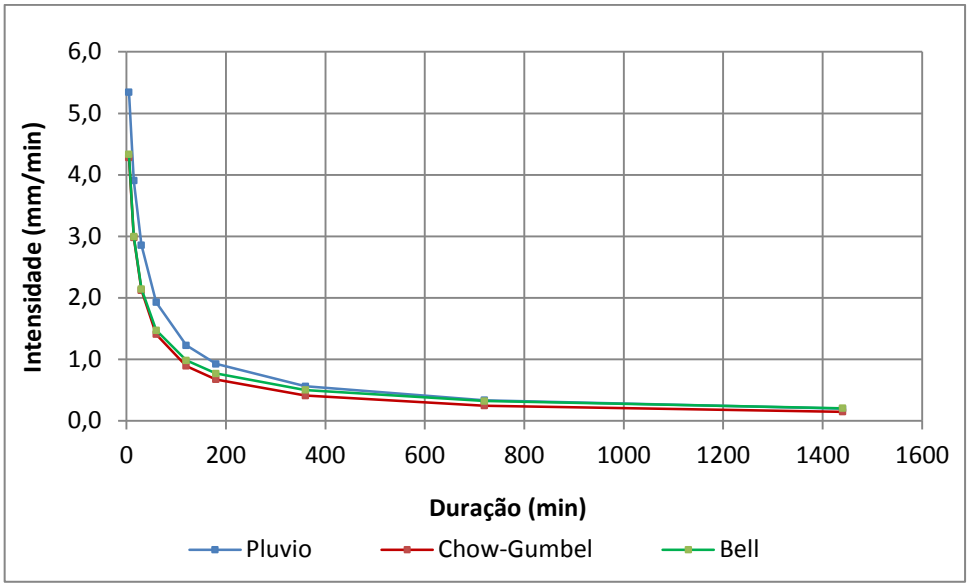

Figura 9: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 100 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS).

Da simples inspeção das figuras de 7 a 9 (e de figuras similares produzidas para os outros períodos de retorno) pode-se observar que as intensidades estimadas a partir da equação estabelecida com aplicação do software Pluvio são invariavelmente superiores àquelas apropriadas pelos métodos de Chow-Gumbel e de Bell, quando da estimativa de precipitações com durações inferiores a 600 minutos. Adicionalmente, para precipitações com durações superiores a 60 minutos, as intensidades apropriadas pelos métodos de Chow-Gumbel e Bell são similares.

A Tabela 12 apresenta os tempos de concentração, em minutos, estimados para a porção superior da bacia hidrográfica do rio Benevente, a partir da aplicação dos métodos de Dooge, Johnstone e Bransby-Williams. É relevante observar que o tempo de concentração estimado a partir da expressão de Johnstone foi substancialmente menor que aqueles apropriados pelas demais expressões consideradas neste estudo, com diferenças variando entre 77% (referente ao tempo de concentração estimado pela expressão proposta por Bransby-Williams) e 100% (Dooge).

A Tabela 13, por sua vez, apresenta os diferentes usos e ocupações do solo da área de estudo, indicando-se a área e tipo de solo associado a cada tipo de uso e ocupação. As informações disponíveis nesta tabela foram usadas para a estimativa

do valor de CN. O valor de CN estimado para a porção superior da bacia hidrográfica do rio Benevente foi 48, ressaltando as características rurais da região.

Tabela 12: Tempos de concentração estimados para a região de estudo.

Método	Tempo de concentração (min.)
Dooge	385
Johnstone	190
Bransby-Williams	337

Tabela 13: Registros fisiográficos da região de estudo para a estimativa do valor de CN.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Cambissolo Háplico	C	Afloramento/ Solo Exposto	0,000	0,000	87
		Agricultura	0,021	0,078	79
		Floresta Natural / Sombra	0,014	0,052	70
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	1,787	6,749	62
		Floresta Plantada em Crescimento	0,001	0,003	78
		Pastagem	17,115	64,638	71
		Pastagem / Sombra	0,015	0,059	81
		Vegetação Natural Secundária	0,456	1,723	73
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	Áreas urbanas	0,001	0,004	89
		Afloramento / Solo Exposto	0,050	0,188	72
		Agricultura	0,543	2,052	68
		Floresta Natural / Sombra	0,015	0,056	56
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	17,388	65,668	26
		Floresta Plantada em Crescimento	0,089	0,334	26
		Pastagem	60,382	228,041	47
		Pastagem / Sombra	0,030	0,112	47
		Restinga Arbustiva e Arbórea	0,000	0,001	45
		Vegetação Natural Secundária	2,094	7,908	36
			Média ponderada		48

As Figuras 10, 11 e 12 representam graficamente as vazões máximas estimadas pelo método SCS para o exutório da região hidrográfica estudada, resultantes de eventos de chuva com intensidade estimada pelos métodos de Chow-Gumbel, Bell e pelo *Software* Pluvio, associados a diferentes períodos de retorno e a durações iguais aos tempos de concentração estimados pelas expressões propostas por Dooge, Johnstone e Bransby-Williams.

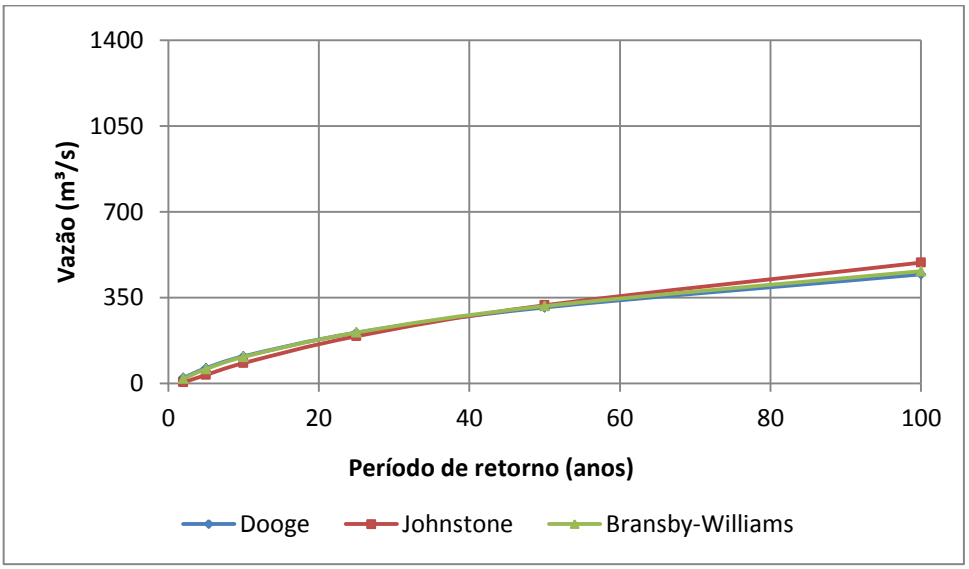

Figura 10: Vazões Máximas associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração - Intensidades pluviométricas estimadas a partir do método de Chow-Gumbel.

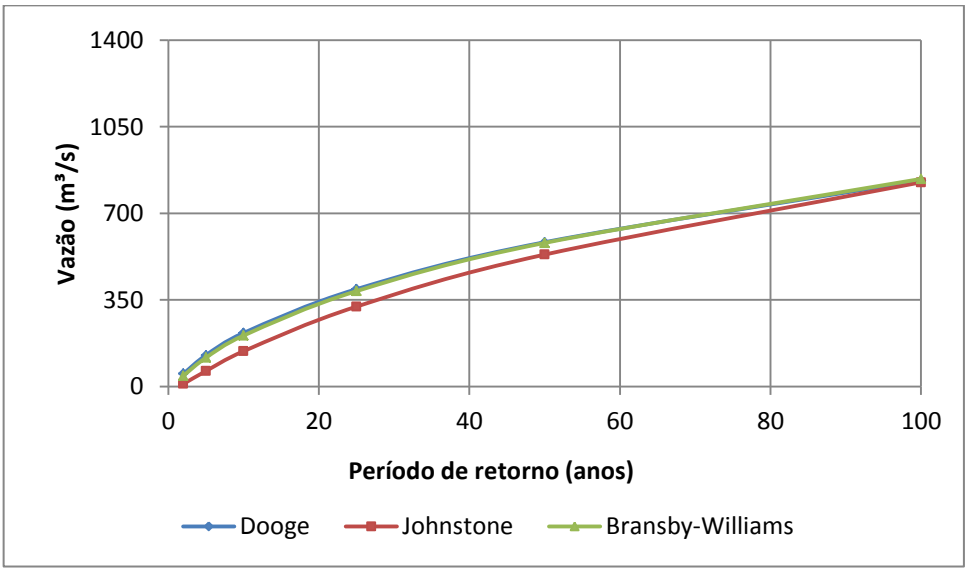

Figura 11: Vazões Máximas associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração - Intensidades pluviométricas estimadas a partir do método de Bell.

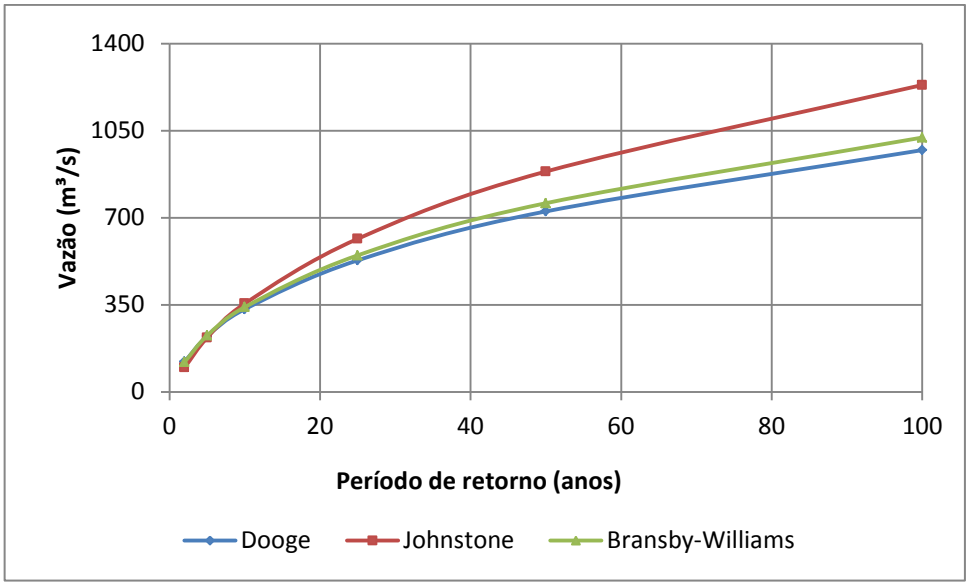

Figura 12: Vazões Máximas associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração - Intensidades pluviométricas estimadas a partir do *software* Pluvio.

A simples inspeção das figuras 10, 11 e 12 permite observar que as vazões de pico associadas às intensidades pluviométricas estimadas por meio do *Software* Plúvio foram substancialmente superiores que aquelas estimadas pelas demais alternativas de apropriação de chuvas intensas, quando da adoção de uma mesma formulação para apropriação do tempo de concentração. Adicionalmente, o menor tempo de concentração associados à expressão proposta por Johnstone produziu, usualmente, as maiores vazões de pico no exutório da bacia estudada.

Conforme estabelecido no capítulo reservado a Metodologia, o método SCS foi aplicado para diferentes sub-bacias que dão forma a área de estudo. Na sequência, as vazões máximas para o exutório da área de estudo são apresentadas considerando-se as seguintes abordagens:

- A partir do simples somatório das vazões máximas das diferentes sub-bacias, ignorando-se a necessidade de propagação dos picos de cheia e os efeitos dos menores valores de áreas e tempos de concentração associados às sub-bacias;
- A partir da soma das vazões das máximas produzidas em cada sub-bacia, considerando-se a translação dos hidrogramas de cheia de cada sub-bacia para o exutório da área de estudo.

As diferentes bacias consideradas quando da divisão da área de estudo estão indicadas na Figura 13, figura gerada pela ferramenta *Hydrology Modeling* do ArcGIS 9.3, de acordo com o procedimento apresentado no item 5.3. A discretização da área de estudo conduziu a sub-bacias com áreas que variaram entre 0,5 Km² e 115 Km², valores substancialmente inferiores ao total da área de estudo (377 km^2).

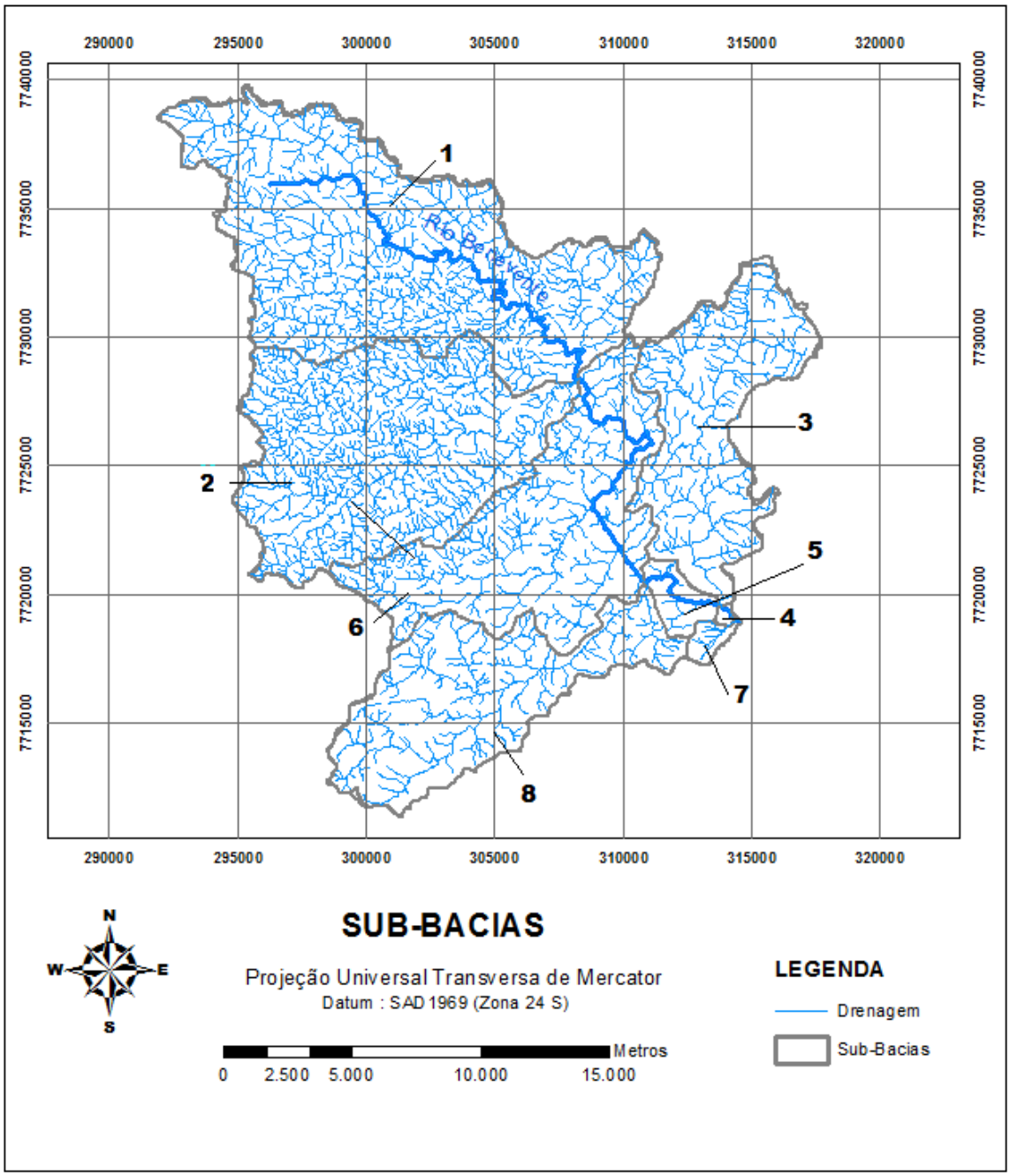

Figura 13: Mapa hidrológico das sub-bacias estudadas.

A Tabela 14 apresenta as características fisiográficas consideradas para o cálculo dos tempos de concentração das sub-bacias em estudo.

Tabela 14: Características fisiográficas consideradas para os cálculos dos tempos de concentração das sub-bacias em estudo.

Sub-bacia	Área (Km²)	Comprimento do talvegue (km)	Declividade (m/m)
1	114,4600	19,2200	0,0450
2	84,6500	14,2200	0,0370
3	49,5300	13,2540	0,0410
4	0,4820	1,0780	0,046
5	5,2520	3,1140	0,0770
6	67,3040	12,1900	0,0850
7	2,1130	2,0440	0,2790
8	53,8720	14,0130	0,0320

A Tabela 15, por sua vez, apresenta os tempos de concentração estimado para cada sub-bacia, em minutos, apropriados a partir dos métodos de Dooge, Johnstone e Bransby-Williams. É relevante observar que os tempos de concentração estimados, a partir da expressão de Johnstone, foram, usualmente, menores que aqueles apropriados pelas demais expressões consideradas, com diferenças variando entre 55% (referente ao tempo de concentração estimado pela expressão proposta por Bransby-Williams) e 35% (Dooge).

Tabela 15: Tempos de concentração estimados para as diferentes sub-bacias da área de estudo.

Sub-bacia	Tempo de concentração (min.)		
	Dooge	**Johnstone**	**Bransby-Williams**
1	259	192	324
2	236	173	257
3	186	163	247
4	27	45	31
5	67	68	64
6	187	130	191
7	37	40	36
8	201	178	273

Similarmente ao procedimento empregado para toda a região de estudo, foram estimados, por tipo de solo, as áreas associadas a cada tipo de uso e ocupação de cada sub-bacia, calculando-se, na sequência, o correspondente valor de CN. A Tabela 16 apresenta os resultados referentes a sub-bacia 3, quando da estimativa do valor de CN. Para esta sub-bacia, o parâmetro CN assumiu o valor de 52, ressaltando as características rurais da área. Os registros fisiográficos para a apropriação dos valores de CN para as demais sub-bacias estudadas estão apresentados nas Tabelas 25 a 31, tabelas resumidas no Apêndice C.

Tabela 16: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 3.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Cambissolo Háplico	C	Afloramento / Solo Exposto	0,0000	0,0000	87
		Agricultura	0,0007	0,0342	79
		Floresta natural / Sombra	0,0010	0,0499	70
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,0658	3,2572	62
		Pastagem	0,2645	13,1005	71
		Pastagem / Sombra	0,0010	0,0501	81
		Vegetação Natural Secundária	0,0146	0,7211	73
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	Afloramento / Solo Exposto	0,0002	0,0095	72
		Agricultura	0,0034	0,1699	68
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,1124	5,5665	26
		Floresta Plantada em Crescimento	0,0011	0,0529	56
		Pastagem	0,5222	25,8667	47
		Pastagem / Sombra	0,0009	0,0444	47
		Restinga Arbustiva e Arbórea	0,00002	0,0009	45
		Vegetação Natural Secundária	0,0122	0,6063	36
			Média ponderada		52

As Figuras 14, 15 e 16, representam graficamente as vazões máximas estimadas pelo método SCS, para o exutório da sub-bacia 3, resultantes de eventos de chuva com intensidade estimada pelos métodos de Chow-Gumbel, Bell e pelo *Software* Pluvio, associados a diferentes períodos de retorno e aos tempos de concentração estimados pelas expressões propostas por Dooge, Johnstone e Bransby-Williams. As vazões máximas estimadas para as demais sub-bacias em estudo estão representadas graficamente no Apêndice D.

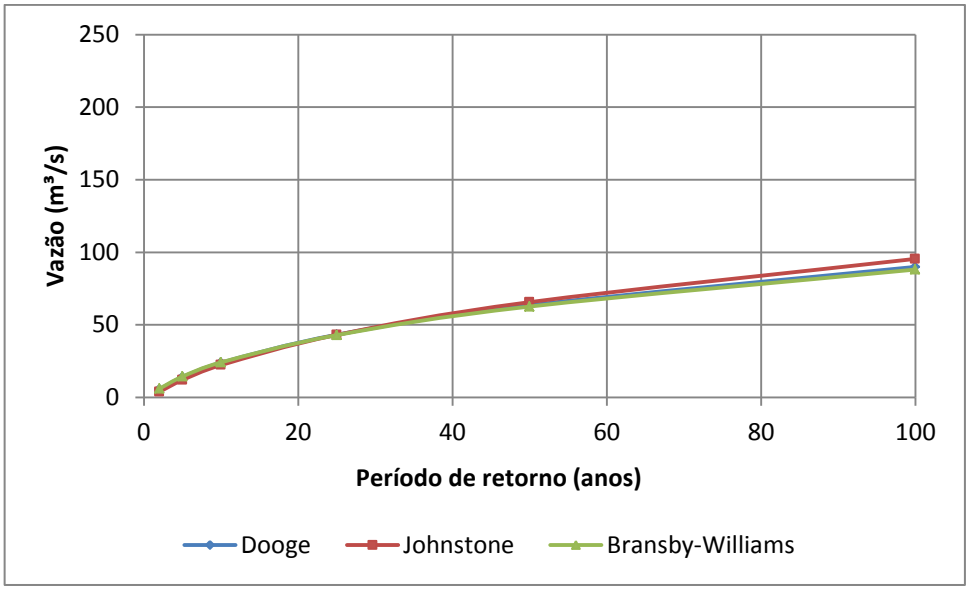

Figura 14: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 3, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

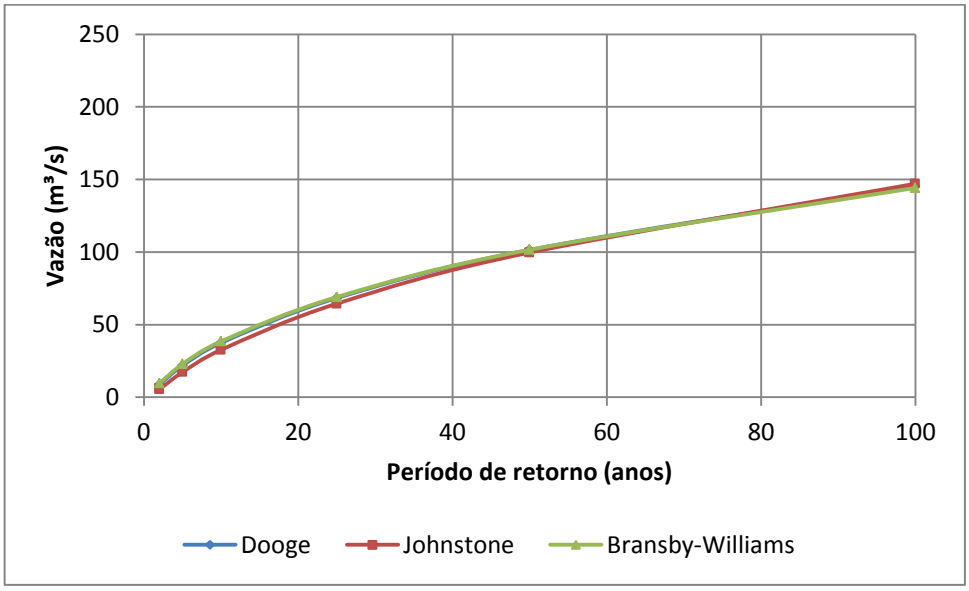

Figura 15: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 3, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

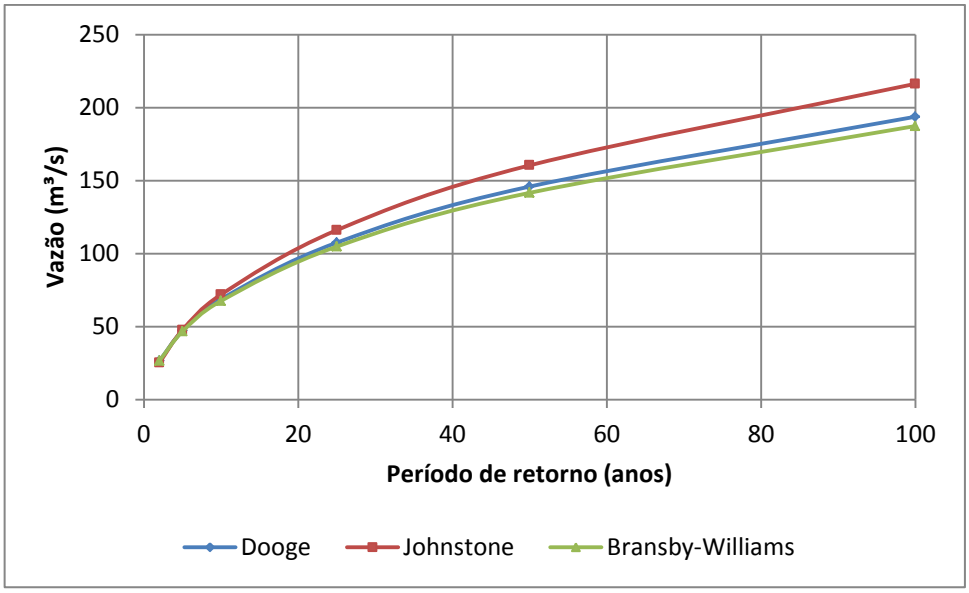

Figura 16: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 3, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

A simples inspeção das Figuras 14, 15 e 16 (e de figuras similares produzidas para as demais sub-bacias) permite observar que as vazões de pico associadas às intensidades pluviométricas estimadas por meio do *Software* Plúvio foram substancialmente superiores que aquelas estimadas pelas demais alternativas de apropriação de chuvas intensas, quando da adoção de uma mesma formulação para apropriação do tempo de concentração, repetindo-se padrão observado quando da aplicação do método SCS uma única vez e para toda a área de estudo.

As figuras 17 e 18 representam graficamente vazões máximas estimadas a partir de intensidades pluviométricas apropriadas pelo método de Chow-Gumbel e da adoção de tempos de concentração apropriado pela expressão proposta por Dooge.

Na Figura 17, são apresentados, por período de retorno, os valores de vazão estimados com aplicação do método SCS ***a)*** uma única vez e para toda a porção superior da bacia hidrográfica do rio Benevente (vazão total) e ***b)*** a partir do simples somatório das vazões associadas às diferentes sub-bacias (somatório de vazões).

A Figura 18, por sua vez, também apresenta a vazão para toda a área de estudo. No entanto, a vazão decorrente do somatório das vazões das sub-bacias foi produzida a partir da incorporação do efeito da translação dos hidrogramas do exutório de cada sub-bacia para o exutório da área de estudo.

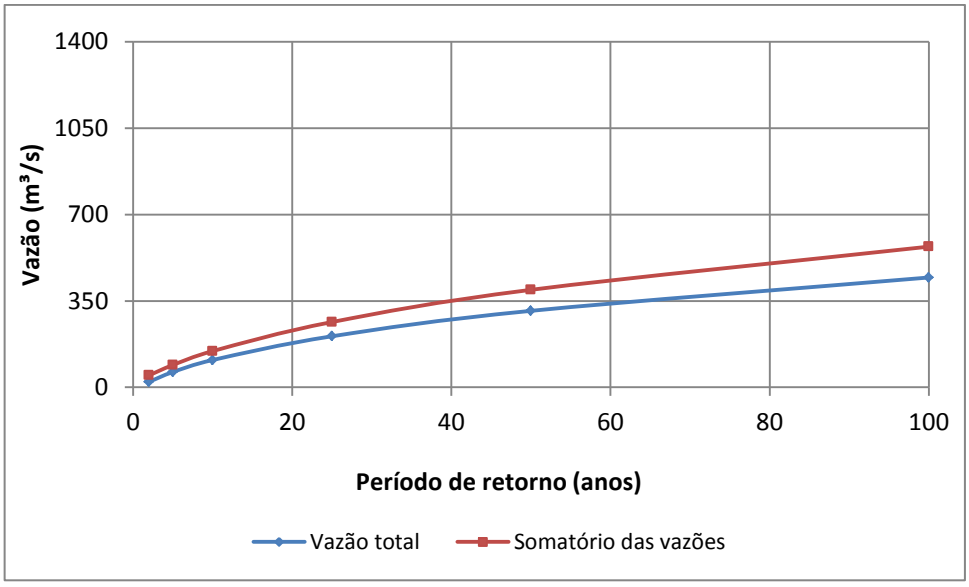

Figura 17: Vazões máximas associadas a diferentes períodos de retorno, considerando tempo de concentração apropriado pela expressão proposta por Dooge e intensidade pluviométrica estimada pelo método de Chow-Gumbel.

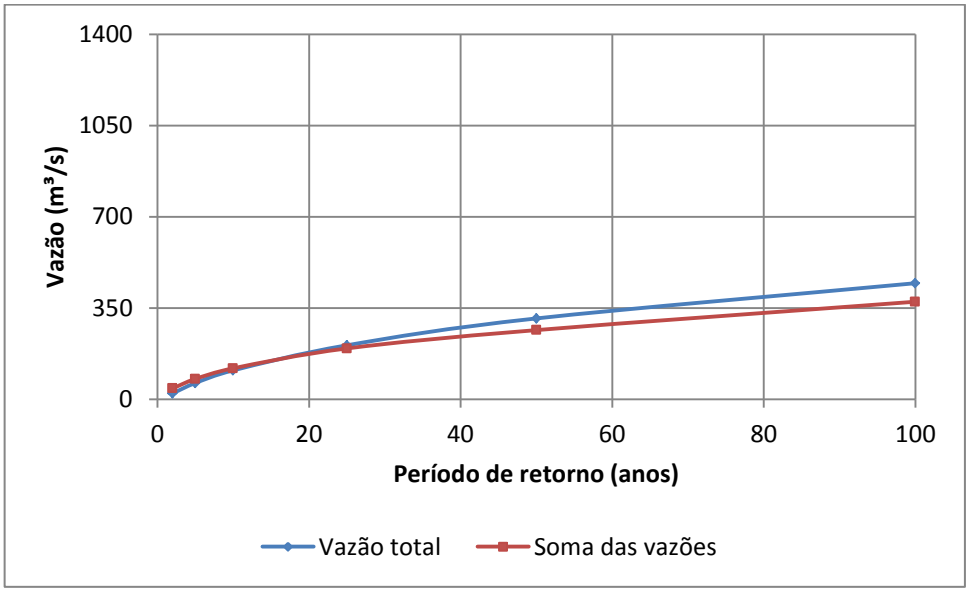

Figura 18: Vazões máximas associadas a diferentes períodos de retorno, considerando tempo de concentração apropriado pela expressão proposta por Dooge, intensidade pluviométrica estimada pelo método de Chow-Gumbel e a translação dos hidrogramas do exutório de cada sub-bacia para o exutório da área de estudo.

Da Figura 17 (e de figuras semelhantes produzidas para os métodos de estimativa de tempos de concentração e intensidades pluviométricas) é possível observar que as vazões máximas para o exutório da área de estudo, estimadas a partir do

somatório das vazões das diferentes sub-bacias, foram superiores às vazões máximas estimadas a partir da aplicação do método SCS uma única vez e para toda a porção superior da bacia hidrográfica do Rio Benevente. Para o período de retorno de 50 anos, as vazões máximas estimadas a partir da somatório de vazões superaram as vazões máximas considerando a integralidade da área de estudo em aproximadamente 27%.

No entanto, a incorporação do efeito da translação dos hidrogramas (Figura 18), aproximou as curvas que descrevem a variação das vazões no exutório da área de estudo. A vazão máxima associada ao período de retorno de 50 anos, estimada a partir da aplicação do método SCS uma única vez e para toda a área de estudo, é aproximadamente 15% maior que aquela produzida pelo somatório das vazões correspondentes aos picos dos hidrogramas transladados para o exutório da área de estudo.

As tabelas de 17 a 22 apresentam as vazões máximas com períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, estimadas para o exutório da área de estudo, quando do ajuste das distribuições de probabilidade de Gumbel, Pearson 3, Logpearson 3 e Lognormal 3 à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica de Matilde. Estas tabelas também apresentam os intervalos de confiança associados a variações de 5% e o erro padrão de estimativa para cada distribuição de probabilidade utilizada.

Tabela 17: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 2 anos.

Distribuição	**Vazões máximas (m^3/s)**			
	Intervalo de confiança inferior (95%)	**Intervalo de confiança superior (95%)**	**Vazão máxima (m³/s)**	**Erro padrão**
Gumbel	21,08	26,24	23,66	1,32
Pearson 3	19,70	26,56	23,13	1,75
Logpearson 3	20,62	25,64	23,13	1,28
Lognormal 3	20,49	26,83	23,66	1,62

Tabela 18: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 5 anos.

Distribuição	Vazões máximas (m^3/s)			
	Intervalo de confiança inferior (95%)	Intervalo de confiança superior (95%)	Vazão máxima (m³/s)	Erro padrão
Gumbel	29,21	38,35	33,78	2,33
Pearson 3	28,28	37,13	32,71	2,26
Logpearson 3	28,38	37,00	32,69	2,20
Lognormal 3	28,15	37,11	32,63	2,29

Tabela 19: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 10 anos.

Distribuição	Vazões máximas (m^3/s)			
	Intervalo de confiança inferior (95%)	Intervalo de confiança superior (95%)	Vazão máxima (m³/s)	Erro padrão
Gumbel	34,21	46,75	40,48	3,20
Pearson 3	33,17	45,09	39,13	3,04
Logpearson 3	33,28	45,51	39,39	3,12
Lognormal 3	32,64	45,02	38,83	3,16

Tabela 20: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 25 anos.

Distribuição	Vazões máximas (m^3/s)			
	Intervalo de confiança inferior (95%)	Intervalo de confiança superior (95%)	Vazão máxima (m³/s)	Erro padrão
Gumbel	40,42	57,48	48,95	4,35
Pearson 3	37,54	56,81	47,17	4,92
Logpearson 3	39,32	57,22	48,27	4,57
Lognormal 3	38,26	55,24	46,75	4,33

Tabela 21: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 50 anos.

Distribuição	Vazões máximas (m^3/s)			
	Intervalo de confiança inferior (95%)	**Intervalo de confiança superior (95%)**	**Vazão máxima (m³/s)**	**Erro padrão**
Gumbel	44,98	65,48	55,23	5,23
Pearson 3	39,82	66,32	53,07	6,76
Logpearson 3	43,76	66,58	55,17	5,82
Lognormal 3	42,45	62,96	52,70	5,23

Tabela 22: Vazões máximas, em m³/s, estimadas por diferentes distribuições de probabilidade – Período de retorno de 100 anos.

Distribuição	Vazões máximas (m^3/s)			
	Intervalo de confiança inferior (95%)	**Intervalo de confiança superior (95%)**	**Vazão máxima (m³/s)**	**Erro padrão**
Gumbel	49,50	73,43	61,47	6,11
Pearson 3	41,54	76,21	58,87	8,85
Logpearson 3	48,15	76,47	62,31	7,22
Lognormal 3	46,65	70,75	58,70	6,15

As Figuras 20, 21 e 22, por sua vez, representam graficamente a comparação entre as vazões máximas estimadas quando da adoção do método SCS (considerando o tempo de concentração apropriado pelo método de Dooge) e a partir das diferentes distribuições de probabilidade consideradas. Os gráficos produzidos para os demais métodos de apropriação de tempo de concentração encontram-se reunidos no Apêndice E.

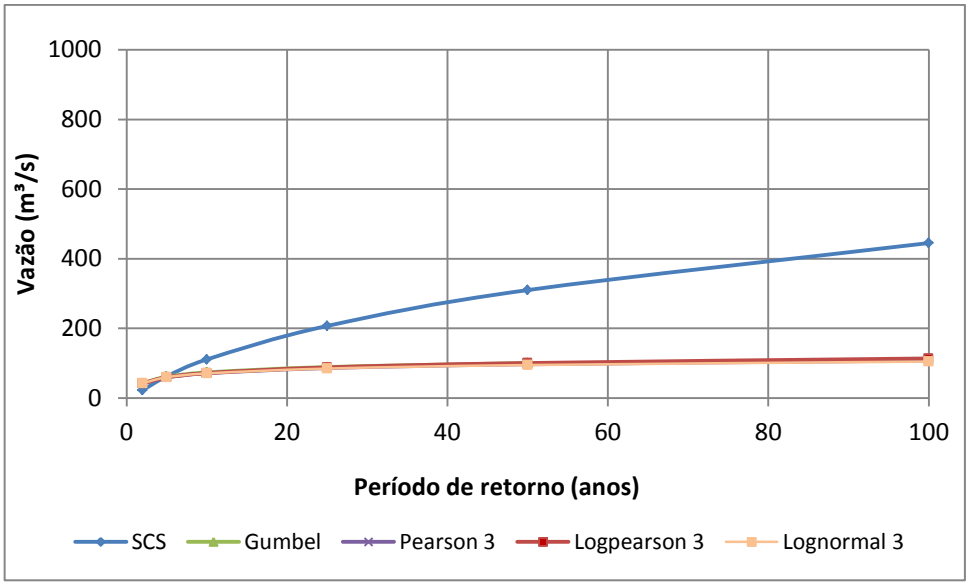

Figura 18: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Chow-Gumbel e da adoção de tempo de concentração apropriado por Dooge.

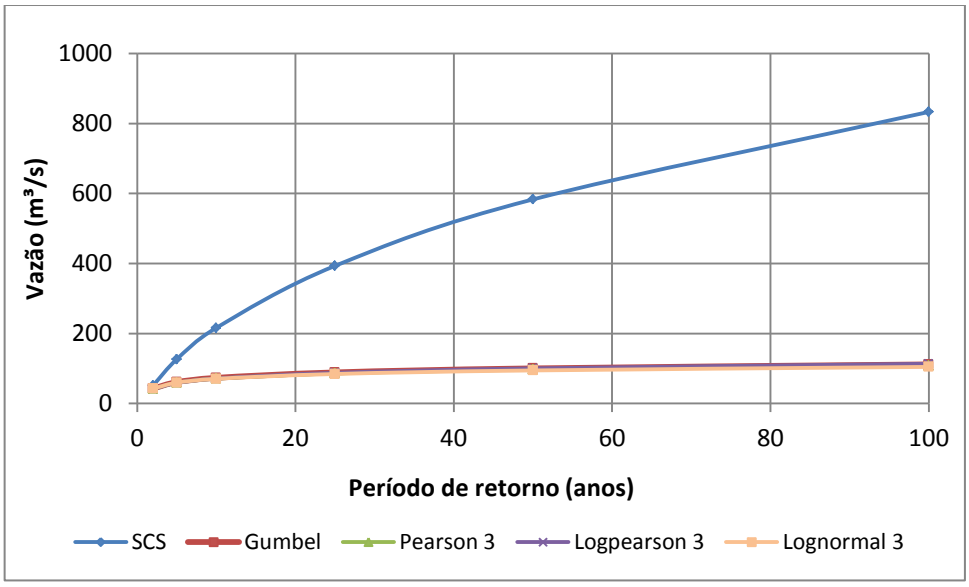

Figura 19: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Bell e da adoção de tempo de concentração apropriado por Dooge.

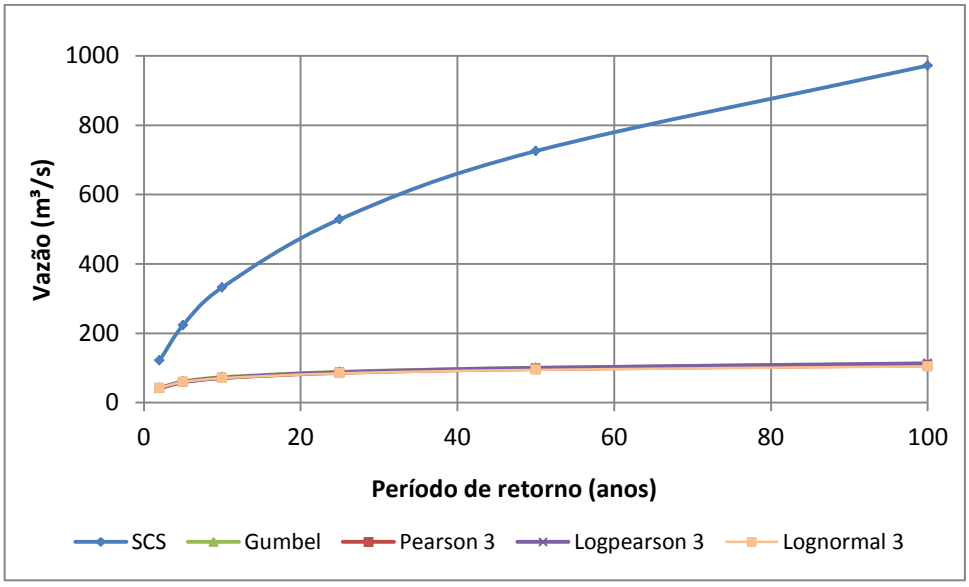

Figura 20: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada pelo *Software* Pluvio e da adoção de tempo de concentração apropriado por Dooge.

Da inspeção das Figuras 20, 21 e 22, deve-se observar que as vazões estimadas pelo Método *Soil Convervation Service* são invariavelmente superiores às vazões máximas estimadas a partir da análise probabilística da série histórica de vazões, exceto para pequenos períodos de retorno, quando da adoção de um evento de chuva intensa estimada pelo método de Chow-Gumbel e tempo de concentração estimado pelo método de Johnstone (resultados reunidos no Apêndice E).

Ainda que o método *Soil Convervation Service* constitua alternativa útil e versátil para estimativa de vazões máximas, seu emprego demanda cuidadosa seleção das variáveis que lhe dão forma. A combinação de valores para variáveis associadas ao uso e ocupação do solo, condição de infiltração, tempo de concentração e intensidade pluviométrica pode produzir valores que divergem dos resultados da análise probabilística por ordem de grandeza.

É relevante observar que, embora o período de retorno constitua a variável independente nos gráficos das figuras 20, 21 e 22 (e das figuras similares reunidas no Apêndice E), na avaliação de vazões máximas a partir de distribuições de probabilidade, o período de retorno constitui variável independente das funções de densidade de probabilidade que estimam diretamente valores de vazão. No método SCS, o período de retorno constitui variável independente para estimativa de

intensidades pluviométricas, variáveis a partir das quais são estimados os valores de vazões máximas. Neste contexto, os gráficos sugerem que uma precipitação intensa com um determinado período de retorno produza uma vazão máxima associada ao mesmo período de retorno, o que não é necessariamente correto. Em função da ocorrência de precipitações antecedentes e das condições de infiltração, precipitações idênticas podem produzir efeitos substancialmente diferentes numa mesma bacia hidrográfica.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões do presente trabalho podem ser assim sumarizadas:

- A partir da revisão bibliográfica conduzida, foram identificadas aplicações do método SCS para estimativa de vazões máximas em bacias de drenagem com áreas variando de 3 a 2600 Km²;
- As intensidades pluviométricas estimadas a partir do software Pluvio apresentaram-se invariavelmente superiores àquelas apropriadas pelos métodos de Chow-Gumbel e de Bell, quando da estimativa de precipitações com durações inferiores a 600 minutos. Para precipitações com durações superiores a 60 minutos, as intensidades apropriadas pelos métodos de Chow-Gumbel e Bell são similares.
- As vazões máximas estimadas pelo método SCS, consideradas as intensidades pluviométricas apropriadas por meio do Software Pluvio, foram substancialmente maiores que aquelas estimadas pelas demais alternativas de apropriação de chuvas intensas, quando da adoção de uma mesma formulação para apropriação do tempo de concentração.
- A aplicação do método SCS para sub-bacias da porção superior do Rio Benevente, ignorando-se a necessidade de propagação dos picos de cheia, conduziu a vazões máximas invariavelmente maiores que aquelas estimadas quando da aplicação do referido método uma única vez e para toda a área de estudo. A incorporação da translação dos hidrogramas associados às sub-bacias para o exutório da área de estudo atenuou as referidas diferenças;
- A aplicação do método SCS produziu estimativas de vazões máximas que superaram em até uma ordem de grandeza as vazões máximas estimadas com auxílio do método probabilístico.

Como recomendações são consideradas relevantes:

- Conduzir estudos que considerem a estimativa de vazões máximas considerando-se simultaneamente a discretização da área de estudo e a propagação dos picos de cheia.

- Conduzir estudos que permitam a comparação das estimativas conduzidas pelo método SCS com os que seriam obtidos a partir de outros modelos chuva-vazão.
- Conduzir estudos que permitam a incorporação de coeficientes de correção das vazões máximas em função das áreas de drenagem das bacias hidrográficas.

8 REFERÊNCIAS

BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 5 n.4 Out/Dez 2000.

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

CARVALHO, F. F.; MARQUES, P.; PORTELA, M. M. **Hietogramas de projecto para a análise de cheias baseada no modelo do Hidrograma Initário do *Soil Conservation Service* (SCS)**. 5º Congresso da Água - A água e o desenvolvimento sustentável: desafios para o novo século. Asspciação Portuguesa de Recursos Hídricos – APRH. 2000.

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

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S.; ROSSKOFF, J. L. C. **Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.14, n.1, p.46–54, Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. 2010.

FERREIRA, C. C. M. Zoneamento Agroclimático para Implantação de Sistemas Agroflorestais com Eucaliptos, em Minas Gerais. Viçosa, UFV, 1997.

FIORIO, P. R.; DUARTE, S. N.; RODRIGUES, G. O.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R. A. **Comparação de equações de chuvas intensas para localidade do estado de São Paulo**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.32, n.6, p.1080-1088, 2012.

FRANCO, J. E. **Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional**. 2004. 155 f. Dissertação (Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

GARCIA, F.; RAMOS, D. A. **Comparação entre custos de obras de macrodrenagem dimensionadas com vazões calculadas pelo método Racional e pelo método do SCS ("*Soil Conservation Service*") na sub-bacia do rio Morro**

Alto, em Joinville, SC. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, 2007.

GENOVEZ, A. M.; **Vazões Máximas**. In: Paiva, J. B. D.; Paiva, E. M. C. D. Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacia Hidrográficas. Porto Alegre:ABRH, 2003.

IEMA. Instituto Estadual do Meio Ambiente do estado do Espírito Santo. **As águas do Rio Benevente**. Disponível em: <http//www.iema.es.gov.br>. Acesso em: 31 jan. 2013.

JABUR, A. S.; RIZZI, N. E. **Estimativas da vazão máxima e capacidade de saturação hídrica da bacia hidrográfica do alto do rio Ligeiro em Pato Branco, PR**. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 41, n. 4, p. 833 - 846, out./dez. 2011.

KITE, G.W. **Frequency and risk analyses in hidrology**. Fort Collins, Water Resources,1978.224p.

LOU, F. R.**Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUCAS, E. W. M; SOUSA, F. A.; SILVA, S. F. D. S.; LUCIO, P. S.; **Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingú – Pará**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.3, 308-322, 2009.

MAGALHÃES, S. F. C.; VASCONCELOS, T. T.; FRANCELINO, M. R.; SILVA, L. D. B.; SALAMENE, S. **Uso de geoprocessamento na estimativa da vazão da micro-bacia do córrego Atalaia em Macaé, RJ**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2010.

MARTINS, C. A. SILVA.; BORGES, T. S.; SILVEIRA. F. C; CECÍLIO, R. A. **Caracterização da precipitação da bacia hidrográfica do rio Benevente**. XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. 2011.

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

MELLO, L. T. A. **Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Viçosa : UFV, 2003.

MIRANDA, E. E.; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 23 jun. 2013.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

OLIVEIRA, L. F. C.; ANTONINI, J. C. A., GRIEBELER, N. P. **Estimativas de chuvas intensas para o estado de Goiás**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.28, n.1, p.22-33, jan./mar. 2008.

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, 30(1): 23-27, jan./jun. 2000.

PINTO, N.L.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A. **Hidrologia de Superfície**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.

PINTO, D. S. S.; ROCHA. L. M.; TELES, G. S.; MELLO JÚNIOR, A. V.; PEDROTTI, A. **Aplicação do método no Natural Resources Conservation Cervice com subsídio de um sistema de informações geográficas na bacia do Rio das Pedras, Sergipe**. IV Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. 2008.

PINTO, N. L. S.*et al*. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

RAMOS, C. L; BARROS, M. T. L.; PALOS, J. C. F. **Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo**. Prefeitura do Município de São Paulo e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – CTH, 1999.

RADAMBRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra / Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, 1983. 775p.

REBOUÇAS, E. A.; REIS, J. A. T. **Estabelecimento de Equações de Chuvas Intensas para a Bacia Hidrográfica do Rio Doce, ES**. Trabalho de conclusão de Curso de Saneamento Ambiental. CEFETES, Vitória-ES.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Calos: EESC/USP, 1998.

SANTOS, L. C. C. **Estimativas de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos**. 172 f. Dissertação (mestrado em engenharia ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2010.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.4 Out/Dez. 2005.

SCHARFFENBERG, W. A.; FLEMING, M. J. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS – User`s Manual**. Hydrologic Engineering Center, HEC. Davis, CA. 2010.

SILVA, D. D.; PINTO, F. R. L.; PRUSKI, F. F.; PINTO,F. A. **Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para o Rio de Janeiro e o Espírito Santo**.Eng. Agríc., Jaboticabal, v.18, n.3, p.11-21, mar. 1999.

SOIL CONSERVATION SERVICE - SCS.**Urban Hydrology for Small Watersheds**.Technical release 55, U.S. Department of agriculture, Washing DC. 1986.

SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECON, P. R.; SOUZA, J. R. C. SisCAH 1.0 – Sistema Computacional para Análises Hidrológicas. Gupo de Pesquisa em Recursos Hídricos. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.; BARROS, M.T. **Drenagem urbana**. Editora da Universidade UFRGS. Porto Alegre: ABRH, 1995.

TUCCI, C.E.M. **Inundações urbanas**. 1ª Ed. Vol. 11. Editora RHAMA. Porto Alegre: ABRH, 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). Departamento de Engenharia Agrícola. Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos. **Softwares - Plúvio**. Viçosa,

2006. Disponível em: < http://www.ufv.br/dea/gprh/softwares.htm>. Acesso em: 10 set. 2011.

VIANNA, A.P.P. **Utilização de modelagens Hidrológica e Hidráulica Associadas a um sistema de informações geográficas para mapeamento de áreas inundáveis – Estudo de caso: município de Itajubá, MG**. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, 2000, MG.

VILLELA S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. 1ª ed. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Companhia Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978.

APÊNDICE A – REGISTROS HIDROLÓGICOS

Tabela 23: Precipitações máximas anais registradas na estação Matilde (DNOS).

Ano	Precipitação máxima anual (mm)	Ano	Precipitação máxima anual (mm)
1961	69,2	1986	58,2
1962	102,6	1987	97,4
1963	94,2	1988	55,4
1964	135,8	1990	67,8
1965	87,4	1991	75,6
1966	127	1992	77,4
1967	66,6	1993	75,2
1968	108	1994	129,8
1969	77,8	1995	127
1970	79,8	1996	70,2
1971	128	1997	77,2
1972	86,8	1998	65,2
1973	105,8	1999	62,4
1974	74,2	2000	66,8
1975	90,4	2001	135,2
1976	98,6	2002	105,4
1977	73,8	2003	126
1978	57,6	2004	90
1979	75,6	2005	87,5
1980	84,6	2006	88,4
1981	129	2007	141
1982	80,1	2008	78,3
1983	80,9	2009	86,2
1984	68,4	2010	130,8
1985	60,8	2011	97,4

Tabela 24: Vazões máximas anais registradas na estação Matilde.

Ano	Vazão máxima anual (mm)	Ano	Vazão máxima anual (mm)
1950	14,40	1978	16,40
1951	30,70	1979	53,90
1952	19,80	1980	34,30
1953	16,80	1981	34,30
1954	11,50	1982	39,80
1955	9,90	1983	26,20
1956	37,40	1984	22,30
1957	30,00	1985	29,30
1958	18,90	1986	9,91
1959	26,40	1987	28,40
1960	58,60	1988	15,30
1961	18,30	1989	17,80
1962	17,60	1990	-
1963	14,80	1991	18,10
1964	35,10	1992	31,60
1965	20,00	1993	25,40
1966	9,73	1994	30,70
1967	17,40	1995	17,10
1968	38,20	1996	22,50
1969	20,00	1997	22,70
1970	23,00	1998	18,70
1971	43,80	1999	16,70
1972	44,60	2000	23,47
1973	18,90	2001	32,41
1974	33,30	2002	20,47
1975	18,10	2003	23,18
1976	21,90	2004	19,74
1977	24,30	2005	25,78

APÊNDICE B – INTENSIDADES PLUVIOMÉTRICAS

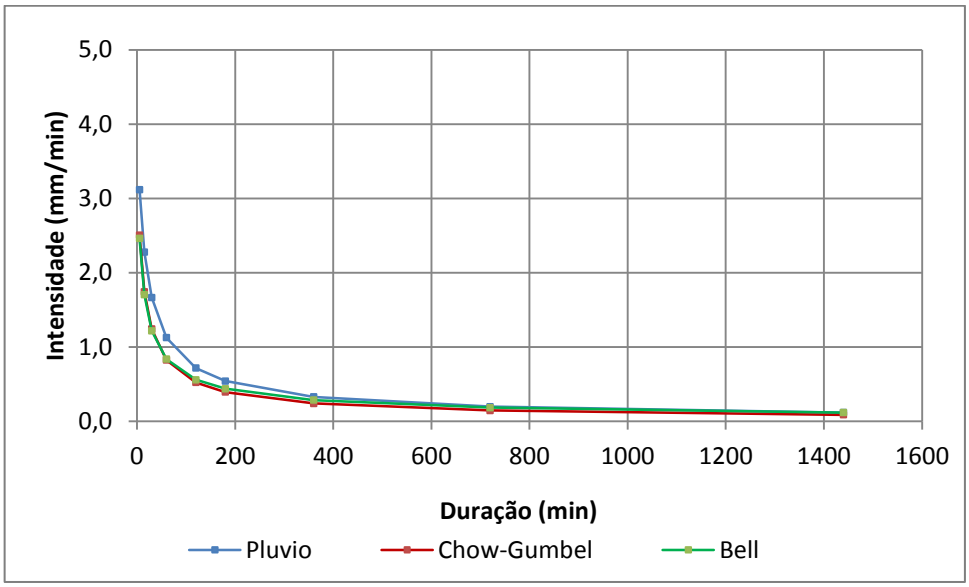

Figura 21: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 5 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS).

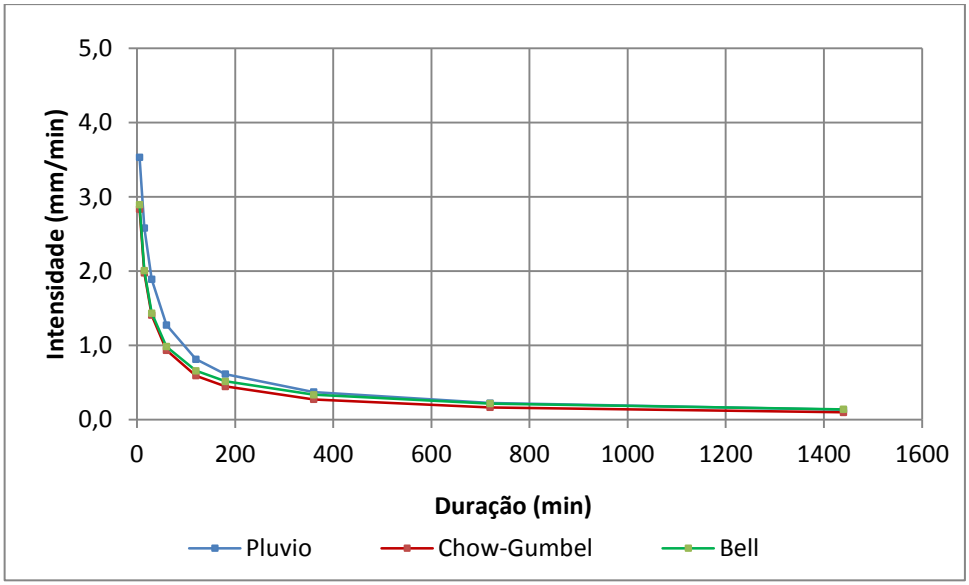

Figura 22: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 10 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS).

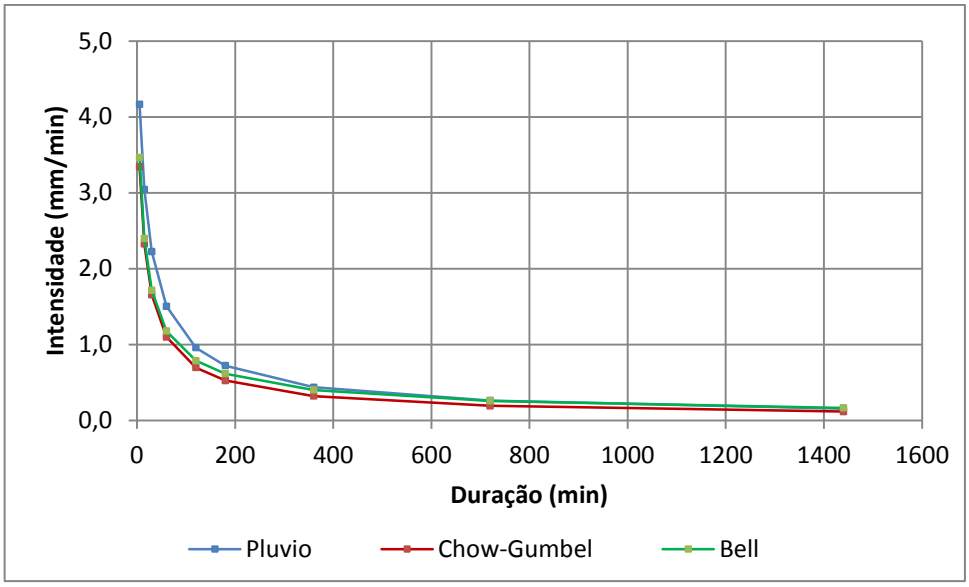

Figura 23: Intensidades de chuva associadas ao período de retorno de 25 anos - Resultados para a estação Matilde (DNOS).

APÊNDICE C - TIPO DE SOLO, USOS E OCUPAÇÃO DO SOLO E VALOR DE CN PARA AS SUB-BACIAS

Tabela 25: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 1.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	Afloramento / Solo Exposto	0,001	0,100	72
		Agricultura	0,004	0,410	68
		Floresta natural / Sombra	0,001	0,050	56
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,328	32,520	26
		Floresta Plantada em Crescimento	0,001	0,070	56
		Pastagem	0,629	77,020	47
		Pastagem / Sombra	0,001	0,050	47
		Vegetação Natural Secundária	0,037	4,250	36
			Média ponderada		41

Tabela 26: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 2.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	Afloramento / Solo Exposto	0,001	0,080	72
		Agricultura	0,017	1,420	68
		Floresta natural / Sombra	0,001	0,010	56
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,268	22,720	26
		Floresta Plantada em Crescimento	0,002	0,180	56
		Pastagem	0,682	57,700	47
		Vegetação Natural Secundária	0,030	2,530	36
			Média ponderada		41

Tabela 27: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 4.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Cambissolo Háplico	C	Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,020	0,010	62
		Pastagem	0,958	0,460	71
		Vegetação Natural Secundária	0,022	0,010	73
			Média ponderada		71

Tabela 28: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 5.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Cambissolo Háplico	C	Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,009	0,045	62
		Pastagem	0,983	5,161	71
		Pastagem / Sombra	0,001	0,001	81
		Vegetação Natural Secundária	0,008	0,045	73
			Média ponderada		71

Tabela 29: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 6.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Cambissolo Háplico	C	Agricultura	0,0001	0,01	79
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,0162	1,09	62
		Pastagem	0,1142	7,68	71
		Pastagem / Sombra	0,0000	0,00	81
		Vegetação Natural Secundária	0,0028	0,19	73
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	Áreas urbanas	0,001	0,004	89
		Afloramento / Solo Exposto	0,001	0,002	72
		Agricultura	0,001	0,050	68
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,071	4,760	26
		Pastagem	0,787	52,970	47
		Pastagem / Sombra	0,000	0,010	47
		Vegetação Natural Secundária	0,007	0,500	36
			Média ponderada		49

Tabela 30: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 7.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Cambissolo Háplico	C	Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,005	0,010	62
		Pastagem	0,981	2,072	71
		Vegetação Natural Secundária	0,014	0,030	73
			Média ponderada		71

Tabela 31: Tipo de solo, usos e ocupação do solo e valor de CN para a Sub-bacia 8.

Tipo de solo	Classificação do solo	Uso do solo	% da Área	Área (Km²)	CN
Cambissolo Háplico	C	Agricultura	0,001	0,040	79
		Floresta natural / Sombra	0,001	0,002	70
		Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,043	2,340	62
		Floresta Plantada em Crescimento	0,001	0,003	78
		Pastagem	0,671	36,160	71
		Pastagem / Sombra	0,001	0,010	81
		Vegetação Natural Secundária	0,013	0,730	73
Latossolo Vermelho-Amarelo	A	Floresta Natural Primária ou Secundária Avançada ou Média	0,002	0,100	26
		Pastagem	0,269	14,480	47
		Vegetação Natural Secundária	0,001	0,020	36
			Média ponderada		64

APÊNDICE D – VAZÕES MÁXIMAS DAS SUB-BACIAS

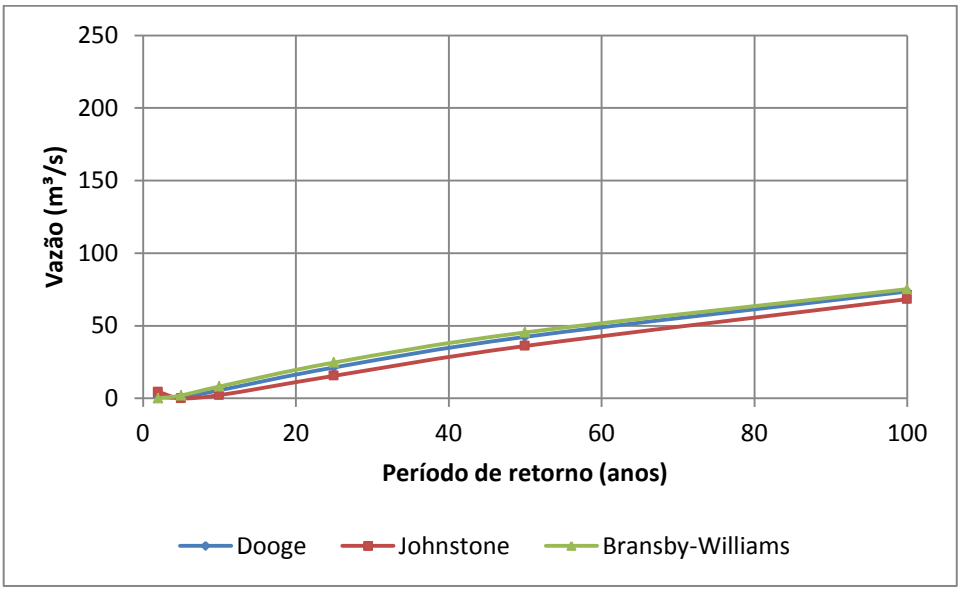

Figura 24: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 1, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

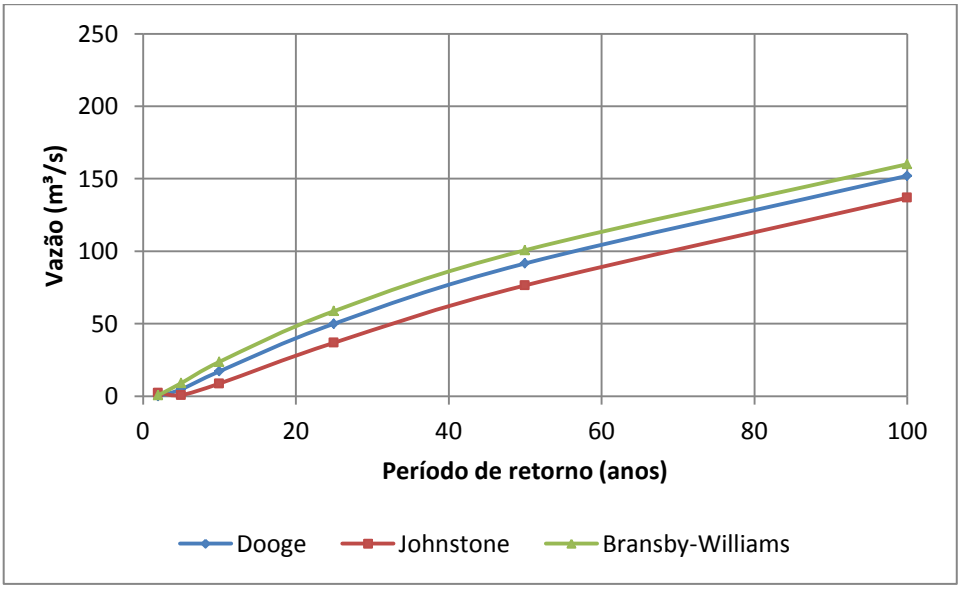

Figura 25: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 1, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

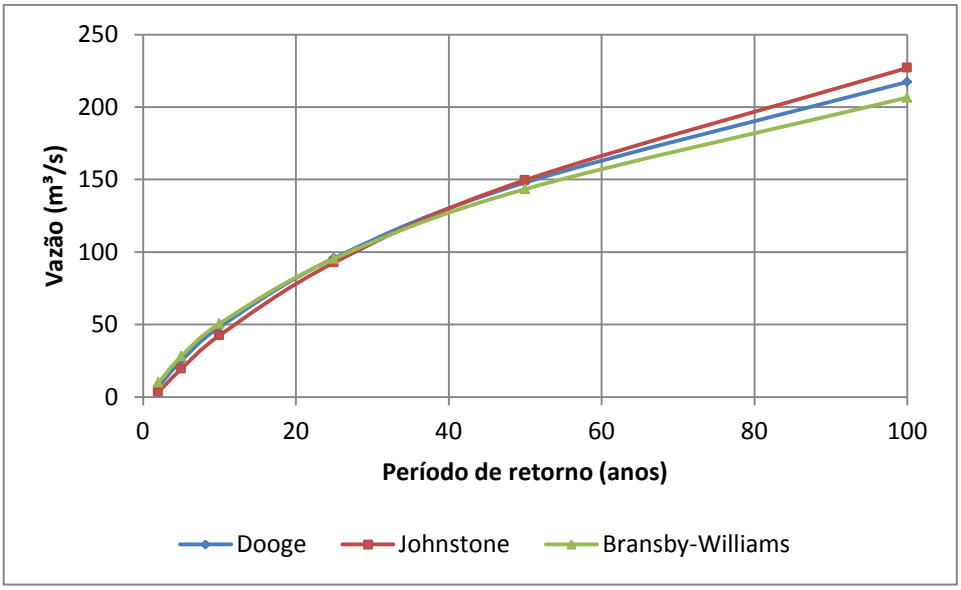

Figura 26: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 1, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

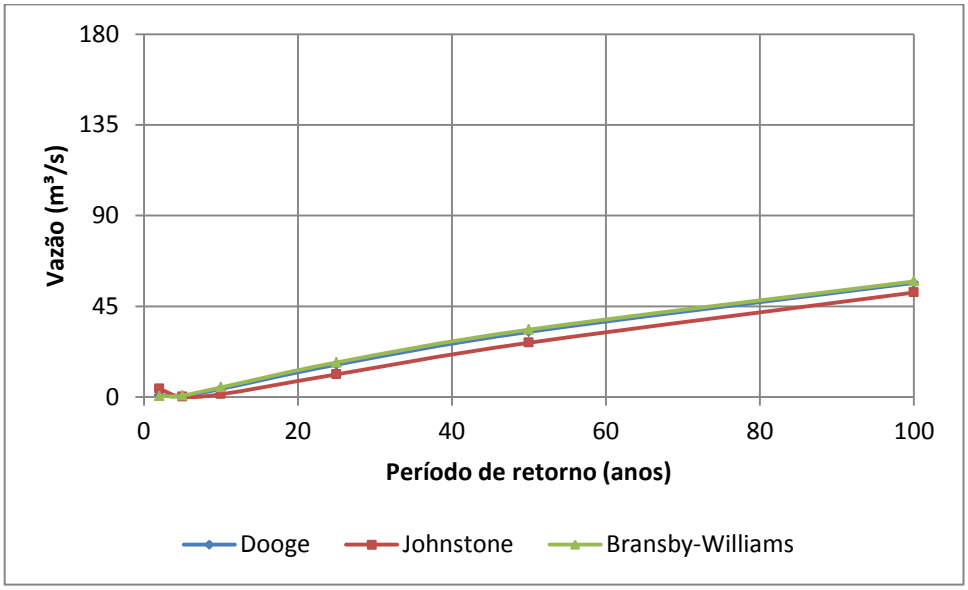

Figura 27: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 2, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

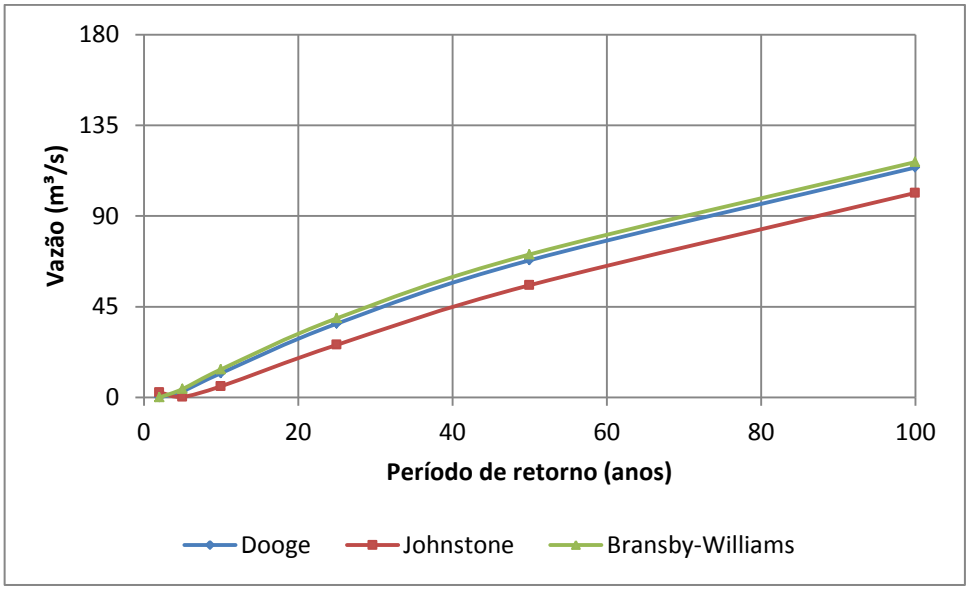

Figura 28: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 2, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

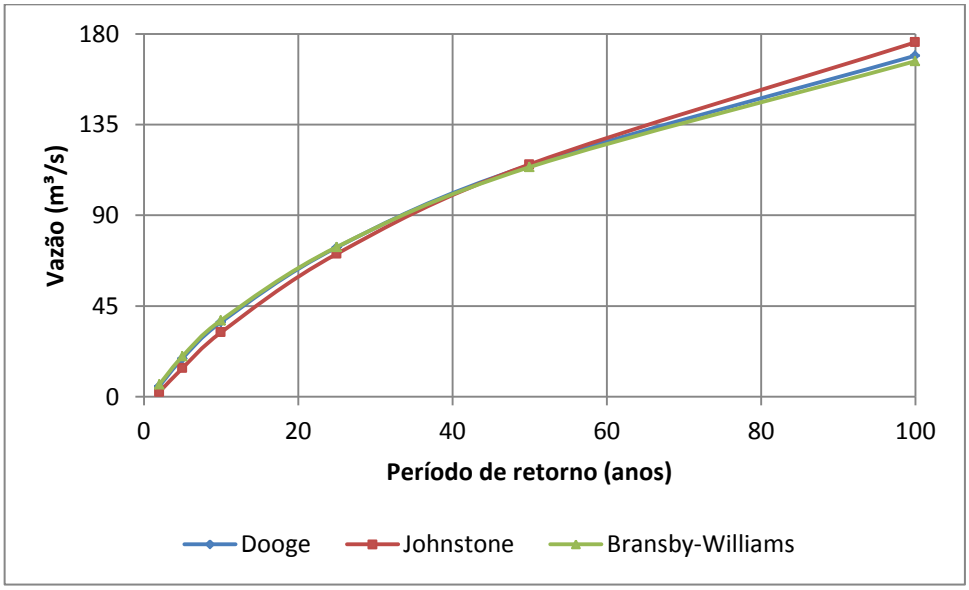

Figura 29: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 2, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

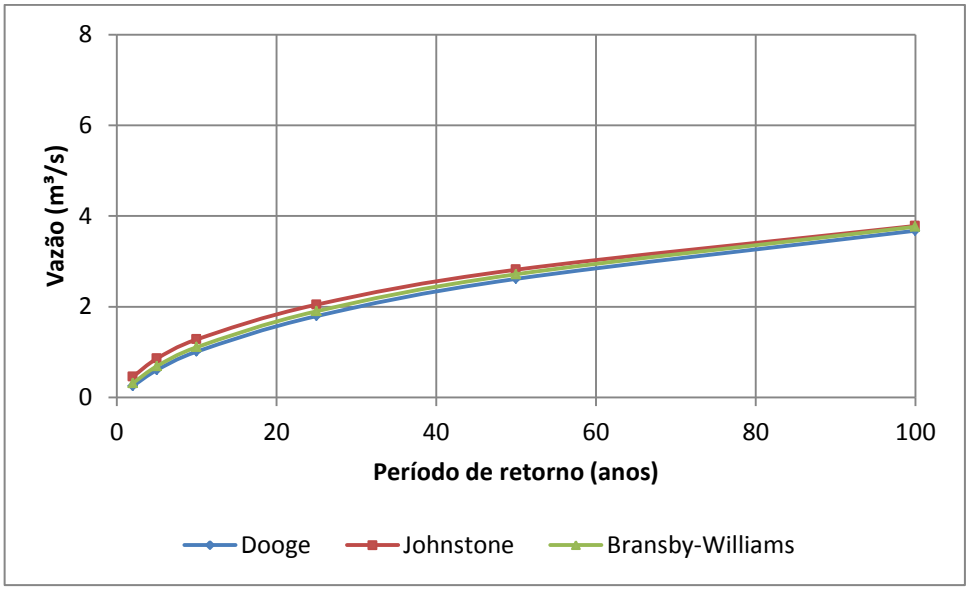

Figura 30: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 4, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

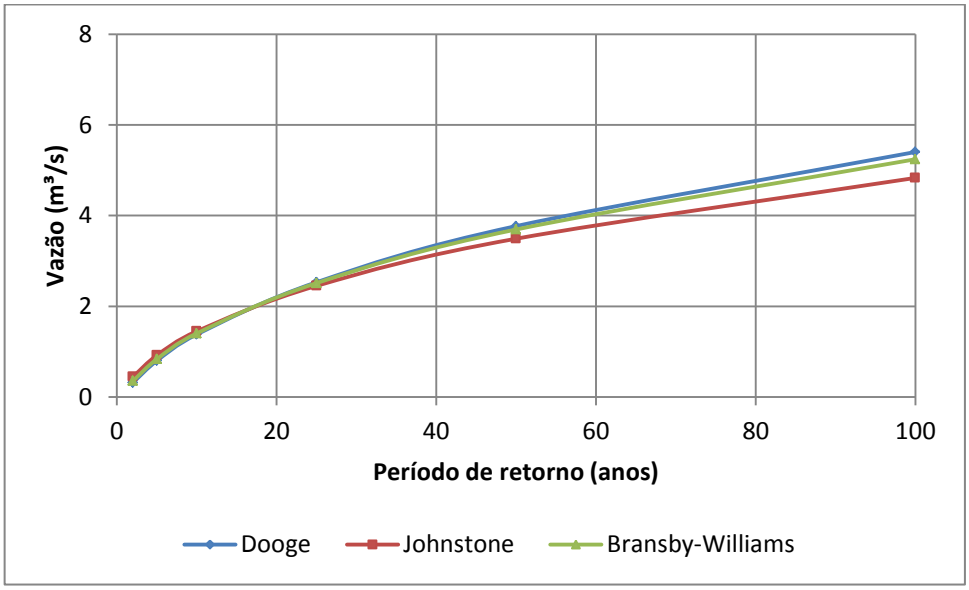

Figura 31: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 4, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

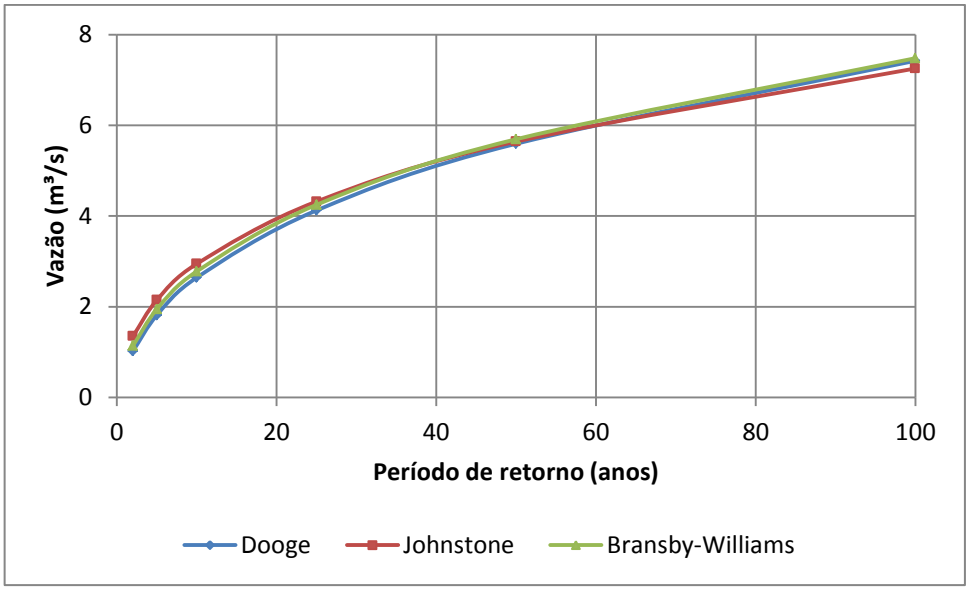

Figura 32: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 4, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

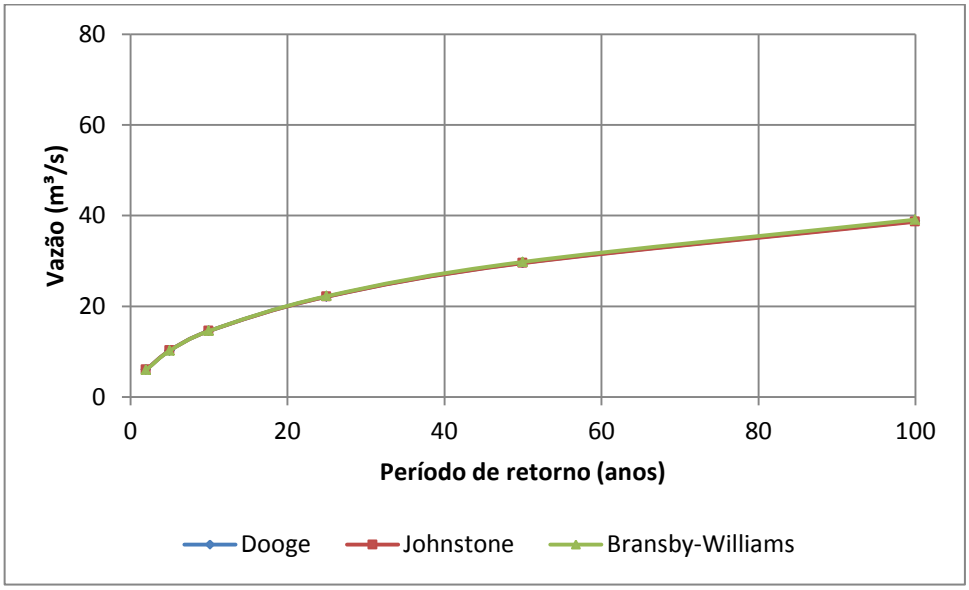

Figura 33: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 5, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

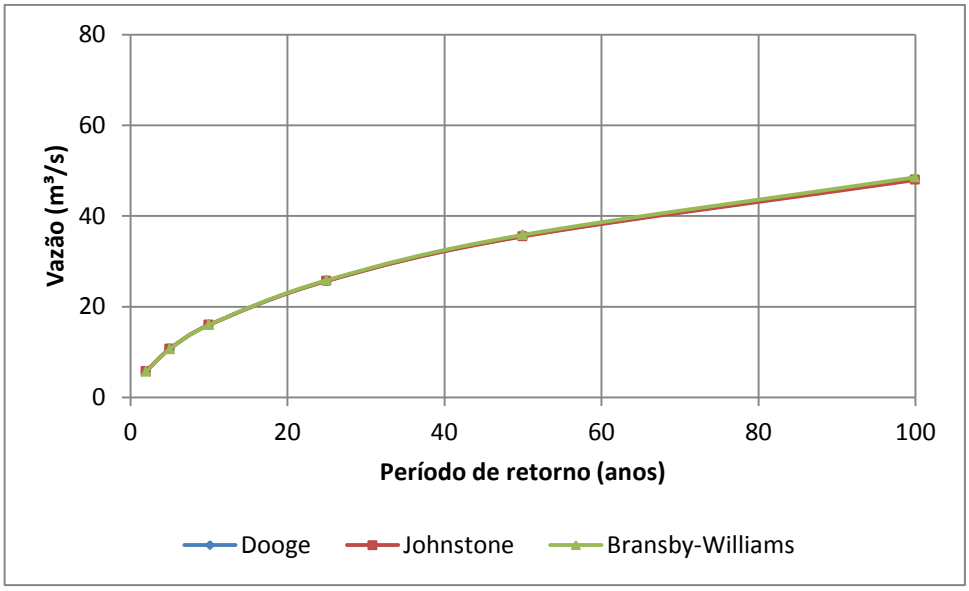

Figura 34: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 5, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

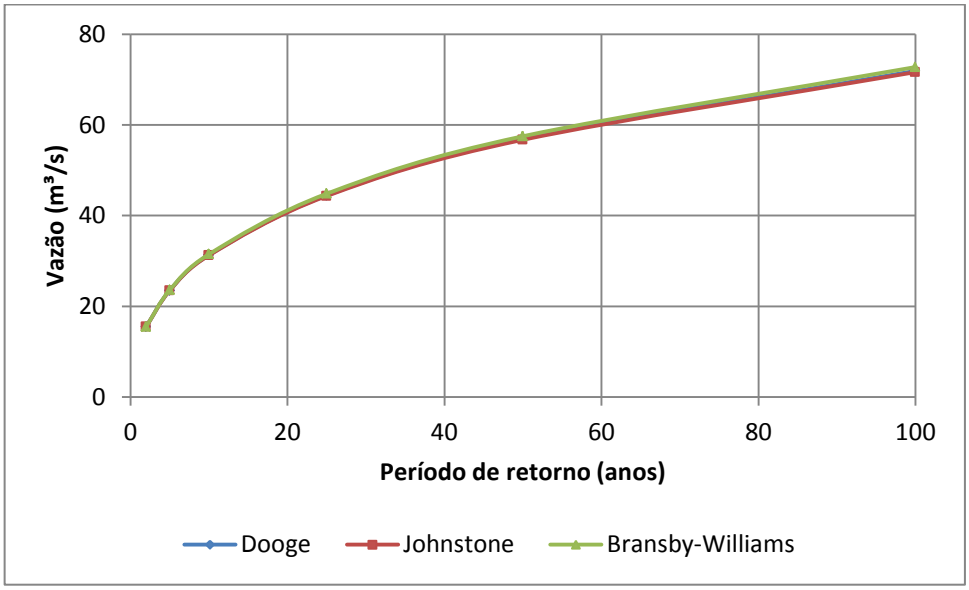

Figura 35: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 5, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

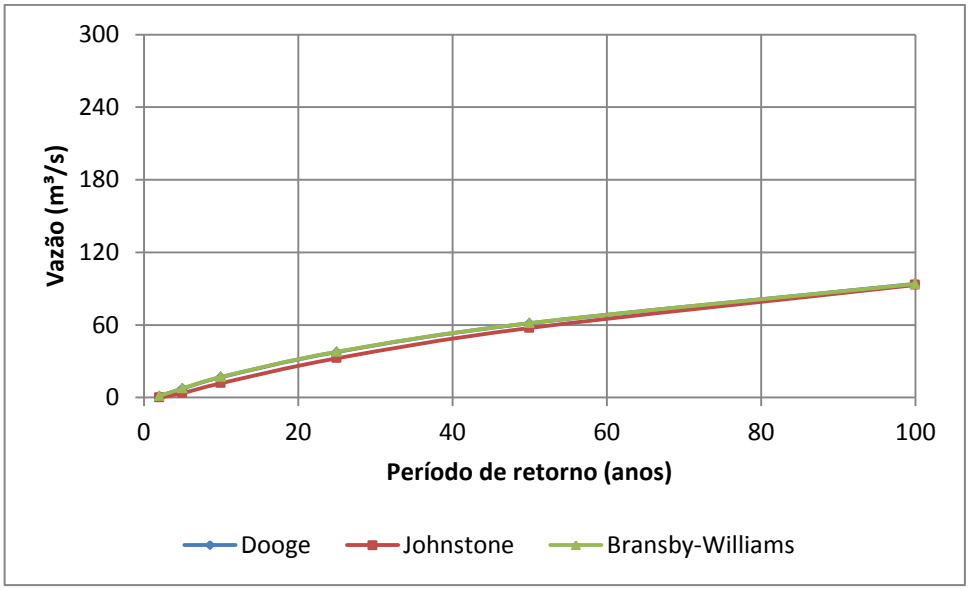

Figura 36: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 6, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

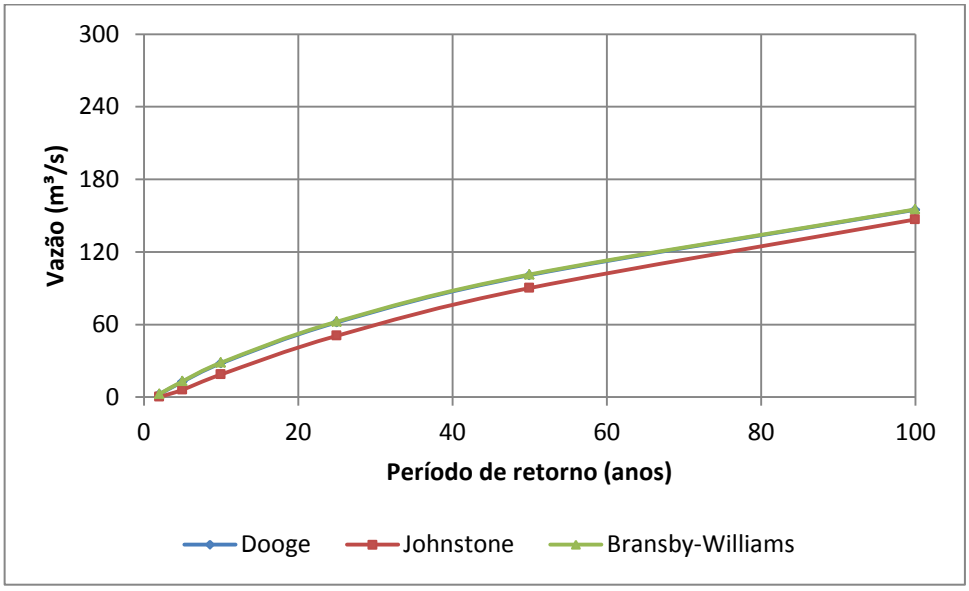

Figura 37: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 6, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

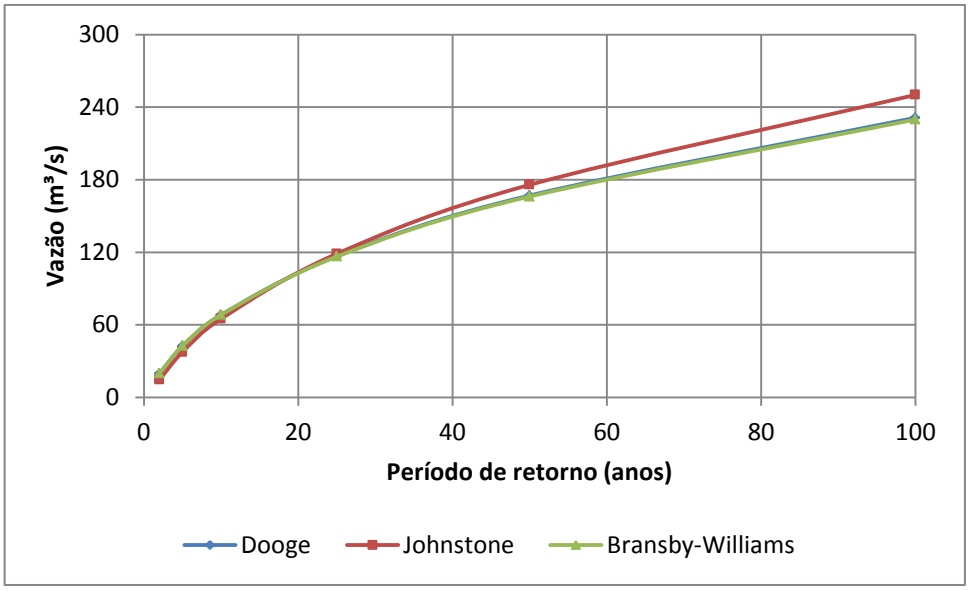

Figura 38: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 6, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

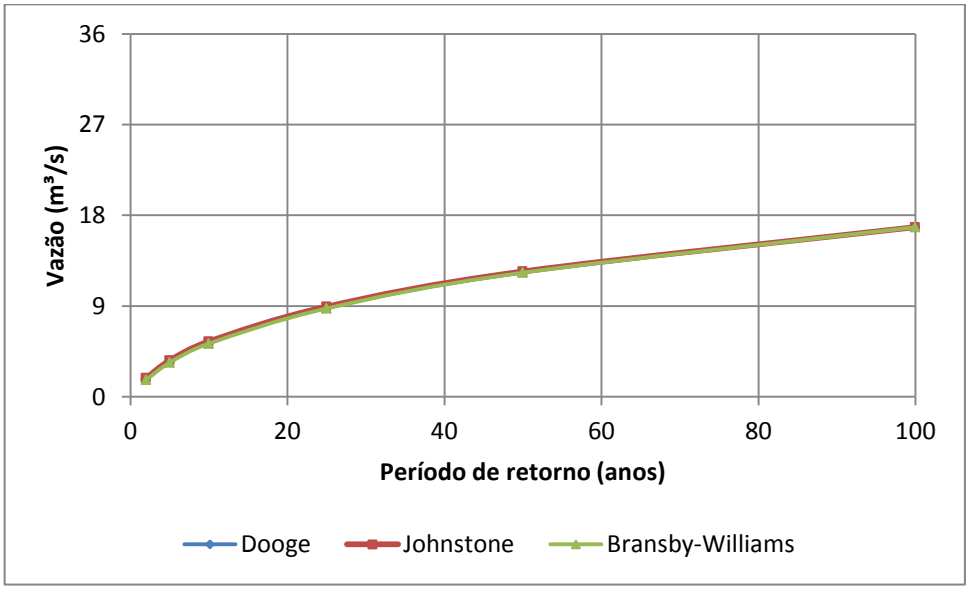

Figura 39: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 7, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

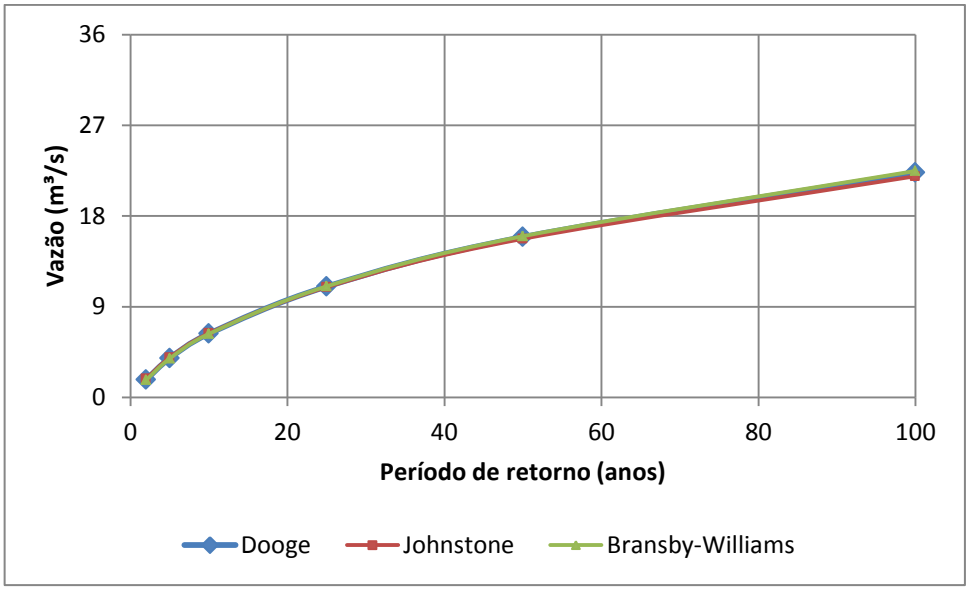

Figura 40: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 7, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

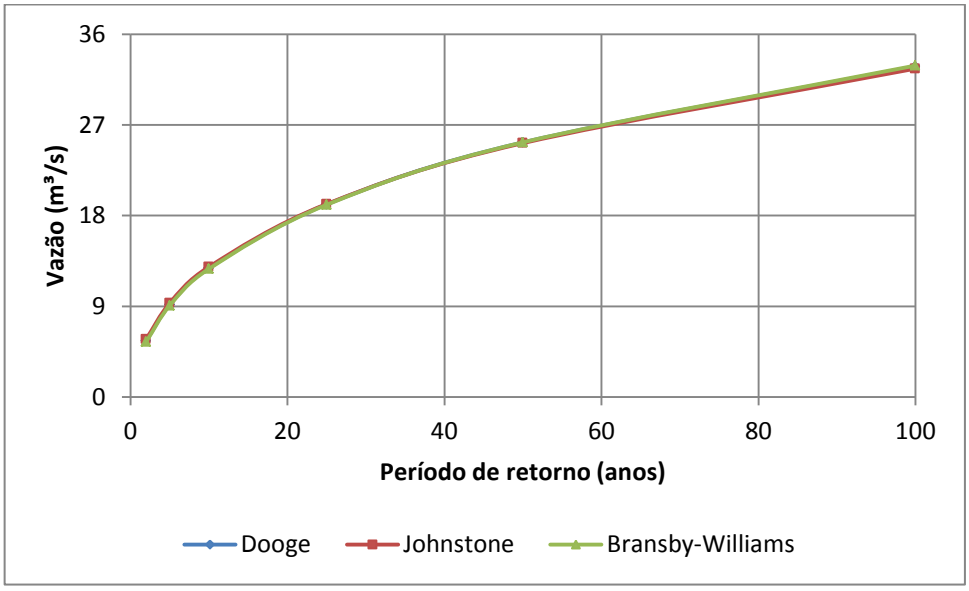

Figura 41: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 7, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

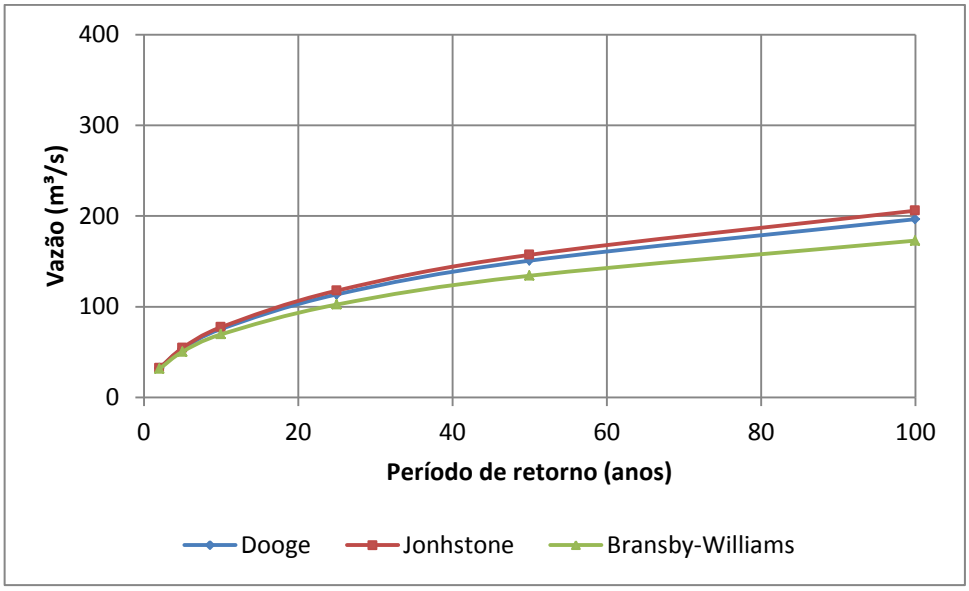

Figura 42: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 8, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Chow-Gumbel.

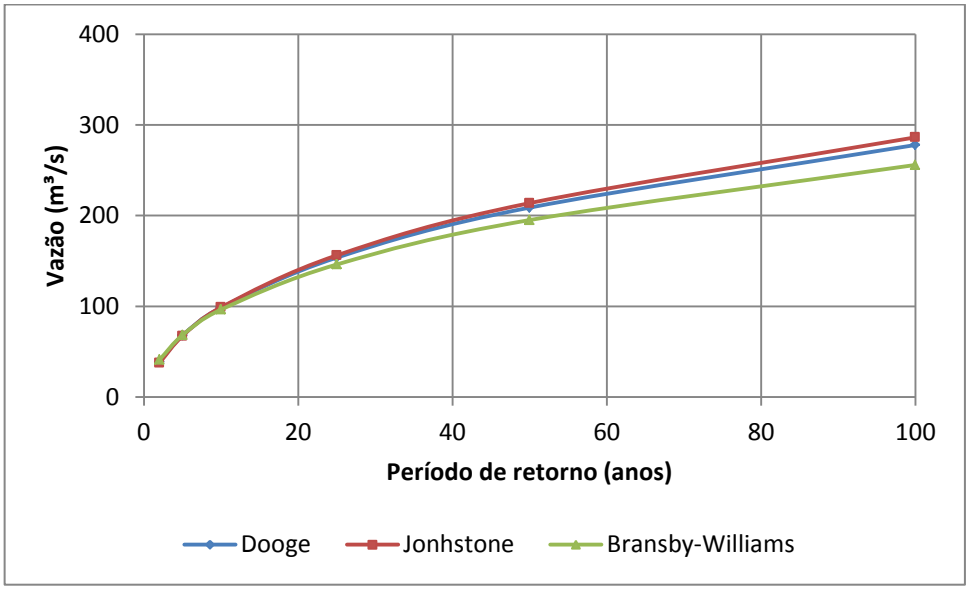

Figura 43: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 8, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo método de Bell.

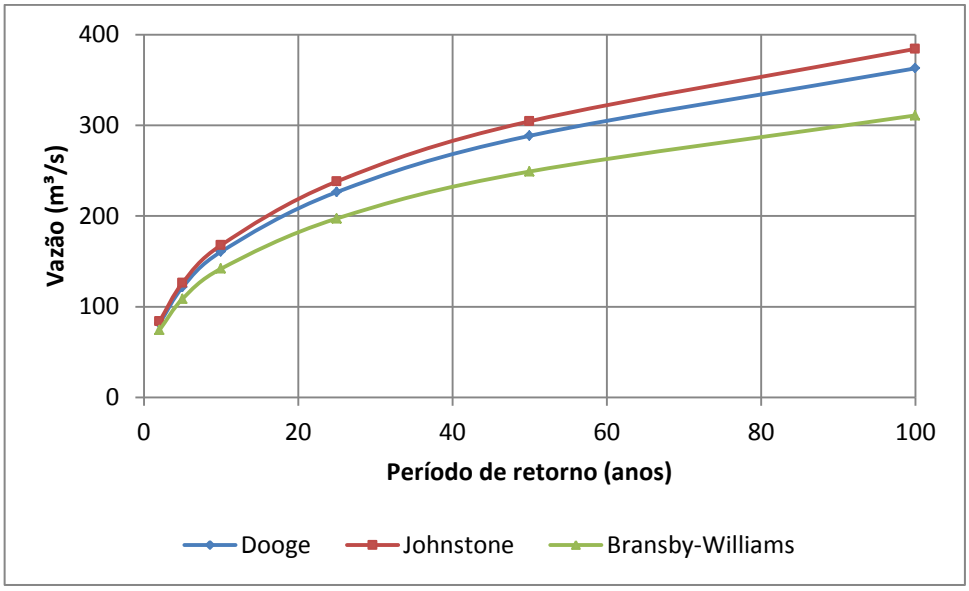

Figura 44: Vazões máximas no exutório da sub-bacia 8, associadas a diferentes períodos de retorno e tempos de concentração – Intensidades pluviométricas estimadas pelo *Software* Pluvio.

APÊNDICE E – COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO SCS E AS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

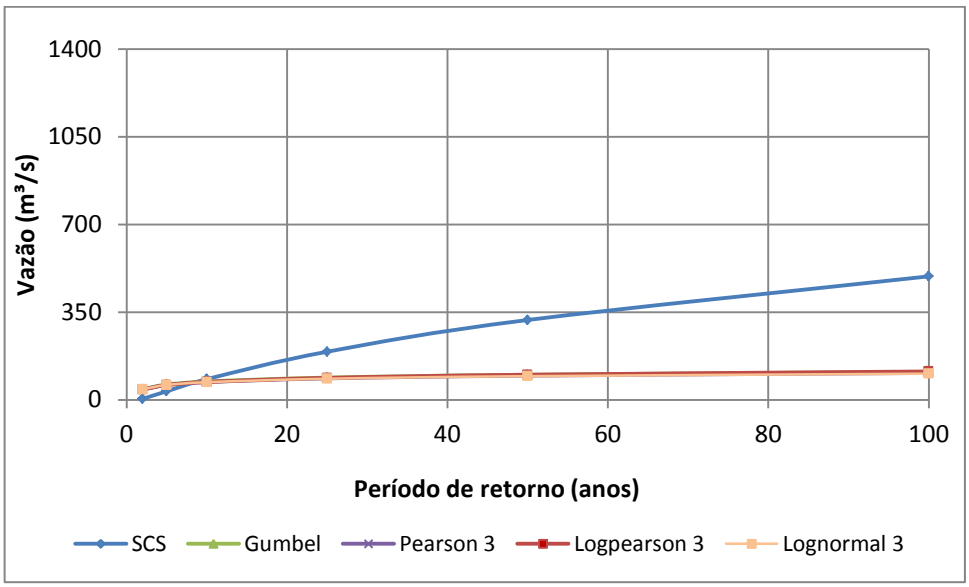

Figura 45: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Chow-Gumbel e da adoção de tempo de concentração apropriado por Johnstone.

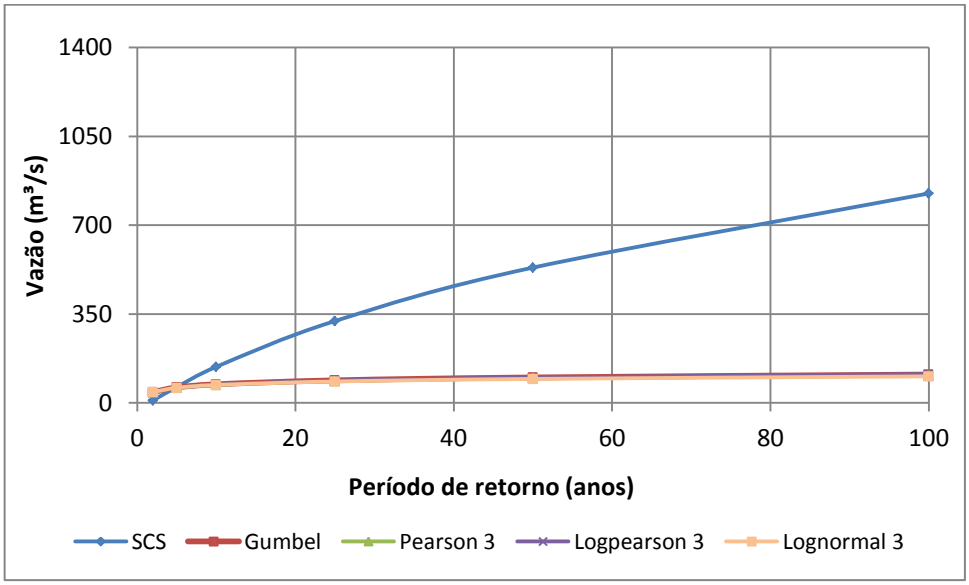

Figura 46: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Bell e da adoção de tempo de concentração apropriado por Johnstone.

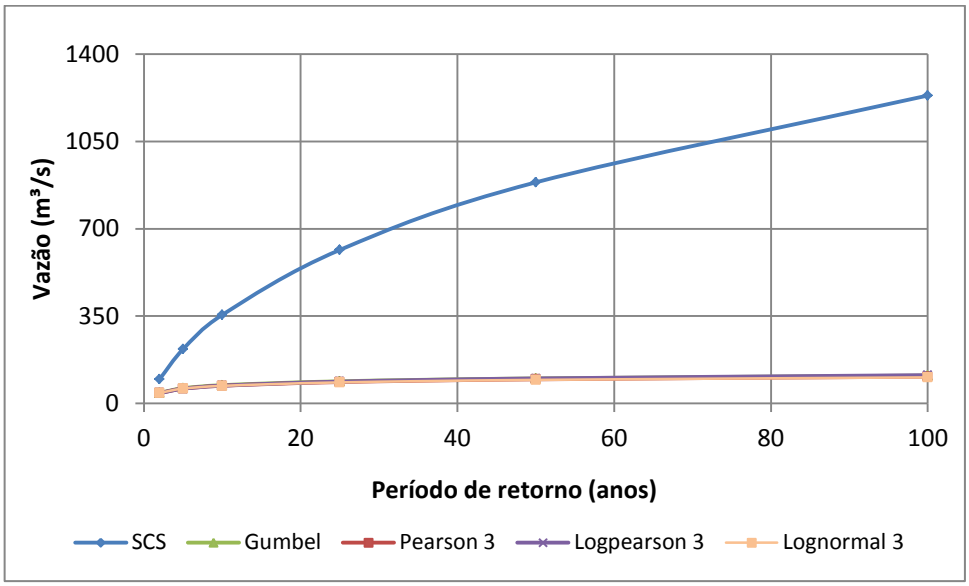

Figura 47: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada pelo *Software* Pluvio e da adoção de tempo de concentração apropriado por Johnstone.

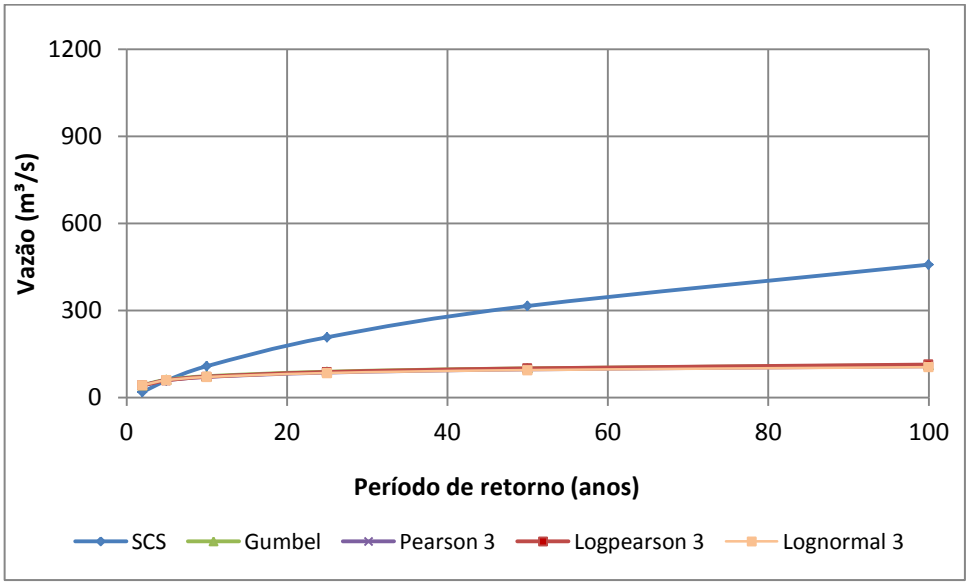

Figura 48: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Chow-Gumbel e da adoção de tempo de concentração apropriado por Bransby-Williams.

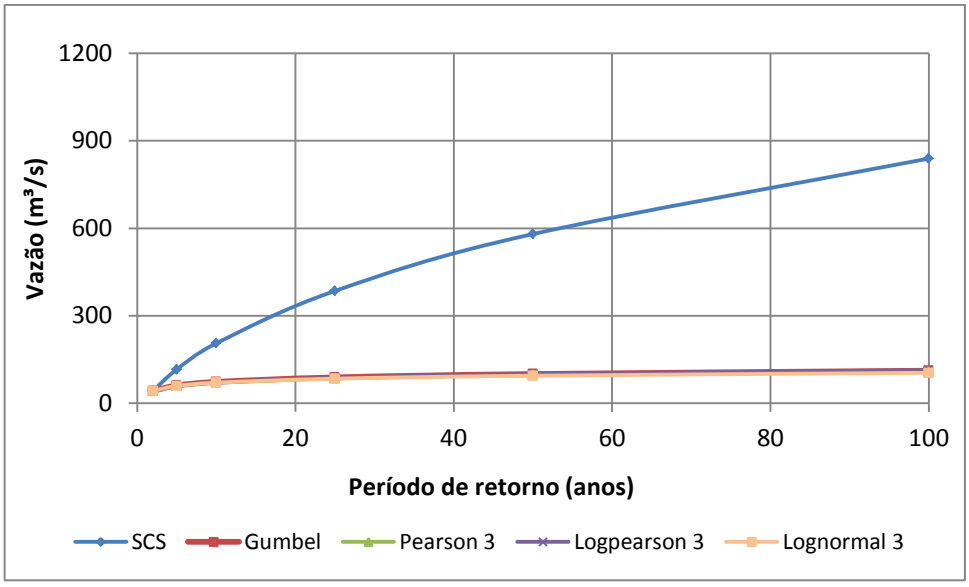

Figura 49: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada por Bell e da adoção de tempo de concentração apropriado por Bransby-Williams.

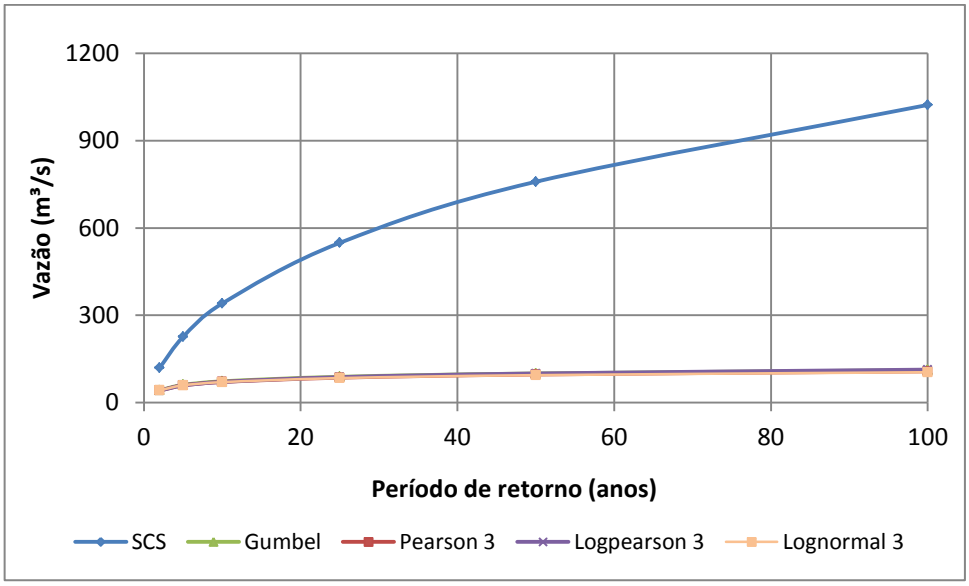

Figura 50: Vazões máximas estimadas pelo método SCS e por métodos probabilísticos, resultantes de um evento de chuva intensa estimada pelo *Software* Pluvio e da adoção de tempo de concentração apropriado por Bransby-Williams.