

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

VANUZA PRATTI CRISTELO

**Aplicações de Sistemas de Informações
Geográficas na Estimativa de Vazões
Máximas de Projeto**

**VITÓRIA
ESPÍRITO SANTO – BRASIL
2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

VANUZA PRATTI CRISTELO

Aplicações de Sistemas de Informações Geográficas na Estimativa de Vazões Máximas de Projeto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Ambiental na área de concentração de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof^o Ph.D. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça

**VITÓRIA
ESPÍRITO SANTO – BRASIL
2007**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C933a Cristelo, Vanuza Pratti, 1976-
Aplicações de sistemas de informações geográficas na
estimativa de vazões máximas de projeto / Vanuza Pratti Cristelo. –
2007.

168 f. : il.

Orientador: Antônio Sergio Ferreira Mendonça.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de informação geográfica. 2. Hidrologia. 3.
Precipitação (Meteorologia). 4. Bacias hidrográficas. I. Mendonça,
Antônio Sergio Ferreira. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

Aula de vôo

O conhecimento

caminha lento feito lagarta.
Primeiro não sabe que sabe
e voraz contenta-se com o cotidiano orvalho
deixado nas folhas vívidas das manhãs.
Depois pensa que sabe
e se fecha em si mesmo:
faz muralhas
cava trincheiras,
ergue barricadas.
Defendendo o que pensa saber
levanta certeza na forma de muro
orgulha-se de seu casulo.
Até que maduro
explode em vôos
rindo do tempo que imaginava saber
ou guardava preso o que sabia.
Voa alto sua ousadia
reconhecendo o suor dos séculos
no orvalho de cada dia.
Mesmo o vôo mais belo
descobre um dia não ser eterno.
É tempo de acasalar
voltar à terra com seus ovos
à espera de novas e prosaicas lagartas.
O conhecimento é assim
ri de si mesmo
e de suas certezas.
É meta de forma
metamorfose
movimento
fluir do tempo
que tanto cria como arrasa
a nos mostrar que para o vôo
é preciso tanto casulo
como asa.

Mauro Iasi.

A meus pais Ayres e Carmen
meus irmãos Ayres, Marcelo e Luciano,
meus sobrinhos Eduardo, Ayres Vinicius, Gabriel e Murilo
minhas cunhadas Emilia, Geanine e Lindinéia,
pelo apoio ao logo dessa caminhada e de toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre me deu força nos momentos difíceis para perseverar no meu objetivo.

Ao meu orientador, Prof. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça, pela amizade, paciência, respeito e por todo conhecimento compartilhado.

Ao Prof. Alexandre Rosa dos Santos pelo incentivo, amizade e entusiasmo nos ensinamentos transmitidos.

Aos professores Suzana Montenegro e Daniel Rigo pela disponibilidade em participar da banca examinadora e pelas contribuições.

Aos colegas do GEARH, Anátalia, André, Célio, Cleide, Diogo, Ednéia, Felipe, Jones, Leandro, Luiz André, Márcia, Marco Aurélio, Mônica, Patrícia, Renato, Tiago, pela troca de idéias e convivência agradável.

Aos amigos da graduação, Aline, Gisella, Karla, Letícia, Macksuel e Wederson, amigos de ontem e sempre.

Aos amigos do mestrado, Elene, Marcos Eugênio e Tatiana, pelos momentos compartilhados, incentivo e carinho.

A todos os meus verdadeiros amigos que trago no coração.

Ao meu padrinho Jose Lucilo e minha madrinha Carminha pelo carinho e por me ajudarem a alcançar esse objetivo.

Aqueles que passaram por nossa vida, trouxeram felicidade e deixaram uma
saTd (o)Tj 6.72397 0 Td ()TM 0 Td (a)Tj 6.7239 Td (h)Tj 6.72397 d (T)Tj 7.44439 0 Td (a)Tj 6.723

RESUMO

Estimativas de vazões máximas são fundamentais para o planejamento e controle de recursos hídricos e a utilização de Sistema de Informação Geográfica (SIGs) possibilita uma eficiente análise e modelagem de informações relacionadas à hidrologia de uma região, podendo produzir resultados de grande utilidade e de boa qualidade. Nesse contexto, foi estudada metodologia baseada na aplicação do geoprocessamento, como ferramenta de apoio, na delimitação de bacias hidrográficas, estimativa de valor médio de CN (número da curva), definição da rede de drenagem, determinação das características fisiográficas de bacias e estimativa de vazões máximas de projeto com uso de Sistema de Informações Geográficas – SIG. Foram discutidas na revisão bibliográfica algumas metodologias existentes para a estimativa de vazões de projetos e hidrogramas unitários sintéticos, analisando suas simplificações e limites de aplicabilidade. Foram discutidos alguns métodos para a determinação do tempo de concentração e do Número da Curva - CN. Fez-se uma análise de sensibilidade da variação de alguns parâmetros como CN e declividade do talvegue e sua influência sobre a vazão máxima de pico. Foi realizada análise de correlação de Pearson considerando alguns parâmetros fisiográficos, a vazão de pico e a vazão máxima específica, obtidas pelo método Racional, para sub-bacias estudadas, sendo ajustadas equações de regressão. Em função desta análise, foram feitas algumas recomendações para a obtenção de vazões de projeto, fundamentadas nos resultados do estudo.

ABSTRACT

Estimation of maximum discharges is a very important task for water resources planning and management and Geographic Information Systems (GIS) are instruments that speed hydrologic related data analysis and modeling. In this work there were studied GIS methods for drawing watersheds limits and drainage networks, and estimation of physiographic parameters, average Curve Numbers(CN) and maximum water discharges. There were analyzed methods for definition of design floods such as unit hydrograph and rational methods with respect to simplifying hypotheses and applicability limitations. There were discussed methods for watersheds concentration time and CN estimation. It was developed sensibility analysis of design flood estimation considering CN and river bed declivity variations. It was also made Pearson correlation analysis considering physiographic parameters, peak and specific maximum discharges estimated by the rational method for the studied watersheds, through adjustment of regression equations. There were made recommendations about the design flood estimation procedures, based on the study results

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS..... | 12 |
| LISTA DE TABELAS..... | 15 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS..... | 16 |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS..... | 19 |
| 1.1 - Importância e justificativa..... | 20 |
| 1.2 – Objetivo geral..... | 22 |
| 1.3 – Objetivos específicos..... | 22 |
| CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 23 |
| 2.1 – Precipitação..... | 24 |
| 2.1.1- Tempo de Concentração..... | 26 |
| 2.1.2- Tempo ou Período de Retorno..... | 31 |
| 2.1.3- Intensidade-Duração-Frequência..... | 31 |
| 2.1.4- Precipitação Excedente..... | 33 |
| 2.1.5- Número da Curva de Escoamento Superficial – CN..... | 35 |
| 2.2 – Vazões de Projeto..... | 42 |
| 2.3 – Métodos de Estimativa de Vazão Máxima..... | 43 |
| 2.3.1 – Métodos de Estimativa de Vazões Máximas Baseados em Equações Empíricas..... | 44 |
| 2.3.2- Métodos de Estimativa de Vazões Máximas Baseadas na Teoria do Hidrograma Unitário..... | 49 |
| 2.4 – Sistema de Informações Geográficas Aplicado no Gerenciamento de Recursos Hídricos..... | 59 |
| 2.4.1 - Tipos de Dados..... | 60 |
| 2.4.2 - Base de Dados..... | 61 |
| 2.4.3 - Modelo Numérico de Terreno (MNT)..... | 64 |
| 2.4.4 - Delimitação das Bacias de Drenagem..... | 67 |
| CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS..... | 75 |
| 3.1 – Bacia Hidrográfica Alto Santa Maria da Vitória..... | 76 |
| 3.2 – Procedimentos Para Delimitação de Bacias Hidrográficas e Extração da Rede de Drenagem Utilizando o Modelo Digital de Elevação..... | 77 |
| 3.3 – Procedimentos para obtenção do mapa do Número da Curva (CN-SCS)..... | 85 |
| 3.4- Escolha das Áreas de Estudo..... | 88 |
| 3.5 – Características Morfológicas das Sub-bacias..... | 89 |
| 3.6 – Série Histórica de Precipitação..... | 90 |
| 3.7 – Precipitação..... | 91 |
| 3.7.1- Ajuste probabilístico das chuvas máximas anuais..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| 3.7.2- Precipitação de Projeto. | 92 |
| 3.8 – Distribuição Temporal da Chuva de Projeto | 93 |
| 3.9 – Precipitação Excedente | 94 |
| 3.10 – Vazões Máximas..... | 94 |
| 3.11 – Análise de Sensibilidade | 95 |
| 3.12 – Correlação de Pearson | 95 |
| CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 97 |
| 4.1 – Delimitação de Bacias Hidrográficas e Extração da Rede de Drenagem Utilizando o Modelo Digital de Elevação | 98 |
| 4.2 – Obtenção do Mapa do Número da Curva (CN-SCS)..... | 105 |
| 4.3 – Áreas de Estudo | 108 |
| 4.4- Características Morfológicas das Sub-bacias | 112 |
| 4.5 - Determinação e Composição CN Médio | 115 |
| 4.6- Determinação e Composição do Fator C - Coeficiente de escoamento Médio. . | 120 |
| 4.7- Tempos de Concentração..... | 123 |
| 4.8- Ajuste probabilístico das chuvas máximas anuais. | 126 |
| 4.9 – Distribuição Temporal da Chuva de Projeto | 131 |
| 4.10 – Precipitação Excedente | 133 |
| 4.11 – Estimativa de Vazões de Pico..... | 135 |
| 4.12 – Análise de Sensibilidade | 140 |
| Análise da influência de alterações do uso do solo sobre os picos de vazão..... | 140 |
| Análise da influência da declividade do terreno sobre os picos de vazão | 144 |
| 4.13 – Correlação de Pearson | 146 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 152 |
| CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 160 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1:Curvas de relação entre chuva no ponto e chuva na área para uso com os valores de duração-frequência (U.S. Weather Bureau).Fonte:CETESB,1979. | 26 |
| Figura 2: Hidrograma unitário triangular do SCS..... | 54 |
| Figura 3: Hidrograma unitário sintético de Snyder. Fonte: Adaptado Genovez, 2001..... | 56 |
| Figura 4: Gráfico para determinação de C_t . Fonte: Porto (1995)..... | 56 |
| Figura 5:Gráfico para determinação do fator de pico. Fonte: Porto(1995)..... | 57 |
| Figura 6: MDE e MDT (Fonte: Câmara et. al., 2004)..... | 64 |
| Figura 7:Operações e parâmetros obtidos a partir de modelos numéricos de terreno. Fonte: Mendes & Cirilo (2001). | 67 |
| Figura 8: Direções de fluxo. | 68 |
| Figura 9: Perfil em vista de uma depressão, antes e depois da sua correção..... | 69 |
| Figura 10: Malha representando o MDE e os esquemas e códigos de direção de fluxo..... | 70 |
| Figura 11: Caracterização dos possíveis caminhos de fluxo..... | 70 |
| Figura 12: Malha do fluxo acumulado a partir da direção de fluxo..... | 71 |
| Figura 13: Malha com os trechos de fluxo..... | 72 |
| Figura 14: Bacia Hidrográfica obtida utilizando a função <i>watershed</i> | 72 |
| Figura 15: Mapa de localização da bacia do rio Santa Maria da Vitória e da sub-bacia Alto Santa Maria. | 76 |
| Figura 16:Esquema das fases de delimitação das bacias hidrográficas..... | 78 |
| Figura 17: Mapa da hipsometria (curvas de nível) da área de estudo. | 78 |
| Figura 18: Métodos propostos pelo ArcGis para ordenamento dos cursos de água. Fonte: Help software ArcGis 9.0. | 81 |
| Figura 19: Mapa de Solos, Fonte: Zamprogno (1999)..... | 85 |
| Figura 20: Mapa de Uso de Solo, Fonte: Zamprogno (1999). | 86 |
| Figura 21: Malha triangular irregular (TIN) para a área de estudo..... | 98 |
| Figura 22: Modelo digital de elevação..... | 98 |
| Figura 23: Modelo digital de elevação sem falhas..... | 99 |
| Figura 24: Malha de direção de fluxo. | 99 |
| Figura 25: Malha de fluxo acumulado. | 100 |
| Figura 26: Reclassificação da malha de fluxo para os valores 500, 200, 70 e 10,..... | 100 |
| Figura 27: Mapa com os trechos de fluxos..... | 101 |
| Figura 28: Detalhe do ordenamento dos trechos utilizando o método de Stralher..... | 101 |
| Figura 29: Bacias obtidas utilizando a malha de direção de fluxo. | 102 |
| Figura 30: Fluxo acumulado máximo para cada região..... | 102 |
| Figura 31: Regiões delimitadas para os dois maiores pontos de acumulação..... | 103 |
| Figura 32: Sub-bacia do Alto Santa Maria delimitada utilizando ferramenta SIG..... | 103 |

| | |
|---|-----|
| Figura 33: Sub-Bacia Alto Santa Maria, delimitada por SIG, a montante da UHE de Rio Bonito. | 104 |
| Figura 34: Hidrografia da sub-bacia delimitada por SIG a montante da UHE de Rio Bonito. | 104 |
| Figura 35: Mapa de solo em formato raster com valores atribuídos por tipo de solo. | 105 |
| Figura 36: Mapa de uso do solo em formato raster com valores atribuídos por cultura. | 105 |
| Figura 37: Mapa com valores de combinação para os mapas de uso ocupação e solo. | 106 |
| Figura 38: Mapa com os grupos hidrológicos para cada tipo de solo. | 106 |
| Figura 39: Mapa com o número da curva (CN) segundo Tucci (1993). | 107 |
| Figura 40: Mapa com o número da curva (CN) segundo Setzer e Porto (1979). | 107 |
| Figura 41: Sub-bacias escolhidas, com áreas até 30 km ² | 108 |
| Figura 42: Sub-bacias escolhidas, com áreas superiores a 30 km ² | 108 |
| Figura 43: Hidrografia das sub-bacias com áreas até 30 km ² | 109 |
| Figura 44: Hidrografia das sub-bacias com áreas superiores a 30 km ² | 109 |
| Figura 45: Mapa de solos para as sub-bacias com áreas até 30 km ² | 110 |
| Figura 46: Mapa de solos para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km ² | 110 |
| Figura 47: Mapa de uso e ocupação do solo para as sub-bacias com áreas até 30 km ² | 111 |
| Figura 48: Mapa de uso e ocupação do solo para as bacias com áreas superiores a 30 km ² | 111 |
| Figura 49: Mapa de CN (TUCCI, 1993) para as sub-bacias com área até 30 km ² | 116 |
| Figura 50: Mapa de CN (TUCCI, 1993) para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km ² | 116 |
| Figura 51: Mapa de CN (Setzer; Porto, 1979) para as sub-bacias com áreas até 30 km ² | 117 |
| Figura 52: Mapa de CN (Setzer; Porto, 1979) para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km ² | 117 |
| Figura 53: Mapa de CN médios (Tucci, 1993) por sub-bacia para as áreas até 30 km ² | 118 |
| Figura 54: Mapa de CN médios (Tucci, 1993) por sub-bacia para as áreas superiores a 30 km ² | 118 |
| Figura 55: Mapa de CN médios (Setzer; Porto, 1979) por sub-bacia para as áreas até a 30 km ² | 119 |
| Figura 56: Mapa de CN médios (Setzer; Porto, 1979) por sub-bacia para as áreas superiores a 30 km ² | 119 |
| Figura 57: Mapa fator C para as sub-bacias com área até 30 km ² | 121 |
| Figura 58: Mapa fator C para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km ² | 121 |
| Figura 59: Mapa do fator C por sub-bacia para as áreas até 30 km ² | 122 |
| Figura 60: Mapa do fator C médio por sub-bacia para as áreas superiores a 30 km ² | 122 |
| Figura 61: Tempos de concentração (min) para as sub-bacias de 1 a 18. | 123 |
| Figura 62: Tempos de concentração (min) para as sub-bacias de 19 a 36. | 124 |
| Figura 63: Tempos de concentração (min) para as sub-bacias de 37 a 54. | 124 |
| Figura 64: Chuvas máximas estimadas para as distribuições analisadas. | 128 |

| | |
|---|-----|
| Figura 65: Chuvas máximas obtidas para cada período de retorno para as distribuições... | 129 |
| Figura 66: Altura Pluviométrica (mm) para cada duração da chuva e período de Retorno, PEARSON III para a estação de Santa Teresa..... | 130 |
| Figura 67: Intensidade de chuva (mm/min) para cada duração da chuva e período de Retorno, PEARSON III..... | 131 |
| Figura 68: Representação gráfica do hietograma de projeto para sub-bacias com área até 25 km ² (Tr= 10 anos). | 132 |
| Figura 69: Hietograma de Precipitação excedente para a sub-bacia 1 (Tr= 10 anos) | 134 |
| Figura 70: Vazões de projeto (m ³ /s) para as sub-bacias de 1 a 18, Tr = 10 anos. | 138 |
| Figura 71: Vazões de projeto (m ³ /s) para as sub-bacias de 19 a 36, Tr =10 anos. | 138 |
| Figura 72: Vazões de projeto (m ³ /s) para as sub-bacias de 37 a 54, Tr =10 anos. | 139 |
| Figura 73: Vazões de pico, em função da variação do valor de CN adotado para a sub-bacia 20. | 142 |
| Figura 74: Vazões de pico em função da variação do valor de CN adotado para as sub-bacia 21. | 142 |
| Figura 75: Vazões de pico, em função da variação do valor de CN adotado para as sub-bacia 52. | 143 |
| Figura 76: Comparação das vazões de pico (m ³ /s), para as diferentes declividades adotadas para a sub-bacia 20. | 145 |
| Figura 77: Comparação das vazões de pico (m ³ /s), para as diferentes declividades adotadas para a sub-bacia 21. | 145 |
| Figura 78: Comparação das vazões de pico (m ³ /s), para as diferentes declividades adotadas para a sub-bacia 52. | 146 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1: Períodos de retorno para diferentes ocupações de área. | 31 |
| Tabela 2: Valores do parâmetro CN para bacias rurais. FONTE: Tucci, 1993..... | 37 |
| Tabela 3: Valores do parâmetro CN. Fonte: Setzer & Porto (1979)..... | 40 |
| Tabela 4: Valores do coeficiente de escoamento superficial C. Fonte: Cetesb, 1979..... | 47 |
| Tabela 5: Valores do coeficiente de escoamento C para diferentes períodos de retorno. | 48 |
| Tabela 6: Fator de frequência para correção do coeficiente de escoamento superficial C. ... | 48 |
| Tabela 7: Precipitação total máximas anuais. | 91 |
| Tabela 8:Relação entre as alturas pluviométricas – valores médios obtidos do estudo do DNOS. | 92 |
| Tabela 9: Características físicas das sub-bacias. | 113 |
| Tabela 10: Características morfológicas das sub-bacias. | 114 |
| Tabela 11: Associação dos usos da sub-bacia com as tabelas do Número da Curva - CN. | 115 |
| Tabela 12: Valores do Fator C – Uso e Ocupação. Fonte: ZAMPROGNO, 1999..... | 120 |
| Tabela 13: Tempo de concentração (min) para as sub-bacias de estudo. | 125 |
| Tabela 14: Chuvas máximas estimadas para distribuições ajustadas e erros padrão de estimativas..... | 127 |
| Tabela 15: Valores precipitação de projeto para vários períodos de retorno..... | 128 |
| Tabela 16: Alturas Pluviométricas para diferentes tempos de duração da chuva, PEARSON III, para a Estação de Santa Teresa..... | 129 |
| Tabela 17: Intensidades de chuva (mm/min) para diferentes tempos de duração de chuva. | 130 |
| Tabela 18: Hietograma de projeto determinado para sub-bacias com área até 25 km ² | 132 |
| Tabela 19: Hietograma de precipitação excedente para a sub-bacia 1 (Tr= 10 anos)..... | 133 |
| Tabela 20: Precipitação efetiva para as sub-bacias..... | 134 |
| Tabela 21:Resultados obtidos para vazão de pico, período de retorno de 10 anos. | 136 |
| Tabela 22: Continuação dos resultados obtidos para vazão de pico, período de retorno de 10 anos..... | 137 |
| Tabela 23: Características das sub-bacias utilizadas na análise de sensibilidade as alterações do uso do solo. | 141 |
| Tabela 24: Comparação entre as vazões de pico obtidas, considerando aumento da impermeabilização do solo, nas sub-bacia 20, 21 e 52. | 142 |
| Tabela 25: Valores de declividade selecionados entre as sub-bacias para análise de sensibilidade..... | 144 |
| Tabela 26: Vazões de pico (m ³ /s), para diferentes declividades, para a sub-bacia 20..... | 144 |
| Tabela 27: Vazões de pico (m ³ /s), para as diferentes declividades, para a sub-bacia 21... .. | 144 |
| Tabela 28: Vazões de pico (m ³ /s), para as diferentes declividades, para a sub-bacia 52... .. | 145 |
| Tabela 29: Matriz de correlação entre características de sub-bacias estudadas..... | 148 |
| Tabela 30: Equações de regressão com uma variável resposta. | 149 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 31: Equações de regressão com duas variáveis respostas..... | 150 |
|--|-----|

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| A | área de drenagem da bacia hidrográfica |
| AMC | condição de unidade antecedente |
| AMC I | condição I de umidade antecedente |
| AMC II | condição II de umidade antecedente |
| AMC III | condição III de umidade antecedente |
| a,b,c Murph. | coeficiente utilizados nas equações de Ganguillet, Kutter, Kresnik, Kuichling |
| C | coeficiente de escoamento superficial |
| C0 | coeficiente do método Santa Bárbara |
| C1 | coeficiente do método Santa Bárbara |
| C_f | fator de correlação do coeficiente de escoamento superficial |
| CN | número da curva |
| C_t | coeficiente adimensional que representa a porcentagem de impermeabilização da bacia |
| C_p | coeficiente relacionado com a capacidade de armazenamento da bacia. |
| CETESB | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental |
| D | duração unitária |
| DAEE | Departamento de Águas e Energia Elétrica |
| DNOS | Departamento Nacional de Obras de Saneamento |
| EP | erro médio padrão |
| H | diferença de cotas entre o ponto mais afastado da bacia e o exutório |
| HU | hidrograma unitário |
| HUS | hidrograma unitário sintético |
| IDF | intensidade-duração-freqüência |
| I | intensidade da chuva, em mm/h ou mm/min |
| le | intensidade de chuva em mm/h |
| la | abstrações iniciais ou perdas iniciais |
| $I'(t)$ | hidrograma instantâneo, em m ³ /s |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| k,a,b,c | constantes da relação intensidade-duração-freqüência |
| k_c | coeficiente de compacidade da bacia |
| kf | coeficiente de forma da bacia |
| λ | constante de proporcionalidade da abstração inicial em relação a retenção potencial máxima |
| L_t | comprimento do talvegue principal da bacia, em km |
| L | comprimento total dos cursos d' água, em km |

| | |
|-----------------|---|
| L_{cg} | distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade da bacia |
| m, n | parâmetros relativos ao ajuste da equação de intensidade-duração-frequência |
| m_i | parâmetro tabelado dependente da área da bacia que utiliza a equação de Iszkowski |
| MDE | modelo digital de elevação |
| MDT | modelo digital do terreno |
| MNT | modelo numérico do terreno |
| n | coeficiente de rugosidade de Manning |
| P | precipitação total, em mm |
| P_e | precipitação excedente, em mm |
| p | perímetro da bacia, em km |
| q_p | vazão específica, em m/s. km ² |
| Q | vazão de pico, em m ³ /s |
| $Q(1)$ e $Q(2)$ | vazões de saída do reservatório no instante 1 e 2. |
| S | declividade do talvegue, em m/m. |
| S | armazenamento máximo na bacia hidrográfica, em mm |
| SCS | Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos da América |
| T | período de retorno, em anos |
| t | duração da chuva, em min |
| t_0 | parâmetro relativo ao ajuste da equação de intensidade-duração-frequência |
| t_a | tempo de ascensão |
| t_b | tempo de base |
| t_c | tempo de concentração, em min |
| t_p | tempo de pico |
| t_r | tempo de recessão ou retardamento |
| x_i | parâmetro 1 da correlação de Pearson |
| \bar{x} | média do parâmetro 1 |
| y_i | parâmetro 2 da correlação de Pearson |
| \bar{y} | média do parâmetro 2 |
| USDA | Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América |
| V | velocidade média no trecho, em m/s |

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 - Importância e justificativa

A estimativa dos valores de vazão máxima tem importância decisiva nos custos e na segurança dos projetos de engenharia. A estimativa desses valores se faz necessária para o controle e atenuação das cheias, dimensionamento de obras hidráulicas de drenagem, perímetros de irrigação, diques e extravasores de barragens (TUCCI, 1993).

Estimativas de vazões máximas são fundamentais para o planejamento e projeto de medidas estruturais e não estruturais de controle de recursos hídricos (ROCHA, 2003).

O aumento da extensão de áreas impermeáveis provocado pela urbanização, o desmatamento e o uso agrícola têm como conseqüências aumentos em picos de vazão e elevação mais rápida dos níveis dos corpos d'água provocadas pelo maior volume e rapidez do escoamento das águas pluviais não controladas, podendo se converter em prejuízos econômicos e sociais cada vez maiores.

Eventos extremos hidrológicos na forma de cheias têm causado grandes impactos sobre a sociedade humana e o meio ambiente, ocasionando mortes, desabrigo, destruição de edificações, de vias de transporte, de plantações e proliferação de doenças em várias partes do mundo. Por estes motivos se faz necessário o estudo e previsão destes fenômenos (ROCHA, 2003).

O desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido um aumento caótico na frequência de inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade de água. À medida que a cidade se urbaniza, ocorre o aumento das vazões máximas devido à impermeabilização e canalização (TUCCI, 2000).

Os modelos são muito úteis na estimativa de vazões devido às suas flexibilidades em preverem comportamentos futuros causados por alterações na ocupação do solo e, no caso do Brasil, devido à escassez de dados, principalmente para pequenas bacias que se encontram em crescente processo de exploração (SARTORI, 2004).

A maioria das informações utilizadas no gerenciamento e planejamento ambiental possui um componente geográfico associado. A utilização de um sistema de informação geográfica possibilita um processo eficiente para análise e modelagem de informações relacionadas à hidrologia de uma região, produzindo resultados de grande utilidade e de boa qualidade. Exemplos de estudos que utilizaram com qualidade e aplicabilidade técnicas de SIG na hidrologia, em diversas partes do Brasil e do mundo, são citados a seguir: Pilar et al. (1998), Rosin & Pellegrino (1999), Ahnert (2000), Gumbo et al. (2001), Santos (2001), Fraga et al. (2005), Moreno & Tejada (2003), Marcellini (2002), Marcellini et al. (2003) e Elesbon (2004), Dias et al.(2005); Pickbrenner et al.(2005); Vendrame & Lopes (2005); Benini et al. (2005), Nayak & Jaiswal (2005).

Na presente pesquisa, foi estudada e aplicada rotina de procedimentos, utilizando sistemas de informações geográficas para estimativa de vazões máximas em bacias hidrográficas, com maior rapidez e precisão. A metodologia foi aplicada em sub-bacias apresentando diferentes escalas de tamanho, realizadas análise de sensibilidade e de correlação para alguns parâmetros.

1.2 – Objetivo geral

Maior conhecimento a respeito de técnicas para estimativa de vazões máximas de projeto em bacias hidrográficas e da utilização de sistemas de informações geográficas para obtenção de parâmetros básicos para estas estimativas.

1.3 – Objetivos específicos

- Levantar e analisar diferentes tipos de métodos de cálculo de vazões máximas de projeto utilizando equações empíricas e hidrogramas unitários (HU).
- Estudar formas de obtenção de parâmetros destes modelos, com uso de Sistema de Informação Geográfica - SIG.
- Aplicar e comparar os resultados das metodologias em bacias hidrográficas específicas.
- Analisar a sensibilidade de métodos de estimativa de vazões máximas de projeto a variações de parâmetros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Precipitação

Segundo Zahed (1995), precipitações máximas ou chuvas intensas são definidas como aquelas chuvas cujas intensidades ultrapassam um determinado valor mínimo. A determinação dessas intensidades é de fundamental importância em drenagem urbana, pois, em muitas metodologias, as vazões de projeto são obtidas indiretamente por modelos de transformação chuva-vazão.

As principais características das precipitações máximas são o total precipitado, distribuição temporal e espacial e frequência de ocorrência que proporcionam prever, juntamente com os dados observados e valendo-se dos princípios das probabilidades, quais as máximas precipitações que possam vir a ocorrer em uma certa localidade com determinada frequência.

A distribuição temporal determina o volume infiltrado e a forma do hidrograma de escoamento superficial direto originado pela chuva excedente. De acordo com Zahed (1995) existem vários métodos para a determinação da distribuição temporal, como os propostos pelos pesquisadores: Keifer e Chu, 1957; Huff, 1967; Wiesner, 1970; Pilgrim e Cordery, 1975; Yen e Chow, 1980; McCuen, 1982; Magni e Mero, 1986 e outros, que mostram grande dispersão nos padrões dos hietogramas para precipitações de mesma duração, devido à complexidade de fenômenos físicos envolvidos.

A distribuição temporal da chuva de projeto deveria ser obtida a partir de dados observados do local ou a partir de dados regionais, mas estes dados são raramente disponíveis. Segundo Genovez (2001), por esta razão, muitos autores adotaram uma distribuição temporal uniforme, mais pela ausência de informações do que por razões técnicas.

O conhecimento da distribuição espacial da chuva sobre uma área é importante no estudo de precipitações, visto que os valores de precipitações registrados em um posto pluviométrico ou pluviográfico são representativos para uma área restrita ao redor do posto e não para toda a área de uma bacia hidrográfica. Caso se disponha de um conjunto de postos pluviométricos ou pluviográficos, pode-se obter a

distribuição dessa precipitação utilizando o método de Thiessen e o das Isoietas, pelos quais a precipitação média é ponderada por áreas de influência. O método da média aritmética, em que a média das precipitações registradas nos vários postos é considerada a média precipitada na área, considera que os aparelhos estão distribuídos uniformemente na área. Segundo Genovez (2001), outros métodos mais complexos são raramente utilizados, por falta de dados ou pelo tempo que se dispõe para término dos projetos.

Os estudos de drenagem urbana envolvem, geralmente, cursos d' água de pequeno porte desprovidos de registros fluviométricos, nos quais a estimativa de cheias é feita com base nos dados de chuvas de curta duração e alta intensidade, que ocorrem nas respectivas bacias.

Esses dados são bastante escassos na maior parte do país e, mesmo em regiões onde a densidade dos postos pluviográficos é satisfatória, verifica-se que os registros disponíveis carecem de tratamento sistemático que permita a sua pronta utilização. Existem imensas áreas em que as únicas informações disponíveis são as chuvas de 1 dia, dadas por postos pluviométricos, (CETESB, 1979).

Dois tipos de séries podem ser utilizados na análise de freqüência dos dados de chuva: as series anuais que incluem as alturas pluviométricas máximas para cada ano e as séries parciais, constituídas por alturas pluviométricas acima de certo valor-base, independentemente do ano no qual possa ocorrer.

Segundo Cetesb (1979), as séries parciais fornecem resultados mais consistentes para períodos de retorno inferiores a 10 anos, enquanto as duas séries apresentam praticamente os mesmos resultados para períodos de retorno superiores a 10 anos.

Quando interessa principalmente analisar os valores das intensidades extremas, elegem-se as séries das máximas anuais, isto é, para uma dada duração escolhem-se as máximas intensidades pluviométricas observadas em cada ano hidrológico. As séries anuais revelam-se mais significativas, pois são definidas em termos de sua ocorrência em vez de sua magnitude. (VILLELA; MATTOS, 1975)

Os estudos de freqüência utilizando séries anuais são baseados em alturas pluviométricas pontuais. Segundo Cetesb (1979), o *Drainage Criteria Manual de Denver*, considera que em áreas de drenagem até aproximadamente 25 km², as alturas pluviométricas pontuais podem ser utilizadas no cálculo das alturas pluviométricas nessas mesmas áreas, sem nenhuma redução.

O uso da chuva na área ao invés da chuva no ponto resulta no decréscimo da chuva e no aumento da duração.

Para áreas maiores se faz necessário aplicar um fator de redução, que pode ser obtido das curvas elaboradas pelo *U.S. Weather Bureau*.

É apresentada, na figura a seguir, a relação estabelecida pelo *United States Weather Bureau*, entre 1957 e 1960, a partir de tormentas observadas nos Estados Unidos.

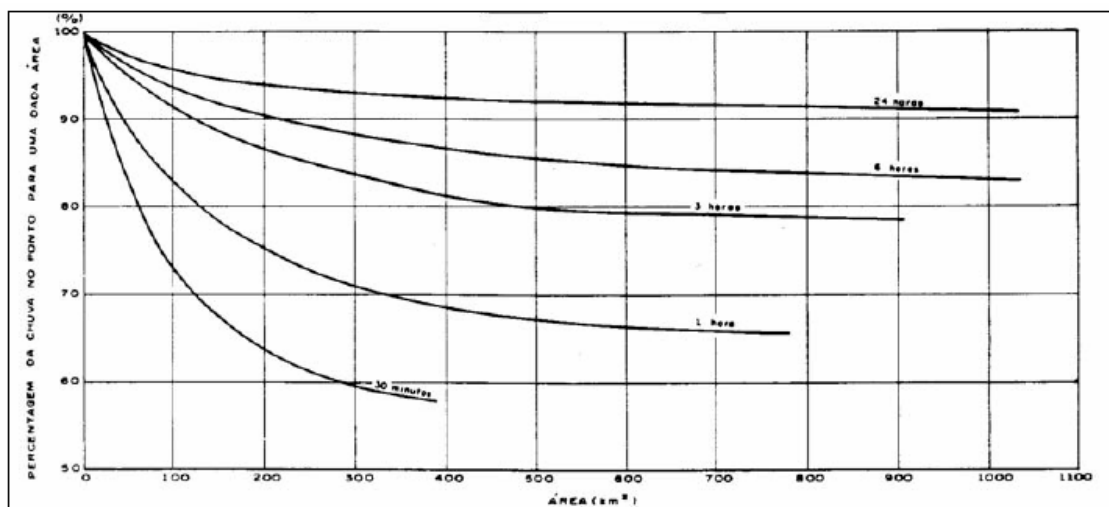


Figura 1: Curvas de relação entre chuva no ponto e chuva na área para uso com os valores de duração-freqüência (U.S. Weather Bureau). Fonte: CETESB, 1979.

2.1.1- Tempo de Concentração

Um grande número de métodos assume que a vazão máxima ocorre quando toda a área da bacia está contribuindo simultaneamente para a seção em estudo, ou seja, quando ocorre o tempo de concentração. Este tempo corresponde ao tempo que

leva a gota que cai no ponto mais distante da bacia, para atingir a seção em estudo, contada a partir do início da chuva.

Em geral, adota-se para a chuva crítica de uma pequena bacia hidrográfica uma duração igual ao tempo de concentração da bacia. Essa hipótese é válida quando se admite que a contribuição do escoamento superficial para a seção da bacia atinja um regime permanente, após a duração da chuva ter superado o tempo de concentração da bacia (ZAHED, 1995).

Existe um grande número de fórmulas e métodos para se obter o tempo de concentração de uma bacia. Em geral, são funções principalmente do comprimento e declividade do talvegue, da rugosidade da superfície, da área e da declividade da bacia.

As fórmulas para a obtenção do tempo de concentração são originadas de estudos experimentais de campo ou laboratório, devendo ser aplicadas em condições semelhantes para as quais foram determinadas. De modo geral, estas fórmulas são obtidas em função das características da bacia hidrográfica, tais como área, comprimento do talvegue, rugosidade do rio, córrego ou canal e declividade dos mesmos.

A grande diferença entre elas está no tipo de escoamento que predominou nos estudos experimentais nos quais foram obtidas. Os três tipos de escoamentos considerados são: escoamento sobre a superfície do terreno, escoamento em canais naturais e escoamento em canais artificiais e/ou galerias.

Segundo Marcellini (1994), existem várias fórmulas desenvolvidas para situações particulares. Portanto, é importante conhecer estas situações e verificar se há condições de aplicabilidade para a bacia hidrográfica de interesse.

Considerando que para pequenas bacias hidrográficas, na maioria dos casos, não se dispõe de dados simultâneos pluviométricos e fluviométricos que permitam a determinação experimental do tempo de concentração, apresenta-se a seguir uma

coletânea das metodologias de cálculo para estimativa dos tempos de concentração de bacias, geralmente a partir das características fisiográficas:

Porto (1995) apresenta diversas fórmulas para cálculo do tempo de concentração, algumas são apresentadas a seguir:

- A Fórmula de Kirpich de 1940 foi desenvolvida a partir de dados de sete bacias rurais do Tennessee, obtidos pelo Soil Conservation Service - SCS, com canais bem definidos e declividades variando de 3 a 10% e áreas de no máximo 0,5 km². O fato de ser desenvolvida para bacias tão pequenas é uma indicação de que os parâmetros devem representar o escoamento sobre superfícies.

$$t_c = 3,989 \times L_t^{0,77} \times S^{-0,385} \quad (2.01)$$

t_c = tempo de concentração, em min; L_t = comprimento do talvegue, em km e S = declividade do talvegue, em m/m.

- California Culverts Practice de 1942 foi obtida a partir da equação de Kirpich, na qual S foi substituído por L/H .

$$t_c = 57 \times L_t^{1,155} \times H^{-0,385} \quad (2.02)$$

t_c = tempo de concentração, em min; L_t = comprimento do talvegue, em km e H = diferença entre as cotas da seção de saída e o ponto mais a montante da bacia, em m.

- Dooge de 1956 foi determinada com dados de dez bacias rurais da Irlanda, seus parâmetros refletem o comportamento de bacias médias e escoamento predominante em canais.

$$t_c = 21,88 \cdot A^{0,41} \cdot S^{-0,17} \quad (2.03)$$

t_c = tempo de concentração, em min; A = área da bacia, em km² e S = declividade do talvegue, em m/m .

- Onda Cinemática de 1963 deduzida a partir da teoria da onda cinemática, aplicada a superfícies a partir das hipóteses de escoamento turbulento e chuva com intensidade constante. É adequada para bacias muito pequenas, nos quais o escoamento em superfícies seja predominante.

$$t_c = 447 \cdot (L_t \cdot n)^{0,6} \cdot S^{-0,3} \cdot I_e^{-0,4} \quad (2.04)$$

t_c = tempo de concentração, em min; A = área da bacia, em km^2 ; L_t = comprimento do talvegue, em km; n = rugosidade de manning; S = declividade do talvegue, em m/m e I_e = precipitação efetiva, em mm/h;

- Fórmula da Federal Aviation Agency de 1970 é válida para casos em que predomine o escoamento em superfícies, em pequenas bacias.

$$t_c = 22,73 \cdot (1,1 - C) \cdot L_t^{0,50} \cdot S^{-0,33} \quad (2.05)$$

t_c = tempo de concentração em min; L_t = comprimento do talvegue, em km; S = declividade do talvegue, em m/m e C = coeficiente de escoamento superficial do Método Racional.

- SCS – “Lag Formula” de 1975 foi desenvolvida em bacias rurais com áreas de drenagem até 8 km^2 e reflete o escoamento em superfícies.

$$t_c = 3,42 \cdot L_t^{0,8} \cdot [(1000/CN) - 9]^{0,7} \cdot S^{-0,5} , \quad (2.06)$$

t_c = tempo de concentração, em min; L = comprimento do talvegue, em km; S = declividade do talvegue, em m/m e CN = número da curva (método do SCS).

- SCS – Método Cinemático de 1975 consiste que o tempo de concentração é a somatória dos tempos de trânsito dos diversos trechos que compõem o comprimento do talvegue.

$$t_c = \frac{1000}{60} \sum \frac{L}{V} \quad (2.07)$$

t_c = tempo de concentração em min; L = comprimento do talvegue, em km e V = velocidade média no trecho, em m/s.

- Corps Engineers 1946 (apud SILVEIRA, 2005).

$$t_c = 11,46 \cdot L_r^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad (2.08)$$

t_c = tempo de concentração, em min; L = comprimento do rio, em km e S = declividade do rio, em m/m.

- Ven te Chow 1962 (apud SILVEIRA, 2005).

$$t_c = 9,6 \cdot L_r^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (2.09)$$

t_c = tempo de concentração, em min; L = comprimento do talvegue, em km e S = declividade do talvegue, em m/m.

Silveira (2005) verificou e avaliou o desempenho de 23 fórmulas do tempo de concentração: Izzard, Kerby Hatha Way, Onda Cinemática, FAA, Kirpich, SCS Lag, Simas-Hawkins, Ven te Chow, Dooge, Johnstone, Corps Engineers, Giandotti, Pasini, Ventura, Picking, DNOS, George Ribeiro, Schaake et al, McCuen et al, Carter, Eagleson, Desbordes e Espey-Winslow, em bacias urbanas e rurais brasileiras, fornecendo indicadores para uma escolha consciente de uso das fórmulas empíricas disponíveis. Como resultado da pesquisa, foi formulada uma tabela com as equações de tempo de concentração que obtiveram bons resultados, considerando os erros avaliados na pesquisa, para bacias rurais e urbanas. Com base nas avaliações realizadas no estudo, o autor recomendou as fórmulas de tempo de concentração de Corps Engineers, Ven te Chow, Onda Cinemática e Kirpich para bacias rurais com áreas inferiores a 12000 km² e Kirpich, Carter, Schaak, Desbordes para bacias urbanas com áreas até 5 km². O autor também conclui que as fórmulas são mais precisas para bacias rurais do que para bacias urbanas.

Tucci (2000) apresentou um estudo sobre a relação do coeficiente de escoamento de bacias urbanas (C) com a área impermeável e a vazão máxima correspondente dessas bacias, analisando o impacto das áreas impermeáveis no gerenciamento do espaço urbano. Os resultados obtidos apresentaram um bom ajuste com dados observados, considerando que apenas a área impermeável foi utilizada como

variável independente. Este tipo de relação foi utilizado para analisar a vazão específica de bacias urbanas em função das áreas impermeáveis e estabelecer relações com parâmetros de urbanização. A análise realizada no artigo não teve como objetivo determinar coeficientes para projeto.

2.1.2- Tempo ou Período de Retorno

A magnitude de uma enchente é representada, muitas vezes, em função da probabilidade de ser igualada ou superada. O inverso da probabilidade de ser igualada define um período médio de tempo em anos, entre a ocorrência de enchentes de uma certa magnitude ou maior, denominado período de recorrência ou tempo de retorno (GENOVEZ, 2001).

Segundo Porto (1995), os valores da TABELA 1 são encontrados na literatura técnica e desfrutam de certo conceito internacional.

Tabela 1: Períodos de retorno para diferentes ocupações de área.

| Tipo de Obra | Tipo de Ocupação da área | T (anos) |
|----------------|--|----------|
| Microdrenagem | Residencial | 2 |
| Microdrenagem | Comercial | 5 |
| Microdrenagem | Áreas com edifícios de serviços ao público | 5 |
| Microdrenagem | Aeroportos | 2-5 |
| Microdrenagem | Áreas comerciais e artérias de tráfego | 5-10 |
| Macro drenagem | Áreas comerciais e residências | 50-100 |
| Macro drenagem | Áreas de importância específica | 500 |

Fonte: Porto (1995).

As dificuldades em se estabelecer o período de retorno fazem com que a escolha seja feita sobre valores aceitos de forma mais ou menos ampla pelo meio técnico.

2.1.3- Intensidade-Duração-Frequência

A precipitação máxima pontual pode ser caracterizada através das relações intensidade-duração-frequência. Essas relações são obtidas através de uma série de dados de chuvas intensas, longas e representativas do local de interesse.

De acordo com CETESB (1979), a intensidade é a quantidade de precipitação que ocorre em uma unidade de tempo para uma chuva de uma dada frequência e com

uma duração igual ao tempo de concentração. Após a seleção do período de retorno da tormenta, deve ser construído um gráfico mostrando intensidade da chuva versus duração.

Uma forma comum de encontrar as relações de intensidade-duração e freqüência - IDF é representada pelas expressões obtidas por meio de ajustes de distribuições de freqüência, tais como:

$$i = K \frac{T^m}{(t + t_0)^n} \quad (2.10)$$

i é a intensidade média da chuva em mm/min ou mm/h; t é a duração da chuva, em minutos; T é o período de recorrência, em anos; m , n , t_0 e K são parâmetros relativos ao ajuste da equação.

A determinação dessa relação exige um trabalho de tabulação, análise e interpretação de uma grande quantidade de pluviogramas. A pequena quantidade de trabalhos desenvolvidos com essa finalidade são uma demonstração de que isso ainda representa um grande obstáculo.

Villela & Mattos (1975), Pinto et al. (1976), Tucci (1993) e Silva et al. (1999) apresentaram equações IDF para várias cidades brasileiras.

A intensidade a ser considerada no método é a máxima média observada num intervalo de tempo igual ao tempo de concentração da bacia, para o período de retorno escolhido.

Procura-se analisar as relações intensidade-duração-freqüência das chuvas observadas, determinando-se para os diferentes intervalos de duração da chuva, qual o tipo de equação e qual o número de parâmetros dessa equação que melhor caracterizam aquelas relações (VILLELA; MATTOS, 1975).

Pinto & Santana (2006) estimaram as intensidades máximas de precipitação com duração e freqüência específicas capazes de ocorrer na Bacia do Rio Jequitinhonha utilizando dados de precipitação pluvial.

Silva et al (1999) estimaram os parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação utilizando o modelo de regressão não linear Gauss-Newton e o modelo Pluvio 1.0 para o estado do Rio de Janeiro e Espírito Santo, utilizando dados de chuvas intensas de 13 estações pluviográficas, obtendo a equação intensidade-duração-frequência para cada localidade estudada.

Zuffo (2004) estudou a equação da chuva utilizada na região de Campinas-SP, mostrando que a equação atualmente utilizada subestima as precipitações de projeto, implicando em subdimensionamento das obras hidráulicas e contribuindo para o aumento das enchentes na cidade, mostrando a necessidade de revisões periódicas e atualizações nas equações de chuvas para evitar o subdimensionamento de obras hidráulicas urbanas e rurais contra as enchentes.

2.1.4- Precipitação Excedente

A parte da chuva que se transforma em escoamento superficial é denominada de precipitação efetiva ou excesso de precipitação. Sua determinação é um dos fatores mais importantes na determinação da vazão máxima a partir de dados de chuva. Devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo, é difícil de ser calculada. É determinada subtraindo da precipitação as perdas devido a interceptação, armazenamento na superfície e infiltração.

Os métodos utilizados podem ser classificados em físicos conceituais e empíricos. Os métodos mais usados no cálculo da precipitação efetiva são: Método do índice Φ , Método de Horton, Método do Soil Conservation Service (SCS) e Método de Green e Ampt (GA).

O método do número da curva de escoamento superficial, ou simplesmente método do CN, permite estimar a precipitação excedente resultante de uma determinada chuva para uma área de drenagem conhecida. Desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1986), sua primeira publicação data de 1954.

O método SCS depende de três variáveis apenas: precipitação, umidade antecedente do solo e complexo hidrológico solo-cobertura.

Segundo Sartori (2004), o método foi desenvolvido originalmente para áreas rurais e, com o passar do tempo, tem sido objeto de estudos, os quais contribuíram e ainda contribuem para seu aprimoramento, incluindo aplicações em bacias urbanas. Durante esse período, o método se difundiu, ganhou credibilidade e tornou-se muito popular, sendo utilizado em diversos países.

Equação do método SCS,

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, P > 0,2S \quad (2.11)$$

Q= escoamento superficial direto, em mm; P= precipitação total, em mm e S = retenção potencial do solo (diferença entre P e Q no início da chuva), em mm.

O SCS propôs uma relação linear entre as variáveis S e I_a :

$$I_a = \lambda S \quad (2.12)$$

sendo λ uma constante de proporcionalidade da abstração inicial em relação a retenção potencial máxima.

O SCS adotou um valor médio $\lambda=0,2$, que é o padrão do método recomendado para projeto. Foram utilizados dados de pequenas bacias hidrográficas dos Estados Unidos para a determinação desse valor.

Para o cálculo do escoamento direto a partir de uma precipitação conhecida existe a necessidade de uma estimativa média para a variável S. Com este propósito, visando uma aplicação mais prática da equação 2.11, foi adotado pelo SCS o número da curva de escoamento superficial, o CN.

Este parâmetro adimensional representa os efeitos da combinação do grupo hidrológico do solo com o tipo de uso e cobertura do solo e tratamento da terra e umidade antecedente.

Estas curvas foram numeradas de 0 a 100 e S está relacionado ao CN por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2.13)$$

A capacidade máxima de retenção da bacia (S), expressa em altura d'água, procura exprimir de alguma forma uma capacidade potencial máxima da bacia para absorver a água, que se torna assim não utilizável para a geração de escoamento.

Amorim & Leopoldo (1996) aplicaram o modelo SCS da curva numérica, o qual é definido, basicamente, em função da precipitação e armazenamento temporário da bacia, para obtenção do escoamento superficial de uma pequena bacia sob utilização agrícola, localizada no município de São Manuel, estado de São Paulo.

Gumbo et al. (2001) descreveram um método para avaliação da eficácia de redes de drenagem, combinando um modelo de elevação digital com um modelo chuva-vazão, baseado no manual de conservação de solo Sul Africano (SCS-SA). Os autores concluíram que essa combinação do modelo de elevação digital com o modelo chuva-vazão, dentro de uma plataforma SIG, é útil para a estimação do escoamento sobre bacias parcialmente urbanizadas e para determinação do tamanho e da orientação de drenos, sendo particularmente útil para áreas novas, nas quais o desenvolvimento está em fase inicial.

2.1.5- Número da Curva de Escoamento Superficial – CN

O SCS desenvolveu um índice, que foi chamado de número da curva do escoamento (CN), para representar o efeito hidrológico combinado do solo, uso da terra, classe de tratamento da terra, condição hidrológica e umidade antecedente do solo (MCCUEN, 1982).

De acordo com McCuen (1982) o volume da precipitação é provavelmente a característica meteorológica mais importante na estimativa do volume do escoamento. O tipo do solo, o uso de terra, e a condição hidrológica da cobertura do solo são os fatores da bacia que apresentam o impacto mais significativo na estimativa do volume do escoamento. A umidade antecedente do solo é também um determinante importante do volume do escoamento. Estes fatores podem ser avaliados por meio dos exames de solo, investigações locais e mapas de uso de terra.

Segundo Genovez (2001), o valor de CN é uma constante que varia de 0 a 100. Quanto maior o valor de CN, maior a quantidade de escoamento superficial direto esperado para uma determinada chuva. Para CN = 100, toda a precipitação escoar superficialmente.

Nas bacias hidrográficas em que se reconhecem dois ou mesmo mais grupos hidrológicos de solo, é preciso avaliar a percentagem de cada grupo, e calcular a média ponderada de CN, utilizando as áreas correspondentes a cada grupo hidrológico de solo como pesos.

O método proposto pelo SCS divide os tipos de solo em quatro grandes grupos hidrológicos (TUCCI, 1993).

A: solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila;

B: solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.

C: solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo;

D: solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

De acordo com McCuen (1982), são definidas três condições de umidade antecedente da bacia,

Na TABELA 2 são relacionados os grupos hidrológicos do solo com o uso da terra e a condição de superfície do solo, segundo SCS, com o número de curva do escoamento superficial CN, para a condição média de umidade antecedente.

Tabela 2: Valores do parâmetro CN para bacias rurais. FONTE: Tucci, 1993.

| Uso do Solo | Superfície | A | B | C | D |
|-------------------------------------|------------------------------------|----|----|----|----|
| Solo lavrado | com sulcos retilíneos | 77 | 86 | 91 | 94 |
| | em fileiras retas | 70 | 80 | 87 | 90 |
| Plantações | em curvas de nível | 67 | 77 | 83 | 87 |
| Regulares | terraceado em nível | 64 | 76 | 84 | 88 |
| | em fileiras retas | 64 | 76 | 84 | 88 |
| Plantações de Cereais | em curvas de nível | 62 | 74 | 82 | 85 |
| | terraceado em nível | 60 | 71 | 79 | 82 |
| | em fileiras retas | 62 | 75 | 83 | 87 |
| Plantações de legumes ou cultivados | em curvas de nível | 60 | 72 | 81 | 84 |
| | terraceado em nível | 57 | 70 | 78 | 89 |
| | pobres | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Normais | 49 | 69 | 79 | 94 |
| Pastagens | Boas | 39 | 61 | 74 | 80 |
| | pobres, em curvas de nível | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | normais, em curvas de nível | 25 | 59 | 75 | 83 |
| Campos permanentes | boas, em curvas de nível | 6 | 35 | 70 | 79 |
| | Normais | 30 | 58 | 71 | 78 |
| | esparsas, de baixa transpiração | 45 | 66 | 77 | 83 |
| Chácaras | Normais | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | densas, de alta transpiração | 25 | 55 | 70 | 77 |
| Estradas de Terra | Normais | 56 | 75 | 86 | 91 |
| | Más | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Florestas | de superfície dura | 74 | 84 | 90 | 92 |
| | muito esparsas, baixa transpiração | 56 | 75 | 86 | 91 |
| | Esparsas | 46 | 68 | 78 | 84 |
| | densas, alta transpiração | 26 | 52 | 62 | 69 |
| | Normais | 36 | 60 | 70 | 76 |

Condição I: solos estão secos, porém não até o ponto de murchamento das plantas, podendo ser cultivado satisfatoriamente o solo;

Condição II: condições médias;

Condição III: choveu muito, ou choveu pouco, mas com baixas temperaturas nos últimos 5 dias, solo saturado.

No Brasil, alguns pesquisadores têm se esforçado para adaptar a classificação dos solos proposta por pelo SCS para os tipos de solos brasileiros.

Em 1979 tiveram início estudos com o objetivo de adaptar o método SCS às características dos solos brasileiros, com a publicação do trabalho de Setzer & Porto (1979) que propuseram, aproveitando a idéia do SCS, cinco grupos hidrológicos de solo, conforme sua natureza física e tipo de perfil, para o Estado de São Paulo.

Segundo Setzer & Porto (1979), as condições de saturação das bacias são:

A classificação hidrológica é feita sem considerar sua topografia, tipo de uso e cobertura vegetal. A classificação proposta é:

A: Solos arenosos, com baixo teor de argila total, inferior a 8%; não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

B: Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas este limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, entre 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.

C: Solos barrentos com teores de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser 40% e 1,5 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade camada mais densificada que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

D: Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

E: Solos barrentos, como C, mas com camada argilosa impermeável ou com pedras. Ou sem tal camada, mas com o teor de argila superando 40%. No caso de terras roxas este teor pode subir a 60% (no caso D, 45%).

Condição I: Os solos estão secos, mas não a ponto de provocar murchamento das plantas, mesmo as cultivadas, enquanto é alta a percentagem de área arada que permite infiltração rápida das águas pluviais.

Condição II: Condição em que os solos normalmente se encontram na estação úmida do ano, condição intermediária, mais comum do que a I e a III;

Condição III: O solo está quase saturado porque nos 5 últimos dias que precederam à precipitação intensa que nos interessa, já havia chovido muito ou com baixas temperaturas que reduziram sobremaneira a evapotranspiração. Assim, é grande o perigo de inundação na parte mais baixa da bacia.

A TABELA 3 apresenta a numeração das curvas de escoamento de chuvas intensas, conforme o complexo hidrológico do solo e sua cobertura vegetal, propostas, por Setzer & Porto (1979).

Tabela 3: Valores do parâmetro CN. Fonte: Setzer & Porto (1979).

| Cobertura Vegetal ou tipo de uso do solo | Defesa contra a erosão | Situação hidrológica de infiltração | A | B | C | D | E |
|--|------------------------|-------------------------------------|----|----|----|----|----|
| Arado, quase sem cobertura vegetal | SR | Boas | 65 | 80 | 88 | 92 | 95 |
| | C | Boas | 65 | 78 | 86 | 90 | 92 |
| Cultivos de ciclo curto e arações freqüentes | SR | Más | 60 | 72 | 81 | 87 | 90 |
| | SR | Boas | 52 | 66 | 75 | 82 | 86 |
| | C | Más | 56 | 65 | 78 | 84 | 87 |
| | C | Boas | 48 | 60 | 72 | 78 | 82 |
| | C-T | Más | 52 | 62 | 74 | 80 | 84 |
| Cultivos de ciclo médio, arações anuais | C-T | Boas | 45 | 55 | 67 | 75 | 80 |
| | SR | Más | 58 | 65 | 73 | 82 | 88 |
| | SR | Boas | 54 | 62 | 70 | 79 | 85 |
| | C | Más | 55 | 64 | 72 | 78 | 84 |
| | C | Boas | 50 | 60 | 67 | 75 | 83 |
| Semeação densa ou a lanço; cobertura curta, mas densa, como a das leguminosas e dos pastos rodízio | T | Más | 52 | 62 | 70 | 77 | 82 |
| | T | Boas | 48 | 55 | 65 | 73 | 80 |
| | SR | Más | 56 | 64 | 72 | 80 | 86 |
| | SR | Boas | 50 | 58 | 66 | 76 | 82 |
| | C | Más | 54 | 60 | 69 | 76 | 83 |
| Pastagem velha com arbustos | C | Boas | 48 | 56 | 64 | 72 | 80 |
| | T | Más | 50 | 58 | 65 | 75 | 80 |
| | T | Boas | 45 | 52 | 60 | 70 | 76 |
| | | Más | 65 | 70 | 78 | 85 | 90 |
| | | Médias | 60 | 66 | 75 | 82 | 87 |
| Reflorestamento | | Boas | 56 | 62 | 72 | 79 | 84 |
| | C | Más | 55 | 62 | 70 | 78 | 86 |
| | C | Médias | 42 | 59 | 67 | 75 | 82 |
| | C | Boas | 50 | 56 | 64 | 72 | 79 |
| | SR | Más | 35 | 50 | 62 | 74 | 83 |
| Mata, capoeira velha | SR | Boas | 30 | 42 | 55 | 68 | 78 |
| | C | Más | 30 | 45 | 57 | 69 | 80 |
| | C | Boas | 25 | 36 | 52 | 64 | 75 |
| | | Más | 32 | 40 | 55 | 67 | 76 |
| Gramados tratados | | Boas | 18 | 25 | 42 | 58 | 70 |
| | | Más | 65 | 72 | 78 | 84 | 88 |
| Estradas de Terra | | Boas | 59 | 67 | 74 | 81 | 86 |
| | SR | Más | 80 | 85 | 90 | 93 | 95 |
| | C | Boas | 74 | 80 | 86 | 90 | 92 |

Nota: SR= sulcos retos; C=cultivo em contorno, paralelamente às curvas de nível; T= terraceamento. No caso de estradas de terra, SR é quando as águas pluviais são alojadas ao pé de barrancos, e C quando não atravessam a estrada. A estimativa dos dados numéricos baseia-se na condição II das bacias hidrográficas e em $A_i = 0,2S$.

Lacerda et al. (2001) estudaram os efeitos de escala da bacia e uso do solo sobre o escoamento na bacia representativa de Sumé localizada no Cariri Paraibano. A metodologia do SCS foi aplicada no cálculo do escoamento de várias bacias com tamanhos diferentes e foram comparados com os valores observados. Os resultados mostraram que os valores de CN calculados diminuiriam com o tamanho da bacia, essa relação foi representada por funções de regressão entre CN e a área de drenagem.

Baugarten et al. (2003) implementaram em sistema de informação geográfica o método CN do Soil Conservation Service – SCS para determinação da precipitação efetiva na Bacia do Rio Chopim. Concluíram que a utilização de SIG em problemas de recursos hídricos mostrou-se eficaz para a sistematização de modelos matemáticos, principalmente pela facilidade na definição da distribuição espacial dos parâmetros.

Sartori (2004) analisou e comparou as classificações hidrológicas de solo utilizando a classificação do SCS, baseada nos solos dos Estados Unidos, e uma classificação baseada nas características dos solos brasileiros, proposta por Lombardi Neto em 1989. Das comparações efetuadas, foi observado que a classificação baseada nas características dos solos brasileiros foi condizente com a realidade, enquanto que os resultados obtidos com a classificação do SCS foram subestimados em 90% dos eventos analisados.

Rodrigues et al. (2004) verificaram que as distribuições de precipitação adimensionais de projeto (tipo II e III), desenvolvidas pelo SCS, têm suas curvas semelhantes às geradas a partir das equações de intensidade-duração-freqüência das cidades de Fortaleza e Curitiba. Com as equações de cada cidade, foi realizado um estudo para períodos de retorno de 50 e 10.000 anos, obtendo-se os valores das precipitações adimensionais de projeto. Verificou-se que as curvas obtidas pelas equações de intensidade-duração-freqüência e as fornecidas pelo SCS são bastante semelhantes, podendo-se aplicar as curvas SCS tipo II e III a diversas cidades brasileiras com uma certa razoabilidade, verificando-se previamente se as curvas geradas a partir de equações disponíveis na literatura tendem a ter comportamentos similares.

Vendrame & Lopes (2005) analisaram o crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica do escoamento superficial da bacia do Rio Parangaba, localizada em São Paulo. Utilizando o modelo IPHS1, analisaram o pico de enchente para três cenários pré-estabelecidos: antes da ocupação, ocupação atual e urbanização futura. Das comparações entre os três cenários observaram que a vazão máxima para todas as seções de controle aumentou significativamente em relação à vazão natural.

2.2 – Vazões de Projeto

Segundo Tucci (1993), a vazão máxima de um rio é entendida como sendo o valor associado a um risco de ser igualado ou ultrapassado. A vazão máxima é utilizada na previsão de enchentes e no projeto de obras hidráulicas.

A estimativa dos valores de vazão máxima tem importância decisiva nos custos e na segurança dos projetos de engenharia, como relatou AWWA (apud TUCCI, 1993), detectando que 20% das falhas de barragens americanas foram devidas a subdimensionamento dos vertedores.

A disponibilidade de longas séries de precipitação é muito mais freqüente do que a de vazão. Por meio do estudo das precipitações máximas pode-se conhecer a vazão de enchente de uma bacia.

O estudo da freqüência de vazões contrapõe uma dificuldade, praticamente insuperável, constituída pela carência quase total de dados hidrológicos em pequenas áreas de drenagem e muitas vezes mesmo em grandes áreas. É exatamente para pequenos rios que se necessita de equipamentos mais caros. Uma alternativa para levar em conta os problemas de freqüência para esses locais sem dados históricos de vazão é utilizar a série histórica de precipitações (ANDREOLLI, 2003).

Quando não se dispõe de série de vazões observadas para se determinar a vazão máxima de projeto, esta deve ser determinada indiretamente a partir de dados observados de chuva, através de modelos de simulação do escoamento superficial

na bacia hidrográfica. Para isso seleciona-se uma série de chuvas intensas para se estimar a precipitação admitida como a causadora da vazão máxima de projeto.

Euclides et al. (apud ELESBOM, 2004) afirmam que a estimativa de vazões máximas associadas a um determinado risco de ocorrência é importante para a determinação de áreas sujeitas a inundação.

De acordo com Genovez (2001), o estudo de vazões de enchente em pequenas bacias é muito importante devido à necessidade de dimensionamento de pontes e bueiros em estradas e também devido ao notório crescimento do aproveitamento dos recursos hídricos de pequenas bacias, tais como sistemas de abastecimento de água a pequenas comunidades, sistemas de irrigação, pequenas centrais hidroelétricas, entre outros.

2.3 – Métodos de Estimativa de Vazão Máxima

As vazões máximas podem ser estimadas com base no ajuste de uma distribuição estatística, regionalização de vazões máximas e precipitação. Quando existem dados históricos de vazão no local de interesse e as condições da bacia hidrográfica não se modificaram, pode ser ajustada uma distribuição estatística. A mesma é utilizada para a estimativa da vazão máxima para um risco escolhido. Quando não existem dados ou a série é pequena, pode-se utilizar a regionalização de vazões máximas ou as precipitações. A regionalização permite estimar a vazão máxima em locais sem dados, com base em postos da região. As precipitações máximas são transformadas em vazões através de modelos matemáticos. Este método é útil quando a bacia sofre modificações (TUCCI, 1993).

Na literatura existem vários exemplos desses tipos de modelo. Os principais dados necessários para esses modelos são: precipitação de projeto e características físicas da bacia, como área, comprimento, tipo de solo, cobertura natural, entre outros.

Segundo Porto (1995), a literatura especializada registra uma grande variedade de métodos empíricos para determinação das vazões de projeto, sendo que,

invariavelmente, essas técnicas baseiam-se no Método Racional ou na teoria do hidrograma unitário, não apresentando grandes diferenças de significado entre si.

2.3.1 – Métodos de Estimativa de Vazões Máximas Baseados em Equações Empíricas.

Na tentativa de determinar a vazão de pico de cheias, muitas equações empíricas foram estabelecidas, nas quais a vazão é apresentada como função de características físicas da bacia, fatores climáticos, etc. São apresentados, a seguir, alguns métodos de transformação chuva-vazão:

Pinto et al. (1976) descreveram em detalhes os métodos apresentadas a seguir:

Creager desenvolveu uma equação que considera dois parâmetros, K' , coeficiente que depende das características fisiográficas da bacia e A , área drenada da bacia em km^2 , sendo a vazão (Q) obtida em m^3/s . Os valores do coeficiente K' dependem da orografia da bacia, tipo de solo, cobertura vegetal e topografia da bacia.

$$Q = 1,3K' \left(\frac{A}{2,59} \right)^{0,936 \cdot A^{-0,048}} \quad (2.14)$$

Equação proposta por Scimemi leva em consideração apenas a área de drenagem da bacia. A equação é recomendada para áreas inferiores a 1000 km^2 . A área deve ser em km^2 e a vazão é obtida em m^3/s .

$$Q = \left(\frac{600}{A+10} + 1 \right) A \quad (2.15)$$

Os parâmetros considerados no método de Iszkowski são a morfologia da bacia, representada pelo coeficiente K , a área da bacia em Km^2 , a precipitação média anual, em mm , e um coeficiente m_i que é tabelado e depende da área da bacia. A vazão Q é obtida em m^3/s .

$$Q = \frac{K \cdot m_i \cdot h \cdot A}{1000} \quad (2.16)$$

As equações de Ganguillet, Kutter, Kresnik, Kuichling Murph entre outros, utilizam a área de drenagem da bacia associadas a coeficientes a, b e c, para a determinação da vazão.

$$Q = \frac{a}{b + \sqrt{A}} \quad \text{e} \quad Q = \left(a + \frac{b}{c + A} \right) A \quad (2.17)$$

O método Racional é largamente utilizado na determinação de vazão máxima de projeto para bacias pequenas ($\leq 3\text{Km}^2$). Os princípios básicos dessa metodologia segundo são (GENOVEZ, 2001):

- a) Considera a duração da precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração. Ao considerar esta igualdade admite-se que a bacia seja suficientemente pequena para que esta situação ocorra, pois a duração é inversamente proporcional à intensidade;
- b) Adota um coeficiente único de perdas, denominado C, estimado com base nas características de permeabilidade da superfície da bacia;
- c) Não avalia o volume da cheia, e nem a distribuição temporal das vazões;

A equação do Método Racional é apresentada a seguir:

$$Q = 0,278 CiA \quad (2.18)$$

i= intensidade da precipitação, em mm/h; A= área da bacia, em Km^2 e; C= coeficiente de perdas ou coeficiente de escoamento e a vazão Q_{max} , em m^3/s .

No Método Racional a intensidade da precipitação é obtida por meio de curvas de intensidade x duração x freqüência, ou fórmulas empíricas equivalentes. As relações são elaboradas com base em dados de postos pluviográficos existentes em cada região.

A relação entre o volume total precipitado e o volume total escoado superficialmente é denominado de coeficiente de escoamento superficial. (GENOVEZ, 2001).

O coeficiente de escoamento superficial C é função de uma série de fatores, entre os quais o tipo de solo, ocupação da bacia, a rede de drenagem, o efeito do armazenamento e da retenção superficial, umidade antecedente e intensidade da chuva, entre outros.

O coeficiente C engloba os efeitos de infiltração, armazenamento por detenção, evaporação, retenção, encaminhamento das descargas e interceptação, efeitos esses que afetam a distribuição cronológica e a magnitude do pico de deflúvio superficial direto. (CETESB, 1979)

O coeficiente de escoamento C é um número adimensional que diz respeito à parcela da precipitação que escorre para o exutório da bacia pela superfície do solo. O restante da precipitação é infiltrada no solo, sofre evapotranspiração ou se perde por detenção ou armazenamento na superfície. É a variável do método racional mais suscetível de determinações imprecisas e requer muitos cuidados na sua seleção. Seu uso na equação implica numa relação fixa para qualquer área de drenagem.

A TABELA 04 apresenta valores de C em função das características da bacia e para períodos de retorno de 5 anos a 10 anos.

Tabela 4: Valores do coeficiente de escoamento superficial C. Fonte: Cetesb, 1979.

| Descrição da Área | Coeficiente de "Runoff" |
|---|-------------------------|
| Área Comercial | |
| Central | 0,70 a 0,95 |
| Bairros | 0,50 a 0,70 |
| Área Residencial | |
| Residências Isoladas | 0,35 a 0,50 |
| Unidades Múltiplas (separadas) | 0,40 a 0,60 |
| Unidades Múltiplas(conjugadas) | 0,60 a 0,75 |
| Lotes com 2.000 m ² ou mais | 0,30 a 0,45 |
| Área com prédios de apartamentos | 0,50 a 0,70 |
| Área Industrial | |
| Indústrias Leves | 0,50 a 0,80 |
| Indústrias Pesadas | 0,60 a 0,90 |
| Parques, Cemitérios | 0,10 a 0,25 |
| "Playgrounds" | 0,20 a 0,35 |
| Pátios de estradas de ferro | 0,20 a 0,40 |
| Áreas sem melhoramentos | 0,10 a 0,30 |
| Ruas | |
| Pavimentação asfáltica | 0,70 a 0,95 |
| Pavimentação de concreto | 0,80 a 0,95 |
| Passeios | 0,75 a 0,85 |
| Telhados | 0,75 a 0,95 |
| Terrenos relvados (solos arenosos) | |
| Pequena declividade (2%) | 0,05 a 0,10 |
| Declividade Média (2% a 7%) | 0,10 a 0,15 |
| Forte declividade (7%) | 0,15 a 0,20 |
| Terrenos relvados (solos pesados) | |
| Pequena declividade (2%) | 0,15 a 0,20 |
| Declividade Média (2% a 7%) | 0,20 a 0,25 |
| Forte declividade (7%) | 0,25 a 0,30 |

As bacias que apresentam superfície com diferentes características utilizam um valor médio de C, obtido por uma média ponderada dos diferentes valores de escoamento superficial C da bacia, tendo como base as áreas que representam.

A TABELA 5, apresentada por Genovez (2001), mostra valores do coeficiente C para vários períodos de retorno.

Tabela 5: Valores do coeficiente de escoamento C para diferentes períodos de retorno.

| 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 menor que 50% da área) | | | | | | | |
| Plana, 0-2% | 0.32 | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.44 | 0.47 | 0.58 |
| Média, 2-7% | 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, 0-2% | 0.25 | 0.28 | 0.30 | 0.34 | 0.37 | 0.41 | 0.53 |
| Média, 2-7% | 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, 0-2% | 0.21 | 0.23 | 0.25 | 0.29 | 0.32 | 0.36 | 0.49 |
| Média, 2-7% | 0.29 | 0.32 | 0.35 | 0.39 | 0.42 | 0.46 | 0.56 |
| Inclinada, >7% | 0.34 | 0.37 | 0.40 | 0.44 | 0.47 | 0.51 | 0.58 |
| Áreas Rurais | | | | | | | |
| Campos Cultivados | | | | | | | |
| Plana, 0-2% | 0.31 | 0.34 | 0.36 | 0.40 | 0.43 | 0.47 | 0.57 |
| Média, 2-7% | 0.35 | 0.38 | 0.41 | 0.44 | 0.48 | 0.51 | 0.60 |
| Inclinada, >7% | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.48 | 0.51 | 0.54 | 0.61 |
| Pastos | | | | | | | |
| Plana, 0-2% | 0.25 | 0.28 | 0.30 | 0.34 | 0.37 | 0.41 | 0.53 |
| Média, 2-7% | 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 |
| Florestas /Reflorestamento | | | | | | | |
| Plana, 0-2% | 0.22 | 0.25 | 0.28 | 0.31 | 0.35 | 0.39 | 0.48 |
| Média, 2-7% | 0.31 | 0.34 | 0.36 | 0.40 | 0.43 | 0.47 | 0.56 |
| Inclinada, >7% | 0.35 | 0.39 | 0.41 | 0.45 | 0.48 | 0.52 | 0.58 |

Fonte: cidade de Austin, Texas, USA, citada em Chow et al., 1988.

Segundo Cetesb (1979), o ajuste do Método Racional, para uso com a chuva máxima de projeto, pode ser feito multiplicando-se a correspondente expressão por um fator de freqüência C_f , TABELA 6, o qual é usado para levar em conta as condições antecedentes de precipitação. O produto de C por C_f não pode exceder 1,0.

Tabela 6: Fator de freqüência para correção do coeficiente de escoamento superficial C.

| Tempo de Retorno T (anos) | C_f |
|---------------------------|-------|
| 2 a 10 | 1 |
| 25 | 1,1 |
| 50 | 1,2 |
| 100 | 1,25 |

Fonte: CETESB, 1979

Zhou et al. (1996) utilizaram sistema de informações geográficas para a definição da rede de drenagem associada ao Método Racional, para simulação dinâmica da drenagem correspondente aos eventos de chuva, na implantação de um empreendimento localizado na costa norte de New South Wales, Austrália.

Benini et al. (2004) compararam os valores atuais e futuros da vazão de escoamento superficial da bacia do Córrego do Mineirinho, São Paulo, utilizando o Método Racional para o cálculo das vazões, combinado com o método Soil Conservation Service (SCS) para o cálculo do coeficiente de escoamento superficial, concluindo que com a conseqüente impermeabilização do solo e o aumento das áreas urbanizadas, com a implantação do novo Campus da USP em São Carlos, deverão ocorrer mudanças no uso e ocupação do solo, ocasionando um aumento expressivo no escoamento superficial.

Franco (2004) desenvolveu uma proposta para determinação da chuva crítica para o dimensionamento de bacias de retenção de águas pluviais, baseada no Método Racional, aplicada na Bacia do Rio Ressaca, juntamente com o método do hidrograma unitário do SCS. Concluiu que apesar de sua simplicidade, o Método Racional oferece resultados razoavelmente precisos para as áreas até 10 km² e tempos de retorno superiores a 5 anos.

2.3.2- Métodos de Estimativa de Vazões Máximas Baseadas na Teoria do Hidrograma Unitário.

De acordo com Tucci (1993), hidrograma é a denominação dada ao gráfico que relaciona a vazão com tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico, entre a ocorrência da precipitação e da vazão na bacia hidrográfica.

É simplesmente o gráfico em forma de curva, ao longo do tempo, das vazões causadas por um determinado hietograma, sendo a área abaixo dessa curva o volume de escoamento superficial direto, causado por uma chuva excedente sobre toda a área de drenagem.

O hidrograma pode ser caracterizado por três partes principais:

- ascensão, altamente correlacionada com a intensidade de precipitação, e com grande gradiente;
- região de pico, próximo ao valor máximo, quando o hidrograma começa a mudar de inflexão, resultado da redução da alimentação de chuvas e/ou amortecimento da bacia. Esta região termina quando o escoamento superficial acaba, resultando somente o escoamento subterrâneo;
- recessão. Nesta fase, somente o escoamento subterrâneo contribui para a vazão total do rio.

O escoamento superficial, que caracteriza as duas primeiras partes do hidrograma, pode ser descrito por modelos. Para simular o escoamento superficial é necessário separá-lo do escoamento subterrâneo e obter a precipitação efetiva que gerou o escoamento.

A seguir, são apresentados simplificações adotadas pelo Hidrograma Unitário (HU):

- Linearidade: o modelo admite que a transformação de precipitação efetiva em vazão é linear invariante, ou seja, admite a superposição dos efeitos e o HU constante no tempo;
- Distribuição Espacial Uniforme: a precipitação é a mesma em toda a bacia no intervalo de tempo de cálculo;
- Distribuição Temporal Uniforme: A intensidade da precipitação é constante no intervalo de tempo;
- Intervalo de tempo Δt : a escolha do intervalo de tempo ou duração Δt da precipitação depende do tempo de resposta da bacia. O intervalo de tempo deve ser suficientemente pequeno para que a distribuição do volume e dos

valores máximos instantâneos não seja distorcido. Esse intervalo não deve ser muito pequeno para evitar o processamento de uma quantidade exagerada de informações. O tempo de pico t_p tem sido utilizado para obtenção do valor do intervalo de tempo Δt . Os autores sugerem entre 3 e 5 pontos para representação da ascensão do hidrograma de escoamento superficial, onde ocorrem os maiores gradientes.

Marcellini (1994) analisou alguns dos parâmetros que influem na determinação dos hidrogramas de projeto de pequenas bacias hidrográficas. Discutiu a chuva de projeto a ser utilizada, analisou a influência da distribuição espacial da chuva sobre um hidrograma de projeto e fez uma análise de sensibilidade em relação a alguns parâmetros do hidrograma de projeto, fazendo recomendações para a obtenção de hidrogramas de projeto.

Segundo Mendonça (1977), o conceito do hidrograma unitário tornou-se largamente aceito como uma das mais notáveis contribuições para a ciência da hidrologia. Pelo fato da hidrógrafa unitária ser uma valiosa ferramenta, e haver necessidade de utilizá-la em bacias sem registros de medições, muitas pesquisas têm se encarregado de estabelecer hidrógrafas unitárias sintéticas, a partir das características físicas da área de drenagem. As características mais comumente usadas no desenvolvimento dessas relações são: área, inclinação, forma, topografia, densidade de rios e capacidade do canal.

Mendonça (1977) apresentou importantes estudos realizados no campo dos hidrogramas unitários, mostrados a seguir:

O método de Sherman de 1932 foi o primeiro a tratar do estudo de hidrógrafas unitárias e foi motivado pela observação da semelhança da forma de hidrógrafas para chuvas uniformes de mesma duração precipitadas sobre uma bacia. A finalidade do método é o cálculo de hidrógrafa unitária de período finito a partir de dados de descarga, supondo intensidade constante de precipitação. Sua principal contribuição foi o uso de uma duração definida para a chuva efetiva geradora do escoamento superficial. Sherman sugeriu que o cálculo da hidrógrafa unitária deveria se basear em cheias cujas precipitações fossem mais uniformes possíveis,

sobre toda a bacia, com grande intensidade e curta duração. O método, com o passar dos anos, foi estudado e trabalhado por outros hidrólogos que introduziram modificações nos cálculos.

Morgan e Hulinghorst, em 1939, obtiveram a Curva-S, que representa uma hidrógrafa unitária de duração infinita, sendo uma das formas em que a hidrógrafa unitária pode ser colocada em termos de tempo e descarga, independentemente da duração da precipitação. Foi desenvolvida a fim de evitar a necessidade do cálculo de hidrógrafa unitária de certa duração de dados de descargas provenientes de chuvas com tempo de precipitação efetiva igual à duração da hidrógrafa unitária. A Curva-S obtida a partir da hidrógrafa unitária com uma certa duração fornece a derivação de outras com durações diferentes. A descoberta da possibilidade de utilização da Curva-S na derivação de hidrógrafas unitárias foi um dos maiores avanços na teoria da hidrógrafa unitária pois com seu uso, não é necessária a procura nos registros de tempestades cujas durações sejam iguais às das hidrógrafas unitárias desejadas.

O método de Commons de 1942 partiu da consideração de uma forma semelhante de hidrógrafa de escoamento superficial para diferentes bacias e se baseia em um hidrograma adimensional, com base em inúmeras cheias no Texas. Este método ignora a variação das características de uma bacia para outra assumindo uma só forma para as curvas de escoamento superficial de todas as áreas de drenagem, não faz então qualquer referência à precipitação que dá origem ao hidrograma.

Clark propôs a primeira metodologia em 1945, para cálculo de hidrógrafa unitária instantânea, utilizando a técnica de propagação de cheias. O método translada escoamentos superficiais de sub-bacias, de acordo com os tempos de trânsito, até a saída e após, faz a propagação desses escoamentos por meio de um reservatório linear com a finalidade de considerar os efeitos de armazenamento das bacias e dos canais. Esse método pode ser aplicado em bacias de maior área de drenagem, pois leva em consideração os fenômenos de translação e o armazenamento de água na bacia.

O método de Nash de 1957 considerou a bacia formada por um conjunto de reservatórios lineares iguais dispostos em série.

O método de Dooge de 1959 considera a bacia de drenagem constituída por reservatórios e canais lineares dispostos em séries, sendo os reservatórios considerados responsáveis pelos efeitos de armazenamento, e os canais pelos efeitos de translação.

As metodologias de Clark, Nash e Dooge surgiram com finalidade de cálculo de hidrógrafas unitárias instantâneas utilizando os conceitos que seus autores faziam a respeito da resposta de bacias hidrográficas à precipitação, formando assim modelos conceituais.

Os métodos de Inversão através de matrizes e de O' (a) Tj 6.38196 0 Td 7 0 Td (e) Tj 6.7239 desenvolvidos para obtenção direta de hidrógrafas unitárias de período finito pela análise linear do sistema formado pela bacia hidrográfica.

Aorto

(s) Tj 6.38196 0 Td (1) Tj 6.72397 0 Td (9) Tj 6.7239 nidos da mérica.

de estabelecimento de hidrógrafas unitárias para bacias com registros insuficientes O método do oi Cons

Tempo de pico em horas:

$$t_a = \frac{D}{2} + 0,6t_c \quad (2.20)$$

Tempo de base, em horas:

$$t_b = 2,67 \cdot t_a \quad (2.21)$$

A vazão de pico em m^3/s para uma duração unitária $D = \frac{t_a}{5}$ ou $D = 0,133t_c$, é obtida

por:

$$q_p = \frac{2,08 \cdot A}{t_a} \quad (2.22)$$

t_c é o tempo de concentração da bacia, em horas; A é a área de drenagem da bacia, em km^2 e D é a duração da precipitação do hidrograma unitário, em horas.

Com os valores de q_p , t_p , t_b pode-se obter o hidrograma unitário sintético triangular do SCS, conforme apresentado na FIGURA 2.

O hidrograma curvilíneo pode ser obtido a partir do hidrograma unitário sintético triangular, utilizando um gráfico adimensional elaborado pelo SCS, com valores tabelados. Em função do tempo de ascensão do hidrograma t_p e da vazão de pico, q_p , para um tempo t e uma vazão q .

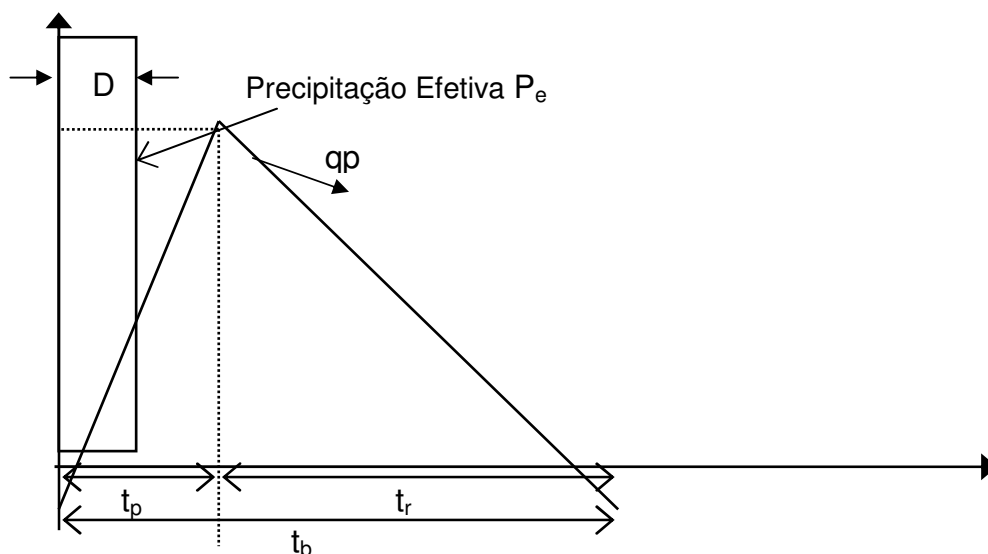


Figura 2: Hidrograma unitário triangular do SCS.

O método do hidrograma unitário de Snyder de 1938, segundo Genovez (2001), foi um dos primeiros a estabelecer um hidrograma unitário sintético, a partir de dados dos Apalaches (USA).

Os hidrogramas sintéticos determinam a forma do hidrograma e, portanto, a vazão de pico, a partir de parâmetros relacionados com as características físicas da bacia. O método consiste na determinação dos seguintes fatores:

Tempo de retardamento do hidrograma unitário, em horas:

$$t_p = \frac{C_t}{1,33} (L \cdot L_{cg})^{0,3} \quad (2.23)$$

L = comprimento do rio principal, em km, L_{cg} = distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo ao centro de gravidade da bacia, em km; C_t = coeficiente adimensional relacionado com a porcentagem de impermeabilização da bacia.

Tempo de duração da precipitação, em horas, é calculado por

$$t_r = \frac{t_{p1}}{5,5} \quad (2.24)$$

A vazão máxima da HU para uma chuva de 1 cm, em m^3/s , é

$$q_p = \frac{2,76 \cdot C_p \cdot A}{t_p} \quad (2.25)$$

C_p = coeficiente adimensional, relacionado com a capacidade de armazenamento da bacia; A = área da bacia, em km^2 , t_p = tempo de retardamento do hidrograma unitário medido do centro da chuva unitária até o pico do hidrograma, em horas.

Calculados os valores t_p , q_p , t_r , tem-se os três pontos pelos quais deve passar o hidrograma unitário.

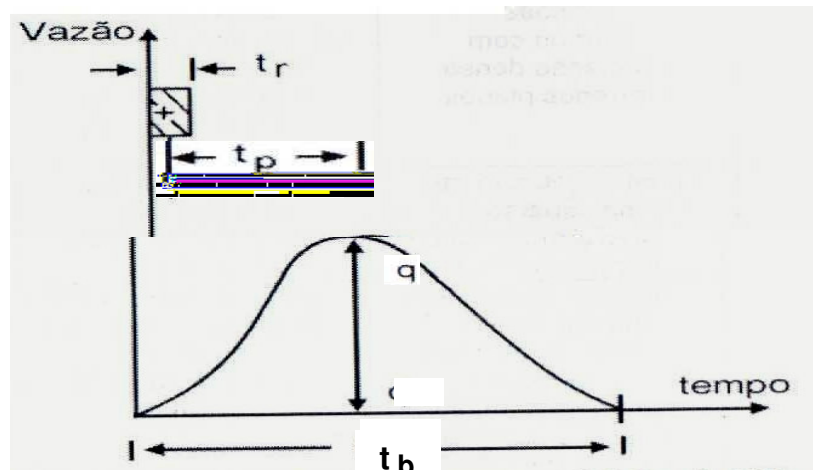


Figura 3: Hidrograma unitário sintético de Snyder. Fonte: Adaptado Genovez, 2001.

Existem diversos valores experimentais para C_t e C_p , calculados por vários pesquisadores em estudos realizados em pequenas bacias rurais no estado de São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, que também obtiveram equações regionalizadas para estes coeficientes, como citado por Genovez (2001).

De acordo com Porto (1995), a CHUP (*Colorado Urban Hydrograph Procedure*) fornece gráficos para a obtenção dos parâmetros C_t e C_p , em função da porcentagem de área impermeabilizada da bacia. A FIGURA 4 fornece diretamente o valor de C_t , enquanto a FIGURA 5 fornece o fator de pico P , utilizado, na equação de cálculo de C_p , apresentada a seguir:

$$C_p = 0,867P \cdot C_t \cdot A^{0,15} \quad (2.26)$$

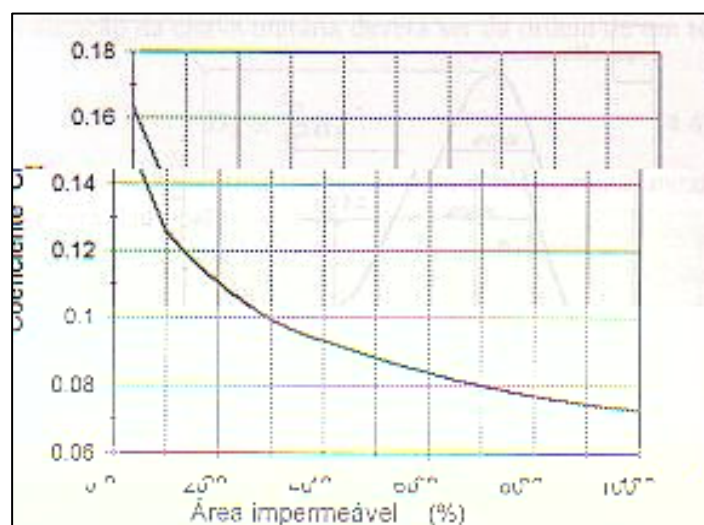


Figura 4: Gráfico para determinação de C_t . Fonte: Porto (1995)

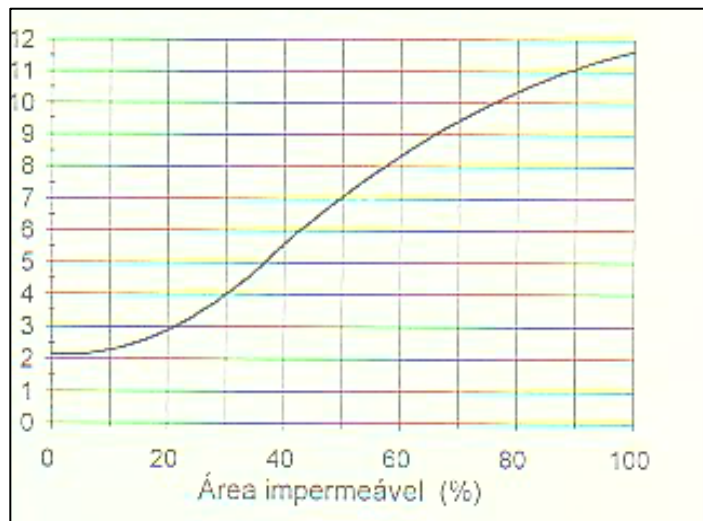


Figura 5:Gráfico para determinação do fator de pico. Fonte: Porto(1995).

O método de Santa Bárbara de 1975 (apud MARCELLINI, 2004), admite que o hidrograma de saída de uma bacia possa ser obtido por meio do trânsito de um hidrograma instantâneo de entrada, considerando-se um reservatório linear imaginário, cuja constante linear é o tempo de concentração da bacia hidrográfica. Este método considera a bacia com apenas uma isócrona, cujo intervalo de tempo é igual ao tempo de concentração.

O método admite que o hidrograma instantâneo de entrada é representado pela chuva efetiva, multiplicado pela área da bacia e dividido pelo intervalo de tempo dt .

$$I'(t) = \frac{P_e(t)A}{dt} \quad (2.27)$$

$I'(t)$ = hidrograma instantâneo em, m^3/s ; $P_e(t)$ =precipitação efetiva, em mm; A = área da bacia, em m^2 e dt = intervalo de tempo, em segundos.

Admitindo-se que a constante de armazenamento do reservatório linear é igual ao tempo de concentração, tem-se:

$$t_c = \frac{dV}{Q(2) - Q(1)} \quad (2.28)$$

t_c = tempo de concentração da bacia, em horas; dV = variação de armazenamento da bacia, em m^3 e $Q(2)$ e $Q(1)$ são as vazões de saída no reservatório no instante 2 e no instante 1, respectivamente.

Aplicando-se a equação da continuidade ao reservatório, em forma de diferenças, obtém-se:

$$dV = t_c(Q(2) - Q(1)) = \left(\frac{I'(1) + I'(2)}{2} \right) dt - \left(\frac{Q(1) + Q(2)}{2} \right) dt \quad (2.29)$$

Fazendo

$$K = \frac{dt}{2t_c + dt} \quad (2.30)$$

Obtém-se:

$$Q(2) = Q(1) + K[I'(1) + I'(2) - 2Q(1)] \quad (2.31)$$

A expressão anterior permite o cálculo da vazão no instante t , uma vez conhecidos a vazão no instante anterior, o hidrograma de entrada e o tempo de concentração da bacia. Normalmente, o intervalo de tempo, dt , é considerado igual ou inferior a um quinto do tempo de concentração.

Mendonça & Campos (1989) desenvolveram programas computacionais, em linguagem BASIC, para o cálculo de hidrogramas unitárias, utilizando os métodos de Sherman, Snyder, Soil Conservation Service, Clark, Nash, Dooge O' Donell e inversão de matrizes, mostrando exemplos de aplicação a uma bacia hidrográfica.

Pilar et al. (1998) apresentaram aplicação de uma metodologia, baseada no hidrograma unitário, gerado por aplicação de técnicas de SIG, para obtenção do hidrograma de escoamento superficial para eventos observados numa bacia agrícola de $1,1 \text{ km}^2$, localizada nas cabeceiras do rio Uruguai, lado brasileiro.

Reda (apud GENOVEZ, 2001) propôs um método para a determinação do hidrograma unitário sintético regionalizado, a partir das características fisiomorfológicas das bacias, utilizando registros de precipitação e vazão de oito

pequenas bacias rurais paulistas. Foram estabelecidas equações de regressão linear relacionando o formato do hidrograma unitário as características fisiomorfológicas da bacia.

2.4 – Sistema de Informações Geográficas Aplicado no Gerenciamento de Recursos Hídricos

De acordo com Aspiazu & Brites (apud SANTOS, 2001), sistemas de informações geográficas são técnicas empregadas na integração e análise de dados provenientes das mais diversas fontes, como imagens fornecidas por satélites terrestres, mapas, cartas climatológicas, censos, dentre outros.

Os sistemas de informações geográficas constituem conjuntos interativos de subsistemas orientados à organização da informação espacial, com o objetivo de administrar elementos de apoio à tomada de decisões (SANTOS, 2001).

As formas de integração dos SIG com os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos podem ocorrer das seguintes formas (MENDES; CIRILO, 2001):

- Modelagem baseada nas funções presentes no SIG, com seus recursos internos, o que é bastante limitado, permitindo modelar apenas processos simplificados;
- Construção de pré e pós-processadores que permitam efetuar o intercâmbio dos dados entre o SIG e o modelo e vice-versa;
- Integração do código fonte de um programa no código do outro, o que requer programação.

Em aplicação no campo de recursos hídricos, a utilização do geoprocessamento visa reduzir o trabalho e o tempo no levantamento de informações geográficas para a determinação de parâmetros de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, planejamento da intervenção na bacia hidrográfica, administração do uso da água, suporte a planos e projetos e uma série de outras ações (MENDES; CIRILO, 2001).

Câmara & Ortiz (1998) apresentaram uma visão geral dos sistemas de informação geográfica, discutiram sua anatomia e funcionalidade e desenvolveram uma taxonomia para os componentes da estrutura interna de um SIG para entender seu funcionamento e avaliar suas potencialidades e limitações.

De acordo com Mendes & Cirilo (2001), um dos grandes ganhos da integração dos SIG aos sistemas de recursos hídricos diz respeito ao suporte que os mesmos podem proporcionar na obtenção e análise de informações espaciais e suprimento de dados para ferramentas como modelos de simulação e sistemas de suporte à decisão.

Marcellini et al. (2003) investigaram, aplicaram e avaliaram a utilização de software de sistemas de informação geográfica (SIG), como ferramenta de apoio na obtenção de informações fundamentais em análises de recursos hídricos e apresentaram recomendações para se garantir resultados confiáveis para essas aplicações.

2.4.1 - Tipos de Dados

Segundo Mendes & Cirilo (2001), os dados geográficos podem ser enquadrados em três categorias:

- Dado espacial, que se refere à localização, à forma e às relações entre as entidades espaciais. É um elemento localizado no espaço mediante um sistema predefinido de coordenadas que podem ser descritas por meio de atributos, e sua relação com outros elementos pode ser estabelecida.
- Dado descritivo (temático), que se refere às características da entidade espacial, denominada de atributos.
- Dado temporal, que se refere ao período ou época da ocorrência do fenômeno ou fato geográfico.

Os dados temáticos são obtidos a partir de levantamento de campo, são inseridos no sistema por digitalização ou, de forma mais automatizada, a partir de classificação de imagens (CAMARA et al., 2004).

Os dados geométricos se apresentam em dois tipos de estruturas: matricial (ou raster) e a vetorial.

- A estrutura matricial (raster) descreve o espaço geográfico na forma de uma matriz de células, a cada uma das quais é atribuído um valor. Um mapa no formato raster é composto por elementos denominados “pixels” ou células. Podem ser imagens de satélite, mapas temáticos na forma de malha e modelos numéricos de terreno.

A representação matricial supõe que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou documento e a área por ela coberta no terreno. (CAMARA et al., 2004)

- A estrutura vetorial

Base de dados se refere às informações que podem ser utilizadas e de alguma forma exploradas nos softwares SIG. Antes dos dados serem inseridos nos softwares SIG é importante fazer um levantamento da disponibilidade e do formato no qual se encontram.

È importante enfatizar que todos esses dados devem estar atrelados a uma mesma base cartográfica, ou seja, mesmos sistemas de projeção, datum e coordenadas, de tal forma que possam ser analisados entre si, tendo como fator agregador as mesmas coordenadas.

Detalhes sobre base de dados geográficos para utilização em sistemas de informação podem ser encontrados em Câmara et. al (1997) , Mendes & Cirilo (2001) e Câmara et al. (2005).

A base de dados geográficos básicos necessários para uso em Hidrologia é representada pelos seguintes dados (MARCELLINI, 2002):

- Hidrografia (dados vetoriais lineares);
- Curvas de nível (dados vetoriais lineares);
- Tipo de solos (vetorial ou matricial);
- Imagens de satélite (dados matriciais);
- Outros dados mais específicos;

E necessário investigar em que condições de qualidade e formato se encontram os dados de entrada do sistema de informações e analisar se os mesmos cumprem a necessidade à qual se destinam. Isso é essencial para qualquer trabalho em SIG.

Segundo Mendes & Cirilo (2001) a tendência futura é a exploração das técnicas de sensoriamento remoto na aquisição de informações dos elementos que compõem a superfície terrestre e a atmosfera, sem contato físico, obtidas pelos métodos que utilizam energia eletromagnética para detecção e medição de objetos. As informações proporcionadas pelas imagens de satélite integradas aos softwares SIG podem melhorar ainda mais a riqueza das análises dos recursos hídricos.

Tan et al. (2002) utilizaram as tecnologias integradas do sensoriamento remoto e sistema de informação para estimar o escoamento superficial em bacias hidrográficas em Taipei e na Florida. Foram realizadas análises com o SIG baseadas nos mapas de uso e cobertura e de solo para estimar os números de curva CN e coeficientes de escoamento foram calculados utilizando o método racional para cada ano estudado. Concluíram que um aumento significativo no volume e pico de fluxo do escoamento pode ser atribuído à mudança no uso e cobertura do solo.

No Brasil, ainda não existem muitas fontes de dados para utilização em softwares SIG. Existem dados disponíveis que já foram preparados para trabalhos específicos e podem ser utilizados para outros estudos e pesquisas.

O trabalho de obtenção de amostras e digitalização das informações geográficas necessárias ao gerenciamento de Recursos Hídricos é feito de forma isolada por entidades de pesquisa para projetos específicos. Não existe hoje um órgão específico para a preparação de dados digitais a serem usados em Sistemas de Informação.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponibiliza cartas topográficas no formato digital, em várias escalas, no endereço: <http://www.ibge.gov.br/>.

Souza et al. (2003) apresentaram o sistema de informações geográficas desenvolvido pela Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Estado do Paraná para gestão de recursos hídricos da Bacia do Alto Iguaçu.

Moreno & Tejada (2003) discutiram sobre a aplicação do uso de instrumental SIG tomando como base a unidade geográfica, que é a bacia hidrográfica do Ribeirão do Piracicamirim - SP, na análise de parâmetros hidrológicos, com vistas a incorporar tomadas de decisões à gestão territorial.

Elesbom (2004) utilizou sistemas de informação geográfica na delimitação e obtenção das características físicas e hidrológicas para automatização de parte do

processo de regionalização de vazões para as bacias do Rio Mucuri, Itaúnas e São Mateus.

2.4.3 - Modelo Numérico de Terreno (MNT)

Um Modelo Numérico de Terreno é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (CAMARA et al., 2004).

Os modelos numéricos de terreno são derivados de mapas topográficos, gerando uma matriz (raster) de números que representam a distribuição geográfica de elevações.

Atualmente, a aquisição de dados para a produção do modelo numérico de terreno é feita por digitalização, utilizando scanners ou mesas digitalizadoras, ou automaticamente, a partir da classificação de imagens de satélite.

Após a vetorização ou digitalização dos mapas topográficos são gerados arquivos com grande quantidade de pontos que representam as curvas de nível. O passo seguinte consiste em gerar uma matriz que representa uma superfície contínua de uma determinada região por meio da interpolação matemática.

Os modelos numéricos de terreno (MNT) mais utilizados são os modelos de malha regular, Modelo de Elevação Digital (MED) e os modelos de malha triangular irregular (TIN), Modelo Digital de Terreno (MDT), FIGURA 6.

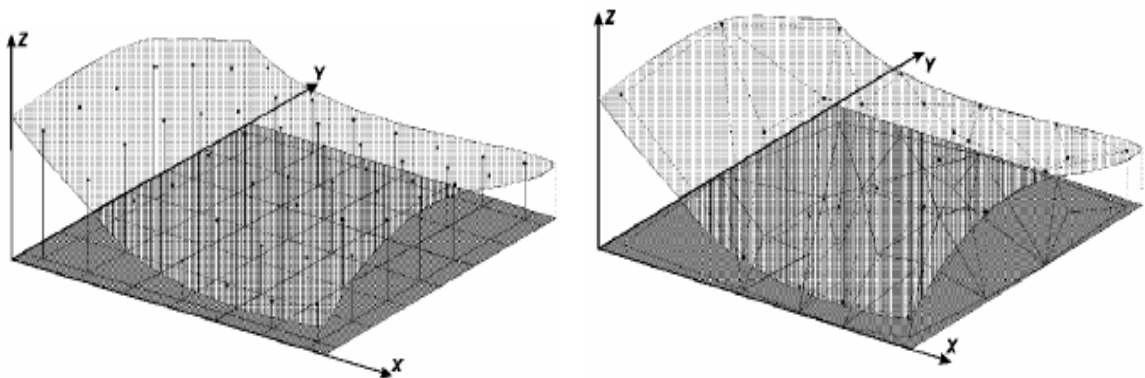


Figura 6: MDE e MDT (Fonte: Câmara et. al., 2004).

Um aspecto importante na seleção de um modelo numérico de terreno, além da qualidade na precisão dos dados de elevação é a sua resolução.

De acordo com Mendes & Cirilo (2001), nos modelos numéricos de terreno existem diferentes fontes de erro:

- i) digitação de isolinhas e pontos;
- ii) técnica de interpolação usada;
- iii) discretização e escala dos mapas;
- iv) erros próprios da medição ou da técnica que georreferência a variável nos mapas usados como base;

Em geral a agregação de todos estes efeitos influencia a qualidade da informação gerada.

A resolução refere-se ao espaçamento horizontal e vertical da malha. A resolução de um modelo numérico de terreno é determinada pelo tamanho da célula. Quanto maior o tamanho da célula menor a resolução.

A qualidade e a resolução do modelo numérico de terreno devem ser consistentes com a escala da aplicação e os processos que serão modelados, o tamanho das características da superfície da terra e os objetivos do estudo (GARBRECHT; MARTZ, 1999).

A informação praticamente não varia entre malhas com discretização na faixa de 10m a 50m (10x10m, 30x30m, 50x50m). Para uma malha mais grosseira como a de 100x100m, a perda de informação é mais evidente (MENDES; CIRILO, 2001).

Segundo Marcellini (2002), utilizando-se Modelo digital de elevação com células de 20, 30 e 60 m para a obtenção da delimitação de bacias hidrográficas, a perda de informação é mais evidente (MENDES; CIRILO, 2001).

tomadas de decisão no contexto de desenvolvimento de aplicações e também modelagens que utilizam os sistemas de informações.

Ahnert (2000) trabalhou na delimitação de áreas potencialmente alagáveis devido aos eventos de enchente utilizando sistema de informações geográficas, na cidade de Marechal Floriano, cortada pelo Rio Jucu Braço Sul.

Rosin & Pellegrino (1999) extraíram automaticamente a rede de drenagem de uma região no polígono das secas do Nordeste, que faz parte do projeto de transposição das áreas do Rio São Francisco, utilizando o modelo numérico de elevação do terreno.

Entre os componentes da modelagem hidrológica assistida por SIG encontram-se os dados provenientes da análise do terreno, caracterização morfológica das bacias hidrográficas e da rede de drenagem, a partir do modelo numérico de terreno. Os Modelos numéricos do terreno têm sido utilizados para delinear redes de drenagem e limites de bacias hidrográficas, calcular as características, como área, declividade e orientação do terreno e para modelagem do fluxo superficial, dentre outros. Estes índices quantitativos objetivam auxiliar estudos hidrológicos (SANTOS, 2001).

Baena et al. (2003) determinaram e analisaram as características fisiográficas de diversas bacias de drenagem obtidas com a utilização de modelos digitais de elevações gerados a partir de mapas cartográficos nas escalas de 1:50.000 e 1:250.000 para a bacia do Rio Paraíba do Sul. Concluíram que a área de drenagem não sofreu influência expressiva em função da variação na escala, enquanto que as características fisiográficas relacionadas ao relevo tenderam a apresentar valores mais altos para a escala de 1:50.000.

A seguir são apresentadas algumas operações e parâmetros que podem ser obtidos a partir do modelo numérico de terreno, FIGURA 7.

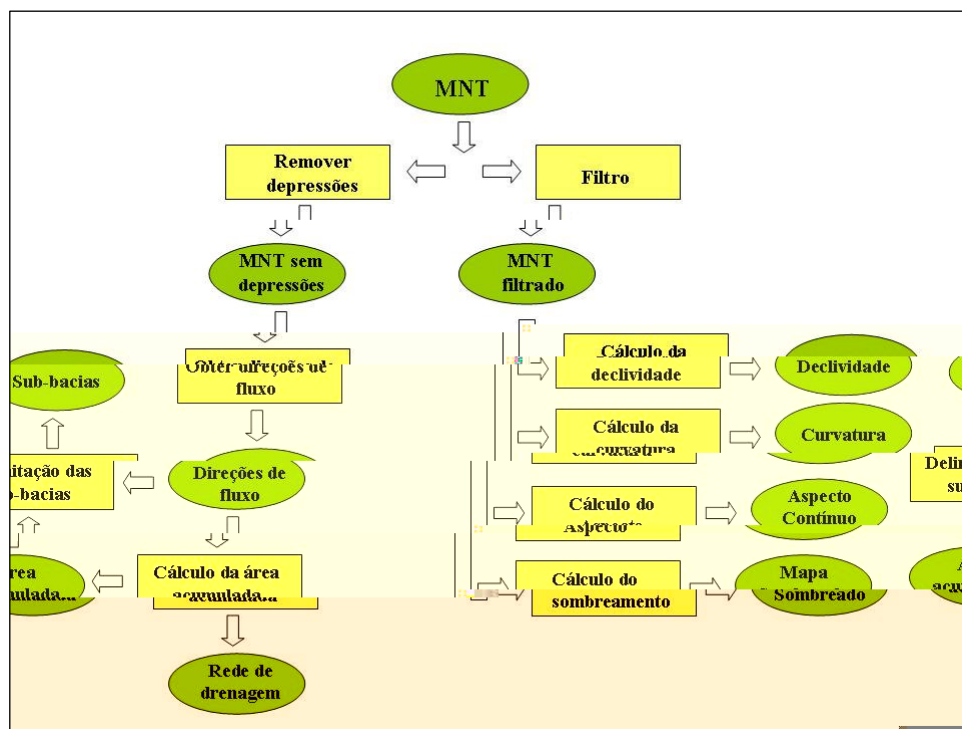


Figura 7: Operações e parâmetros obtidos a partir de modelos numéricos de terreno. Fonte: Mendes & Cirilo (2001).

2.4.4 - Delimitação das Bacias de Drenagem

Como estabelecido nos fundamentos da Lei nº. 9.433 (1997) que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

Os elementos de análise e decisão para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos estão associados à delimitação e obtenção das bacias hidrográficas que são os elementos fundamentais para qualquer estudo hidrológico.

O sistema de drenagem do terreno define o sentido do fluxo da água de superfície de acordo com a topografia do terreno. As características da rede são formadas por uma série de dados que descrevem essa interação da água com a topografia. Os limites exatos da drenagem são essenciais para estudos de modelagem hidrológica. Vários estudos apresentam métodos para determinação das redes de fluxo e áreas de drenagem. Métodos operacionalmente viáveis e mais rápidos usados na

determinação de áreas de drenagem e redes de fluxo foram desenvolvidos por Jenson & Domingue (1988) e inclusive estão sendo usados pelo módulo *Spatial Analyst* do software ArcGis 9.0.

A metodologia chamada D8 (Deterministic - 8 Node) detalhada por Garbrecht & Martz (1999) é a utilizada no SIG para a definição da rede de drenagem a partir do modelo de elevação digital.

No modelo D8, FIGURA 8, o sentido de fluxo é determinado identificando o caminho mais íngreme para o fluxo entre cada célula de um modelo de elevação e suas 8 células vizinhas, existem 8 sentidos de fluxo válidos de saída, relacionando-se às oito células adjacentes em que o fluxo poderia escoar. O modelo é uma simplificação do caminho 'verdadeiro' do fluxo que pode ocorrer em qualquer direção.

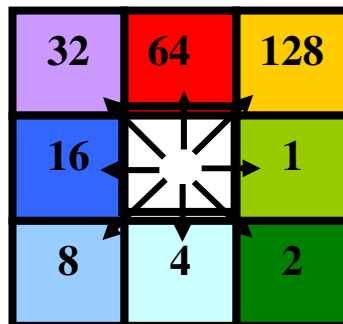


Figura 8: Direções de fluxo.

A distância é determinada entre os centros das células. Se a maior descida entre diversas células for a mesma, a vizinhança será ampliada até que a descida mais íngreme seja encontrada, visto que a água na célula pode fluir para uma e somente uma das células vizinhas. Quando o sentido da descida mais íngreme é encontrado, a célula de saída será codificada com o valor que representa esse sentido. As direções de fluxo são codificadas no software *ArcGis* por potências de 2 ($2^0=1$, $2^1=2$, $2^2=4$, $2^3=8$, $2^4=16$, $2^5=32$, $2^6=64$, $2^7=128$), como pode ser observado na FIGURA 8.

Os erros nos modelos de elevação são classificados geralmente como depressões, áreas planas ou picos, muitas vezes originados de erros de amostragem e interpolação numérica na geração do modelo numérico de terreno. O modelo D8

apresenta dificuldades, na presença dessas falhas, de determinar o escoamento superficial descendente para a célula vizinha.

Se todos os vizinhos forem mais elevados do que a célula que esta sendo processada, a célula tem um sentido de fluxo indefinido. Para obter uma representação exata do sentido de fluxo através de uma superfície essas depressões devem ser identificadas e preenchidas, para que se possa obter um MNT sem depressões, FIGURA 9.

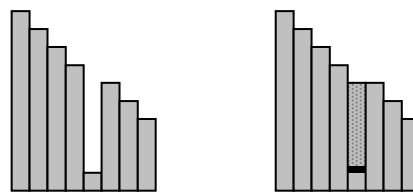


Figura 9: Perfil em vista de uma depressão, antes e depois da sua correção.

As funções de análise hidrológica descritas para o SIG utilizado são projetadas para modelar a convergência do fluxo através de uma superfície natural do terreno. Há uma suposição que as superfícies contêm o relevo vertical suficiente para um trajeto de fluxo que pode ser determinado. As funções supõem que a água pode fluir dentro de muitas células mas com a saída através de uma única célula. A identificação e a remoção das falhas ao tentar criar um MNT sem depressões é um processo iterativo. Quando uma célula é preenchida, os limites da área preenchida podem criar novas depressões que necessitam também ser preenchidas até quando não ocorrer mais células com essas características.

Segundo Mendes & Cirilo (2001) para remover o erro de arredondamento no modelo numérico de terreno é usado um filtro ponderado para calcular a nova elevação da célula da grade correspondente. Este valor substitui o valor central do filtro, a partir dos vizinhos mais próximos.

A malha com a direção de fluxo é determinada encontrando o sentido mais íngreme de cada célula. Este caminho é determinado por meio do cálculo da declividade da célula em relação as suas células vizinhas. Compara-se a diferença das elevações da célula em análise com relação às células vizinhas. Esta diferença é dividida pela distância entre os centros de cada célula. Na horizontal e vertical a distância

coincide com o lado da célula, na diagonal multiplica-se o lado da célula por $\sqrt{2}$, por ser uma célula quadrada.

A direção de fluxo é obtida quando a descida mais íngreme é encontrada. A célula de saída da malha é codificada com o valor que representa esse sentido, como pode ser observado na FIGURA 10.

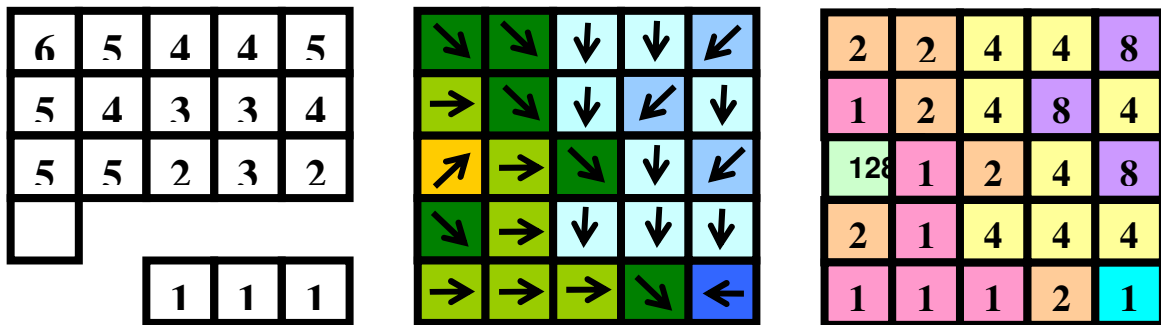


Figura 10: Malha representando o MDE e os esquemas e códigos de direção de fluxo.

A FIGURA 11 mostra a malha com os possíveis caminhos de fluxos obtidos a partir da malha de direção de fluxo, ligando as células de centro a centro e seguindo a direção que foi obtida para cada célula.

Figura 11: Caracterização dos possíveis caminhos de fluxo.

A malha com o fluxo acumulado, obtida após a determinação dos caminhos de fluxo, representa a malha que é utilizada na determinação da rede de drenagem.

A FIGURA 12 apresenta a malha de fluxo acumulado (direita), obtida a partir da malha de direção de fluxo (esquerda). Essa malha resulta da contagem de células a montante que fluem na direção de uma única célula. As células com elevada

acumulação de fluxo são áreas de fluxo concentrado e podem ser usadas para identificar canais do córrego.

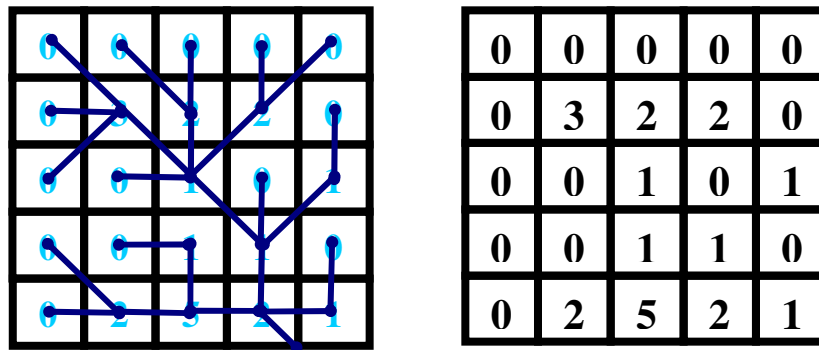


Figura 12: Malha do fluxo acumulado a partir da direção de fluxo.

Manoj et al. (2004) desenvolveram um modelo de escoamento baseado em células ou malhas que simulam a orientação e distribuição da chuva-vazão, assegurando a heterogeneidade da bacia em termos da informação distribuída do tipo de solo, inclinação, solo e chuva. O modelo foi aplicado a eventos isolados de tempestade, em diversas bacias, e as variáveis de entrada foram informadas ao modelo utilizando o sistema de informações geográficas. Concluíram que o modelo pode simular razoavelmente o escoamento na bacia hidrográfica.

A partir da malha de fluxo acumulado pode ser extraída uma rede de drenagem classificando o valor de acumulação, obtendo uma rede muito detalhada ou uma rede mais simplificada. Essa escolha deve ser realizada com a análise visual da rede de drenagem até se obter um resultado coerente e representativo da hidrografia real.

A rede de drenagem resultante do córrego é usada como entrada para determinação dos trechos de fluxo na rede de drenagem, que são importantes para a delimitação das bacias de drenagem.

Os trechos de fluxo são identificados como os trechos de drenagem que ligam duas confluências sucessivas ou uma confluência e um trecho de saída (exutória).

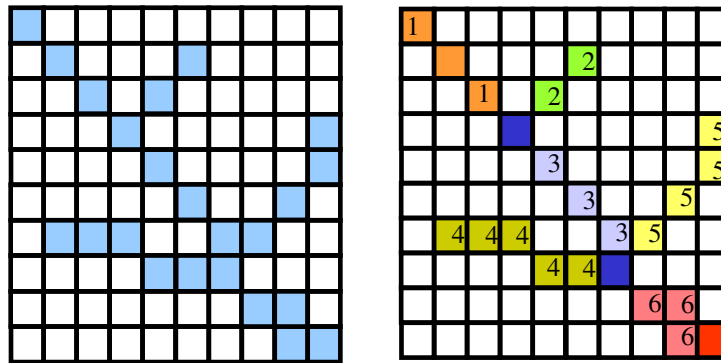


Figura 13: Malha com os trechos de fluxo.

Como pode ser observado na FIGURA 13 (direita), para cada trecho é atribuído um número para as células que pertencem a esse trecho. Quando a célula recebe um afluente esse número é alterado. A última célula de cada trecho representa um ponto de acumulação e pode vir a definir uma sub-bacia. No exemplo mostrado acima, o número de bacias que poderão vir a ser delimitadas será 6.

A malha de trechos de fluxos representa uma das entradas para a determinação das bacias hidrográficas utilizando a função *Watershed*, FIGURA 14, do módulo *Spatial Analyst* do SIG ArcGis 9.0.

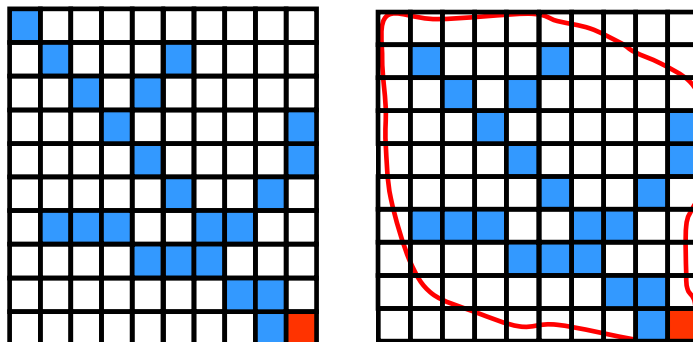


Figura 14: Bacia Hidrográfica obtida utilizando a função *watershed*.

A bacia hidrográfica representada na FIGURA 14 apresenta-se no formato matricial. Para a obtenção de suas características fisiográficas se faz necessária sua transformação para o formato vetorial.

Müller & Garcia (2001) avaliaram a precisão das bases globais GTOPO30 e HYDRO1K disponibilizadas pelo USGS- *United States Geological Survey* e testaram a precisão dessas bases para uso em problemas de recursos hídricos, efetuando a delimitação de bacias hidrográficas e definição da rede de drenagem em 27 bacias no estado do Paraná. Concluíram que considerando todas as bacias foi encontrado

um erro médio de 10% , as bacias menores que 2000 km² o erro médio foi de 13% e as bacias maiores que 2000 km² o erro médio foi de 6%. Os erros encontrados indicam uma forte dependência com o tamanho da bacia, explicada pelo tamanho da célula.

Fraga et al. (2003) verificaram e analisaram o método de extração automática de redes de drenagem, baseado na simulação de fluxo de águas na superfície topográfica, disponível no software SPRING 3.6.

Nayak & Jaiswal (2003) aplicaram as ferramentas de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica – SIG na análise do pico de vazão da bacia do rio Bebas em Madhya Pradesh. Utilizando o modelo do Soil Conservation Service SCS, concluíram que a combinação do sensoriamento remoto e o modelo SCS tornaram a estimativa do escoamento superficial mais rápida e exata e o SIG se mostrou uma ferramenta eficiente na preparação dos dados utilizados no modelo SCS.

Manoj et al. (2004) desenvolveram um modelo de escoamento baseado em células ou malhas que simulam a orientação e distribuição da chuva-vazão assegurando a heterogeneidade da bacia em termos da informação distribuída do tipo de uso do solo, inclinação, solo e chuva. O modelo foi aplicado a eventos isolados de tempestade em diversas bacias e as variáveis de entrada foram informadas ao modelo, utilizando o sistema de informações geográficas. Concluíram que o modelo pode simular razoavelmente o escoamento na bacia hidrográfica.

Pickbrenner et al. (2005) determinaram e apresentaram um mapa de CN médio da bacia do rio Criciúma utilizando técnicas de geoprocessamento. Concluíram que a insegurança da utilização do método SCS, em função da grande sensibilidade do modelo a variação do CN, se torna menor com a utilização de operações de geoprocessamento.

Dias et al. (2005) apresentaram um guia prático para delimitação de bacias hidrográficas que contempla desde a aquisição das imagens e os passos necessários para a delimitação, utilizando o modelo numérico do terreno, gerado a partir de imagens de radar interferométrico, e as ferramentas do Arcgis. Concluíram

que a integração entre SIG e os dados obtidos pela tecnologia radar permitem, com eficiência, precisão e rapidez, delimitar as áreas de contribuição pontual.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Bacia Hidrográfica Alto Santa Maria da Vitória.

A bacia hidrográfica do Alto Rio Santa Maria da Vitória está localizada na região centro-oeste do Estado do Espírito Santo. Esta bacia é um dos principais mananciais de abastecimento da região da Grande Vitória. Nesta bacia estão instaladas as usinas hidrelétricas de Rio Bonito e Suíça.

A sub-bacia considerada neste estudo para definição dos procedimentos de delimitação de bacia hidrográfica e definição da rede de drenagem é constituída pelas partes média e superior da bacia, em cujo exutório se localiza a UHE Rio Bonito, operada pela Espírito Santo Centrais Elétricas S.A. (ZAMPROGNO, 1999). A área desta sub-bacia da bacia do rio Santa Maria da Vitória é de aproximadamente 618 Km²

A FIGURA 15 apresenta a localização da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória e da sub-bacia estudada, a montante da Represa de UHE Rio Bonito.

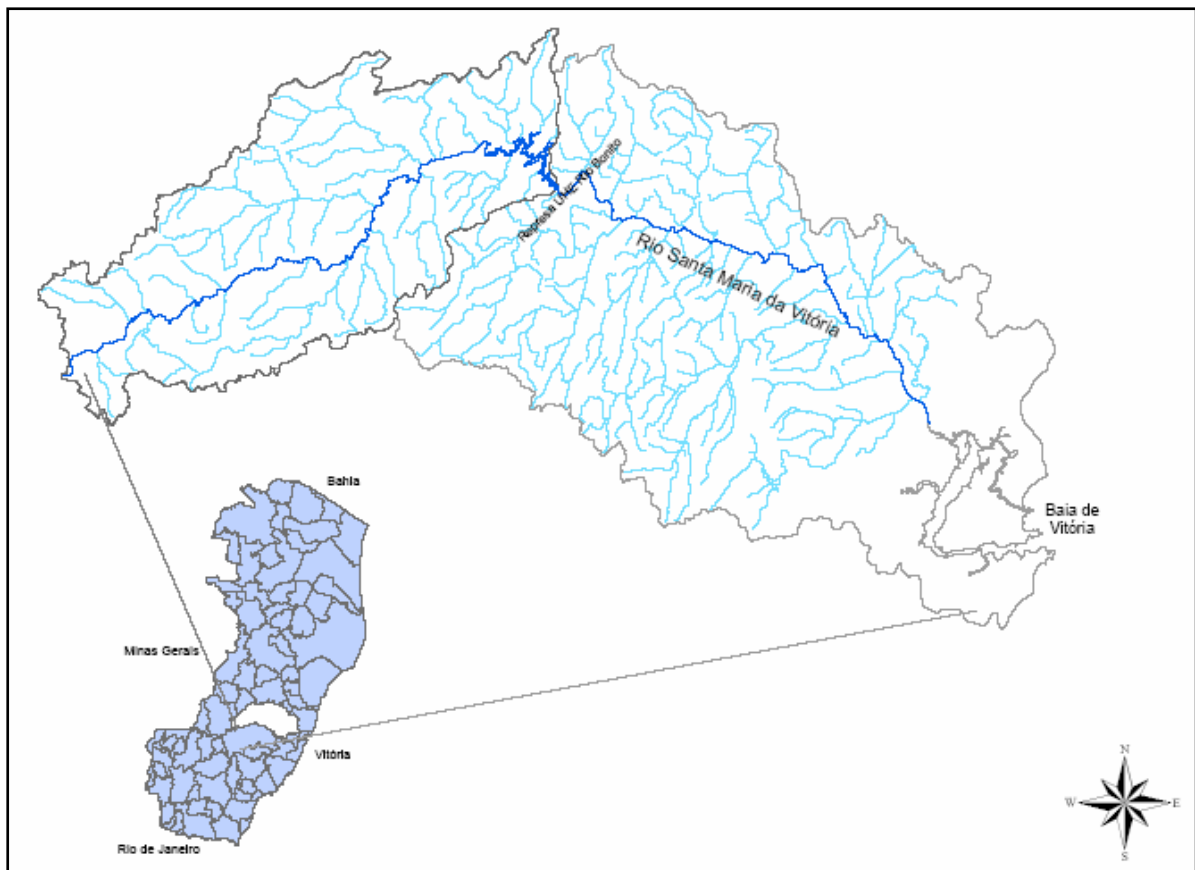


Figura 15: Mapa de localização da bacia do rio Santa Maria da Vitória e da sub-bacia Alto Santa Maria.

3.2 – Procedimentos Para Delimitação de Bacias Hidrográficas e Extração da Rede de Drenagem Utilizando o Modelo Digital de Elevação

O Sistema de informação utilizado nessa pesquisa para a extração da rede de drenagem e delimitação de bacia hidrográfica foi o software ArcGIS 9.0, desenvolvido pela ESRI.

O modelo de dados do *Hydrology*, presente na ferramenta *Spatial Analyst* do software ArcGis, foi desenvolvido para determinação de parâmetros da bacia hidrográfica, obtidas por meio da extração da rede de drenagem.

Na delimitação das bacias hidrográficas e na definição das redes do córrego, foi executada uma série de etapas. Algumas etapas foram dependentes, enquanto outras foram opcionais, dependendo das características dos dados de entrada. O fluxo através de uma superfície ocorre sempre no sentido da maior elevação para o de menor elevação. Uma vez que o sentido do fluxo de saída de cada célula era conhecido, foi possível determinar quais e quantas células fluíam em direção a uma determinada célula. Esta informação foi usada pelo software para definir limites da bacia hidrográfica e das redes dos córregos.

O modelo da elevação foi usado para determinar os sentidos de fluxo. Ocorrem algumas falhas na geração dos modelos numéricos de terreno. Estas depressões são chamadas *sinks*. As funções de análise hidrológica permitiram a identificação dos *sinks* e ofereceram ferramentas para preenchê-las, permitindo a obtenção de um modelo de elevação sem falhas. Desta forma, o sentido de fluxo pôde ser obtido a partir de um modelo de elevação sem falhas.

Com o dado de entrada do processo de delimitação das bacias hidrográficas adicionado, a hipsometria referente a área de estudo, foi executada a seqüência de procedimentos, FIGURA 16, que utilizou as ferramentas do *ArcToolbox*, principalmente do módulo *Hydrology*, disponíveis no software ArcGis 9.0.

Figura 16: Esquema das fases de delimitação das bacias hidrográficas.

Para o desenvolvimento dos passos, descritos a seguir, foi utilizado como referência Childs et al. (2004)

Primeiro passo – Foi utilizada para geração do modelo numérico do terreno a hipsometria, FIGURA 17, para a área de estudo compreendida entre as cartas de Garrafão, Santa Leopoldina e Afonso Cláudio, na escala 1/50.000, e Colatina, na escala 1/100.000, obtidas no sitio do IBGE (<http://www.ibge.gov.br/>). O modelo numérico do terreno foi gerado usando a ferramenta *3D Analyst (Create/Modify TIN*
> 20248 0 Td (l)Tj 3.84227 0 Td (C)Tj 8.6451 0 Td (r)Tj 3.96234 0 Td (e)Tj 6.72397 0 Td (a)Tj 6.7

foi utilizada a ferramenta *Fill* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill*). A superfície de entrada foi o MDE.

Terceiro passo – determinação da malha de direção de fluxo, utilizando a função *Flow Direction* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction*). A superfície de entrada para essa função foi o MDE sem falhas, gerado no passo anterior.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizar a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

$$\text{elevflow} = \text{FLOWDIRECTION}(\text{elevfill}, \#, \text{NORMAL}).$$

Quarto passo – determinação da malha de fluxo acumulado, utilizando a função *Flow Accumulation* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation*). A superfície de entrada para essa função foi a malha de direção de fluxo.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizar a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

$$\text{elevaccum} = \text{FLOWACCUMULATION}(\text{elevflow}).$$

Quinto passo – determinação da rede do córrego (*Stream Network*). Representa o mínimo de células acumuladas necessárias para que determinada célula pertença à rede de drenagem. A bibliografia recomenda fazer a comparação com a hidrografia real para determinação da melhor representatividade em relação à região em estudo.

Utilizando a função *Properties*, obtida clicando com o botão direito sobre a superfície gerada no passo anterior, foi escolhida a opção *Symbology > Classify* e foram definidas 5 classes. Essas classes foram ajustadas para os valores de 10, 70, 200 e 500 para cada classe, como proposto por Childs et al. (2004). Esses valores foram

escolhidos para tornar possível a visualização da malha, a partir da determinação de diferentes valores de acumulação.

A malha de fluxo acumulado foi reclassificada para os valores de 500, 200, 70 e 10 respectivamente, tornando a rede, progressivamente, mais detalhada à medida que diminuiu o valor de acumulação.

Para o presente estudo, foi escolhida a rede do córrego para valores de acumulação maiores ou iguais a 70, utilizando a ferramenta *Set Null* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Conditional > Set Null*). A superfície de entrada foi a malha de fluxo acumulado, gerada no passo anterior. Para a entrada seguinte utilizou-se o valor constante 1 e para a expressão foi digitado *Value LT 70*.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizar a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

Strmnet = SETNULL (elevacum LT 70,1).

Cada célula da rede de fluxo recebeu o valor 1(um) para as células com fluxos acumulados maiores ou iguais a 70 e as células restantes não receberam nenhum valor, para melhor visualização da rede de drenagem obtida.

A partir dessa superfície de saída dessa ferramenta obteve-se uma malha da rede do córrego, sem córregos individuais. Todas as células apresentaram o mesmo valor. Usando a ferramenta *Stream Link* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream link*) obteve-se para cada segmento um valor de identificação apresentando os comprimentos dos segmentos. A superfície de entrada para essa ferramenta foi a malha gerada nesse passo, juntamente com a malha de direção de fluxo.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizar a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*), com a expressão:

Strmlink = STREAMLINK (strmnet, elevflow).

A tabela de atributos desse *layer* apresenta um registro separado para cada segmento que pode ser editado. Esta ferramenta definiu o número de bacias hidrográficas que poderão ser delimitadas.

Sexto passo – A ordenação da hidrografia foi obtida atribuindo uma ordem numérica aos trechos representados em uma malha de uma rede linear, utilizando a função *Stream to Order* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream IOrder*). A superfície de entrada para essa ferramenta foi à malha obtida no passo anterior e a malha de direção de fluxo, além da seleção do método de ordenamento. O ArcGis utiliza os modelos propostos por Strahler e Shreve para definição da ordem dos trechos na rede de drenagem. Na FIGURA 18 são apresentadas as duas classificações que são realizadas pelo modelo.

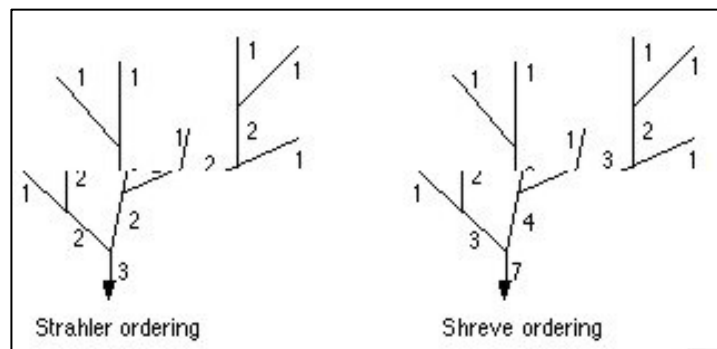


Figura 18: Métodos propostos pelo ArcGis para ordenamento dos cursos de água. Fonte: Help software ArcGis 9.0.

Após a definição das ordens do córrego foram editados os segmentos dos córregos gerados nesse passo utilizando a ferramenta *Single Output Álgebra* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Single Output Map Álgebra*). Na expressão da Álgebra de Mapa foi digitado *SETNULL (strmorder EQ 1 and Strmlink.Count LE 5, strmink)*. Desta forma, foram removidos os córregos com cinco ou menos células.

Com a eliminação dos córregos curtos, passou-se para a caracterização do córrego, utilizando a ferramenta *Stream to Feature* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream to Feature*). A superfície de entrada foi a malha obtida após a edição dos córregos curtos e da malha de direção de fluxo. Para as outras entradas foram aceitos os valores padrões. Com esse procedimento obteve-se o campo na

tabela de atributos chamado *Grid-Code*, com a identificação das ordens dos córregos.

Sétimo passo – determinação das bacias para todo o modelo numérico de terreno. Para esse passo foi utilizada a ferramenta *Basin* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Basin*). A superfície de entrada utilizada foi a malha de direção de fluxo, obtida no terceiro passo.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizar a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

Basins = BASIN (elevflow).

Oitavo passo – delimitação das bacias hidrográficas, utilizando a ferramenta *Watershed*. A ferramenta *Watershed* executa o mesmo algoritmo da ferramenta *Basin* para obtenção das bacias. Entretanto os pontos de acumulação, nesse caso são fornecidos pelo usuário. Primeiro, foram definidos os córregos conectados por regiões dentro de cada bacia, utilizou-se a ferramenta *Region Group* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Generalization > Region Group*).

A superfície de entrada foi a malha obtida no quinto passo para o fluxo acumulado de 70 ou mais células. Para o número de vizinhos usados na interação foi utilizado 8(oito). Para as outras entradas foram utilizados os valores padrões.

Outra forma de executar esta ferramenta seria utilizando a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

Strmgroup = REGIONGROUP (strmnet, #, EIGHT).

A tarefa seguinte foi encontrar o fluxo acumulado máximo dentro de cada região encontrada. Para esta etapa foi utilizada a ferramenta *Zonal Statistics* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Zonal > Zonal Statistics*). A superfície de entrada foi a malha com as definições dos grupos. Na entrada seguinte foi selecionada a opção *Value*, e a malha de fluxo acumulado obtida no quarto passo, para o tipo de estatística que é

uma entrada opcional foi escolhido a opção máximo e no restante as entradas padrões fornecidas pelo sistema. Depois desse passo as células que pertencem a um mesmo grupo e que escoam para o mesmo ponto de acumulação possuem o mesmo valor dentro de cada bacia.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizando a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

Flowmax = ZONALMAX (strmgrou, elevacum).

Para cada bacia existe uma única célula que possui o maior ponto de acumulação de fluxo da bacia. Estas células são conhecidas como *PourPoint*, que são os pontos de exutório das bacias. Para a determinação desses pontos foi utilizada a ferramenta *Single Output Map Algebra* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Single Output Map Algebra*). Na expressão da álgebra de mapa foi digitado *CON (elevacum EQ flowmax, strmgrou)*. Essa função retornou para o máximo fluxo acumulado da bacia uma identificação e o valor *NoData* para as células restantes. Após esse procedimento, cada bacia ficou definida apenas por um ponto de acumulação.

Para melhor visualização foram selecionadas as duas maiores bacias. A ferramenta utilizada foi a *Combine* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Local > Combine*). As malhas de entrada foram o *PourPoint1* e a malha de fluxo acumulado, obtidas no quarto passo.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizando a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

PourPoint2 = COMBINE (PourPoint1, elevacum).

Finalmente, após esses procedimentos, executou-se a ferramenta *Watershed* (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Watershed*). As superfícies de entrada foram as malhas de direção de fluxo, a malha de pontos de acumulação

(*PourPoint2*) e para a entrada opcional de pontos de acumulação foi selecionada a malha de pontos de acumulação para todas as bacias (*PourPoint1*).

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizando a função *Raster Calculator* (*Spatial Analyst > Raster Calculator*) com a expressão:

Watershed = WATERSHED (elevflow, pourpoint2).

Nono passo – Para a delimitação da sub-bacia a montante da UHE de Rio Bonito foi utilizado um *script* chamado *Hidrology Modeling* (*esrihydrology.dll*), obtido no sitio da ESRI (<http://www.esri.com>), disponível para *download*. Esse *script* foi adicionado como uma nova barra de ferramentas do Arcgis 9.0. Para a delimitação da sub-bacia foi utilizada a ferramenta *watershed tool*, uma ferramenta interativa encontrada na barra de ferramentas do *hidrology modeling*. Para a utilização dessa ferramenta foi selecionada a malha de direção de fluxo e a malha de fluxo acumulado obtidas anteriormente (*Hidrology modeling>Properties*).

Após esse procedimento inicial, com a ferramenta *watershed* acionada foi determinado o ponto de foz da bacia, utilizando coordenadas geográficas, e clicado com o mouse sobre esse ponto foi delimitada a bacia a montante da UHE de Rio Bonito.

Décimo passo – consistiu em transformar o mapa gerado no passo anterior em vetor utilizando a ferramenta *Spatial Analyst* (*Spatial Analyst > Convert > Raster to features*). Todos os procedimentos executados nos passos anteriores para a delimitação das bacias hidrográficas são baseados em malhas (superfície raster). Então após a execução dos procedimentos foi necessário transformar as bacias hidrográficas em vetor para a determinação das características fisiográficas, como área e perímetro.

Em todos os procedimentos que se utiliza a função *Raster Calculator* se fez necessário tornar a malha resultante permanente para ser utilizada no procedimento seguinte.

3.3 – Procedimentos para obtenção do mapa do Número da Curva (CN-SCS)

A caracterização do solo, em termos da permeabilidade, contribui para a estimativa do escoamento superficial direto.

O software ArcGis 9.0 permite a estimativa do escoamento na bacia hidrográfica baseada no método do Número da Curva - CN.

Para essa estimativa foi necessário que a classificação de uso e ocupação do solo, classe hidrológica de solo e número da curva sejam atributos de um mesmo mapa temático.

O mapa de Número da Curva foi obtido pela soma do mapa de uso e ocupação do solo com o mapa de solos, no formato matriz (*raster*).

Os mapas de solo, FIGURA 19, e uso e ocupação do solo, FIGURA 20, para a sub-bacia do Alto Santa Maria da Vitória, foram obtidos a partir de estudo realizado por Zamprogno (1999), com base em dados fornecidos pelo Consórcio Santa Maria da Vitória – Jucu (HABTEC, 1997).

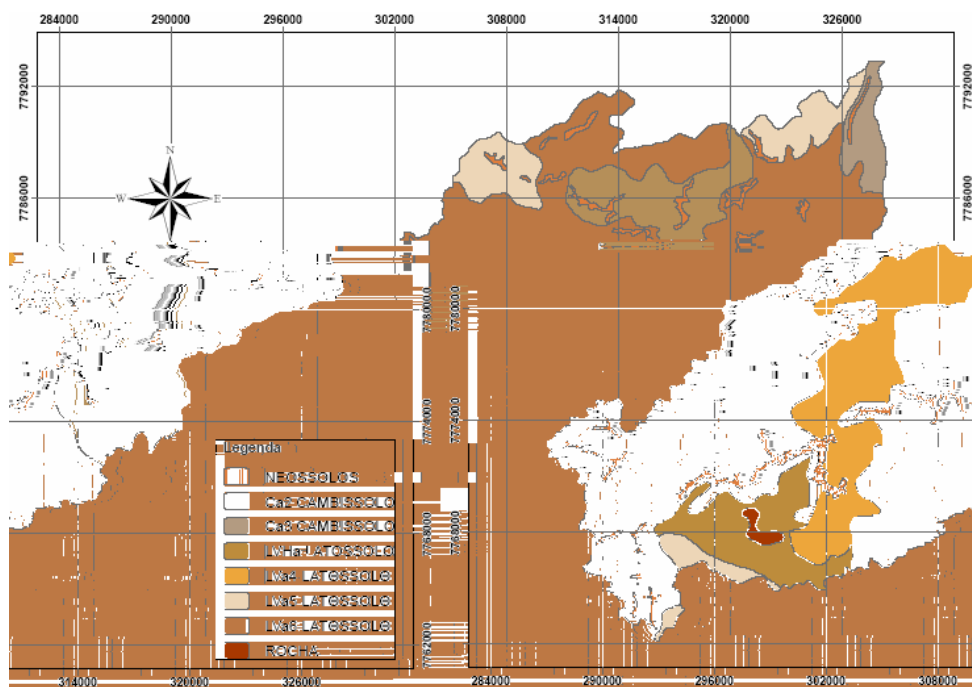


Figura 19: Mapa de Solos, Fonte: Zamprogno (1999).

As principais classes de solo encontradas na área de estudo são as seguintes: Latossolo vermelho amarelo (Lva), Cambissolo (Ca) e Neossolos.

Os tipos de cultivo considerados foram descritos por Zamprogno (1999) e são apresentados a seguir, totalizando cinco usos no meio rural, FIGURA 20.

- Comunidades florestais em estágio avançado de regeneração: apresentam fisionomia arbórea dominante sobre as demais.
- Comunidades florestais em estágio médio de regeneração: apresentam fisionomia arbórea e/ou arbustiva predominando sobre a herbácea.
- Comunidades florestais em estágio inicial de regeneração: apresenta fisionomia herbácea/arbustiva de porte baixo.
- Comunidade vegetais de campo e pastagem: os campos e as pastagens estão presentes em profusão nas bacias, tanto na baixada quanto nas áreas serranas. São essencialmente de origem antrópica e formadas por ervas invasoras.
- Silvicultura: termo adotado ao invés de reflorestamento pelo fato de que, tecnicamente, uma plantação de eucalipto não pode ser conceituada como uma floresta.
- Áreas Agrícolas: a agricultura na bacia tem como principais culturas o café, a banana e a olericultura.

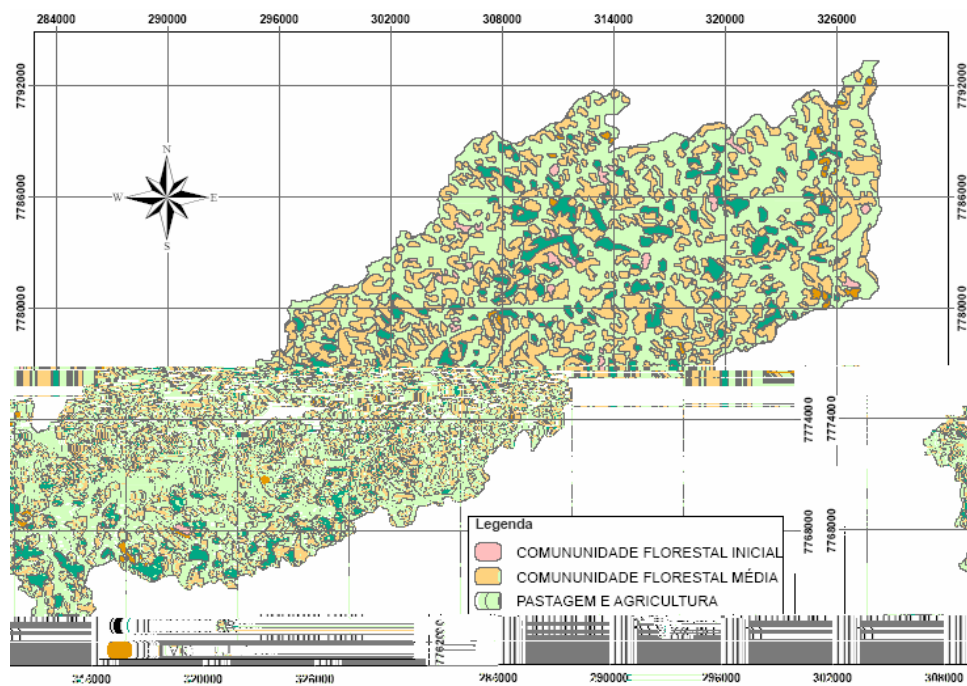


Figura 20: Mapa de Uso de Solo, Fonte: Zamprogno (1999).

A obtenção do mapa do número da curva (CN) foi feita seguinte forma:

Primeiro Passo – Foi adicionada a superfície com os atributos do tipo de solo e iniciado o modo de edição (*Editor > Start Editing*). Na tabela de atributos da superfície foi atribuído para cada tipo de solo um valor que diferencie os solos encontrados naquele mapa, utilizando valores em milhares. A edição foi salva, sendo convertido o mapa de vetor (*feature*) para matriz (*raster*).

Segundo Passo – Foi adicionada a superfície com os atributos de uso e ocupação e iniciado o modo de edição (*Editor > Start Editing*). Na tabela de atributos da superfície foi atribuído para cada uso e ocupação um valor que diferenciase os tipos de uso e ocupação do mapa, utilizando valores em unidades. A edição foi salva, sendo convertido o mapa de vetor (*feature*) para matriz (*raster*).

Terceiro Passo – Os mapas obtidos no primeiro e segundo passo foram somados utilizando a ferramenta *Raster Calculator (Spatial Analyst > Raster Calculator)*.

Na etapa seguinte, o mapa obtido pelo somatório, foi convertido para vetor com a ferramenta *Spatial Analyst (Convert > Raster to Features)*. Para cada combinação obtida foi editada a tabela de atributos, digitando a letra do grupo hidrológico correspondente para cada classificação de tipo de solo.

Quarto passo – Foi determinado, para cada combinação de grupo hidrológico do solo e tipo de uso e ocupação, o valor correspondente do número da curva.

Quinto passo – O valor médio do número da curva para a bacia foi determinado utilizando a ferramenta *Zonal Statistics (ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Zonal > Zonal Statistics)*. As malhas de entrada foram o polígono de delimitação da bacia de estudo e a malha com o valor do número da curva.

Outra forma de executar essa ferramenta seria utilizando a função *Raster Calculator (Spatial Analyst > Raster Calculator)* com a expressão:

$C_{medio} = ZONALMEAN ([malha\ da\ bacia],[malha\ do\ CN])$.

3.4- Escolha das Áreas de Estudo

Para aplicação das metodologias de estimativa de vazão de projeto e análise de sensibilidade de parâmetros de cálculo utilizados nessas estimativas, foram selecionadas cinquenta e quatro sub-bacias de vários tamanhos compreendidas na área delimitada a montante da UHE de Rio Bonito, cinquenta sub-bacias com área até 30 km² e quatro bacias com área superior a 30 km².

O motivo da escolha desta sub-bacia foi a disponibilidade de dados existentes sobre a caracterização da região, incluindo mapas de solo e de uso e ocupação.

Para a delimitação das sub-bacias foi utilizado a barra de ferramentas adicionada ao Arcgis 9.0, como mostrado no nono passo da seção 3.2. Utilizando a ferramenta iterativa *watershed tool* da barra de comandos do *hidrology modeling*, foram selecionadas várias bacias de diferentes tamanhos para a aplicação do método e estimativa de vazão máxima.

Após esse procedimento inicial, com a ferramenta *watershed tool* as bacias obtidas em formato raster foram convertidas para o formato vetorial utilizando a ferramenta *Spatial Analyst (Spatial Analyst > Convert > Raster to features)*. Como a conversão da superfície para o formato vetorial cria uma distorção no limite do mapa, representada por 'dentes serrilhados', foi necessário suavizar o limite do mapa de bacias obtido, para isso foi utilizado a ferramenta *Smooth lines (ArcToolBox > Data Management tools > Generalization > Smooth lines)*, a superfície de entrada para essa ferramenta foi o mapa de sub-bacias.

Para obtenção da área e do perímetro do polígono foi utilizado o *ArcCatalog*. Na pasta de trabalho foi criado um banco de dados, utilizando o *Personal Geodatabase (ArcCatalog > New > Personal Geodatabase)*.

Para polígonos, o modelo de dados Geodatabase forneceu valores das áreas e dos perímetros. Para linhas, como rios e afluentes, o modelo forneceu os valores dos perímetros.

Após renomear esse banco de dados, todos os polígonos criados foram exportados, criando um novo polígono que apresenta na tabela de atributos os valores de área e perímetro, em m² e m, respectivamente.

A hidrografia das sub-bacias foi obtida do mapa gerado no sexto passo da seção 3.2, utilizando a ferramenta *Stream to Feature*, que já vetoriza a rede de drenagem. A rede de drenagem também foi suavizada utilizando a ferramenta *Smooth lines* (*ArcToolBox* > *Data Management tools* > *Generalization* > *Smooth lines*) e comparada com a hidrografia disponibilizada pelo IBGE para verificação com a drenagem obtida via sistema de informação.

Para cada sub-bacia delimitada foi obtida a hidrografia pela interseção do mapa de sub-bacia com a hidrografia encontrada para a região de estudo utilizando a ferramenta *Intersect* (*ArcToolBox* > *Analysis tools* > *Overlay* > *Intersect*), a superfície de entrada para essa ferramenta foi o mapa da sub-bacia e o mapa da hidrografia. Após esse procedimento a hidrografia foi salva no banco de dados do projeto obtendo-se assim para cada sub-bacia delimitada o comprimento dos trechos do rio principal e seus afluentes.

Para obtenção das declividades utilizou-se modelo numérico de terreno, obtido pela interpolação da hipsometria, as curvas de nível cotadas, obtido no primeiro passo da seção 3.2. As diferenças entre as cotas da seção de saída e o ponto mais a montante da bacia foram obtidas utilizando a ferramenta *identify* disponível na barra *Tools*. Para a determinação da declividade foi feita a divisão das diferenças de cota pela extensão horizontal do curso d'água principal entre a nascente e a foz da bacia.

3.5 – Características Morfológicas das Sub-bacias

As características relacionadas a forma das bacias hidrográficas são elementos de grande importância para o entendimento do comportamento hidrológico de uma bacia (VILLELA; MATTOS, 1975). Algumas características foram calculadas para as sub-bacias, como:

Coeficiente de compacidade (K_c) calculado pela equação:

$$Kc = 0,28 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (4.01)$$

A= área da bacia em km² e P= perímetro da bacia em km;

Densidade de drenagem, relação entre o comprimento total dos cursos d'água da bacia e sua área total. A densidade drenagem foi determinada utilizando-se a seguinte equação:

$$Dd = \frac{\sum L_t}{A} \quad (4.02)$$

L_t=comprimento total dos cursos d'água (km) e A =área da bacia (km²)

Fator de forma da bacia (Kf), índice que relaciona a forma da bacia com a forma de um retângulo, foi determinado, utilizando a seguinte equação:

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (4.03)$$

L=comprimento do curso d'água principal (km) e A =área da bacia (km²)

Extensão Média do escoamento Superficial (l), foi calculado pela equação:

$$l = \frac{A}{4L} \quad (4.04)$$

L=comprimento total dos cursos d'água (km) e A =área da bacia (km²)

3.6 – Série Histórica de Precipitação

Os únicos dados disponíveis para a região de estudo compreendem séries históricas de precipitações totais diárias, que foram utilizadas no cálculo da precipitação de projeto.

Os dados de precipitação utilizados na pesquisa compreendem a série histórica de precipitações diárias obtidas junto ao Instituto Capixaba de Pesquisa e Extensão Rural (INCAPER), para a Estação Agroclimatológica de Santa Teresa (Código 83647), para o período de 1976 a 2004.

Para cada ano da série foi determinada a máxima precipitação, obtendo-se assim a precipitação máxima anual, TABELA 7.

Tabela 7: Precipitação total máximas anuais.

| Ano de Ocorrência | Precipitação (mm) | Ano de Ocorrência | Precipitação (mm) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1976 | 78,0 | 1991 | 66,5 |
| 1977 | 52,2 | 1992 | 66,2 |
| 1978 | 59,6 | 1993 | 61,4 |
| 1979 | 131,2 | 1994 | 103,2 |
| 1980 | 76,6 | 1995 | 64,7 |
| 1981 | 121,7 | 1996 | 81,6 |
| 1982 | 53,3 | 1997 | 85,1 |
| 1983 | 102,0 | 1998 | 97,6 |
| 1984 | 60,0 | 1999 | 105,1 |
| 1985 | 92,4 | 2000 | 76,4 |
| 1986 | 71,5 | 2001 | 82,1 |
| 1987 | 89,3 | 2002 | 62,6 |
| 1988 | 50,9 | 2003 | 101,7 |
| 1989 | 88,7 | 2004 | 65,4 |
| 1990 | 69,4 | | |

3.7 – Precipitação

Para a determinação da precipitação de projeto foi utilizada o ajuste probabilístico de chuvas intensas na região de estudo a partir da série histórica observada e a metodologia indicada pela Cetesb (1979) para a obtenção das durações de chuva menores do que 24 horas.

3.7.1- Ajuste probabilístico das chuvas máximas anuais.

Foi realizado no presente estudo ajuste probabilístico das distribuições Normal Truncada (NT), Lognormal (L2), Lognormal com 3 parâmetros (L3), Eventos Extremo tipo I (EE), Pearson tipo III (P3) e LogPearson tipo III (LP3). A estimativa dos parâmetros foi feita pelo método da máxima verossimilhança e o método dos momentos. Comparações entre os ajustes foram feitas utilizando o erro padrão médio.

A partir da distribuição que apresentou melhor ajuste, foram determinadas as alturas de chuvas máximas diárias com período de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Para os diferentes períodos de retorno obtidos foram determinados as precipitações de projeto para as durações menores do que 24 horas, utilizando as relações

apresentadas na TABELA 8, após a multiplicação dos valores da chuva de 1 dia pelo fator 1,14.

3.7.2- Precipitação de Projeto.

Devido à necessidade de avaliação das relações intensidade-duração-freqüência das chuvas de curta duração para locais onde as únicas informações disponíveis são as chuvas de 1 dia, vários estudos foram propostos com o intuito de determinação das relações entre chuvas de diferentes durações, que utilizam os dados pluviométricos em substituição aos dados pluviográficos.

Um exemplo dessas relações encontra-se no estudo publicado por Cetesb (1979). Esse estudo foi baseado na publicação do DNOS de 1957, intitulada “Chuvas Intensas do Brasil” na qual foi aplicada a metodologia descrita pelo U.S.Weather Bureau, sendo as relações apresentadas no TABELA 8, a partir de informações pluviométricas.

Tabela 8:Relação entre as alturas pluviométricas – valores médios obtidos do estudo do DNOS.

| Relações entre alturas pluviométricas | Obtidos do estudo do DNOS(médio) | Adotado pelo u.S. WEATHER BUREAU | Adotados em Denver |
|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| (1) 5 min/30 min | 0,34 | 0,37 | 0,42 |
| (2) 10 min/30 min | 0,54 | 0,57 | 0,63 |
| (3) 15 min/30 min | 0,70 | 0,72 | 0,75 |
| (4) 20 min/30 min | 0,81 | | 0,84 |
| (5) 25 min/30 min | 0,91 | | 0,92 |
| (6) 30 min/1 h | 0,74 | 0,79 | |
| (7) 1 h/24 h | 0,42 | | |
| (8) 6 h/24 h | 0,72 | | |
| (9) 8 h/24 h | 0,78 | | |
| (10) 10 h/24 h | 0,82 | | |
| (11) 12 h/24 h | 0,85 | | |

Fonte: Cetesb, 1979.

Estudo realizado pelo Instituto Agrônomo e Geofísico da USP procurou estabelecer relação entre as precipitações de 1 dia e de 24 horas. Foram analisadas séries anuais que contemplaram o período de 1928 a 1965, obtidas dos dados pluviométricos e pluviográficos observados simultaneamente em São Paulo. Os resultados obtidos mostraram que as alturas pluviométricas de 24 horas e 1 dia guardam uma relação média de 14%, independente do período de retorno e praticamente coincidente com o valor adotado pelo U.S. Weather Bureau para a

mesma relação, de 1,14. Ambos os trabalhos obtiveram as relações empiricamente e chegaram praticamente ao mesmo valor.

Estes resultados são indicativos de que em regiões nas quais as únicas informações são as chuvas de 1 dia observadas em postos pluviométricos, pode-se estimar a chuva de 24 horas de determinada frequência, a partir das relações constantes na TABELA 8, definindo valores de precipitação para diferentes durações de chuva.

No presente estudo foram consideradas séries anuais que incluem as alturas pluviométricas máximas para cada ano.

3.8 – Distribuição Temporal da Chuva de Projeto

A distribuição temporal da chuva de projeto estabelecida pelo método dos blocos alternados, que caracteriza uma condição crítica, é obtida de relações intensidade-duração- frequência. Esta distribuição não está relacionada com os fenômenos físicos, sendo apenas rearranjada para que caracterize a condição mais crítica. Este método é simples e propõe a distribuição de totais de chuva em intervalos de tempo sucessivos contidos na duração total (ZAHED, 1995).

A aplicação do método foi realizada de acordo com as seguintes etapas:

- Através das precipitações de projeto, apresentada na seção anterior, foram obtidas as intensidades de chuva para cada duração;
- As intensidades foram transformadas em alturas de chuva e acumuladas até o último intervalo de tempo;
- Foram calculados os incrementos dos totais acumulados por intervalo;
- Os incrementos ou blocos obtidos foram rearranjados numa seqüência tal, que no centro da duração da tormenta, situou-se o bloco maior, e em seguida os demais blocos foram dispostos em ordem decrescente, um à direita e o outro à esquerda do bloco maior.

3.9 – Precipitação Excedente

A precipitação excedente é a chuva que não é nem retida e nem infiltrada no solo. Depois de escoar sobre a superfície da bacia transforma-se em escoamento superficial direto. A diferença entre a precipitação total e a precipitação efetiva é denominada perda ou abstração. A abstração ou perda é representada pela infiltração, interceptação, armazenamento e evaporação.

No presente estudo foi utilizado o método do Soil Conservation Service (SCS), apresentado no capítulo 2, que utiliza a precipitação total para o cálculo das perdas e foi adotada a distribuição temporal da chuva obtida pelo método dos blocos alternados para o cálculo da precipitação excedente.

Através da distribuição temporal dos blocos alternados, as alturas de chuva foram acumuladas até o último intervalo de tempo;

Foi calculada a precipitação excedente utilizando a equação (2.11), para todos os valores de precipitação total que satisfizeram a relação de $P > 0,2S$;

Em seguida foi calculado o total da precipitação excedente acumulada.

3.10 – Vazões Máximas

Para cálculo de vazões máximas de projeto e determinação do escoamento superficial direto ou hidrograma de projeto, foram utilizados os métodos: Racional, o Hidrograma Triangular do Soil Conservation Service e Hidrograma de Santa Bárbara, apresentados no capítulo 2.

Para a obtenção dos hidrogramas de projeto SCS e Santa Bárbara foram utilizados o modelo ABC 4 e ABC6 e uma para o SCS também foi utilizado uma rotina em Excel disponível na página da FCTH- Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, na disciplina de drenagem urbana, no sítio <http://www.fcth.br/public/material.html>.

O modelo ABC 4 - Análise de Bacias Complexas - determina hidrogramas de cheias a partir de precipitações de projeto especificadas pelo usuário ou calculadas por

relações Intensidade-Duração-Frequência. É adequado a bacias pequenas e médias situadas em áreas urbanas ou rurais. O programa é disponibilizado para *download* na página do LABSID - Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisão da Escola Politécnica da USP. O sistema foi desenvolvido em versão DOS (PORTO et al., 1993).

O modelo ABC 6 – Análise de Bacias Complexas, versão 1,14, apresenta uma evolução do ambiente DOS do modelo ABC4 para o ambiente Windows com uma interface mais amigável e ágil. O programa é disponibilizado para *download* na página do LABSID - Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisão da Escola Politécnica da USP (OLIVEIRA et al., 1999)

3.11 – Análise de Sensibilidade

Foi realizada análise de sensibilidade em relação a alguns parâmetros e analisada a influência destes parâmetros nas vazões de projeto estimadas.

A análise de sensibilidade das vazões máximas de projeto, considerando métodos: Racional, Hidrograma Triangular do Soil Conservation Service e Hidrograma de Santa Bárbara, foi realizada em função dos seguintes parâmetros:

Uso do solo, ou seja, do valor de CN;

Declividade.

A análise de sensibilidade foi feita variando-se os parâmetros e analisando-se os efeitos sobre as vazões máximas de projeto.

3.12 – Correlação de Pearson

Para efeito de análise da existência de correlação linear entre parâmetros, foi obtida matriz de correlação linear, fazendo uso de coeficientes de correlação de Pearson, sendo feita posterior discussão sobre os resultados encontrados.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.05)$$

r – Coeficiente de correlação linear de Pearson; x_i – parâmetro 1; \bar{x} – média do parâmetro 1; y_i – parâmetro 2; e \bar{y} – média do parâmetro 2.

O coeficiente de correlação linear varia entre -1 e +1. A correlação linear quando varia entre 0 a +1 indica uma associação positiva, com valores crescentes de x associados a valores crescentes, ou valores decrescente de x associados a valores decrescentes de y . Os valores entre -1 a 0 indicam associação negativa. ou seja, valores crescentes de x estão associados a valores decrescente de y , ou valores decrescentes de x estão associados a valores crescentes de y . A correlação linear perfeita acontece quando o valor do coeficiente for igual a 1 ou igual -1, quando os pontos de um diagrama de dispersão situam-se exatamente sobre uma linha reta, sendo os valores de x e y perfeitamente associados (MOORE, 1995).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Delimitação de Bacias Hidrográficas e Extração da Rede de Drenagem Utilizando o Modelo Digital de Elevação

Nesta seção, são apresentados os resultados dos procedimentos de delimitação, de acordo com a seqüência apresentada no capítulo 3.

A FIGURA 21 apresenta a malha triangular irregular obtido pela interpolação da hipsometria da área de estudo, com a localização da sub-bacia Alto Santa Maria.

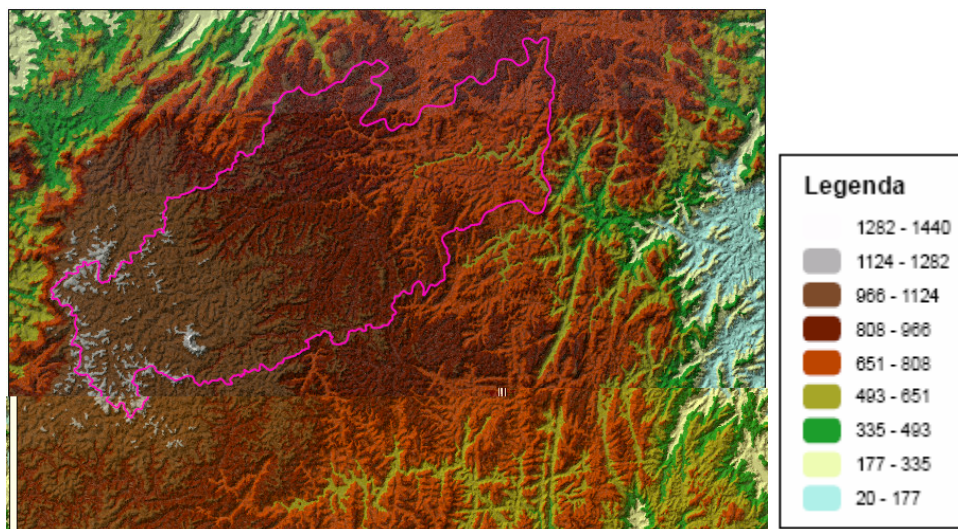


Figura 21: Malha triangular irregular (TIN) para a área de estudo.

Para melhor visualização da rede de drenagem obtida optou-se por apresentar uma ampliação, na região compreendida entre o quadrado vermelho, FIGURA 22. Esta ampliação é utilizada em todas as figuras a seguir.

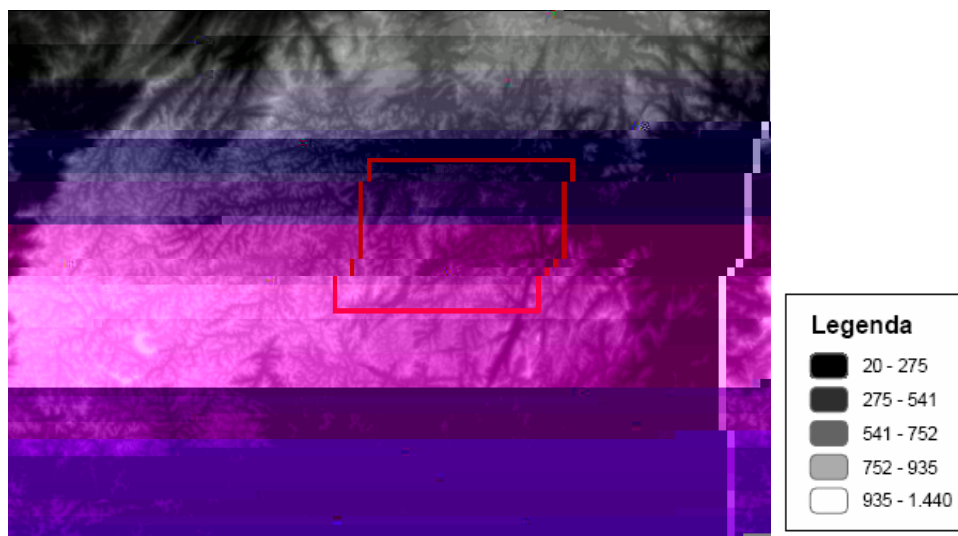


Figura 22: Modelo digital de elevação.

A FIGURA 23 apresenta a malha obtida após a eliminação das possíveis depressões, picos e áreas planas com sentidos indefinidos de drenagem.

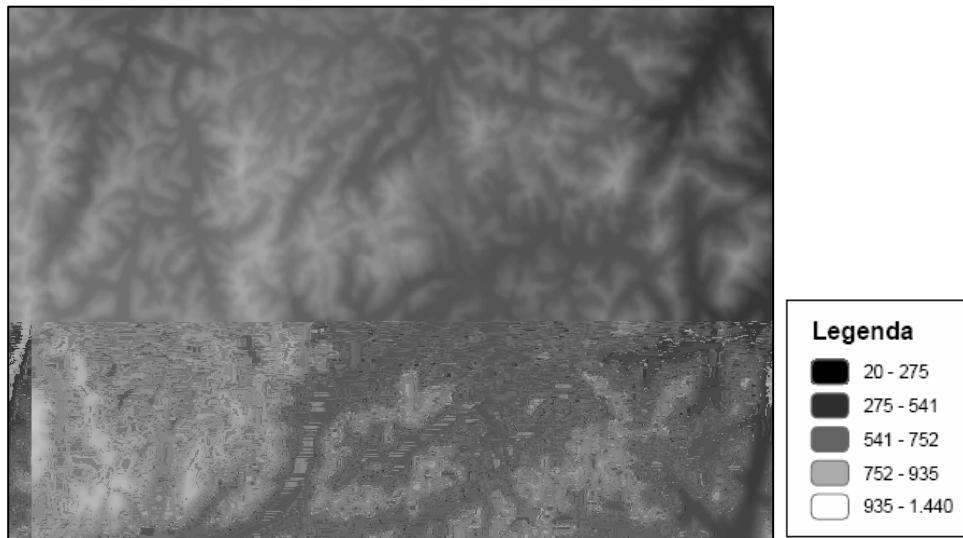


Figura 23: Modelo digital de elevação sem falhas.

A malha de direção de fluxo é apresentada na FIGURA 24. É uma malha de números inteiros cujos fluxos codificados para cada célula variam de 1 a 128, para cada sentido de fluxo.

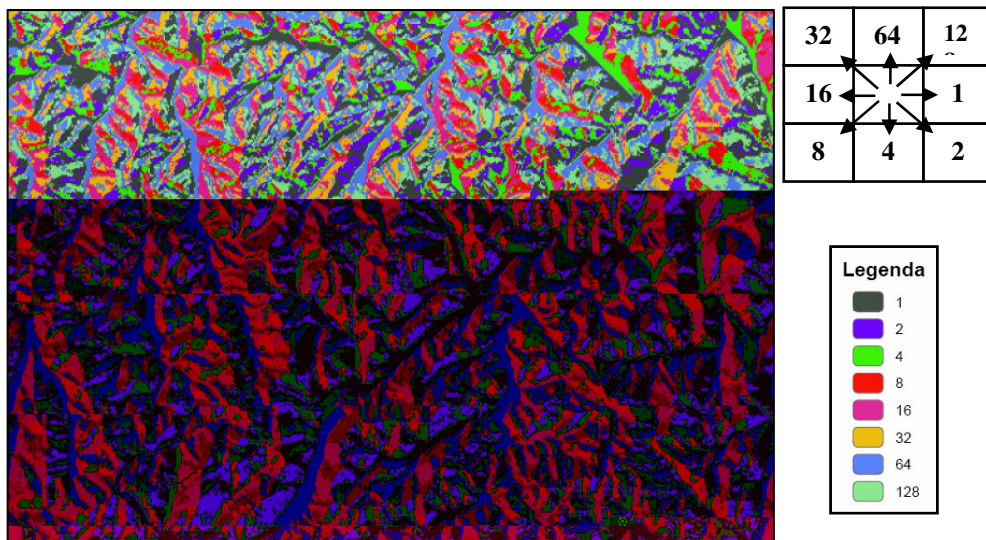


Figura 24: Malha de direção de fluxo.

A FIGURA 25 mostra em detalhe, para a mesma região ampliada, a malha resultante com os valores de fluxo acumulado para cada célula.

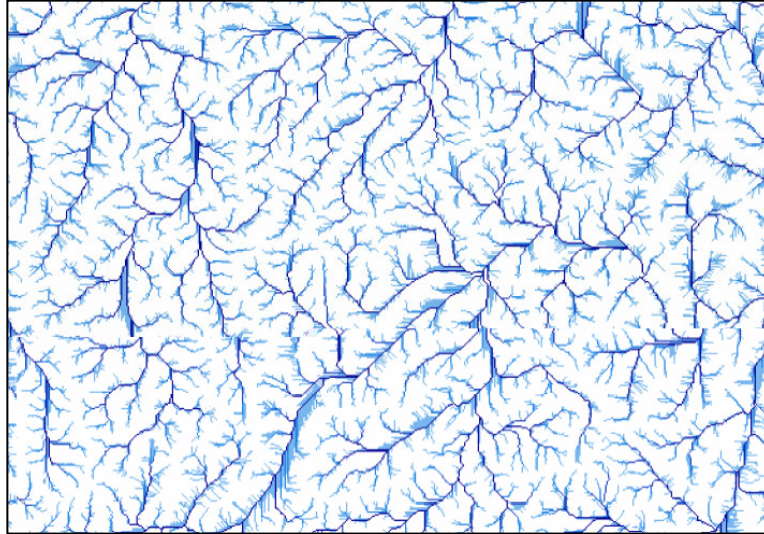


Figura 25: Malha de fluxo acumulado.

Na FIGURA 26, a malha de fluxo acumulado foi reclassificada para 500, 200, 70 e 10 respectivamente, como pode-se observar a rede se torna progressivamente mais detalhada a medida que é diminuído o valor de acumulação, ou seja para cada célula o valor de acumulação é de 10 ou mais na última classificação.

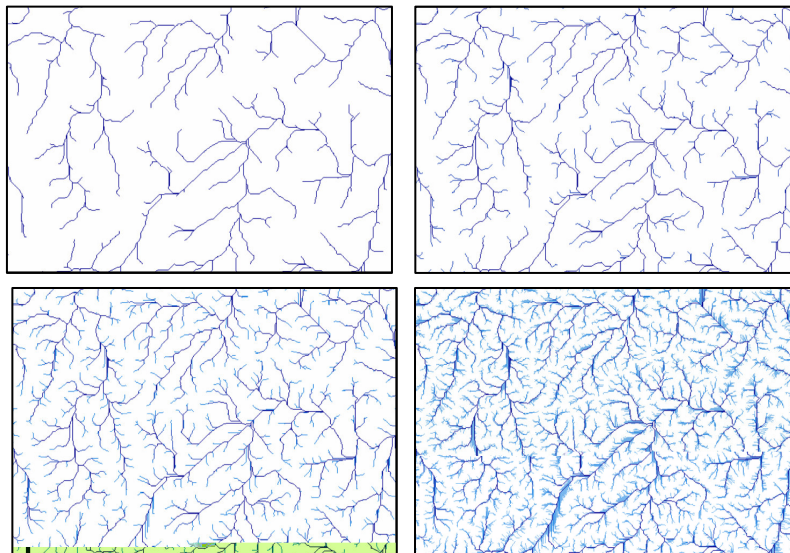


Figura 26: Reclassificação da malha de fluxo para os valores 500, 200, 70 e 10,

A FIGURA 27 mostra os trechos de fluxo resultantes, cada trecho recebe uma numeração que é comum para o mesmo trecho e funciona como identificação. O mapa com os trechos de fluxo resultantes já estão em formato vetorial.

Figura 27: Mapa com os trechos de fluxos.

Na FIGURA 28 é apresentada o ordenamento dos trechos da hidrografia utilizando o método de Strahler (1952). Os trechos são ordenados de acordo com o número de

for

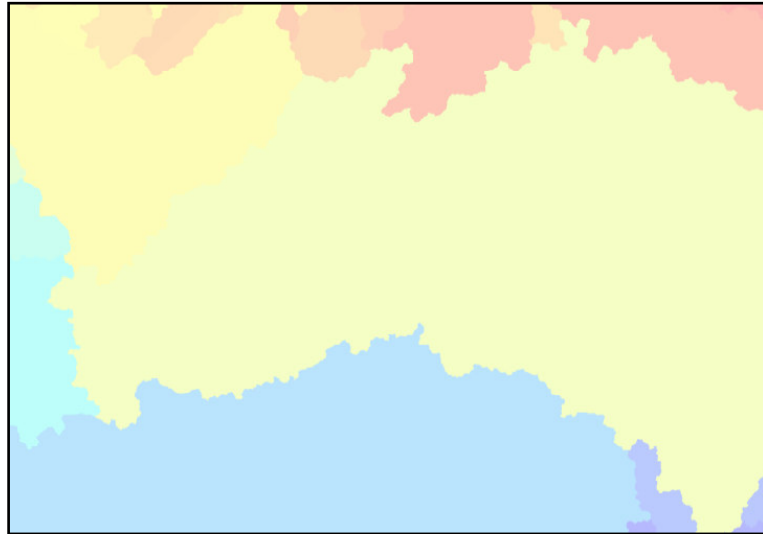


Figura 29: Bacias obtidas utilizando a malha de direção de fluxo.

A FIGURA 30 apresenta a malha de fluxo acumulado máximo dentro de cada região encontrada. A região em vermelho representa a sub-bacia Alto Santa Maria.

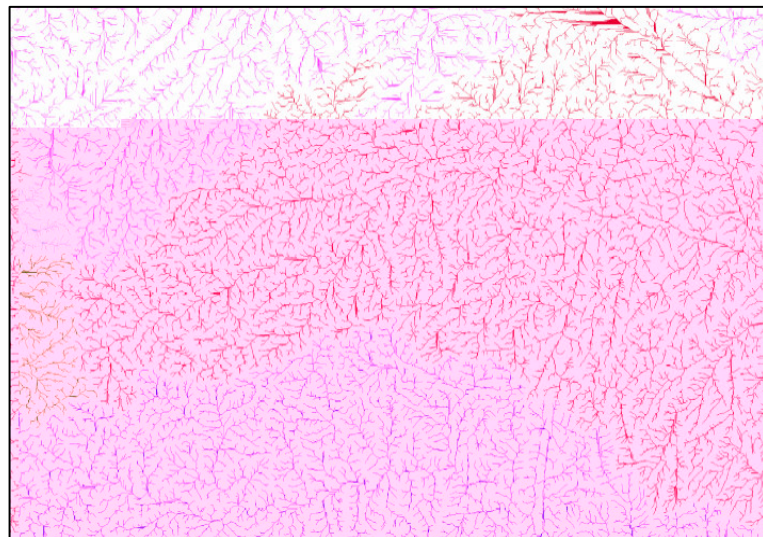


Figura 30: Fluxo acumulado máximo para cada região.

Na FIGURA 31 pode-se observar as duas maiores regiões obtidas para os pontos de maior acumulação de fluxo dentro da área de estudo.

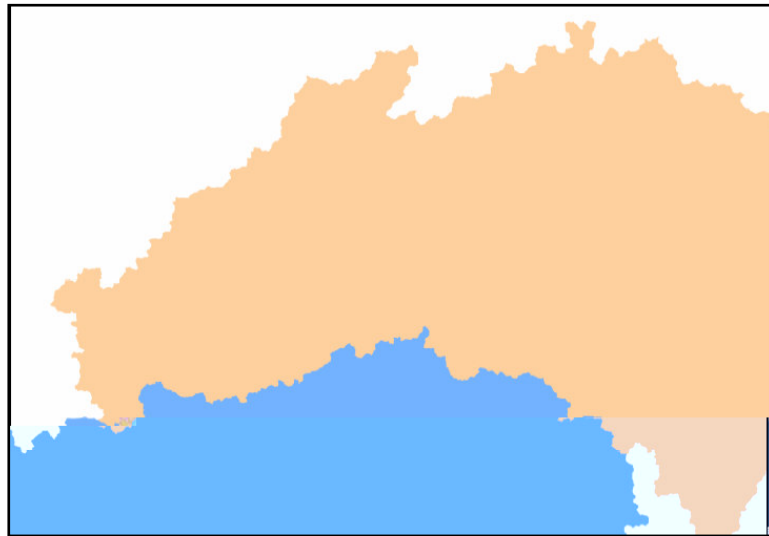


Figura 31: Regiões delimitadas para os dois maiores pontos de acumulação.

A FIGURA 32 apresenta a sub-bacia a montante da UHE de Rio Bonito, em formato raster, obtida utilizando os procedimentos para a delimitação de bacias apresentado no capítulo 3.

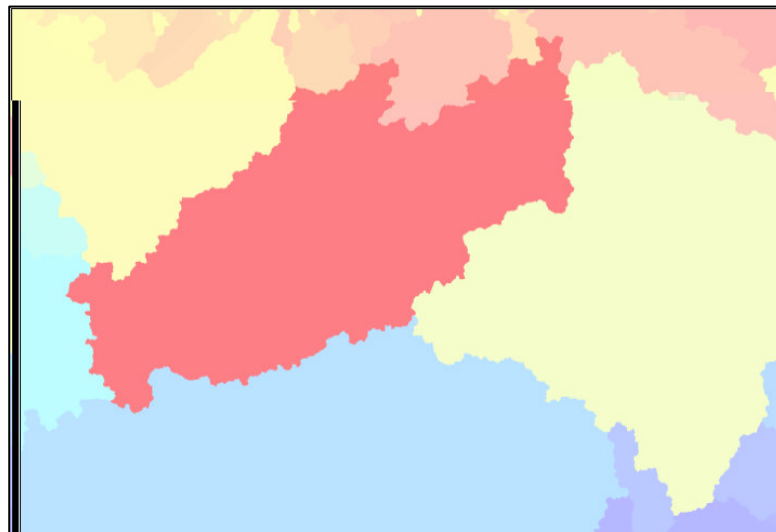


Figura 32: Sub-bacia do Alto Santa Maria delimitada utilizando ferramenta SIG.

Na FIGURA 33 é apresentada o mapa da sub-bacia do Alto Santa Maria, localizada a montante da UHE de Rio Bonito em formato vetorial.

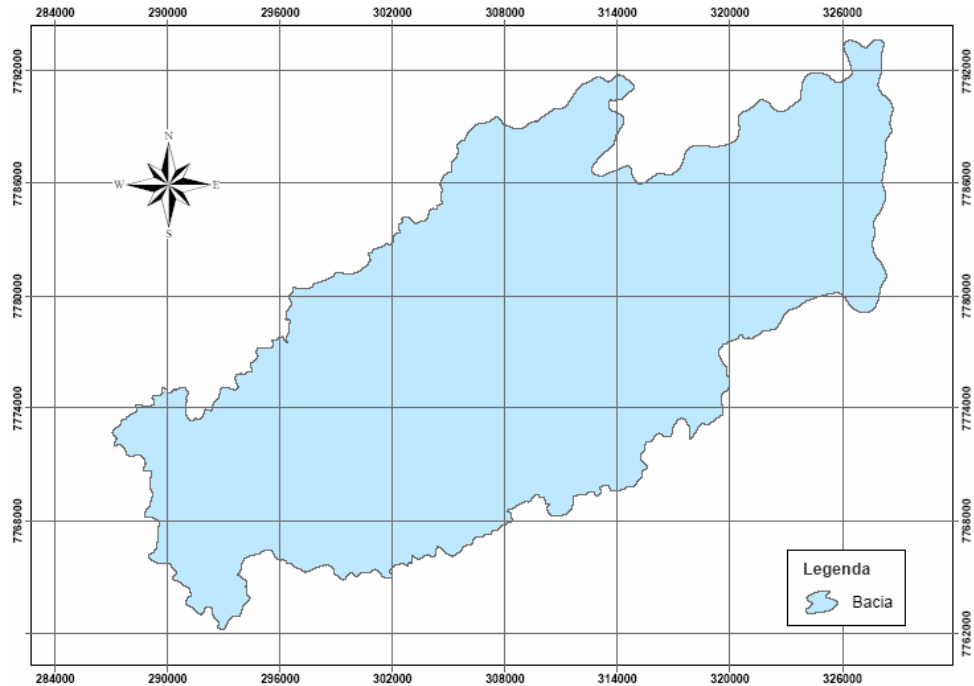


Figura 33: Sub-Bacia Alto Santa Maria, delimitada por SIG, a montante da UHE de Rio Bonito.

Na FIGURA 34 é apresentada a hidrografia obtida para a sub-bacia a montante da UHE de Rio Bonito utilizando os procedimentos para a definição da rede de drenagem apresentado no capítulo 3, utilizando o software Arcgis 9.0

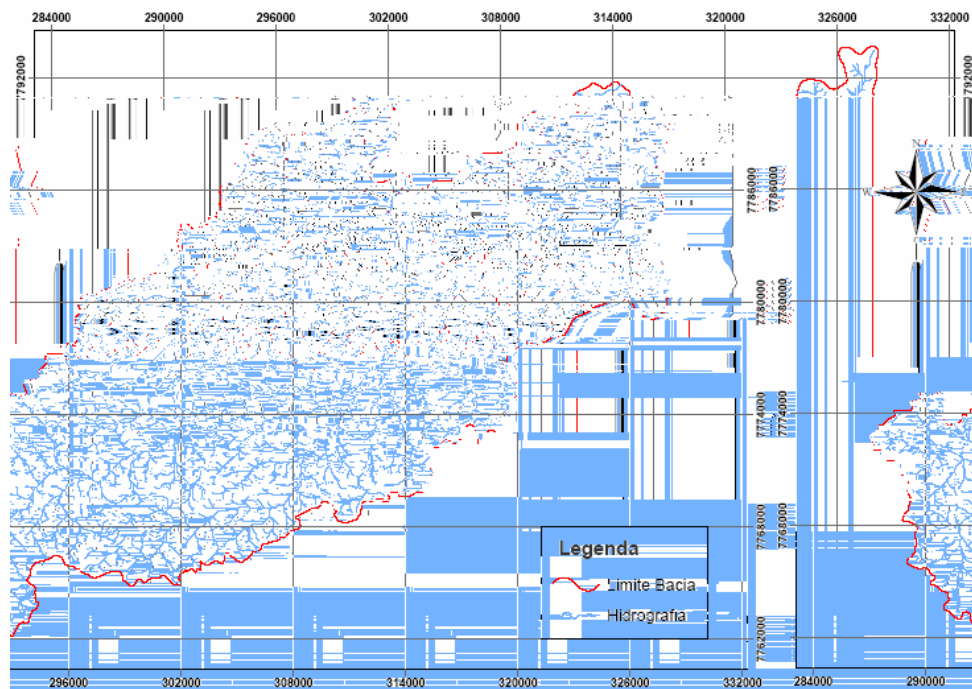


Figura 34: Hidrografia da sub-bacia delimitada por SIG a montante da UHE de Rio Bonito.

4.2 – Obtenção do Mapa do Número da Curva (CN-SCS)

Na FIGURA 35 é apresentado o mapa de solos em formato raster, obtido após a atribuição de valores para cada tipo de solo.

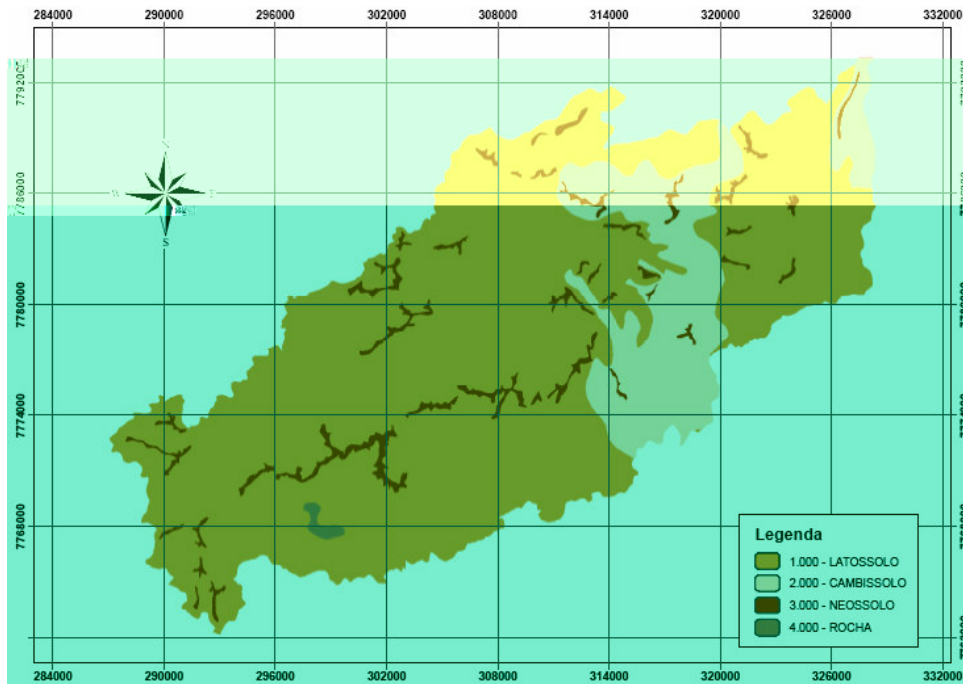


Figura 35: Mapa de solo em formato raster com valores atribuídos por tipo de solo.

A FIGURA 36 apresenta o mapa de uso do solo, em formato raster, obtido após a atribuição de valores que diferenciam cada tipo de uso e ocupação.



Figura 36: Mapa de uso do solo em formato raster com valores atribuídos por cultura.

Na FIGURA 37 é representada a soma efetuada pelo sistema de informação utilizando os mapas de solos e uso do solo em formato raster obtendo um mapa resultante com a combinação dos mapas de uso e ocupação do solo.

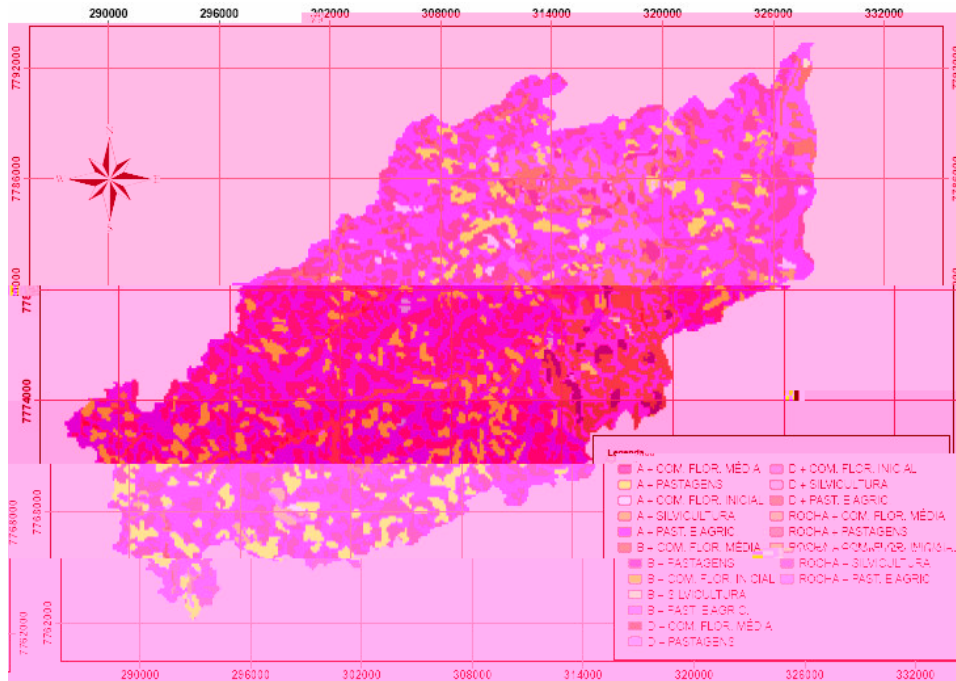


Figura 37: Mapa com valores de combinação para os mapas de uso ocupação e solo.

O mapa de solos, convertido em formato vetorial, e classificado segundo os grupos hidrológicos de solo (GHS) é apresentado na FIGURA 38.

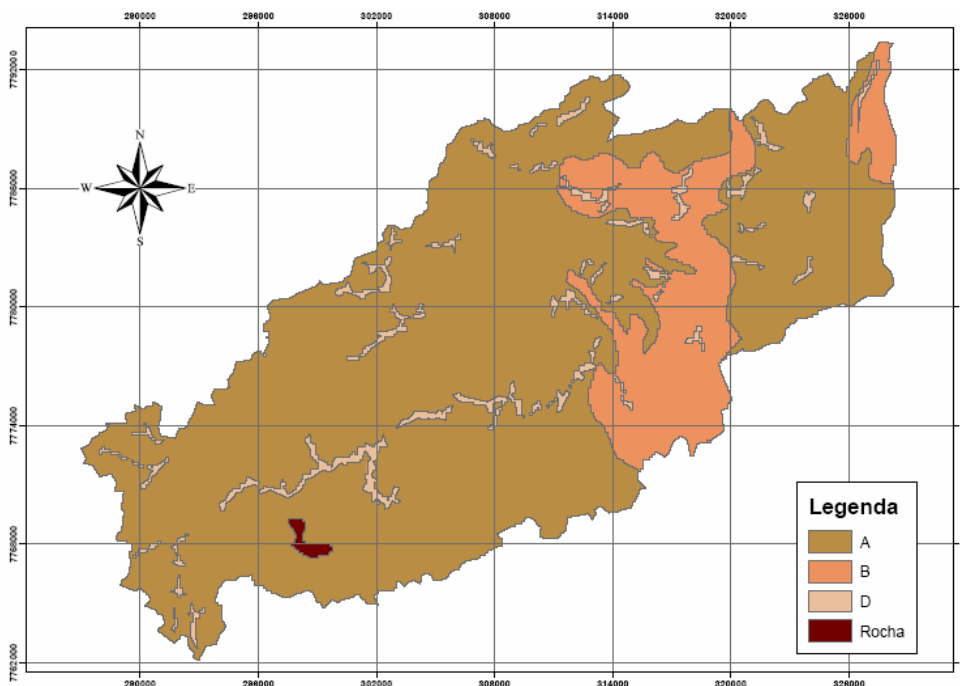


Figura 38: Mapa com os grupos hidrológicos para cada tipo de solo.

Nas FIGURAS 39 e 40 são apresentados os mapas de número da curva - CN utilizando a classificação de Tucci (1993) e Setzer & Porto (1979), respectivamente.

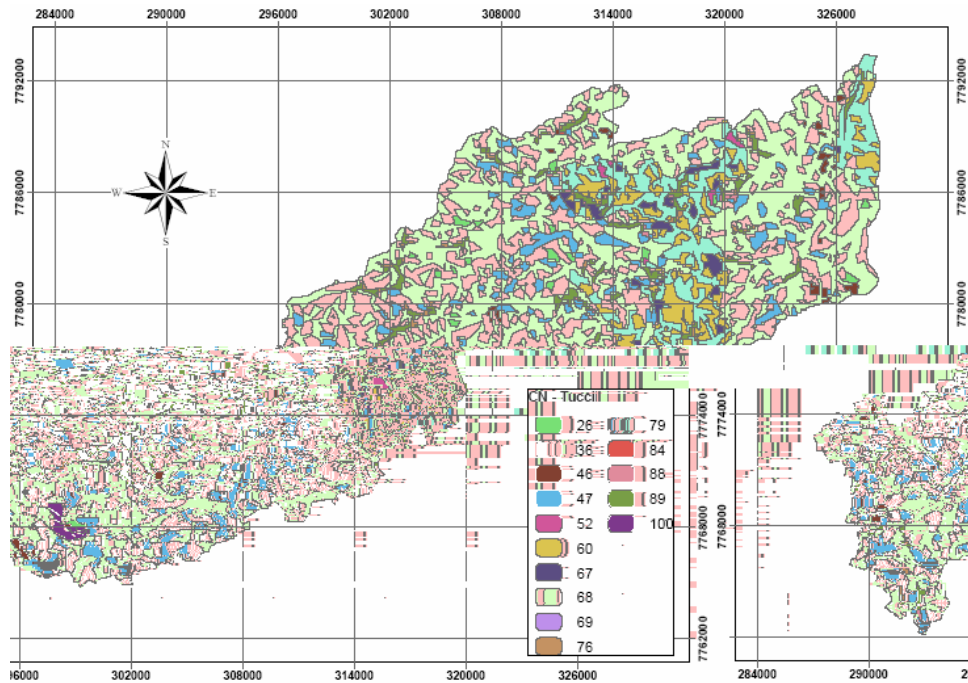


Figura 39: Mapa com o número da curva (CN) segundo Tucci (1993).

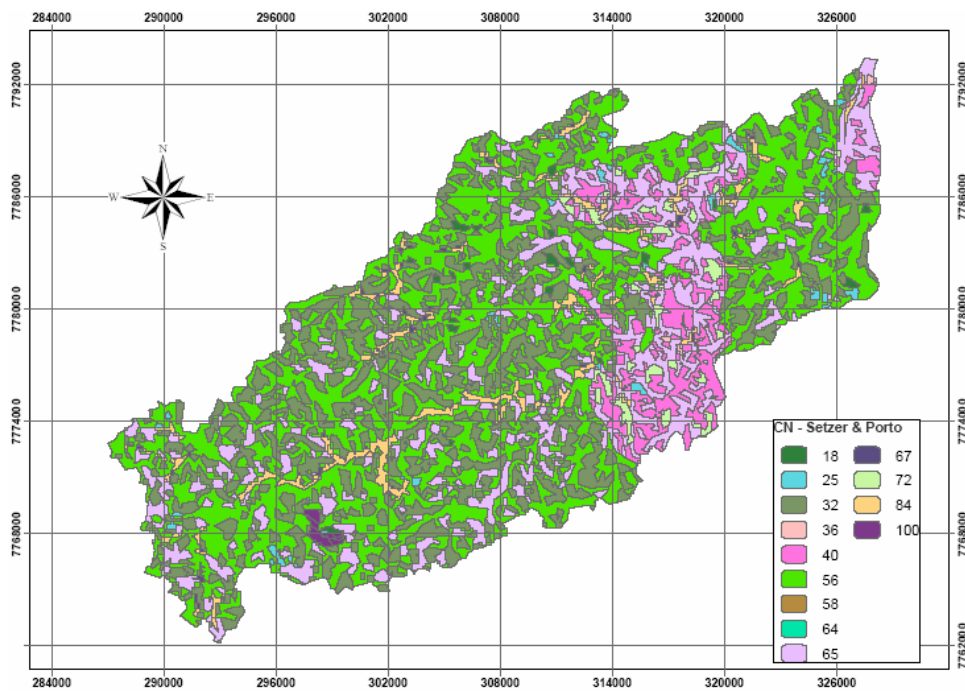


Figura 40: Mapa com o número da curva (CN) segundo Setzer e Porto (1979).

4.3 – Áreas de Estudo

As FIGURAS 41 e 42 mostram sub-bacias escolhidas, em formato de vetor, localizadas na parte superior da bacia do Rio Santa Maria da Vitória, a montante da UHE de Rio Bonito, delimitadas para aplicação das metodologias de estimativa de vazões de projeto e análises de correlação e sensibilidade, conforme o procedimento apresentado no capítulo 3, seção 3.4.

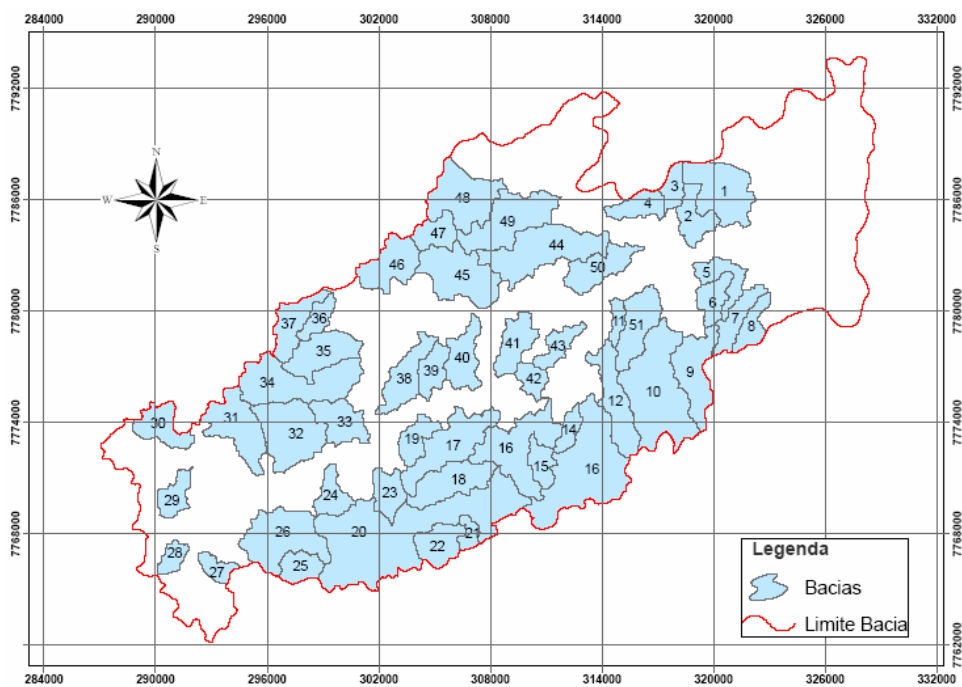


Figura 41: Sub-bacias escolhidas, com áreas até 30 km².

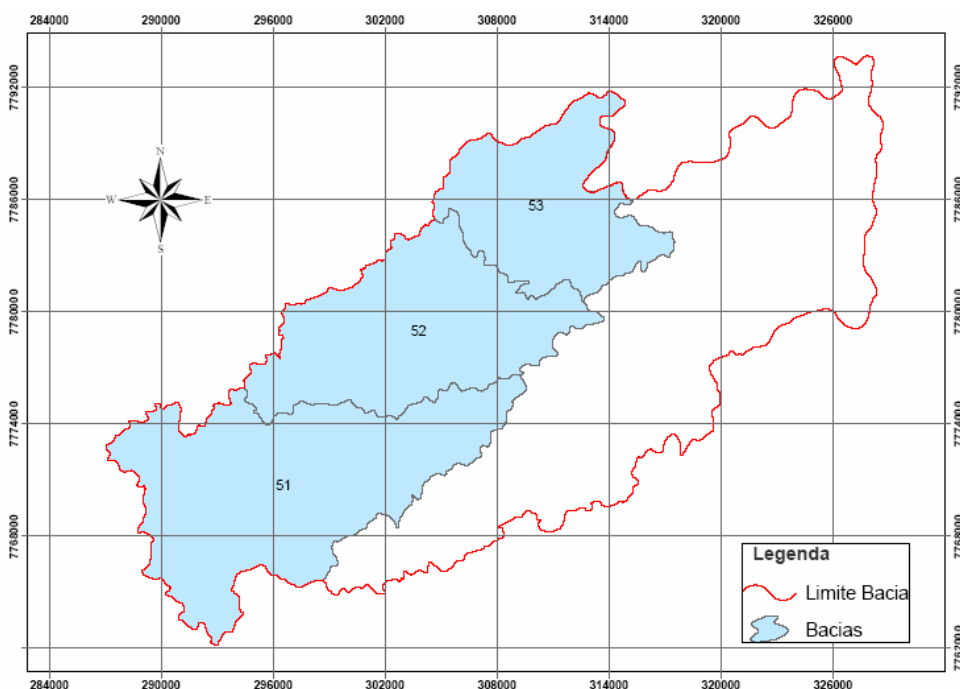


Figura 42: Sub-bacias escolhidas, com áreas superiores a 30 km².

Os mapas de solos, FIGURA 45 e FIGURA 46, para as sub-bacias de estudo com áreas até 30 km² e superiores a 30km² respectivamente.

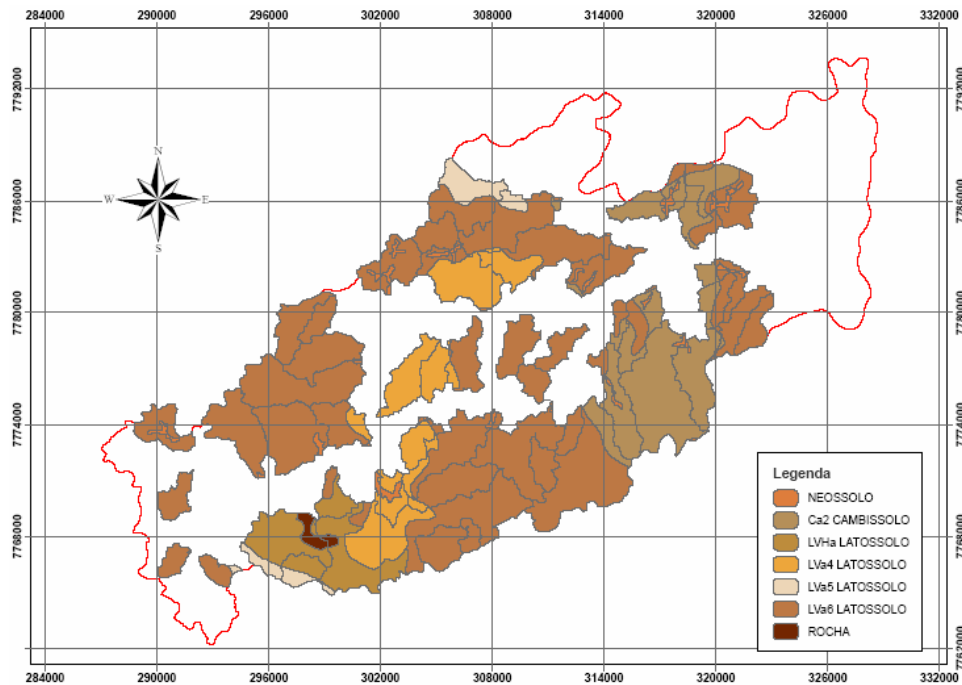


Figura 45: Mapa de solos para as sub-bacias com áreas até 30 km².

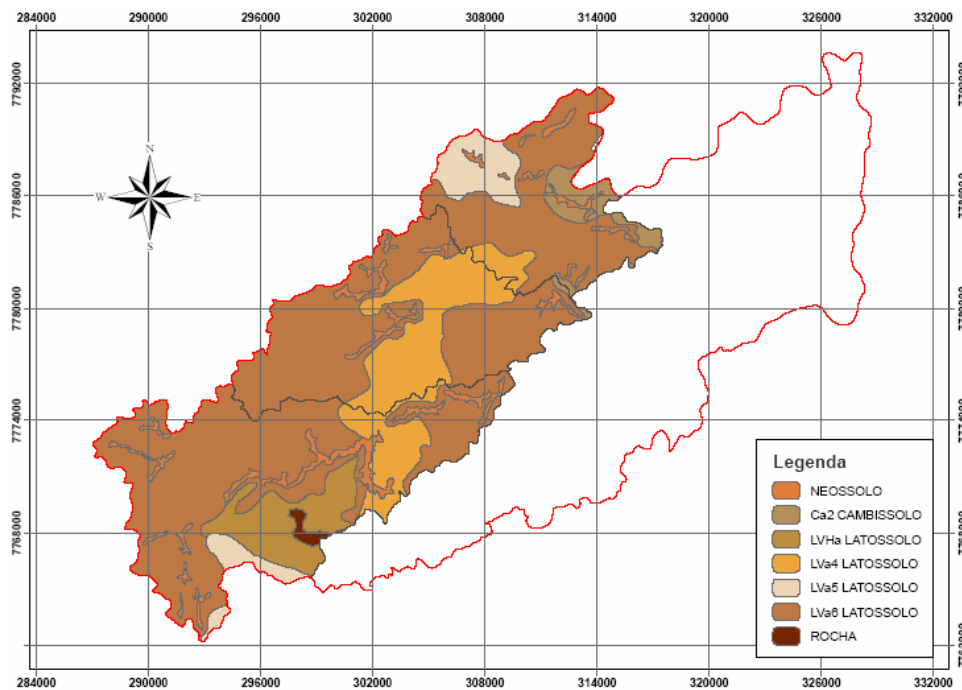


Figura 46: Mapa de solos para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km².

Os mapas de uso do solo, FIGURAS 47 e 48, para as sub-bacias de estudo com áreas até 30 km² e superiores a 30km² respectivamente.

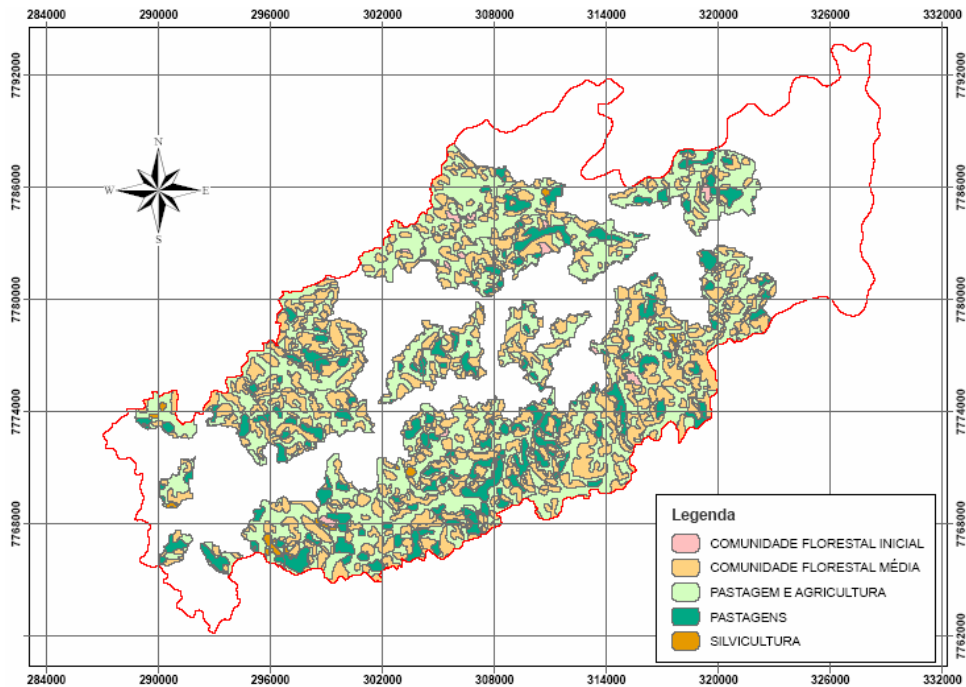


Figura 47: Mapa de uso e ocupação do solo para as sub-bacias com áreas até 30 km².

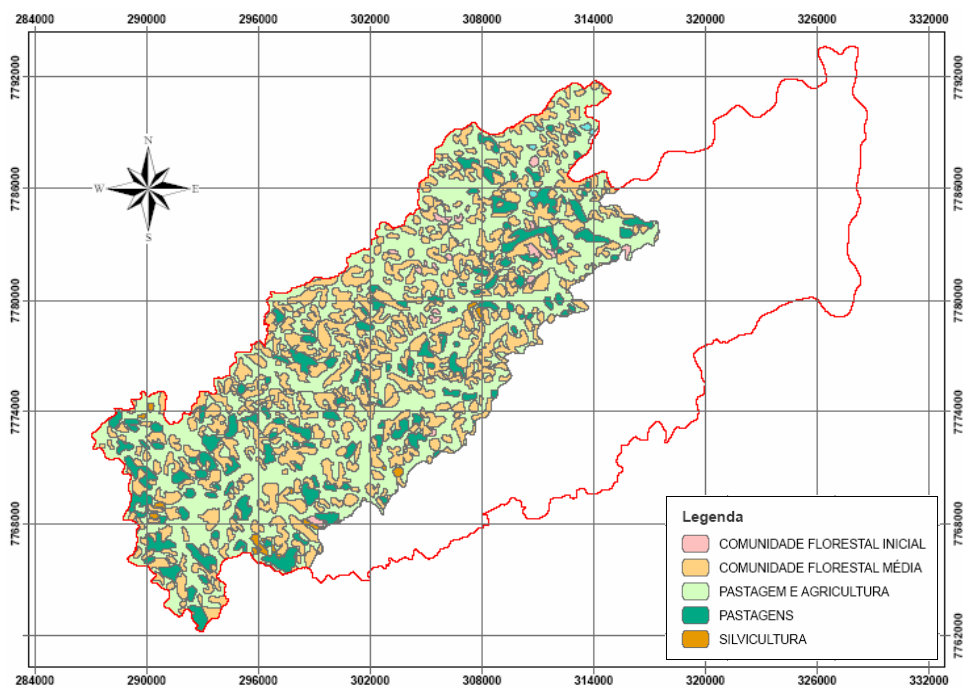


Figura 48: Mapa de uso e ocupação do solo para as bacias com áreas superiores a 30 km².

4.4- Características Morfológicas das Sub-bacias

As principais características das sub-bacias delimitadas na região de estudo, apresentadas na TABELA 9, foram obtidas utilizando o modelo de banco de dados Geodatabase, presente no software Arcgis 9.0, que forneceu na tabela de atributos de cada sub-bacia os valores das áreas, em m^2 e dos perímetros, em m, respectivamente. Para a hidrografia, o modelo forneceu os valores dos comprimentos dos trechos em m. As declividades foram obtidas utilizando o Modelo Digital de Elevação.

A TABELA 10 apresenta os valores obtidos para as características morfológicas das sub-bacias estudadas:

Coeficiente de compacidade (K_c);

Densidade de drenagem (D_d);

Fator de forma da bacia (K_f);

Extensão Média do escoamento Superficial (I)

Tabela 9: Características físicas das sub-bacias.

| Sub-bacia | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS | | | | |
|-----------|-------------------------|-------|---------|--------|---------|
| | A (km ²) | P(km) | Lt (km) | L (km) | S (m/m) |
| 1 | 8,79 | 16,68 | 6,59 | 21,10 | 0,01822 |
| 2 | 4,14 | 14,07 | 4,09 | 8,22 | 0,04177 |
| 3 | 2,16 | 8,49 | 2,99 | 4,28 | 0,00901 |
| 4 | 3,43 | 11,76 | 3,40 | 9,08 | 0,02354 |
| 5 | 3,73 | 17,34 | 3,32 | 11,69 | 0,05470 |
| 6 | 3,38 | 11,46 | 3,80 | 10,87 | 0,05429 |
| 7 | 3,92 | 15,13 | 5,16 | 9,83 | 0,04636 |
| 8 | 3,02 | 11,25 | 4,10 | 7,33 | 0,05398 |
| 9 | 7,65 | 20,25 | 5,08 | 21,65 | 0,02754 |
| 10 | 17,03 | 29,07 | 8,92 | 42,92 | 0,02844 |
| 11 | 1,60 | 8,40 | 2,68 | 5,07 | 0,08103 |
| 12 | 7,38 | 21,30 | 6,65 | 23,95 | 0,02406 |
| 13 | 18,35 | 29,33 | 9,85 | 54,33 | 0,02152 |
| 14 | 2,05 | 8,82 | 3,44 | 6,98 | 0,04902 |
| 15 | 2,84 | 11,16 | 3,08 | 7,95 | 0,04458 |
| 16 | 10,93 | 30,06 | 9,02 | 36,98 | 0,01824 |
| 17 | 9,30 | 24,36 | 7,45 | 29,70 | 0,00953 |
| 18 | 6,98 | 18,30 | 6,08 | 21,50 | 0,02634 |
| 19 | 3,43 | 11,82 | 3,16 | 11,10 | 0,03429 |
| 20 | 30,50 | 49,77 | 16,00 | 74,50 | 0,01470 |
| 21 | 1,52 | 7,66 | 2,12 | 4,68 | 0,05893 |
| 22 | 4,52 | 10,86 | 3,50 | 15,66 | 0,02584 |
| 23 | 3,69 | 11,23 | 3,16 | 10,00 | 0,01802 |
| 24 | 3,30 | 11,34 | 3,59 | 9,66 | 0,02795 |
| 25 | 3,19 | 8,89 | 2,34 | 8,46 | 0,06027 |
| 26 | 10,61 | 20,82 | 5,19 | 28,33 | 0,01157 |
| 27 | 2,00 | 7,88 | 2,23 | 5,91 | 0,01794 |
| 28 | 1,91 | 6,66 | 2,50 | 6,64 | 0,03058 |
| 29 | 2,97 | 11,04 | 3,27 | 8,18 | 0,02307 |
| 30 | 4,61 | 12,14 | 3,44 | 12,85 | 0,02596 |
| 31 | 8,32 | 19,51 | 5,72 | 27,53 | 0,03144 |
| 32 | 10,25 | 18,30 | 5,84 | 31,23 | 0,02455 |
| 33 | 5,16 | 14,70 | 4,00 | 18,58 | 0,01499 |
| 34 | 12,08 | 24,83 | 8,47 | 36,52 | 0,03070 |
| 35 | 6,58 | 16,38 | 4,62 | 19,97 | 0,06528 |
| 36 | 2,46 | 10,26 | 3,20 | 7,83 | 0,02745 |
| 37 | 4,98 | 15,03 | 5,08 | 16,76 | 0,04332 |
| 38 | 5,63 | 18,18 | 5,95 | 17,02 | 0,03908 |
| 39 | 3,36 | 11,52 | 3,94 | 10,64 | 0,04450 |
| 40 | 5,05 | 15,54 | 4,43 | 16,75 | 0,03158 |
| 41 | 4,58 | 13,44 | 4,06 | 15,07 | 0,04437 |
| 42 | 2,38 | 9,48 | 2,39 | 7,12 | 0,05134 |
| 43 | 2,89 | 12,60 | 3,70 | 8,57 | 0,04476 |
| 44 | 12,06 | 27,36 | 8,91 | 35,64 | 0,03391 |
| 45 | 9,98 | 20,91 | 6,72 | 31,68 | 0,03285 |
| 46 | 6,43 | 14,72 | 4,07 | 20,72 | 0,04480 |
| 47 | 3,47 | 10,93 | 2,99 | 11,71 | 0,06885 |
| 48 | 9,45 | 19,56 | 5,82 | 32,51 | 0,03746 |
| 49 | 9,91 | 23,20 | 7,09 | 32,21 | 0,03101 |
| 50 | 5,49 | 17,03 | 5,56 | 12,06 | 0,03850 |
| 51 | 6,37 | 16,26 | 5,50 | 17,88 | 0,04530 |
| 52 | 150,7 | 81,73 | 30,48 | 100,74 | 0,00783 |
| 53 | 109,9 | 62,93 | 24,76 | 79,84 | 0,01544 |
| 54 | 79,0 | 53,99 | 16,69 | 49,66 | 0,01802 |

Tabela 10: Características morfológicas das sub-bacias.

| Sub-bacia | CARACTERÍSTICAS MORFOLOGICAS | | | |
|-----------|------------------------------|------|-------|--------|
| | Dd (km/km ²) | Kc | Kf | l (km) |
| 1 | 2,4 | 1,58 | 0,203 | 0,104 |
| 2 | 2,0 | 1,94 | 0,247 | 0,126 |
| 3 | 2,0 | 1,62 | 0,242 | 0,126 |
| 4 | 2,7 | 1,78 | 0,297 | 0,094 |
| 5 | 3,1 | 2,52 | 0,339 | 0,080 |
| 6 | 3,2 | 1,75 | 0,234 | 0,078 |
| 7 | 2,5 | 2,14 | 0,147 | 0,100 |
| 8 | 2,4 | 1,81 | 0,180 | 0,103 |
| 9 | 2,8 | 2,05 | 0,296 | 0,088 |
| 10 | 2,5 | 1,97 | 0,214 | 0,099 |
| 11 | 3,2 | 1,86 | 0,224 | 0,079 |
| 12 | 3,2 | 2,20 | 0,167 | 0,077 |
| 13 | 3,0 | 1,92 | 0,189 | 0,084 |
| 14 | 3,4 | 1,73 | 0,173 | 0,073 |
| 15 | 2,8 | 1,85 | 0,299 | 0,089 |
| 16 | 3,4 | 2,55 | 0,134 | 0,074 |
| 17 | 3,2 | 2,24 | 0,167 | 0,078 |
| 18 | 3,1 | 1,94 | 0,189 | 0,081 |
| 19 | 3,2 | 1,79 | 0,343 | 0,077 |
| 20 | 2,4 | 2,52 | 0,119 | 0,102 |
| 21 | 3,1 | 1,74 | 0,339 | 0,081 |
| 22 | 3,5 | 1,43 | 0,368 | 0,072 |
| 23 | 2,7 | 1,64 | 0,370 | 0,092 |
| 24 | 2,9 | 1,75 | 0,256 | 0,085 |
| 25 | 2,7 | 1,39 | 0,581 | 0,094 |
| 26 | 2,7 | 1,79 | 0,394 | 0,094 |
| 27 | 3,0 | 1,56 | 0,402 | 0,084 |
| 28 | 3,5 | 1,35 | 0,305 | 0,072 |
| 29 | 2,7 | 1,79 | 0,278 | 0,091 |
| 30 | 2,8 | 1,58 | 0,388 | 0,090 |
| 31 | 3,3 | 1,89 | 0,254 | 0,076 |
| 32 | 3,0 | 1,60 | 0,301 | 0,082 |
| 33 | 3,6 | 1,81 | 0,322 | 0,069 |
| 34 | 3,0 | 2,00 | 0,168 | 0,083 |
| 35 | 3,0 | 1,79 | 0,309 | 0,082 |
| 36 | 3,2 | 1,83 | 0,240 | 0,079 |
| 37 | 3,4 | 1,89 | 0,193 | 0,074 |
| 38 | 3,0 | 2,15 | 0,159 | 0,083 |
| 39 | 3,2 | 1,76 | 0,217 | 0,079 |
| 40 | 3,3 | 1,94 | 0,257 | 0,075 |
| 41 | 3,3 | 1,76 | 0,277 | 0,076 |
| 42 | 3,0 | 1,72 | 0,418 | 0,084 |
| 43 | 3,0 | 2,07 | 0,211 | 0,084 |
| 44 | 3,0 | 2,21 | 0,152 | 0,085 |
| 45 | 3,2 | 1,85 | 0,221 | 0,079 |
| 46 | 3,2 | 1,63 | 0,388 | 0,078 |
| 47 | 3,4 | 1,64 | 0,388 | 0,074 |
| 48 | 3,4 | 1,78 | 0,279 | 0,073 |
| 49 | 3,2 | 2,06 | 0,197 | 0,077 |
| 50 | 2,2 | 2,04 | 0,177 | 0,114 |
| 51 | 2,8 | 1,80 | 0,211 | 0,089 |
| 52 | 0,7 | 1,86 | 0,162 | 0,374 |
| 53 | 0,7 | 1,68 | 0,179 | 0,344 |
| 54 | 0,6 | 1,70 | 0,283 | 0,398 |

Os coeficientes de compacidade (kc) obtidos para todas as sub-bacias foram superiores a 1,35. Segundo Villela & Mattos (1975), as sub-bacias estudadas não são muito propensas a enchentes rápidas em seus exultórios.

Analisando o fator de forma (kf) encontrando pode-se comprovar pelos valores baixos encontrados, que de acordo com o coeficiente de compacidade as sub-bacias não são muito propensas a enchentes rápidas em seus exultórios.

As densidades de drenagem, que indicam os graus de desenvolvimento do sistema de drenagem e, segundo Villela e Mattos (1975), fornecem indicações das eficiências das drenagens das bacias apresentaram valores próximos a 3,00, indicando bacias bem drenadas.

4.5 - Determinação e Composição CN Médio

O CN médio da bacia é a principal variável para estimativa da chuva excedente, segundo a metodologia do SCS. Pela análise do cruzamento dos mapas de solos e uso e ocupação, utilizando o SIG, foram determinados os valores de CN para condições de umidade antecedente II e condições média de umidade antecedente do solo, apresentadas nas tabelas por Setzer & Porto (1979) e Tucci (1993).

A TABELA 11 apresenta a associação de uso do solo das sub-bacias com o número da curva, utilizando as tabelas apresentadas no capítulo 2.

Tabela 11: Associação dos usos da sub-bacia com as tabelas do Número da Curva - CN.

| <i>Uso e Ocupação</i> | <i>Setzer & Porto (1979)</i> | <i>Tucci (1993)</i> |
|------------------------------|------------------------------------|--|
| Comunidade Florestal Média | Mata, Capoeira velha (Más) | Florestas (densas, alta transição) |
| Comunidade Florestal Inicial | Mata, Capoeira velha (Boas) | Florestas (normais) |
| Pastagem | Gramados Tratados (Más) | Pastagens (pobres, em curvas de nível) |
| Pastagem e Agricultura | Cultivo de ciclo curto (C) (Más) | Plantações de Legumes ou cultivados |
| Silvicultura | Reflorestamento (C) (Boas) | Florestas (esparsas) |

Os mapas de CN produzidos, adotando a classificação apresentada por Tucci (1993), FIGURAS 49 e 50, e Setzer & Porto (1979), FIGURAS 51 e 52, são apresentados a seguir, para as sub-bacias de estudo.

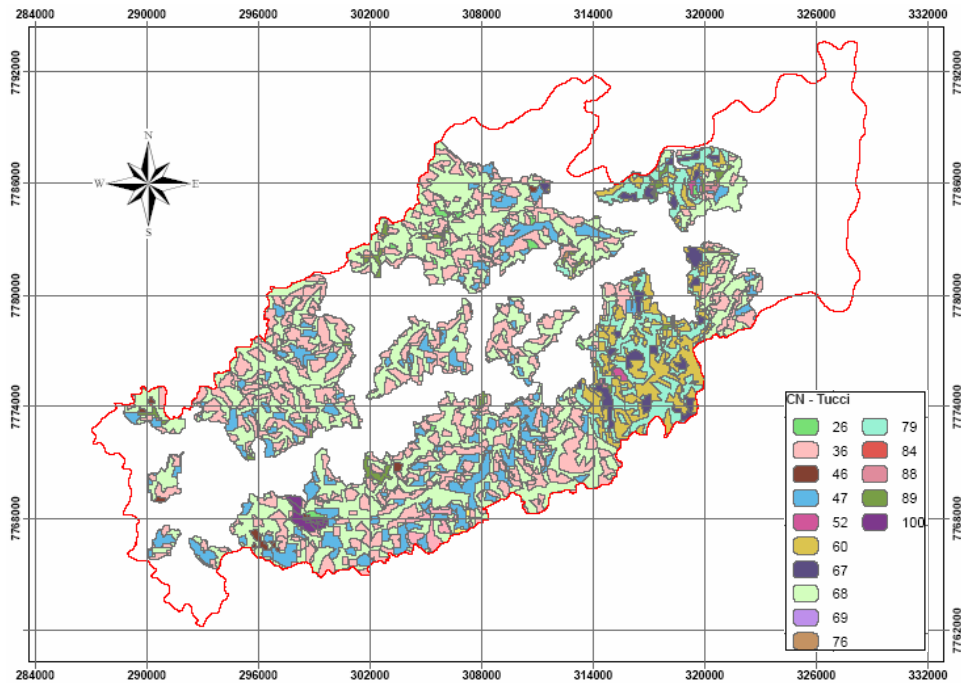


Figura 49: Mapa de CN (TUCCI, 1993) para as sub-bacias com área até 30 km².

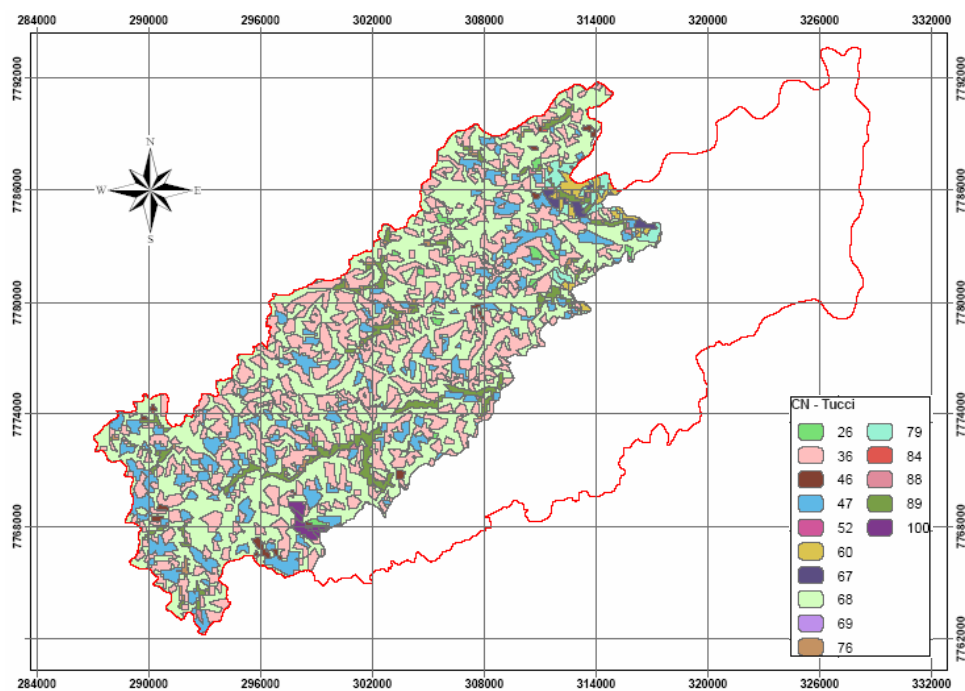


Figura 50: Mapa de CN (TUCCI, 1993) para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km².

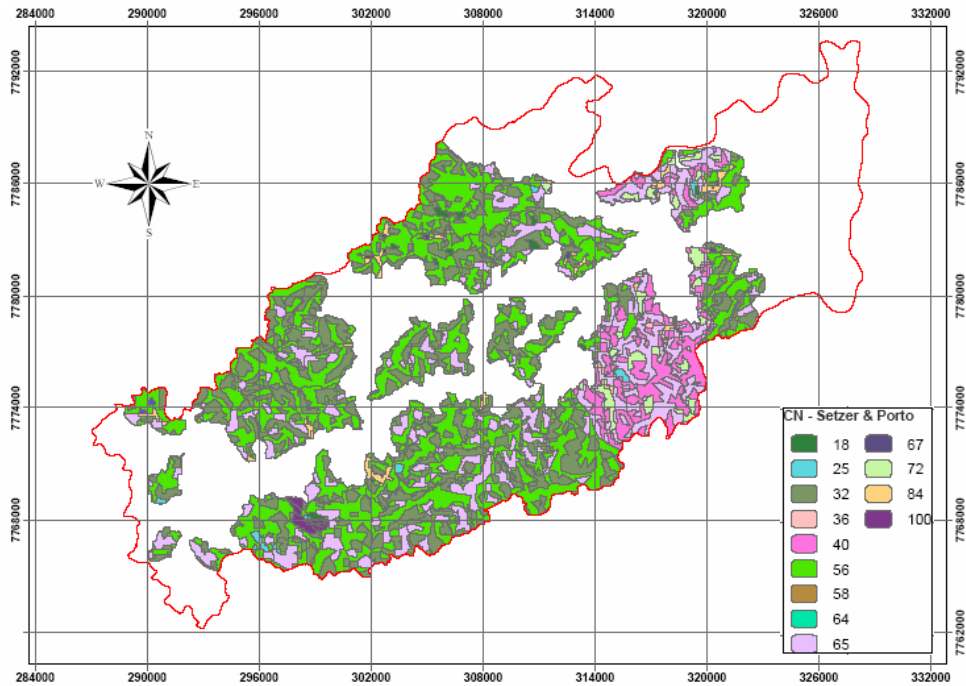


Figura 51: Mapa de CN (Setzer; Porto, 1979) para as sub-bacias com áreas até 30 km².

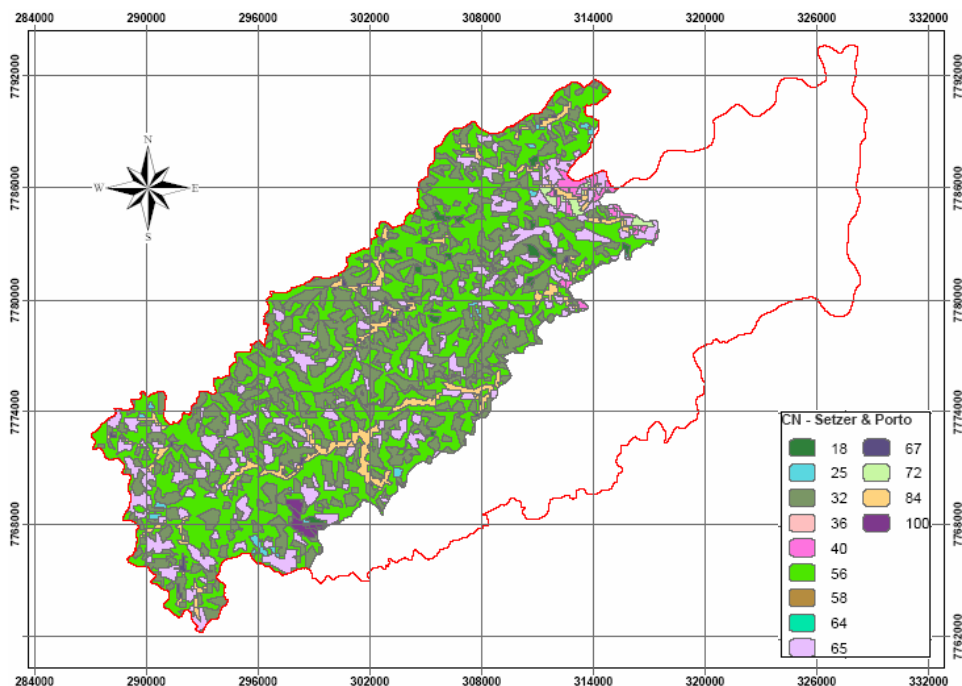


Figura 52: Mapa de CN (Setzer; Porto, 1979) para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km².

Os CN's médios foram obtidos por meio de uma composição ponderada por área, considerando os diversos complexos hidrológicos solo-cobertura do solo existentes na bacia, segundo as classificações hidrológicas dos solos de Setzer & Porto (1979)

e Tucci (1993). Para esse procedimento utilizou-se o software Arcgis 9.0, como apresentado no capítulo 3, seção 3.3, quinto passo.

As FIGURAS 53 e 54 apresentam o mapa com o valor de CN médio por sub-bacia segundo a classificação apresentada por Tucci (1993).

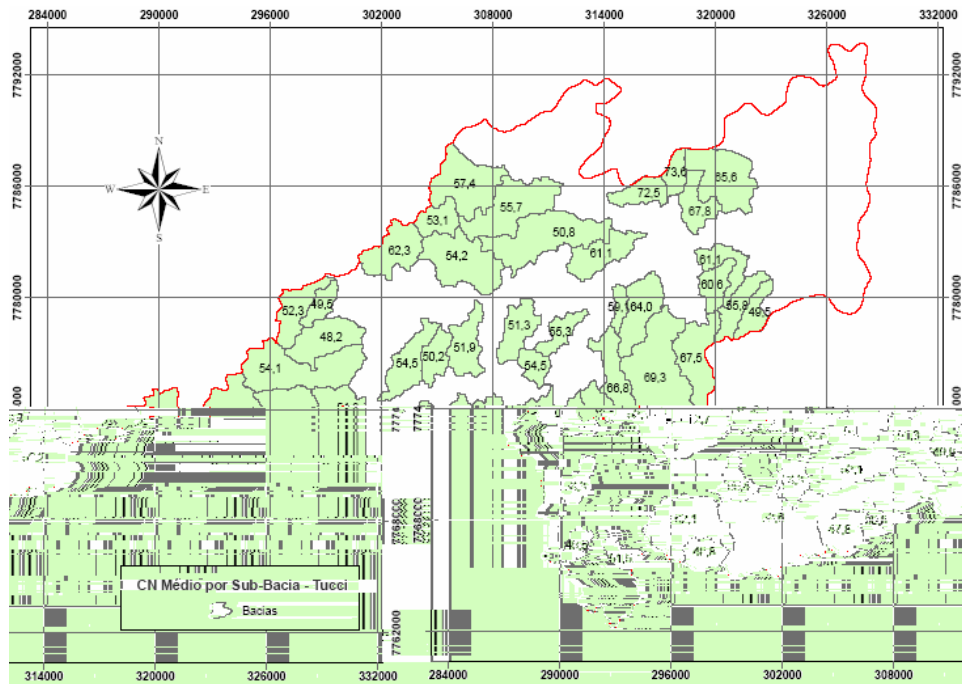


Figura 53: Mapa de CN médios (Tucci, 1993) por sub-bacia para as áreas até 30 km²

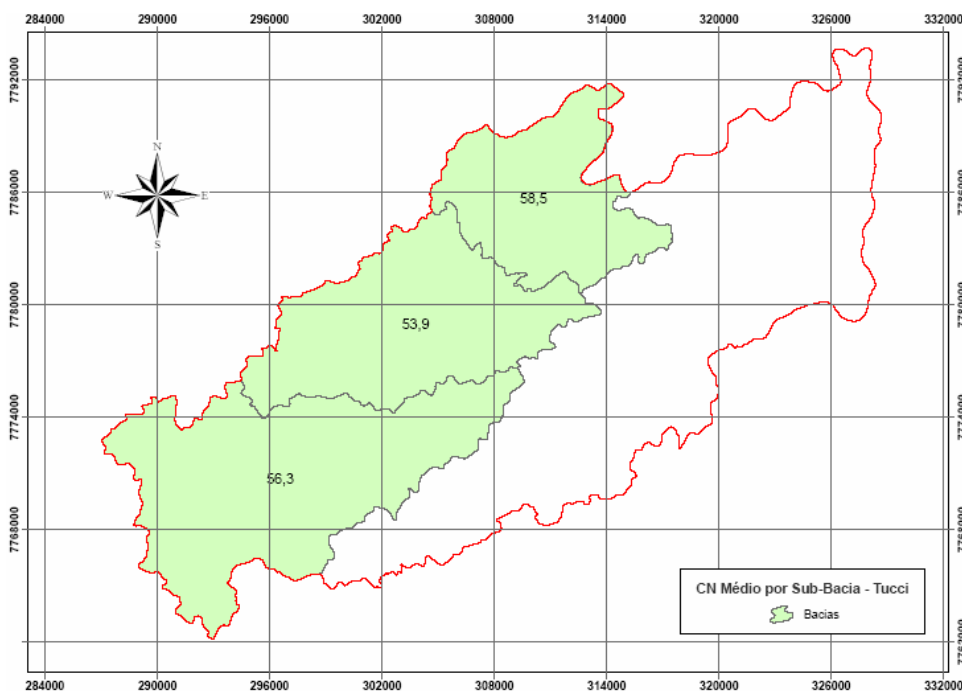


Figura 54: Mapa de CN médios (Tucci, 1993) por sub-bacia para as áreas superiores a 30 km²

As FIGURAS 55 e 56 apresentam o mapa com o valor de CN médio por sub-bacia segundo a classificação apresentada por Setzer & Porto (1979).

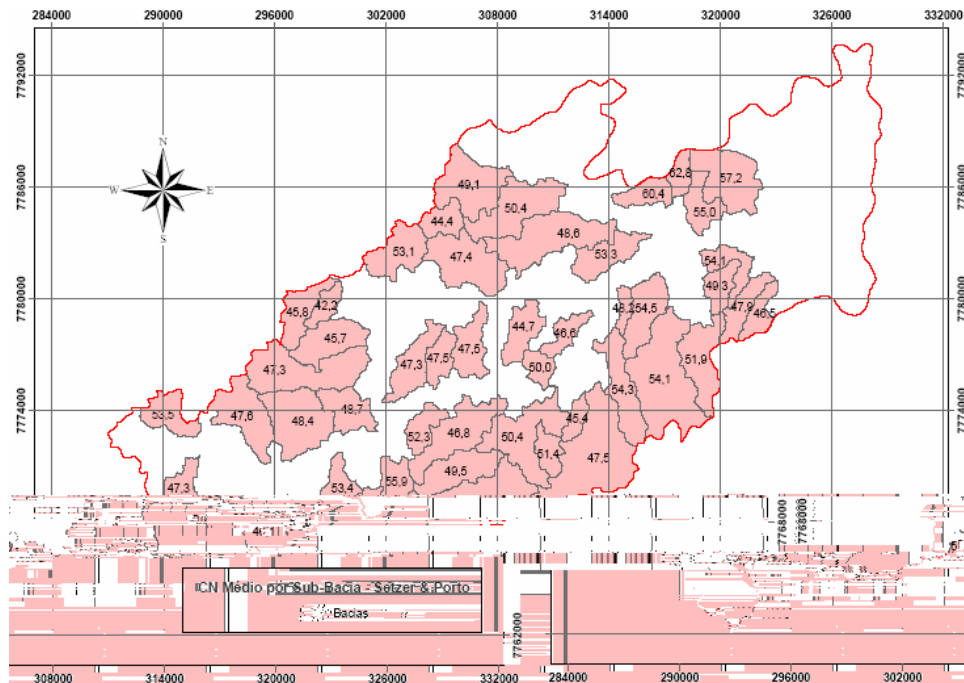


Figura 55: Mapa de CN médios (Setzer; Porto, 1979) por sub-bacia para as áreas até a 30 km²

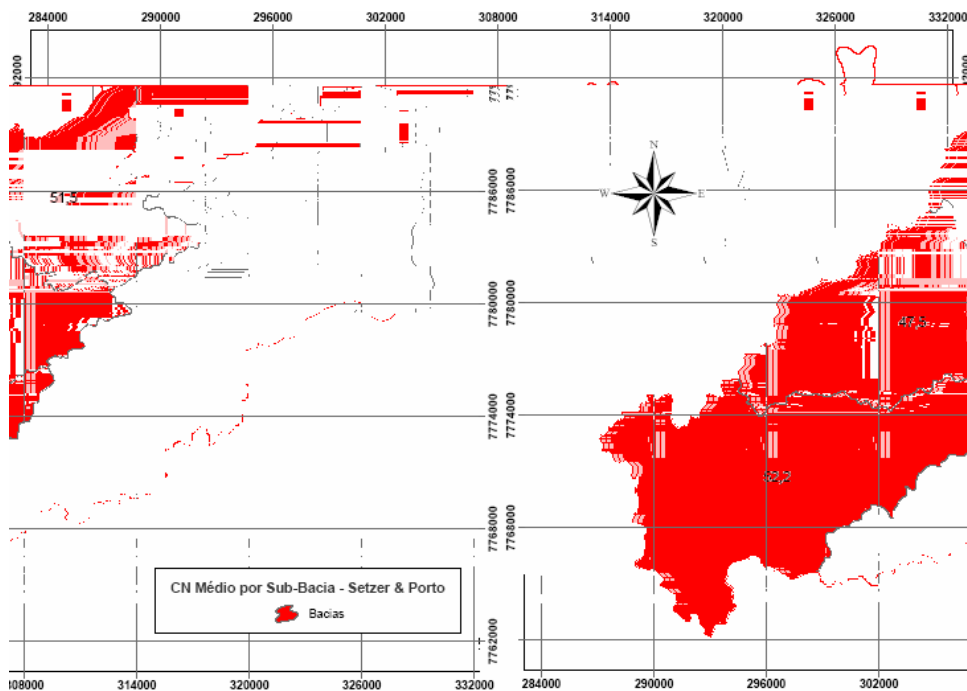


Figura 56: Mapa de CN médios (Setzer; Porto, 1979) por sub-bacia para as áreas superiores a 30 km²

As classificações propostas por Setzer & Porto (1979) e a proposta em Tucci (1993) apresentaram, em média, considerando todas as sub-bacias estudadas, diferença de 12%. Não foi obtida uma diferença significativa na determinação do CN utilizando as duas classificações propostas. A classificação apresentada por Setzer & Porto (1979), formulada para os tipos de solos brasileiros com características de regiões tropicais, apresentou valores inferiores àqueles obtidos pela classificação proposta em Tucci (1993).

4.6- Determinação e Composição do Fator C - Coeficiente de Escoamento Médio.

O mapa do fator C - uso e ocupação do solo para a sub-bacia de estudo, foi obtido a partir dos valores tabelados apresentados por Zamprogno (1999) seguindo referências do HABTEC (1997), TABELA 12.

Tabela 12: Valores do Fator C – Uso e Ocupação. Fonte: ZAMPROGNO, 1999.

| Uso do Solo | Fator C | Observações |
|--|---------|---|
| Comunidades Florestais em estado médio e avançado de regeneração | 0,0007 | Valor médio entre Floresta e Capoeira |
| Comunidades Florestais em estado inicial de regeneração | 0,001 | Adotado como Capoeira |
| Silvicultura | 0,047 | Adotado como reflorestamento |
| Pastagens | 0,04 | Pastagens |
| Agricultura e Pastagem | 0,131 | Valor médio entre culturas temporárias, como café e pastagem. |

O mapa do fator C foi obtido para as sub-bacias de estudo, atribuindo os valores da TABELA 12, para cada tipo de uso e ocupação encontrado no mapa das sub-bacias, FIGURAS 57 e 58.

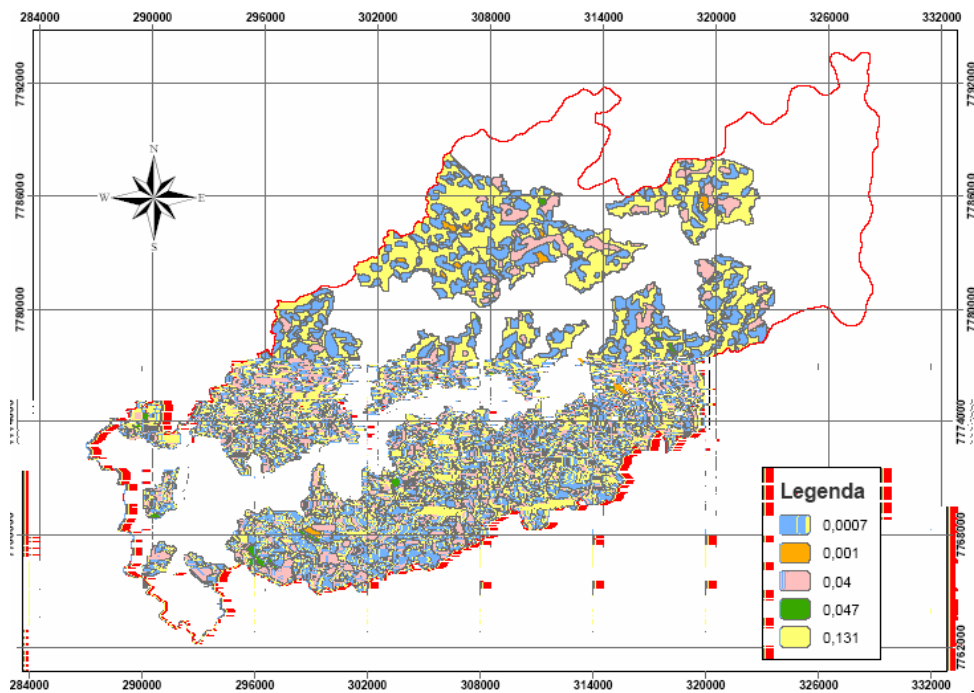


Figura 57: Mapa fator C para as sub-bacias com área até 30 km².

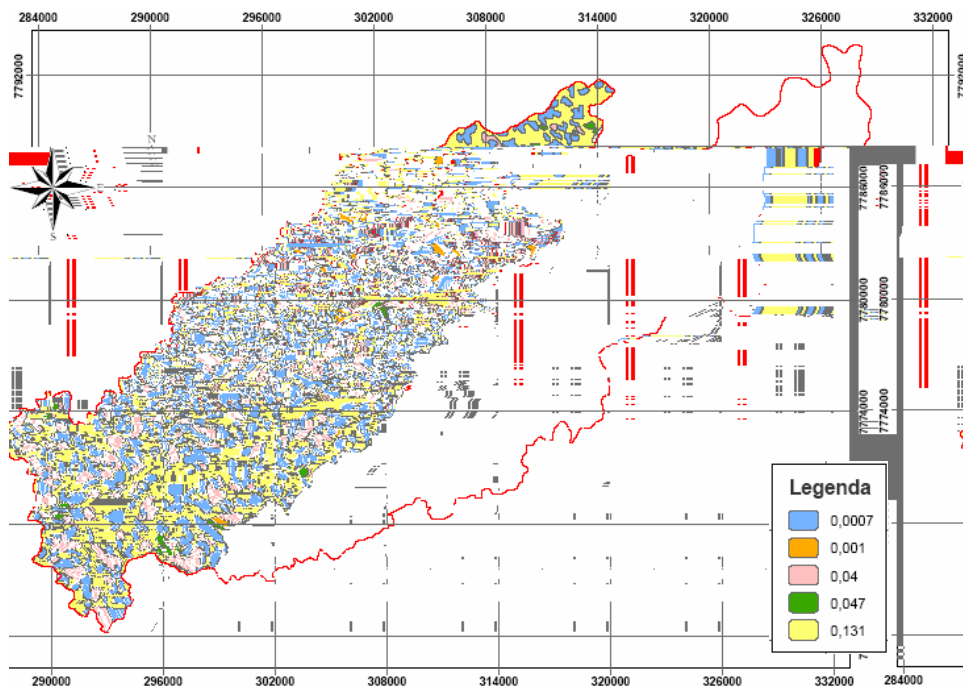


Figura 58: Mapa fator C para as sub-bacias com áreas superiores a 30 km².

O fator C médio por sub-bacia foi obtido por meio de uma composição ponderada por área, considerando os valores apresentados na TABELA 12. Para esse procedimento utilizou-se o software Arcgis 9.0, como apresentado no capítulo 3, seção 3.3, quinto passo.

As FIGURAS 59 e 60 apresentam o mapa com o valor do fator C médio por sub-bacia.

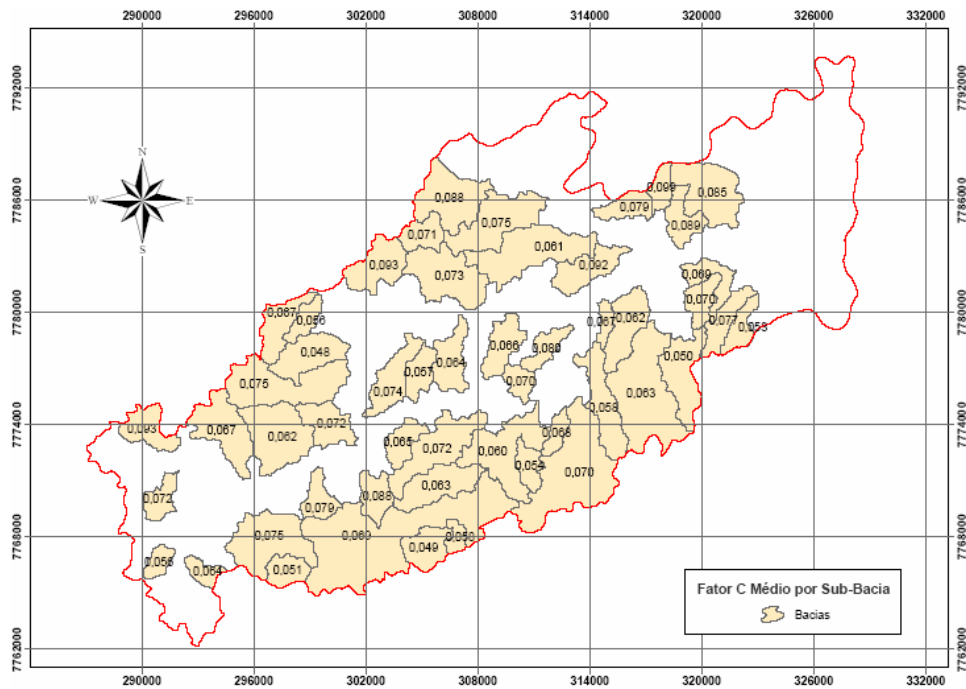


Figura 59: Mapa do fator C por sub-bacia para as áreas até 30 km²

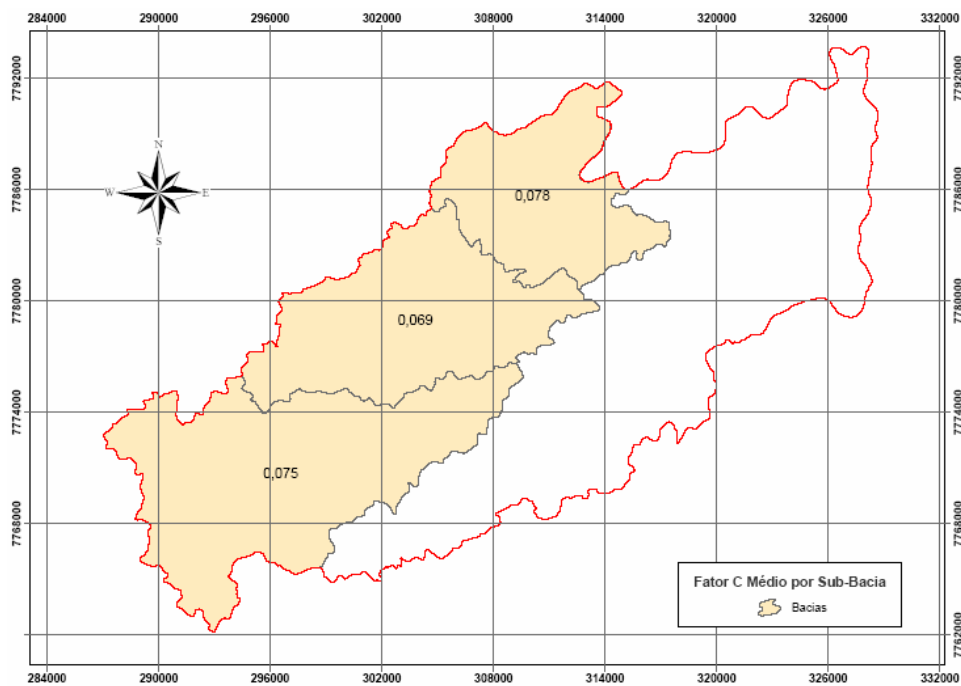


Figura 60: Mapa do fator C médio por sub-bacia para as áreas superiores a 30 km²

4.7- Tempos de Concentração

O tempo de concentração é um dos tempos de resposta da bacia hidrográfica mais utilizados nas estimativas de vazões de pico e hidrogramas de projeto

As informações utilizadas no cálculo do tempo de concentração foram:

- comprimento do talvegue principal, em km;
- declividade do talvegue principal, em m/m;
- diferença entre as cotas do talvegue principal H, em m;
- área da bacia, em km²;
- CN - número da curva;
- fator C – coeficiente de escoamento

Estas características relativas a cada sub-bacia estudada foram obtidas utilizando o sistema de informação geográfica, conforme apresentada no capítulo 3.

Nas FIGURAS 61, 62 e 63 são apresentados os tempos de concentração (min), calculados para cada uma das sub-bacias, utilizando os vários métodos propostos na literatura.

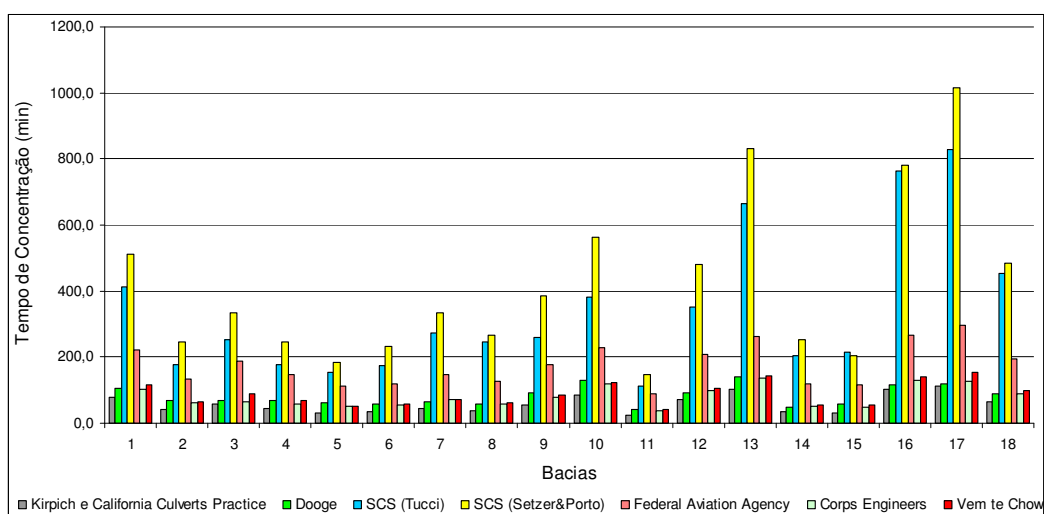


Figura 61: Tempos de concentração (min) para as sub-bacias de 1 a 18.

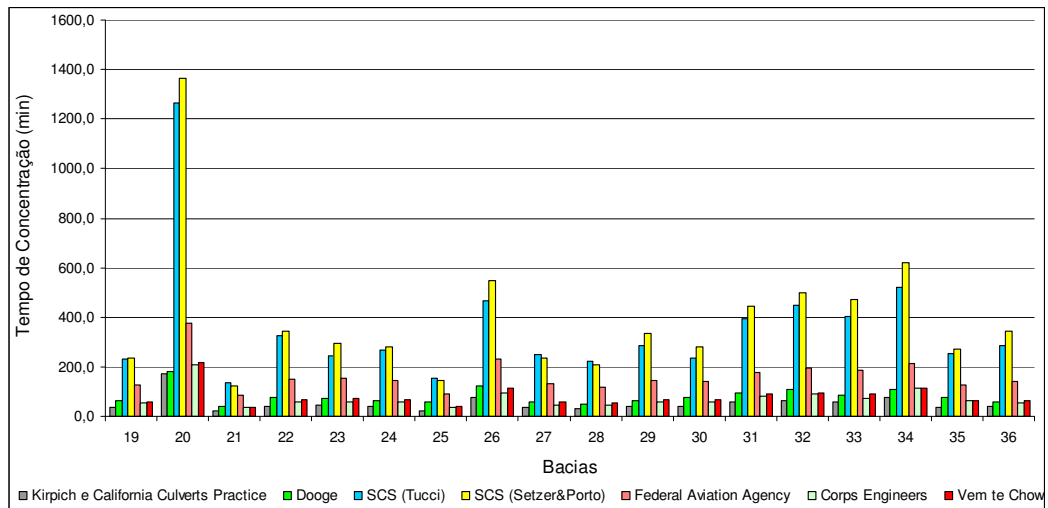


Figura 62: Tempos de concentração (min) para as sub-bacias de 19 a 36.

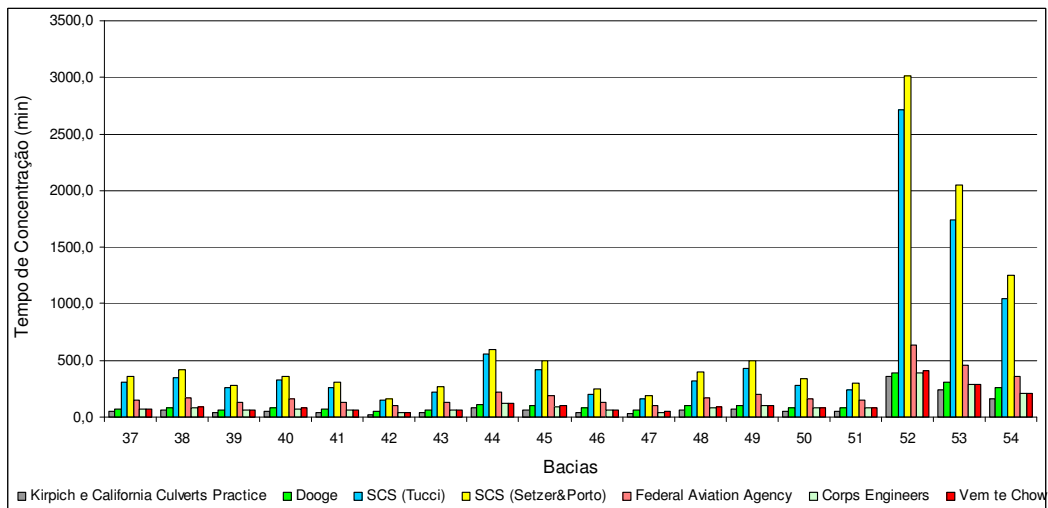


Figura 63: Tempos de concentração (min) para as sub-bacias de 37 a 54.

A TABELA 13 apresenta os valores dos tempos de concentração (min) das sub-bacias, calculados pelas fórmulas de Kirpich, California Culverts Practice, Dooge, SCS 'Lag Fórmula' para CN média ponderada segundo a classificação de Tucci (1993) e segundo a classificação de Setzer & Porto (1979), Federal Aviation Agency, Corps Enginners e Vem te Chow, apresentados no capítulo 2.

Tabela 13: Tempo de concentração (min) para as sub-bacias de estudo.

| Sub-bacias | Kirpich e Califórnia | Dooge | SCS* "Lag Fórmula" | SCS** "Lag Formula" | FAA | Corps Engineers | Vem Te Chow |
|------------|----------------------|-------|-----------------------|------------------------|-------|-----------------|-------------|
| 1 | 79,6 | 105,4 | 412,9 | 511,6 | 221,9 | 102,8 | 115,6 |
| 2 | 40,1 | 67,2 | 175,9 | 244,0 | 132,5 | 61,1 | 65,3 |
| 3 | 56,9 | 66,9 | 251,7 | 335,3 | 186,3 | 64,5 | 87,4 |
| 4 | 43,3 | 68,6 | 177,6 | 244,3 | 147,5 | 59,2 | 69,7 |
| 5 | 30,7 | 61,5 | 154,4 | 184,4 | 111,3 | 49,5 | 52,4 |
| 6 | 34,2 | 59,2 | 174,9 | 233,0 | 119,4 | 54,9 | 57,3 |
| 7 | 46,0 | 64,5 | 273,0 | 333,2 | 145,5 | 71,5 | 73,3 |
| 8 | 36,4 | 56,5 | 246,6 | 266,9 | 126,3 | 58,3 | 60,3 |
| 9 | 55,6 | 92,8 | 259,7 | 386,0 | 176,1 | 78,0 | 85,8 |
| 10 | 84,7 | 128,1 | 381,6 | 564,0 | 228,0 | 118,9 | 121,7 |
| 11 | 22,4 | 40,7 | 112,5 | 148,2 | 88,0 | 39,0 | 40,3 |
| 12 | 72,0 | 93,6 | 350,3 | 482,3 | 209,0 | 98,2 | 106,4 |
| 13 | 101,8 | 138,5 | 666,1 | 830,8 | 260,8 | 135,2 | 141,7 |
| 14 | 33,0 | 49,0 | 206,2 | 250,7 | 117,7 | 52,0 | 55,6 |
| 15 | 31,4 | 56,9 | 213,9 | 206,1 | 116,5 | 48,7 | 53,4 |
| 16 | 101,4 | 115,2 | 762,1 | 780,7 | 266,3 | 130,5 | 141,3 |
| 17 | 112,4 | 120,4 | 829,9 | 1015,5 | 296,3 | 127,7 | 153,9 |
| 18 | 64,9 | 90,0 | 453,4 | 484,7 | 192,9 | 90,1 | 97,5 |
| 19 | 35,5 | 64,4 | 231,6 | 234,2 | 127,4 | 52,2 | 59,0 |
| 20 | 171,2 | 182,0 | 1266,8 | 1363,9 | 377,4 | 210,1 | 218,4 |
| 21 | 21,1 | 42,0 | 134,8 | 121,0 | 87,7 | 34,7 | 38,4 |
| 22 | 42,8 | 75,6 | 328,4 | 343,4 | 149,4 | 59,5 | 69,0 |
| 23 | 45,4 | 74,0 | 244,8 | 295,5 | 153,8 | 58,9 | 72,5 |
| 24 | 42,3 | 65,6 | 266,0 | 279,9 | 143,2 | 59,8 | 68,4 |
| 25 | 22,7 | 56,8 | 152,1 | 146,2 | 92,2 | 37,3 | 40,7 |
| 26 | 78,9 | 123,0 | 468,4 | 548,5 | 231,2 | 93,4 | 114,7 |
| 27 | 34,8 | 57,5 | 249,9 | 233,6 | 132,6 | 45,2 | 58,1 |
| 28 | 31,0 | 51,6 | 220,8 | 209,3 | 118,7 | 44,6 | 52,7 |
| 29 | 42,4 | 64,9 | 286,2 | 333,7 | 146,6 | 57,7 | 68,5 |
| 30 | 42,2 | 76,1 | 235,7 | 279,9 | 141,7 | 58,7 | 68,1 |
| 31 | 57,9 | 93,9 | 392,3 | 443,6 | 176,0 | 83,3 | 88,7 |
| 32 | 64,7 | 106,7 | 448,0 | 499,2 | 193,9 | 88,6 | 97,3 |
| 33 | 58,5 | 87,6 | 402,1 | 469,7 | 187,0 | 73,0 | 89,4 |
| 34 | 79,0 | 109,9 | 520,6 | 618,9 | 214,2 | 112,7 | 114,9 |
| 35 | 37,0 | 75,3 | 255,2 | 272,1 | 126,5 | 61,6 | 61,2 |
| 36 | 39,0 | 58,3 | 284,2 | 344,0 | 139,1 | 55,0 | 63,9 |
| 37 | 46,7 | 72,1 | 305,1 | 360,1 | 149,1 | 71,6 | 74,2 |
| 38 | 54,9 | 77,1 | 344,9 | 413,6 | 165,9 | 82,3 | 84,9 |
| 39 | 38,0 | 61,1 | 258,6 | 276,9 | 131,3 | 58,7 | 62,5 |
| 40 | 47,5 | 76,5 | 323,5 | 362,1 | 155,1 | 68,5 | 75,2 |
| 41 | 39,0 | 69,4 | 258,5 | 306,5 | 132,5 | 60,1 | 63,8 |
| 42 | 24,5 | 51,7 | 144,8 | 162,4 | 96,4 | 39,0 | 43,3 |
| 43 | 36,2 | 57,3 | 215,9 | 269,3 | 124,4 | 55,9 | 60,0 |
| 44 | 79,1 | 108,0 | 560,9 | 593,4 | 215,3 | 114,9 | 114,9 |
| 45 | 64,5 | 100,4 | 417,1 | 495,9 | 186,8 | 93,3 | 97,0 |
| 46 | 38,9 | 79,6 | 194,7 | 246,0 | 128,7 | 60,1 | 63,7 |
| 47 | 26,0 | 57,4 | 155,2 | 193,9 | 97,8 | 43,8 | 45,6 |
| 48 | 54,8 | 96,1 | 321,6 | 396,9 | 164,1 | 81,6 | 84,8 |
| 49 | 68,7 | 101,1 | 431,8 | 494,0 | 195,3 | 98,3 | 102,2 |
| 50 | 52,4 | 76,5 | 278,4 | 338,7 | 158,3 | 78,4 | 81,6 |
| 51 | 48,8 | 79,1 | 236,3 | 300,2 | 153,6 | 75,3 | 76,9 |
| 52 | 358,4 | 390,0 | 2714,4 | 3016,6 | 637,3 | 386,5 | 403,6 |
| 53 | 235,2 | 305,4 | 1740,9 | 2046,6 | 461,8 | 290,2 | 284,4 |
| 54 | 163,6 | 259,8 | 1046,3 | 1248,2 | 357,2 | 208,8 | 210,3 |

*CN Médio Método Tucci(1993) **CN Médio Método Setzer&Porto(1979)

Observando-se os valores obtidos, utilizando os vários métodos de estimativa do tempo de concentração para as sub-bacias estudadas, pode-se verificar grandes variações, para uma mesma sub-bacia.

Segundo Porto (1995) a fórmula do SCS “lag fórmula” superestima o valor do tempo de concentração, em comparação com as expressões de Kirpich e Dooge. Resultado semelhante foi obtido no presente estudo, no qual a equação do método SCS “lag fórmula” superestimou os tempos de concentração para todas as sub-bacias estudadas, caso comparada com os resultados obtidos por outros métodos.

De acordo com Silveira (2005), as fórmulas do tempo de concentração guardam na sua maioria um caráter altamente empírico e são essencialmente equações de regressão, o que justificaria a discrepância dos valores encontrados.

4.8- Ajuste probabilístico das chuvas máximas anuais.

Como proposto na metodologia, foi feita análise da série de precipitações para ajuste da melhor distribuição estatística e determinação das precipitações totais para vários períodos de retorno.

A TABELA 14 apresenta os resultados dos ajustes de distribuições probabilísticas das séries de chuvas máximas anuais e os seus respectivos erros padrão (EP).

Tabela 14: Chuvas máximas estimadas para distribuições ajustadas e erros padrão de estimativas.

| Série Histórica | Distribuições Probabilísticas | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|----------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Normal Truncada EP=4,6 | LOG2 EP=3,3 | LOG3 EP=2,7 | Gumbel EP= 3,3 | Pearson III EP=2,7 | Log Pearson III EP= 2,9 |
| 131 | 118 | 123 | 130 | 125 | 131 | 129 |
| 122 | 111 | 113 | 117 | 113 | 117 | 116 |
| 105 | 106 | 107 | 109 | 107 | 110 | 108 |
| 103 | 103 | 102 | 103 | 102 | 104 | 103 |
| 102 | 100 | 99 | 99 | 98 | 99 | 98 |
| 102 | 97 | 96 | 95 | 95 | 95 | 95 |
| 98 | 95 | 93 | 92 | 92 | 92 | 92 |
| 92 | 93 | 91 | 89 | 89 | 89 | 89 |
| 89 | 91 | 88 | 87 | 87 | 87 | 87 |
| 89 | 89 | 86 | 85 | 85 | 84 | 84 |
| 85 | 87 | 84 | 83 | 83 | 82 | 82 |
| 82 | 85 | 82 | 81 | 81 | 80 | 81 |
| 82 | 83 | 81 | 79 | 80 | 78 | 79 |
| 78 | 82 | 79 | 77 | 78 | 77 | 77 |
| 77 | 80 | 77 | 76 | 76 | 75 | 76 |
| 76 | 78 | 76 | 74 | 75 | 73 | 74 |
| 72 | 76 | 74 | 73 | 73 | 72 | 73 |
| 69 | 75 | 73 | 71 | 72 | 70 | 71 |
| 67 | 73 | 71 | 70 | 70 | 69 | 70 |
| 66 | 71 | 70 | 68 | 69 | 67 | 68 |
| 65 | 69 | 68 | 67 | 67 | 66 | 67 |
| 65 | 67 | 66 | 65 | 66 | 64 | 65 |
| 63 | 65 | 64 | 64 | 64 | 63 | 64 |
| 61 | 62 | 63 | 62 | 63 | 61 | 62 |
| 60 | 60 | 61 | 61 | 61 | 60 | 61 |
| 60 | 57 | 58 | 59 | 59 | 58 | 59 |
| 53 | 53 | 56 | 57 | 57 | 57 | 57 |
| 52 | 49 | 53 | 55 | 54 | 55 | 55 |
| 51 | 42 | 49 | 52 | 51 | 52 | 52 |

Pela análise dos resultados os erros padrão relativos as distribuições Pearson III e LOG 3 foram semelhantes: EP = 2,7. Entretanto, o melhor ajuste ocorreu para a distribuição Pearson III, método dos momentos, que obteve menores valores de erros padrão, em relação às estimativas das chuvas máximas para os diversos períodos de retorno, conforme mostrado na TABELA 15.

A TABELA 15 apresenta os valores de chuvas máximas para os períodos de retorno de 2, 5, 10 , 20, 50 e 100 anos, obtidos por meio dos ajustes das distribuições consideradas.

Tabela 15: Valores precipitação de projeto para vários períodos de retorno

| Distribuição | Período de Retorno (T) | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| LOG2 | | | | | | |
| <i>MOMENTOS</i> | 77,3 | 95,8 | 107,2 | 117,6 | 130,5 | 139,8 |
| Erro Padrão | (3,7) | (5,5) | (7,1) | (8,6) | (10,6) | (12,1) |
| <i>MÁXIMA VEROSSIMELHANÇA</i> | 77,3 | 95,8 | 107,2 | 117,6 | 130,5 | 139,9 |
| Erro Padrão | (3,7) | (5,3) | (6,8) | (8,5) | (10,9) | (12,7) |
| LOG3 | | | | | | |
| <i>MOMENTOS</i> | 77,7 | 96,1 | 107,2 | 117,1 | 129,3 | 139,8 |
| Erro Padrão | (4,2) | (5,2) | (6,8) | (9,2) | (13,4) | (17,1) |
| <i>MÁXIMA VEROSSIMELHANÇA</i> | 75,7 | 95,3 | 108,9 | 122,4 | 140,3 | 154,3 |
| Erro Padrão | (3,8) | (6,1) | (8,8) | (12,4) | (18,5) | (24) |
| GUMBEL | | | | | | |
| <i>MOMENTOS</i> | 76,7 | 97,9 | 111,9 | 125,3 | 142,7 | 155,7 |
| Erro Padrão | (3,5) | (6,5) | (8,9) | (11,4) | (14,7) | (17,2) |
| <i>MÁXIMA VEROSSIMELHANÇA</i> | 76,3 | 94,6 | 106,7 | 118,3 | 133,3 | 144,6 |
| Erro Padrão | (3,5) | (5,4) | (6,9) | (8,5) | (10,5) | (12,1) |
| PEARSON III | | | | | | |
| <i>MOMENTOS</i> | 76,8 | 95,7 | 107,5 | 118,3 | 131,7 | 141,3 |
| Erro Padrão | (2,1) | (4) | (6,3) | (9,4) | (14,3) | (18,4) |
| <i>MÁXIMA VEROSSIMELHANÇA</i> | 74,9 | 95,5 | 109,5 | 123,1 | 140,5 | 153,5 |
| Erro Padrão | (5) | (10,2) | (14) | (17,8) | (22,9) | (26,7) |
| LOGPEARSON III | | | | | | |
| <i>MOMENTOS</i> | 76,5 | 95,3 | 107,7 | 119,5 | 135 | 146,8 |
| Erro Padrão | (3,9) | (5,6) | (7,8) | (11,1) | (16,8) | (22,1) |
| <i>MÁXIMA VEROSSIMELHANÇA</i> | 75,6 | 94,7 | 108,1 | 121,4 | 139,7 | 154,1 |
| Erro Padrão | (3,7) | (5,9) | (8,6) | (12,4) | (19) | (25,5) |

A FIGURA 64 mostra comparação gráfica entre as séries de precipitações históricas e as obtidas com as distribuições ajustadas.

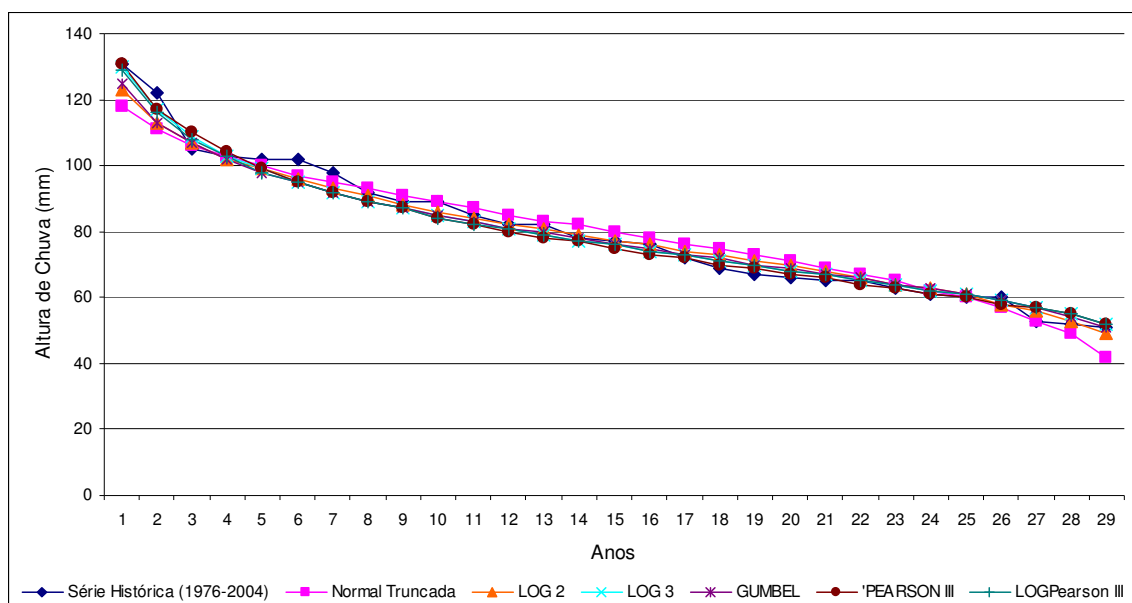


Figura 64: Chuvas máximas estimadas para as distribuições analisadas.

A FIGURA 65 mostra comparação gráfica entre as distribuições ajustadas, para os diferentes períodos de retorno.

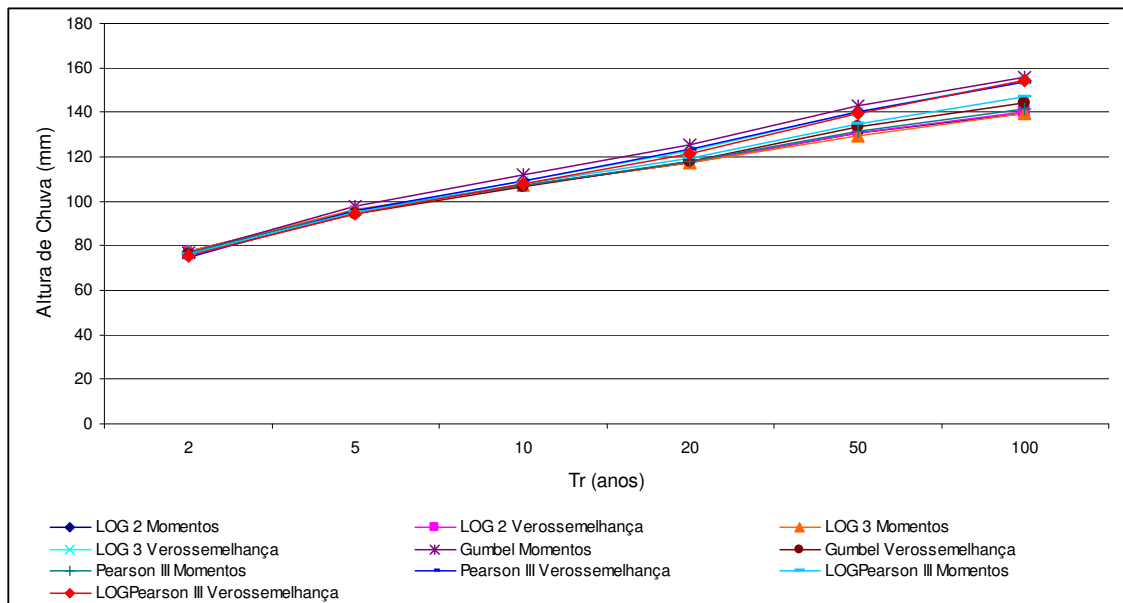


Figura 65: Chuvas máximas obtidas para cada período de retorno para as distribuições.

Utilizou-se o fator de conversão de 1,14 para a transformação da chuva de 1 dia em chuva de 24 horas.

As TABELAS 16 e 17 apresentam as alturas pluviométricas (mm) e as intensidades da chuva (mm/min), obtidas pela aplicação da metodologia proposta por Cetesb (1979), para a determinação das chuvas de durações menores que 24 horas.

Tabela 16: Alturas Pluviométricas para diferentes tempos de duração da chuva, PEARSON III, para a Estação de Santa Teresa.

| Duração | P(mm) - Altura Pluviométrica | | | | | |
|---------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | Período de Retorno (anos) | | | | | |
| | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 5 min | 9,25 | 11,53 | 12,95 | 14,25 | 15,87 | 17,02 |
| 10 min | 14,69 | 18,31 | 20,57 | 22,63 | 25,20 | 27,03 |
| 15 min | 19,05 | 23,74 | 26,66 | 29,34 | 32,66 | 35,04 |
| 20 min | 22,04 | 27,47 | 30,85 | 33,95 | 37,80 | 40,55 |
| 25 min | 24,76 | 30,86 | 34,66 | 38,14 | 42,46 | 45,56 |
| 30 min | 27,21 | 33,91 | 38,09 | 41,92 | 46,66 | 50,06 |
| 1h | 36,77 | 45,82 | 51,47 | 56,64 | 63,06 | 67,65 |
| 6h | 63,04 | 78,55 | 88,24 | 97,10 | 108,10 | 115,98 |
| 8h | 68,29 | 85,10 | 95,59 | 105,19 | 117,11 | 125,64 |
| 10h | 71,79 | 89,46 | 100,49 | 110,59 | 123,11 | 132,09 |
| 12h | 74,42 | 92,73 | 104,17 | 114,63 | 127,62 | 136,92 |
| 24h | 87,55 | 109,10 | 122,55 | 134,86 | 150,14 | 161,082 |

Com os valores tabelados acima foi possível plotar um gráfico de Altura Duração-Frequência, apresentado na FIGURA 66, onde os pontos obtidos foram unidos por retas, permitindo assim avaliar alturas de chuvas de outras durações para a região de estudo.

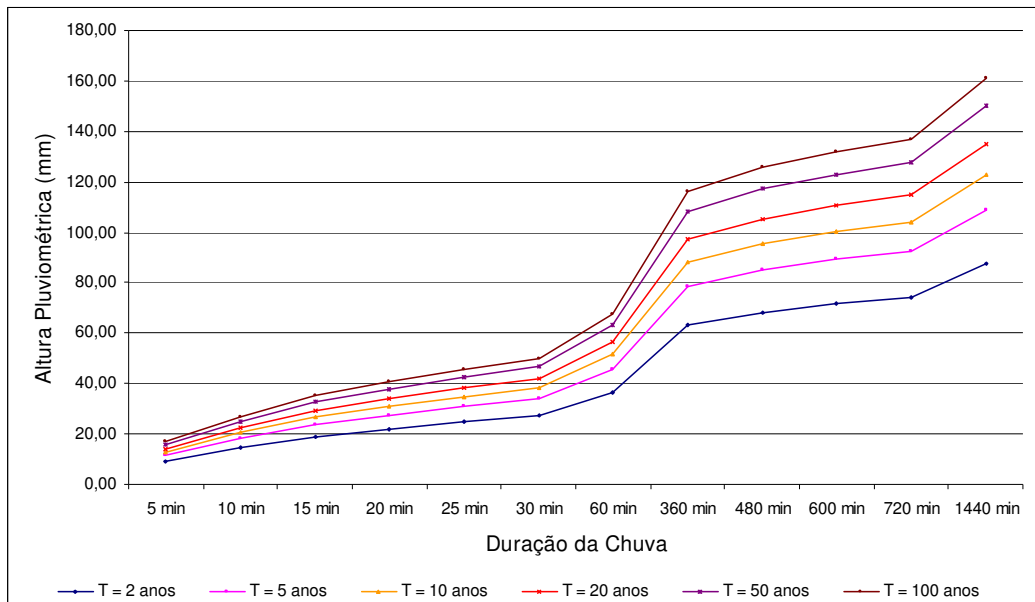


Figura 66: Altura Pluviométrica (mm) para cada duração da chuva e período de Retorno, PEARSON III para a estação de Santa Teresa.

Tabela 17: Intensidades de chuva (mm/min) para diferentes tempos de duração de chuva.

| Duração | I (mm/min) - Intensidade da Chuva | | | | | |
|---------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|
| | Período de Retorno (anos) | | | | | |
| | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 5 min | 1,85 | 2,31 | 2,59 | 2,85 | 3,17 | 3,40 |
| 10 min | 1,47 | 1,83 | 2,06 | 2,26 | 2,52 | 2,70 |
| 15 min | 1,27 | 1,58 | 1,78 | 1,96 | 2,18 | 2,34 |
| 20 min | 1,10 | 1,37 | 1,54 | 1,70 | 1,89 | 2,03 |
| 25 min | 0,99 | 1,23 | 1,39 | 1,53 | 1,70 | 1,82 |
| 30 min | 0,91 | 1,13 | 1,27 | 1,40 | 1,56 | 1,67 |
| 1h | 0,61 | 0,76 | 0,86 | 0,94 | 1,05 | 1,13 |
| 6h | 0,18 | 0,22 | 0,25 | 0,27 | 0,30 | 0,32 |
| 8h | 0,14 | 0,18 | 0,20 | 0,22 | 0,24 | 0,26 |
| 10h | 0,12 | 0,15 | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,22 |
| 12h | 0,10 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,19 |
| 24h | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | 0,11 |

Com os valores tabelados acima foi possível plotar um gráfico de Intensidade-Duração-Frequência apresentado na FIGURA 67 onde os pontos obtidos foram unidos por retas, permitindo assim avaliar intensidades de chuvas de outras durações para a região de estudo.

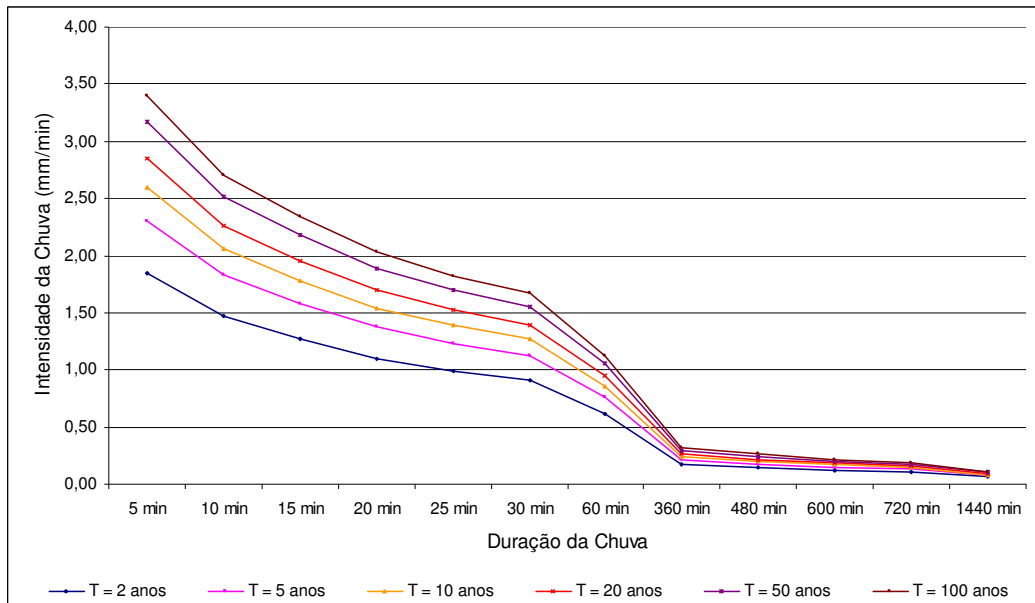


Figura 67: Intensidade de chuva (mm/min) para cada duração da chuva e período de Retorno, PEARSON III.

4.9 – Distribuição Temporal da Chuva de Projeto

Os resultados do ajuste da distribuição de PEARSON III foram utilizados para a determinação das distribuições temporais da chuva de projeto. O cálculo da distribuição temporal da precipitação de projeto utilizou o método dos blocos alternados.

Para o cálculo foram considerados:

- Duração total da precipitação de 3 horas, período superior ao tempo de concentração da maioria das sub-bacias estudadas, recomendado por Cetesb (1979).
- Intervalo de 10 min, valor recomendado para o tempo unitário da chuva, por Cetesb (1979), para pequenas bacias.
- Período de retorno de 10 anos.

No presente estudo foram obtidos cinco distribuições de precipitação de projeto. Para as sub-bacias com áreas até 25 km², onde as alturas pluviométricas pontuais podem ser utilizadas no cálculo das alturas pluviométricas sem nenhuma redução, e as demais foram obtidas para as sub-bacias 20, 52, 53 e 54 onde foi aplicado o fator

de redução de área, conforme FIGURA 1, de 0,96; 0,91; 0,92 e 0,93 respectivamente.

A FIGURA 68 e a TABELA 19 mostram, como exemplo, a distribuição temporal da precipitação de projeto obtido através do método dos blocos alternados para as sub-bacias com áreas até 25 km².

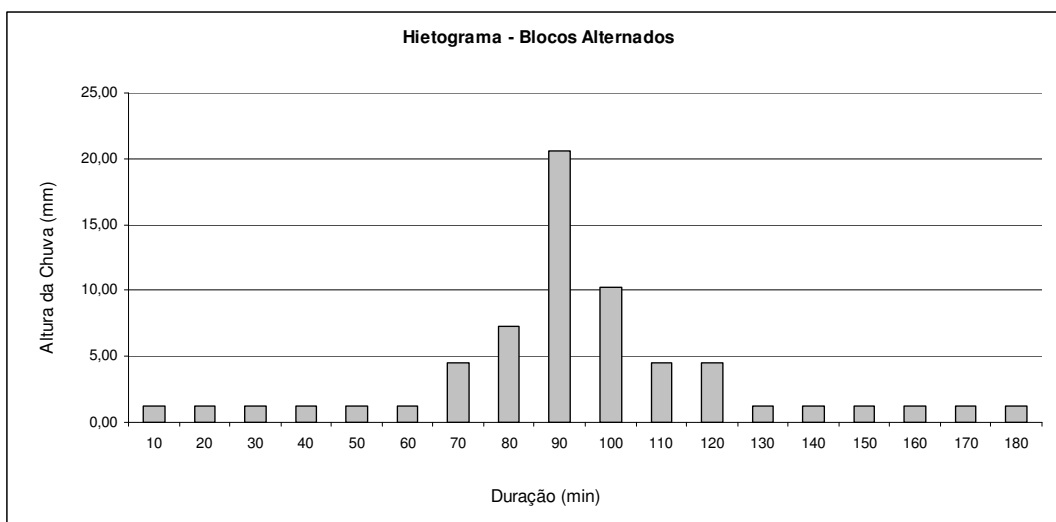


Figura 68: Representação gráfica do hietograma de projeto para sub-bacias com área até 25 km² (Tr= 10 anos).

Tabela 18: Hietograma de projeto determinado para sub-bacias com área até 25 km².

| Duração (min) | Intensidade da chuva (mm/min) | Altura de chuva acumulada (mm) | Incremento da altura em (mm) | Intervalo (min) | Hietograma de projeto (mm) |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| 10 | 2,06 | 20,57 | 20,57 | 0-10 | 1,23 |
| 20 | 1,54 | 30,85 | 10,28 | 10--20 | 1,23 |
| 30 | 1,27 | 38,09 | 7,24 | 20-30 | 1,23 |
| 40 | 1,06 | 42,55 | 4,46 | 30-40 | 1,23 |
| 50 | 0,94 | 47,01 | 4,46 | 40-50 | 1,23 |
| 60 | 0,86 | 51,47 | 4,46 | 50-60 | 1,23 |
| 70 | 0,75 | 52,70 | 1,23 | 70-70 | 4,46 |
| 80 | 0,67 | 53,92 | 1,23 | 70-80 | 7,24 |
| 90 | 0,61 | 55,15 | 1,23 | 80-90 | 20,57 |
| 100 | 0,56 | 56,37 | 1,23 | 90-100 | 10,28 |
| 110 | 0,52 | 57,60 | 1,23 | 100-110 | 4,46 |
| 120 | 0,49 | 58,82 | 1,23 | 110-120 | 4,46 |
| 130 | 0,46 | 60,05 | 1,23 | 120-130 | 1,23 |
| 140 | 0,44 | 61,28 | 1,23 | 130-140 | 1,23 |
| 150 | 0,42 | 62,50 | 1,23 | 140-150 | 1,23 |
| 160 | 0,40 | 63,73 | 1,23 | 150-160 | 1,23 |
| 170 | 0,38 | 64,95 | 1,23 | 160-170 | 1,23 |
| 180 | 0,37 | 66,18 | 1,23 | 170-180 | 1,23 |

Utilizando a mesma metodologia de determinação da precipitação de projeto para as sub-bacias com área até 25 km², foram obtidos as precipitações de projeto para as sub-bacias com área 30,50 km², 150,70 km², 109,9 km² e 78,99 km² no valor de 63,53 mm, 60,88 mm, 59,89 mm e 61,21 mm respectivamente.

4.10 – Precipitação Excedente

A precipitação excedente foi calculada de acordo com a seqüência de passos apresentada na metodologia, foi considerado para o cálculo:

- Duração total da precipitação de 3 horas, com intervalo de 10 min, recomendado por Cetesb (1979);
- Período de Retorno de 10 anos;
- Adotou-se o valor de CN média ponderada de Tucci (1993) para o cálculo da capacidade máxima de armazenamento (S);
- Para a determinação da precipitação efetiva foi utilizado o método do Soil Conservation Service (SCS), apresentado no capítulo 2.

A TABELA 19 e a FIGURA 69 mostram os valores das precipitações excedentes calculados para a sub-bacia 1.

Tabela 19: Hietograma de precipitação excedente para a sub-bacia 1 (Tr= 10 anos).

| Duração (min) | Hietograma de projeto (mm) | Precipitação Acumulada (mm) | Precipitação acumulada excedente (mm) | Precipitação Efetiva (mm) | Infiltração (mm) |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------|------------------|
| 0 | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| 10 | 1,23 | 1,23 | 0 | 0 | 1,23 |
| 20 | 1,23 | 2,46 | 0 | 0 | 1,23 |
| 30 | 1,23 | 3,69 | 0 | 0 | 1,23 |
| 40 | 1,23 | 4,92 | 0 | 0 | 1,23 |
| 50 | 1,23 | 6,15 | 0 | 0 | 1,23 |
| 60 | 1,23 | 7,38 | 0 | 0 | 1,23 |
| 70 | 4,46 | 11,84 | 0 | 0 | 4,46 |
| 80 | 7,24 | 19,08 | 0 | 0 | 7,24 |
| 90 | 20,57 | 39,65 | 1,15 | 1,15 | 19,42 |
| 100 | 10,28 | 49,93 | 3,45 | 2,30 | 7,98 |
| 110 | 4,46 | 54,39 | 4,76 | 1,31 | 3,15 |
| 120 | 4,46 | 58,85 | 6,25 | 1,48 | 2,98 |
| 130 | 1,23 | 60,08 | 6,68 | 0,44 | 0,79 |
| 140 | 1,23 | 61,31 | 7,13 | 0,45 | 0,78 |
| 150 | 1,23 | 62,54 | 7,59 | 0,46 | 0,77 |
| 160 | 1,23 | 63,77 | 8,06 | 0,47 | 0,76 |
| 170 | 1,23 | 65,00 | 8,55 | 0,48 | 0,75 |
| 180 | 1,23 | 66,23 | 9,04 | 0,49 | 0,74 |

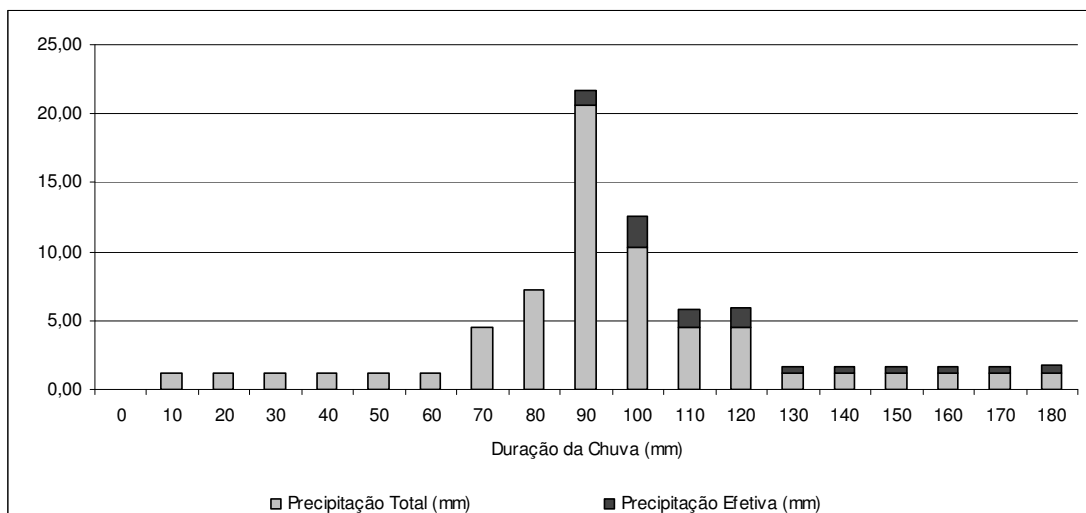


Figura 69: Hietograma de Precipitação excedente para a sub-bacia 1 ($T_r = 10$ anos)

A mesma metodologia de cálculo foi utilizada para a determinação da precipitação efetiva para todas as sub-bacias de estudo.

A TABELA 20 apresenta os valores da precipitação efetiva para as sub-bacias da área de estudo.

Tabela 20: Precipitação efetiva para as sub-bacias

| Sub-bacia | CN | Precipitação Efetiva (mm) | Sub-bacia | CN | Precipitação Efetiva (mm) |
|-----------|------|---------------------------|-----------|------|---------------------------|
| 1 | 65,6 | 9,04 | 29 | 53,3 | 1,95 |
| 2 | 67,8 | 10,85 | 30 | 60,3 | 5,38 |
| 3 | 73,6 | 16,53 | 31 | 52,4 | 1,62 |
| 4 | 72,5 | 15,41 | 32 | 52,7 | 1,71 |
| 5 | 61,1 | 5,86 | 33 | 54,8 | 2,53 |
| 6 | 60,6 | 5,56 | 34 | 54,1 | 2,25 |
| 7 | 55,8 | 2,97 | 35 | 48,2 | 0,48 |
| 8 | 49,5 | 0,77 | 36 | 49,5 | 0,77 |
| 9 | 67,5 | 10,61 | 37 | 52,3 | 1,56 |
| 10 | 69,3 | 12,25 | 38 | 54,5 | 2,39 |
| 11 | 59,1 | 4,64 | 39 | 50,2 | 0,94 |
| 12 | 66,8 | 10,07 | 40 | 51,9 | 1,44 |
| 13 | 56,2 | 3,15 | 41 | 51,3 | 1,25 |
| 14 | 53,0 | 1,82 | 42 | 54,5 | 2,40 |
| 15 | 49,9 | 0,86 | 43 | 55,3 | 2,75 |
| 16 | 51,3 | 1,26 | 44 | 50,8 | 1,10 |
| 17 | 54,8 | 2,52 | 45 | 54,2 | 2,30 |
| 18 | 52,1 | 1,51 | 46 | 62,3 | 6,69 |
| 19 | 52,8 | 1,74 | 47 | 53,1 | 1,85 |
| 21 | 50,8 | 1,10 | 48 | 57,4 | 3,74 |
| 22 | 47,8 | 0,41 | 49 | 55,7 | 2,93 |
| 23 | 63,3 | 7,33 | 50 | 61,1 | 5,87 |
| 24 | 55,4 | 2,80 | 51 | 64,0 | 7,83 |
| 25 | 48,8 | 0,60 | 52 | 56,3 | 2,11 |
| 26 | 62,1 | 6,51 | 53 | 53,9 | 1,16 |
| 27 | 51,5 | 1,32 | 54 | 58,5 | 3,09 |
| 28 | 49,5 | 0,77 | | | |

4.11 – Estimativa de Vazões de Pico

Com o objetivo de mostrar que existe uma grande variação nos resultados de vazão de projeto de acordo com o modelo de escoamento superficial utilizado no cálculo, foi feita a comparação entre os métodos R

Tabela 21: Resultados obtidos para vazão de pico, período de retorno de 10 anos.

| Sub- bacia | Método Racional | | Hidrograma Unitário | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|----------|------|
| | | | EXCEL | | ABC4 | | ABC6 | | ABC4 | | ABC6 | |
| | | | Triangular SCS | Triangular SCS | Triangular SCS | Triangular SCS | Santa Bárbara | Santa Bárbara | Santa Bárbara | Santa Bárbara | | |
| Q (m ³ /s) | Hora (h) | Q (m ³ /s) | Hora (h) | Q (m ³ /s) | Hora (h) | Q (m ³ /s) | Hora (h) | Q (m ³ /s) | Hora (h) | Q (m ³ /s) | Hora (h) | |
| 1 | 8,48 | 1,33 | 13,44 | 2,67 | 13,03 | 3,34 | 12,51 | 2,67 | 9,24 | 2,17 | 8,85 | 2,17 |
| 2 | 6,54 | 0,67 | 11,54 | 2,17 | 10,44 | 2,00 | 10,66 | 2,17 | 7,83 | 2,17 | 7,68 | 2,17 |
| 3 | 3,14 | 0,95 | 7,63 | 2,34 | 7,47 | 2,17 | 7,25 | 2,34 | 5,30 | 2,17 | 5,14 | 2,17 |
| 4 | 4,56 | 0,72 | 13,27 | 2,17 | 12,85 | 2,17 | 12,40 | 2,17 | 9,33 | 2,00 | 8,99 | 2,00 |
| 5 | 5,37 | 0,51 | 5,99 | 2,00 | 5,45 | 2,17 | 5,53 | 2,17 | 4,10 | 2,17 | 4,18 | 2,17 |
| 6 | 4,58 | 0,57 | 4,85 | 2,17 | 4,82 | 2,17 | 4,62 | 2,17 | 3,56 | 2,17 | 3,42 | 2,17 |
| 7 | 4,96 | 0,77 | 2,54 | 2,34 | 2,40 | 2,34 | 2,32 | 2,34 | 1,72 | 2,17 | 1,66 | 2,17 |
| 8 | 3,00 | 0,61 | 0,53 | 2,51 | 0,56 | 3,17 | 0,50 | 3,17 | 0,50 | 3,01 | 0,44 | 3,01 |
| 9 | 5,65 | 0,93 | 17,25 | 2,34 | 17,02 | 2,34 | 16,24 | 2,34 | 12,14 | 2,17 | 11,60 | 2,17 |
| 10 | 11,49 | 1,41 | 34,04 | 2,67 | 31,64 | 2,67 | 32,45 | 2,67 | 22,18 | 2,17 | 22,84 | 2,17 |
| 11 | 2,63 | 0,37 | 2,23 | 2,00 | 2,02 | 2,00 | 2,01 | 2,00 | 1,60 | 2,00 | 1,59 | 2,00 |
| 12 | 5,21 | 1,20 | 13,40 | 2,51 | 12,73 | 2,51 | 12,93 | 2,51 | 8,99 | 2,17 | 9,13 | 2,17 |
| 13 | 11,90 | 1,70 | 8,14 | 3,17 | 7,68 | 3,17 | 7,50 | 3,17 | 5,68 | 3,01 | 5,54 | 3,01 |
| 14 | 2,79 | 0,55 | 0,91 | 2,34 | 0,79 | 2,34 | 0,80 | 2,34 | 0,59 | 2,17 | 0,60 | 2,17 |
| 15 | 3,15 | 0,52 | 0,59 | 2,51 | 0,53 | 3,01 | 0,54 | 3,01 | 0,48 | 3,01 | 0,49 | 3,01 |
| 16 | 6,05 | 1,69 | 1,96 | 3,34 | 1,93 | 3,51 | 1,79 | 3,51 | 1,46 | 3,01 | 1,35 | 3,01 |
| 17 | 5,75 | 1,87 | 3,10 | 3,34 | 2,97 | 3,34 | 3,09 | 3,34 | 2,21 | 3,01 | 2,29 | 3,01 |
| 18 | 5,90 | 1,08 | 1,92 | 2,84 | 1,75 | 3,17 | 1,69 | 3,17 | 1,43 | 3,01 | 1,33 | 3,17 |
| 19 | 4,23 | 0,59 | 1,43 | 2,34 | 1,25 | 2,34 | 1,31 | 2,34 | 0,96 | 3,01 | 0,99 | 3,01 |
| 20 | 12,74 | 2,85 | 4,74 | 3,84 | 4,75 | 4,01 | 5,12 | 4,18 | 3,59 | 3,17 | 3,85 | 3,17 |
| 21 | 2,20 | 0,35 | 0,46 | 2,17 | 0,42 | 2,17 | 0,44 | 2,17 | 0,34 | 3,01 | 0,34 | 3,01 |
| 22 | 3,80 | 0,71 | 0,42 | 2,84 | 0,49 | 3,17 | 0,81 | 3,17 | 0,39 | 3,01 | 0,70 | 3,01 |
| 23 | 5,39 | 0,76 | 6,31 | 2,17 | 5,81 | 2,17 | 5,57 | 2,17 | 4,28 | 2,17 | 4,12 | 2,17 |
| 24 | 4,48 | 0,71 | 2,10 | 2,34 | 1,89 | 2,34 | 2,12 | 2,34 | 1,36 | 2,17 | 1,54 | 2,17 |
| 25 | 3,97 | 0,38 | 0,50 | 2,34 | 0,52 | 3,01 | 0,64 | 3,01 | 0,47 | 3,01 | 0,59 | 3,01 |
| 26 | 9,01 | 1,31 | 11,67 | 2,67 | 10,79 | 2,67 | 10,69 | 2,67 | 7,52 | 2,17 | 7,43 | 2,17 |
| 27 | 2,45 | 0,58 | 0,62 | 2,34 | 0,53 | 2,34 | 0,61 | 2,34 | 0,45 | 3,01 | 0,50 | 3,01 |

Tabela 22: Continuação dos resultados obtidos para vazão de pico, período de retorno de 10 anos.

| Sub- bacia | Método Racional | | Hidrograma Unitário | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------|------|---------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| | | | EXCEL | | ABC4 | | ABC6 | | ABC4 | | ABC6 | |
| | | | Triangular SCS | | Triangular SCS | | Triangular SCS | | Santa Bárbara | | Santa Bárbara | |
| | | | Q (m³/s) | Hora (h) | Q (m³/s) | Hora (h) | Q (m³/s) | Hora (h) | Q (m³/s) | Hora (h) | Q (m³/s) | Hora (h) |
| 28 | 2,21 | 0,52 | 0,35 | 2,51 | 0,32 | 3,01 | 0,36 | 3,01 | 0,29 | 3,01 | 0,33 | 3,01 |
| 29 | 3,68 | 0,71 | 1,28 | 2,51 | 1,11 | 2,34 | 1,03 | 2,34 | 0,86 | 3,01 | 0,82 | 3,01 |
| 30 | 7,36 | 0,70 | 5,85 | 2,17 | 5,43 | 2,17 | 5,22 | 2,17 | 4,02 | 2,17 | 3,87 | 2,17 |
| 31 | 8,07 | 0,97 | 2,59 | 2,67 | 2,20 | 2,67 | 2,07 | 3,17 | 1,85 | 3,01 | 1,74 | 3,01 |
| 32 | 8,46 | 1,08 | 3,19 | 2,84 | 2,83 | 3,01 | 2,98 | 2,84 | 2,33 | 3,01 | 2,45 | 3,01 |
| 33 | 5,38 | 0,97 | 2,52 | 2,67 | 2,24 | 2,51 | 2,31 | 2,51 | 1,72 | 3,01 | 1,75 | 3,01 |
| 34 | 10,22 | 1,32 | 4,44 | 2,84 | 4,04 | 3,01 | 3,97 | 3,01 | 3,14 | 3,01 | 3,10 | 3,01 |
| 35 | 5,82 | 0,62 | 0,74 | 2,67 | 0,76 | 3,17 | 1,21 | 3,17 | 0,63 | 3,01 | 1,07 | 3,01 |
| 36 | 2,48 | 0,65 | 0,42 | 2,51 | 0,40 | 3,17 | 0,45 | 3,17 | 0,35 | 3,01 | 0,40 | 3,01 |
| 37 | 5,44 | 0,78 | 1,67 | 2,51 | 1,40 | 2,51 | 1,31 | 2,51 | 1,19 | 3,01 | 1,13 | 3,01 |
| 38 | 6,23 | 0,91 | 2,69 | 2,51 | 2,38 | 2,51 | 2,62 | 2,51 | 1,82 | 3,01 | 1,95 | 3,01 |
| 39 | 3,53 | 0,63 | 0,72 | 2,51 | 0,66 | 3,17 | 0,62 | 3,17 | 0,58 | 3,01 | 0,55 | 3,01 |
| 40 | 5,19 | 0,79 | 1,53 | 2,51 | 1,28 | 2,51 | 1,31 | 2,51 | 1,11 | 3,01 | 1,14 | 3,01 |
| 41 | 5,44 | 0,65 | 1,31 | 2,51 | 1,07 | 3,01 | 1,01 | 3,01 | 0,97 | 3,01 | 0,91 | 3,01 |
| 42 | 3,89 | 0,41 | 1,55 | 2,17 | 1,51 | 2,17 | 1,65 | 2,17 | 1,13 | 2,17 | 1,23 | 2,17 |
| 43 | 4,36 | 0,60 | 1,90 | 2,34 | 1,73 | 2,17 | 1,64 | 2,34 | 1,31 | 2,17 | 1,23 | 2,17 |
| 44 | 8,39 | 1,32 | 2,21 | 3,01 | 2,16 | 3,34 | 2,23 | 3,34 | 1,66 | 3,17 | 1,74 | 3,01 |
| 45 | 9,82 | 1,07 | 4,18 | 2,67 | 3,71 | 2,67 | 3,54 | 2,67 | 1,68 | 3,01 | 2,81 | 3,01 |
| 46 | 10,77 | 0,65 | 10,80 | 2,17 | 10,08 | 2,17 | 9,70 | 2,17 | 7,36 | 2,17 | 7,09 | 2,17 |
| 47 | 5,56 | 0,43 | 1,71 | 2,17 | 1,61 | 2,17 | 1,59 | 2,17 | 1,18 | 2,17 | 1,16 | 2,17 |
| 48 | 12,40 | 0,91 | 7,15 | 2,51 | 6,47 | 2,51 | 6,14 | 2,51 | 4,64 | 2,17 | 4,35 | 2,17 |
| 49 | 9,43 | 1,14 | 5,15 | 2,67 | 4,65 | 2,67 | 4,87 | 2,67 | 3,51 | 3,01 | 3,63 | 3,01 |
| 50 | 7,72 | 0,87 | 6,81 | 2,34 | 6,45 | 2,34 | 6,33 | 2,34 | 4,62 | 2,17 | 4,53 | 2,17 |
| 51 | 6,31 | 0,81 | 11,14 | 2,34 | 10,39 | 2,17 | 10,41 | 2,34 | 7,61 | 2,17 | 7,59 | 2,17 |
| 52 | 46,24 | 5,97 | 15,97 | 5,68 | 15,90 | 5,84 | 15,02 | 5,67 | 12,70 | 3,34 | 12,03 | 3,17 |
| 53 | 39,37 | 3,92 | 9,47 | 4,51 | 9,70 | 4,84 | 9,70 | 4,67 | 7,60 | 3,34 | 7,60 | 3,17 |
| 54 | 36,95 | 2,74 | 21,51 | 3,67 | 21,25 | 4,01 | 19,49 | 4,01 | 15,66 | 3,01 | 14,39 | 3,17 |

As FIGURAS 70, 71 e 72 apresentam uma comparação entre as vazões de projeto obtidas pelos modelos do SCS, Santa Bárbara e o método Racional. Para as mesmas sub-bacias foram calculadas as vazões de pico.

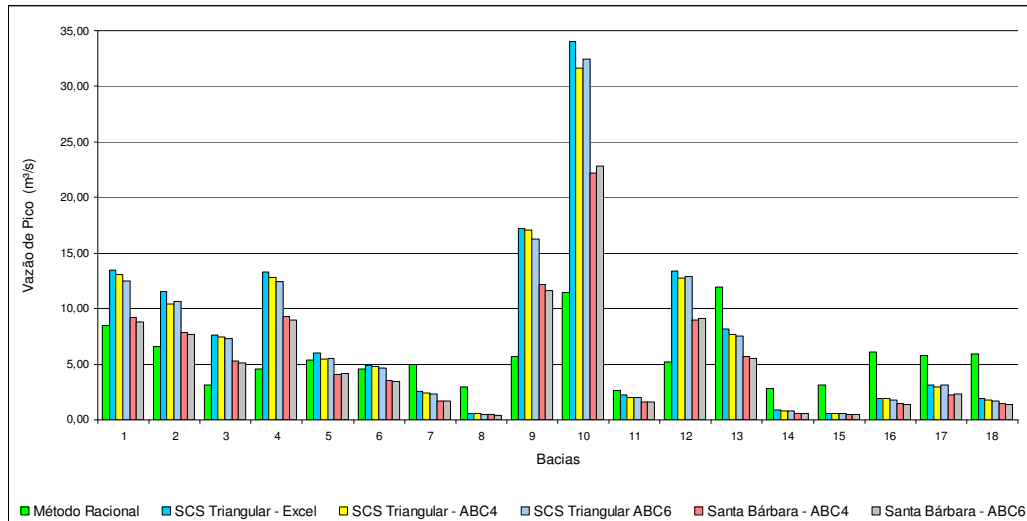


Figura 70: Vazões de projeto (m^3/s) para as sub-bacias de 1 a 18, $Tr = 10$ anos.

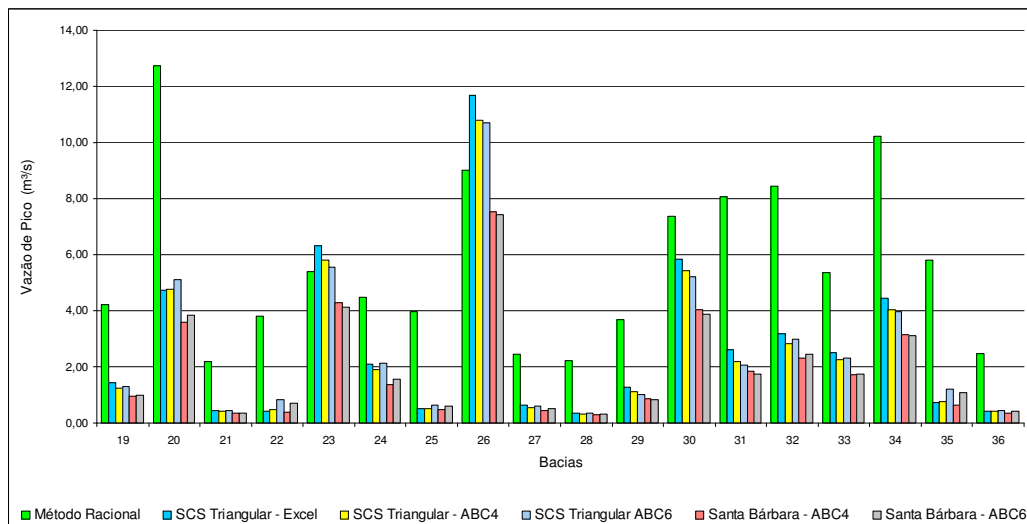


Figura 71: Vazões de projeto (m^3/s) para as sub-bacias de 19 a 36, $Tr = 10$ anos.

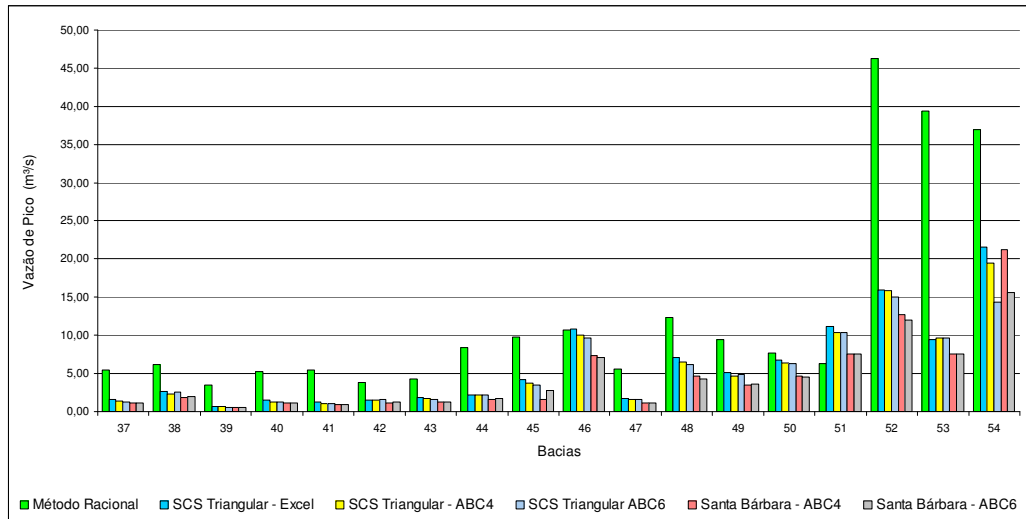


Figura 72: Vazões de projeto (m^3/s) para as sub-bacias de 37 a 54, $T_r = 10$ anos.

Analisando as FIGURAS 70, 71 e 72, que apresentam as comparações, para cada sub-bacia estudada, da vazão de pico (m^3/s), em função do método utilizado, pode-se observar que o Método Racional, em média, superestimou a vazão de pico para a maioria das sub-bacias analisadas, em relação aos outros métodos, seguido pelo método do SCS e pelo Santa Bárbara. A diferença, para mais, da média obtida para as vazões de pico do método Racional em relação ao método do hidrograma triangular do SCS foi da ordem de 30% e o método de Santa Bárbara de 50% para as sub-bacias estudadas.

Fazendo análise apenas em relação às sub-bacias que apresentam áreas de drenagem inferiores a 30 km^2 , observou-se que o Método Racional apresentou maiores valores para a vazão em 37 das 50 sub-bacias analisadas, representando 74% do total de sub-bacias, seguida pelo método SCS triangular que apresentou o maior valor de vazão de pico em 13 das 50 sub-bacias analisadas.

O Método Racional superestimou a vazão de pico mesmo para as sub-bacias com área até 5 km^2 quando comparado com outros métodos de cálculo de vazões de pico utilizadas no presente estudo. Cabe observar que 5 km^2 é limite máximo de área de drenagem recomendado para aplicação do método segundo a literatura.

Batista (apud GENOVEZ, 2001) e Mostaghimi e Mitchel (apud GENOVEZ, 2001) e Genovez (apud GENOVEZ, 2001) também observaram em seus estudos superestimções de vazões de pico na utilização do Método Racional.

Para as sub-bacias com áreas de drenagem superiores a 30 km², o Método Racional apresentou vazões de pico maiores, quando comparadas com os outros métodos utilizados para o cálculo, em 100% das sub-bacias analisadas. As diferenças entre os valores obtidos pelo Método Racional e pelos outros métodos analisados aumentaram significativamente com as áreas. Como observado por Pinto et al. (1976), a imprecisão da utilização do Método Racional será tanto mais significativa quanto maior for à área da bacia, porque as simplificações do método, como a não consideração do armazenamento de água na bacia e das variações do coeficiente de escoamento e da intensidade durante o transcorrer das precipitações.

Marcellini (1994) também constatou nos seus resultados que o método SCS apresenta maiores valores de pico, diferença em torno de 34%, quando comparados com os obtidos pelo método Santa Bárbara.

4.12 – Análise de Sensibilidade

Foi desenvolvida uma análise de sensibilidade em relação a alguns parâmetros que exercem influência na determinação de vazões de pico. Para a determinação das vazões de pico foram utilizados os métodos do hidrograma do SCS e Santa Bárbara, através do modelo ABC4 (PORTO et al., 1993) e ABC6 (OLIVEIRA et al., 1999) além de uma rotina em Excel para o método SCS.

A análise de sensibilidade realizada no presente estudo utilizou três das sub-bacias escolhidas. Estas sub-bacias foram selecionadas em função de suas áreas de drenagem. As sub-bacias selecionadas foram as de número 20 (A=30,5 km²), 21 (A=1,52 km²) e 52 (A=150,70 km²), com áreas de drenagem consideradas média, pequena e grande em comparação com as sub-bacias analisadas.

Análise da influência de alterações do uso do solo sobre os picos de vazão

Os processos de urbanização em uma bacia apresentam influência direta na impermeabilização do solo, produzindo um aumento significativo na frequência de inundações.

Para a análise de sensibilidade em relação à influência de alterações do uso do solo foram utilizados os dados das sub-bacias 20, 21 e 52, citadas anteriormente, obtidas utilizando software Arcgis 9.0, TABELA 23. A avaliação foi feita em relação ao valor de CN, variando-se os valores para cada sub-bacia selecionada do valor encontrado como CN médio da sub-bacia para um CN de 89, valor usualmente utilizado para bacias com impermeabilização de solo significativas, obtido pela média dos valores encontrados para bacias urbanas, segundo Tucci (1993).

Tabela 23: Características das sub-bacias utilizadas na análise de sensibilidade as alterações do uso do solo.

| Sub-bacia | A (km²) | S (m/m) | CN (Tucci) | tc (min) | Precipitação (mm) |
|------------------|---------------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------------|
| 20 | 30,50 | 0,01470 | 53,6 | 171,2 | 63,53 |
| 21 | 1,52 | 0,05893 | 50,8 | 21,1 | 66,18 |
| 52 | 150,7 | 0,00783 | 56,3 | 358,4 | 60,88 |

O CN representa a capacidade de infiltração solo da bacia hidrográfica, sendo caracterizado pela umidade antecedente do solo e pelo tipo de solo.

Por meio da análise realizada pôde-se observar a sensibilidade ao efeito da variação do valor de CN, em relação ao valor da precipitação efetiva e, conseqüentemente, em relação à variação da vazão de pico.

A TABELA 24 e as FIGURAS 73, 74 e 75 apresentam os resultados obtidos para a variação dos valores de CN, médias ponderadas obtida para cada sub-bacia, utilizando a ferramenta SIG, para um cenário de aumento na impermeabilização do solo e conseqüente reflexo dessa variação na vazão de pico obtida para cada sub-bacia analisada.

Tabela 24: Comparação entre as vazões de pico obtidas, considerando aumento da impermeabilização do solo, nas sub-bacia 20, 21 e 52.

| Sub – bacia | 20 | | 21 | | 52 | |
|------------------------|--------------------------|--------|-------------------------|-------|---------------------------|--------|
| | A= 30,50 km ² | | A= 1,52 km ² | | A = 150,7 km ² | |
| | CN = 53,6 | CN=89 | CN = 50,8 | CN=89 | CN =56,3 | CN=89 |
| Triangular SCS - Excel | 4,74 | 110,03 | 0,46 | 22,15 | 15,97 | 263,39 |
| Triangular SCS - ABC4 | 4,75 | 109,08 | 0,42 | 22,23 | 15,90 | 265,10 |
| Triangular SCS - ABC6 | 5,12 | 108,64 | 0,44 | 22,24 | 15,02 | 264,63 |
| Santa Bárbara - ABC4 | 3,59 | 77,33 | 0,34 | 16,23 | 12,70 | 195,24 |
| Santa Bárbara - ABC6 | 3,85 | 76,99 | 0,34 | 16,24 | 12,03 | 194,52 |

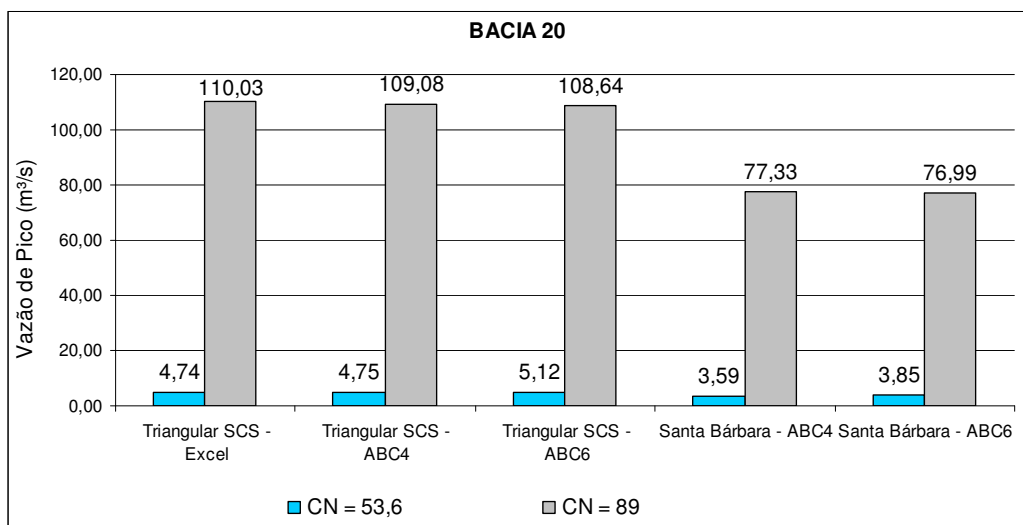


Figura 73: Vazões de pico, em função da variação do valor de CN adotado para a sub-bacia 20.



Figura 74: Vazões de pico em função da variação do valor de CN adotado para as sub-bacia 21.

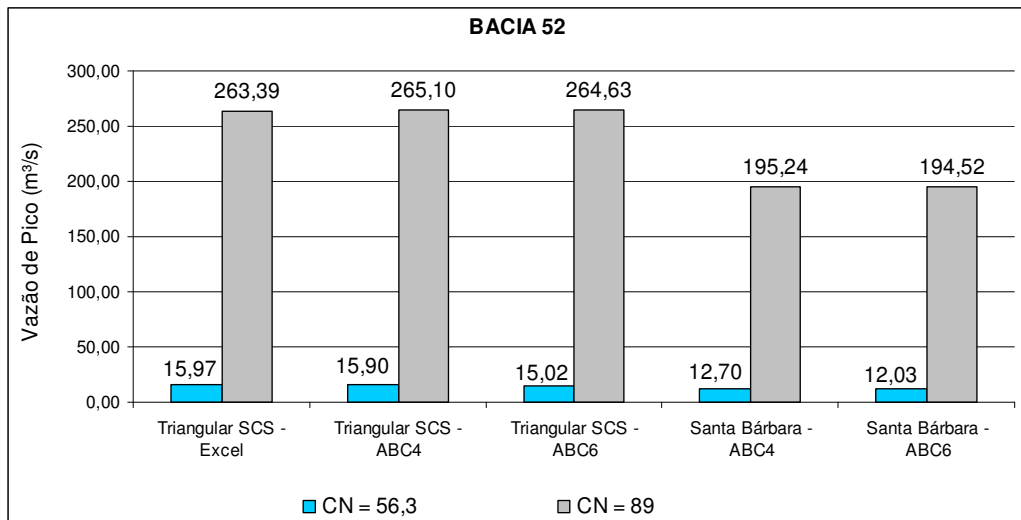


Figura 75: Vazões de pico, em função da variação do valor de CN adotado para as sub-bacia 52.

Na análise de sensibilidade realizada, pôde-se observar que a vazão de pico é crescente com o aumento do valor de CN. Este resultado era esperado, pois quanto maior é o valor de CN, maior a impermeabilização da bacia hidrográfica e maior a parcela de escoamento superficial.

Os valores obtidos para vazões de pico utilizando CN igual a 89, para as três sub-bacias analisadas foram, em torno de 2000%, 4800% e 1500% maiores, para as sub-bacias 20 ($A=30,50 \text{ km}^2$), 21 ($A=1,52 \text{ km}^2$) e 52 ($A=150,70 \text{ km}^2$), respectivamente. Valores estes de vazão de pico significativamente muito maiores do que os encontrados utilizando CN média ponderada atual para cada sub-bacia.

Os resultados obtidos mostraram que as diferenças de vazões de pico diminuíram com o aumento da área de drenagem das sub-bacias. Esta diminuição de pico pode ser atribuída à distribuição da precipitação sobre a área de drenagem, às perdas na propagação do escoamento em áreas maiores ou à maior atenuação do escoamento em áreas maiores.

Análise da influência da declividade do terreno sobre os picos de vazão

Para a análise de sensibilidade em relação à variação de declividade utilizaram-se as mesmas sub-bacias 20, 21 e 52. A análise foi feita em relação ao valor de declividade S (m/km) real da sub-bacia e quatro diferentes valores de declividade selecionados entre as sub-bacias estudadas, TABELA 25.

Tabela 25: Valores de declividade selecionados entre as sub-bacias para análise de sensibilidade.

| Valores de declividades (m/km) | | | |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-------|
| Maior | Intermediário 1 | Intermediário 2 | Menor |
| 81,03 | 44,88 | 27,95 | 7,83 |

Variando-se os valores de declividades e calculando o novo tempo de concentração, estimaram-se as vazões de pico correspondentes.

Nas TABELAS 26, 27 e 28 e nas FIGURAS 76, 77 e 78 são apresentados os valores das vazões de pico, em função das diferentes declividades, para as sub-bacias 20 ($A=30,50 \text{ km}^2$), 21 ($A=1,52 \text{ km}^2$) e 52 ($A=150,70 \text{ km}^2$), respectivamente.

Tabela 26: Vazões de pico (m^3/s), para diferentes declividades, para a sub-bacia 20

| Sub- bacia | 20 ($A= 30,50 \text{ km}^2$ e $S \text{ real}=14,70 \text{ m/km}$) | | | | |
|------------------------|--|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Método | $S=14,70$ m/km | $S=7,83$ m/km | $S=27,95$ m/km | $S=44,88$ m/km | $S=81,03$ m/km |
| Triangular SCS - Excel | 4,74 | 5,05 | 7,53 | 8,54 | 9,89 |
| Triangular SCS - ABC4 | 4,75 | 3,91 | 5,61 | 6,4 | 7,11 |
| Triangular SCS - ABC6 | 5,12 | 4,21 | 6,16 | 6,87 | 7,66 |
| Santa Bárbara - ABC4 | 3,59 | 2,99 | 4,26 | 4,79 | 5,51 |
| Santa Bárbara - ABC6 | 3,85 | 3,21 | 4,58 | 6,87 | 5,92 |

Tabela 27: Vazões de pico (m^3/s), para as diferentes declividades, para a sub-bacia 21

| Sub-bacia | 21 ($A= 1,52 \text{ km}^2$ e $S_{\text{real}} = 58,93 \text{ km}$) | | | | |
|------------------------|--|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Método | $S=58,93$ m/km | $S=7,83$ m/km | $S=27,95$ m/km | $S=44,88$ m/km | $S=81,03$ m/km |
| Triangular SCS - Excel | 0,46 | 0,36 | 0,42 | 0,43 | 0,49 |
| Triangular SCS - ABC4 | 0,42 | 0,32 | 0,34 | 0,35 | 0,43 |
| Triangular SCS - ABC6 | 0,44 | 0,33 | 0,36 | 0,42 | 0,45 |
| Santa Bárbara - ABC4 | 0,34 | 0,28 | 0,32 | 0,33 | 0,34 |
| Santa Bárbara - ABC6 | 0,34 | 0,29 | 0,33 | 0,34 | 0,35 |

Tabela 28: Vazões de pico (m³/s), para as diferentes declividades, para a sub-bacia 52

| Sub-bacia | | 52 (A=150,7 km ² e Sreal=7,83 m/km) | | | | |
|------------------------|-------------|--|--------------|--------------|--------------|--|
| Método | S=7,83 m/km | S=7,83 m/km | S=27,95 m/km | S=44,88 m/km | S=81,03 m/km | |
| Triangular SCS - Excel | 15,97 | 15,97 | 24,92 | 29,13 | 34,85 | |
| Triangular SCS - ABC4 | 15,90 | 15,90 | 25,02 | 29,02 | 34,48 | |
| Triangular SCS - ABC6 | 15,02 | 15,02 | 23,67 | 27,38 | 32,67 | |
| Santa Bárbara - ABC4 | 12,70 | 12,70 | 18,94 | 21,70 | 25,39 | |
| Santa Bárbara - ABC6 | 12,03 | 12,03 | 25,02 | 20,52 | 24,14 | |

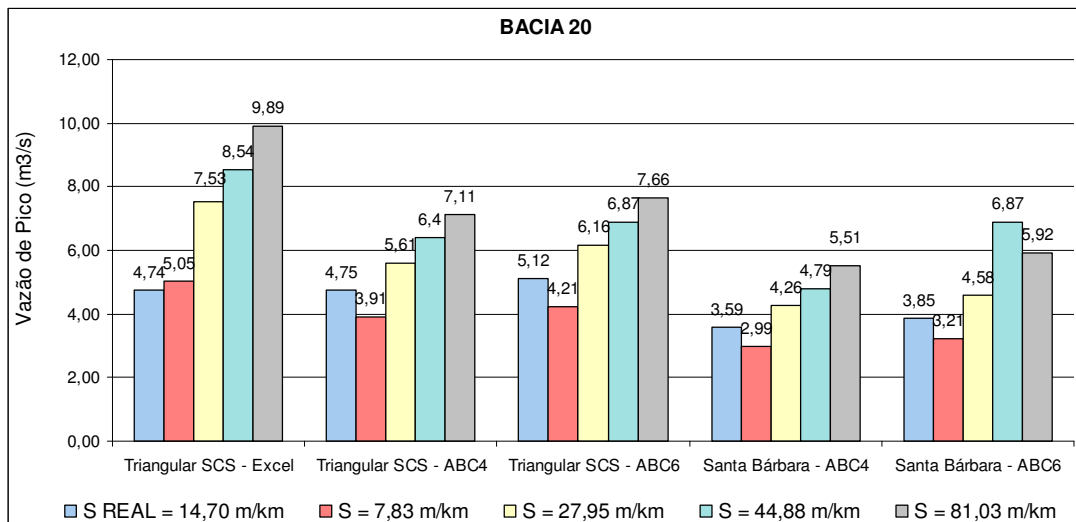


Figura 76: Comparação das vazões de pico (m³/s), para as diferentes declividades adotadas para a sub-bacia 20.

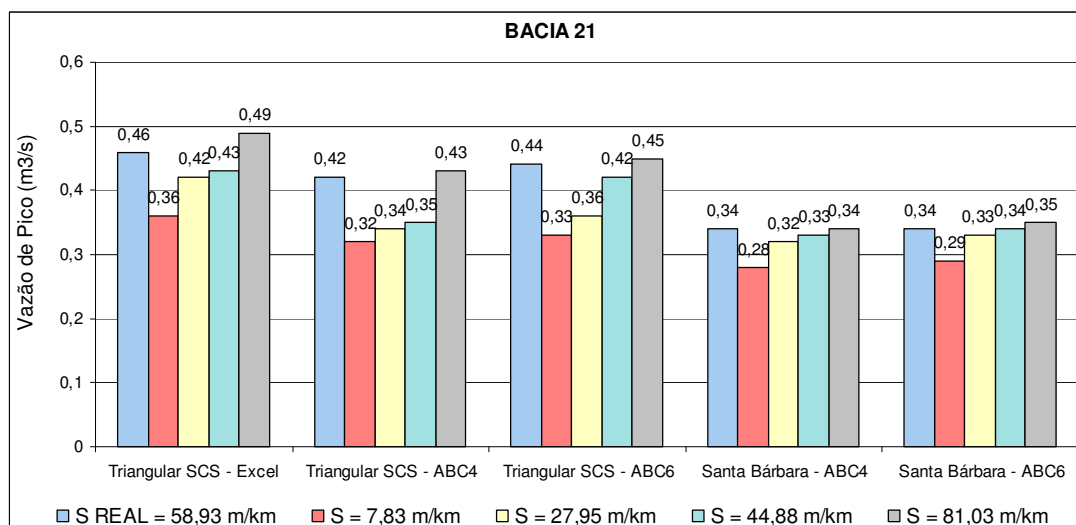


Figura 77: Comparação das vazões de pico (m³/s), para as diferentes declividades adotadas para a sub-bacia 21.

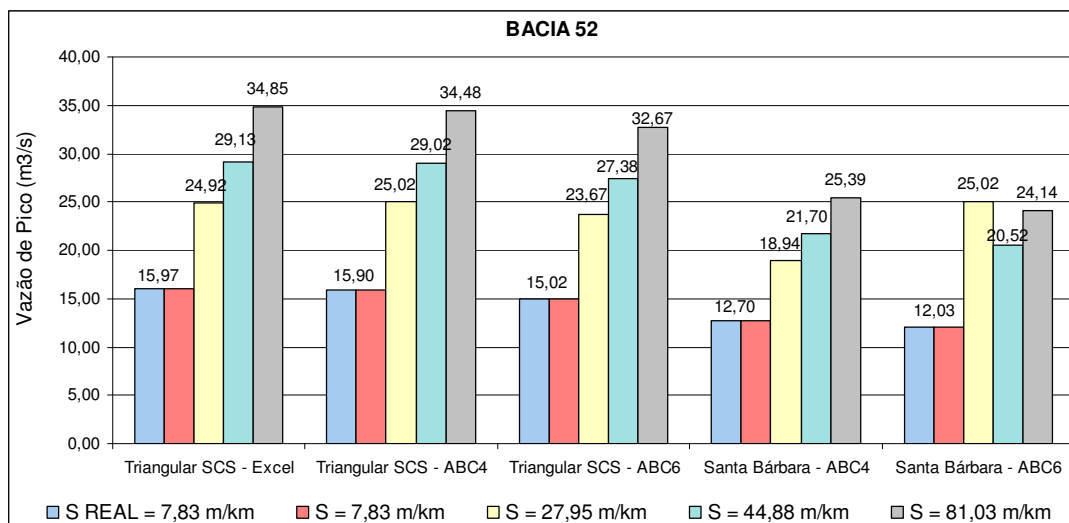


Figura 78: Comparação das vazões de pico (m^3/s), para as diferentes declividades adotadas para a sub-bacia 52.

Como pode ser observado nas FIGURAS 76, 77 e 78, à medida que os valores de declividades aumentam, as vazões de pico também aumentam, o que pode ser explicado pela redução do tempo de concentração da bacia e no conseqüente aumento nas vazões de pico.

Observou-se na análise realizada que quanto menor a área de drenagem da sub-bacia estudada, menor foi, em média, o aumento da vazão de pico, considerando as declividades adotadas. O parâmetro mais importante relacionado com a forma, e, portanto, com as vazões de pico dos hidrogramas sintéticos, é o tempo de ascensão, que sintetiza o efeito das características físicas da bacia sobre o hidrograma de chuva excedente. O tempo de ascensão dos hidrogramas sintéticos é função direta da duração de chuva adotada e do tempo de concentração da bacia. Por isso, a maior representatividade dessas características físicas, como declividade e tempo de concentração, na estimativa das vazões de pico (PORTO,1995; TUCCI,1993).

4.13 – Correlação de Pearson

No contexto do presente estudo desenvolveu-se uma análise destinada a verificar possíveis correlações entre algumas características físicas da bacia e valores obtidos em função dessas características.

Essa análise procurou estudar relações de causa e efeito em associações de características físicas das sub-bacias estudadas, procurando identificar e entender influências dessas relações nas estimativas de vazões de pico, levando em consideração que o fato de duas variáveis tenderem a aumentar ou diminuir juntas não implica que uma delas tenha efeito direto ou indireto sobre a outra, podendo ser influenciadas por outras variáveis.

As altas correlações refletem tendências comuns de duas variáveis.

Para a análise de correlação foram utilizadas as características fisiográficas das cinquenta sub-bacias estudadas apresentando áreas de drenagem até 12,08 km². As vazões de pico consideradas na análise foram às obtidas pelo Método Racional, com finalidade demonstrativa.

A TABELA 29 apresenta as correlações obtidas, considerando as características fisiográficas das sub-bacias analisadas e as relações geradas por essas características, para bacias com área de drenagem entre 1,52 km² e 12,08 km².

Tabela 29: Matriz de correlação entre características de sub-bacias estudadas.

| | Área | CN | Precipitação Efetiva | Fator C | Declividade talvegue | Tempo de concentração | Comprimento talvegue | Vazão de Pico * | Vazão Específica |
|-------------------------|-------|-------|----------------------|---------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|------------------|
| Área | 1 | | | | | | | | |
| CN | 0,15 | 1 | | | | | | | |
| Precipitação Efetiva | 0,08 | 0,75 | 1 | | | | | | |
| Fator C | 0,01 | 0,56 | 0,25 | 1 | | | | | |
| Declividade do Talvegue | -0,39 | -0,27 | -0,20 | -0,25 | 1 | | | | |
| Tempo de Concentração | 0,85 | 0,20 | 0,12 | 0,11 | -0,66 | 1 | | | |
| Comprimento do talvegue | 0,92 | 0,10 | 0,05 | 0,02 | -0,37 | 0,90 | 1 | | |
| Vazão de Pico* | 0,85 | 0,27 | 0,08 | 0,37 | -0,25 | 0,62 | 0,74 | 1 | |
| Vazão Específica | -0,80 | -0,22 | -0,15 | -0,15 | 0,45 | -0,75 | -0,79 | -0,79 | 1 |

*Método Racional

Os coeficientes de correlação foram usados para estudar possíveis inter-relações entre variáveis, desprezando o fator quantitativo como instrumento de análise destas variáveis.

A TABELA 29 mostra que valores maiores de correlação entre os valores tempo de concentração com a declividade do talvegue, comprimento do talvegue e área de drenagem da bacia. No caso da vazão específica também foi observada uma relação expressiva com a área de drenagem da bacia. A precipitação efetiva também apresentou uma relação com o valor de CN, demonstrado pela correlação de 0,75.

Tendo por base os resultados apresentados na TABELA 29 optou-se por realizar uma análise de regressão linear simples aplicada às correlações encontradas com valores acima de -0,7 e 0,7, e que não apresentam relações de associação óbvias, no contexto específico do presente estudo.

Nas TABELAS 30 e 31 são apresentadas equações de regressão encontradas utilizando apenas uma variável, com duas variáveis resposta, respectivamente:

Tabela 30: Equações de regressão com uma variável resposta.

| Tempo de Concentração | | |
|--|---|--|
| $R^2 = 43,9\%$ $tc = 82,9 - 0,895 S$ | $R^2 = 80,5\%$ $tc = 4,49 + 9,73 Lt$ | $R^2 = 72,4\%$ $tc = 22,8 + 4,75 A$ |
| Precipitação Efetiva | | |
| $R^2 = 56,7\%$ $Precipitação Efetiva = - 21,1 + 0,446 CN$ | | |
| Vazão de Projeto | | |
| $R^2 = 72,9\%$ $Q = 2,39 + 0,594 A$ | | |
| Vazão Específica | | |
| $R^2 = 63,6\%$ $q = 2,24 - 0,159 A$ | | |

Tabela 31: Equações de regressão com duas variáveis respostas.

| Tempo de Concentração | |
|------------------------------------|---------------------------------|
| $R^2 = 93,4\%$ | |
| $t_c = 30,5 + 8,19 L_t - 0,521 S$ | |
| Tempo de Concentração | |
| $R^2 = 80,8\%$ | $R^2 = 85,5\%$ |
| $t_c = 6,73 + 0,851 A + 8,20 L_t$ | $t_c = 46,8 - 0,530 S + 3,90 A$ |
| Vazão Específica | |
| $R^2 = 65,4\%$ | |
| $q = 2,45 - 0,115 A - 0,00928 t_c$ | |

Analisando-se as equações de regressão obtidas, verifica-se que o comprimento do talvegue foi a variável que mais explicou o comportamento do tempo de concentração, com um coeficiente de determinação (R^2) 80,5%, seguido da área de drenagem e da declividade do talvegue, para as equações obtidas com uma variável explicativa. Analisando as equações obtidas com duas variáveis explicativas, o melhor resultado encontrado foi para o cálculo do tempo de concentração com a combinação do comprimento do talvegue e declividade do talvegue, com um coeficiente de determinação (R^2) de 93,4%, seguido da combinação das variáveis área de drenagem e declividade e área de drenagem, e comprimento do talvegue.

A área de drenagem foi a variável que melhor explicou o comportamento das vazões de pico e vazão específica, tanto considerando uma variável, como a combinação com duas variáveis explicativas.

A área de drenagem e o comprimento do curso d'água principal caracterizaram-se como as variáveis mais expressivas para a representação das diversas variáveis e equações regionalizadas, à exceção do tempo de concentração para a combinação com duas variáveis explicativas, em que comprimento e a declividade do talvegue apresentaram o melhor resultado.

As equações obtidas, no presente estudo, apresentam para a região de estudo, bacia do rio Santa Maria da Vitória, opções para estimativas de parâmetros e de vazões máximas, para áreas até 12,08 km².

Cabe ressaltar que a análise foi feita apenas como caráter demonstrativo, para demonstração das facilidades de SIG na estimativa de parâmetros relacionados com as vazões de projeto. Desta forma, a aplicação deve ser feita de forma criteriosa, sendo realizados testes de verificação.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Levantar e analisar diferentes tipos de métodos de cálculo de vazões máximas de projeto utilizando equações empíricas e hidrogramas unitários (HU).

No presente estudo foi feita revisão bibliográfica a respeito de metodologias utilizadas para determinação das vazões máximas de projeto, utilizando equações empíricas e hidrogramas unitários sintéticos. A literatura especializada registra uma grande variedade de técnicas para a determinação das vazões de projeto. Estas técnicas, baseadas geralmente no Método Racional ou na teoria do hidrograma unitário, não apresentam grandes diferenças em seus aspectos metodológicos.

As maiores diferenças observadas dizem respeito à qualidade das informações de entrada dos modelos e às escolhas utilizadas na definição de parâmetros importantes na determinação das vazões de pico, em especial o tempo de concentração e os coeficientes relacionados com as perdas por infiltração, retenção e armazenamento no escoamento superficial.

Estudar formas de obtenção de parâmetros destes modelos, com uso de Sistema de Informação Geográfica - SIG.

Através da análise dos conceitos e metodologias referentes a sistema de informações geográficas, considerando os tipos de dados utilizados, a estrutura desses dados (matriciais ou vetoriais), modelo digital de elevação, metodologia D8 para definição de rede de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas, verificou-se que integração do software SIG com os processos de avaliação dos recursos hídricos é uma tendência atual.

Esta integração tem ocorrido tanto em termos das avaliações básicas como na visualização dos dados, análises de vizinhança e geração de mapas temáticos, quanto em processos com ferramentas mais específicas como as utilizadas na definição de rede de drenagem e delimitação de bacias por meio do modelo digital de elevação.

Concluiu-se que processos utilizados para delimitação de bacias hidrográficas e definição da rede de drenagem sem o uso de ferramentas SIG, são geralmente

demorados e trabalhosos, consumindo tempo de projeto e adicionando custos à análise e à modelagem hidrológica.

Observou-se também que, quanto menos subjetivo for o critério na definição dos limites de uma bacia, mais preciso será o traçado da mesma. Algoritmos que permitem o traçado automático de bacias hidrográficas, apoiados em representações computacionais do terreno, modelo numérico do terreno, estão disponíveis para utilização e podem apresentar melhores resultados, quando comparados a digitalizações manuais de bases cartográficas, caso utilizados criteriosamente.

A pesquisa demonstrou as vantagens de se utilizar tecnologias relativas aos sistemas de informações geográficas, como ferramenta na modelagem hidrológica, permitindo automatização de processos mecânicos, além do ganho considerável na qualidade dos produtos gerados e aumento da eficiência do atendimento às demandas da sociedade, facilitando e agilizando os trabalhos relacionados com o gerenciamento de recursos hídricos.

Concluiu-se, a partir da revisão bibliográfica e da aplicação dos procedimentos propostos, que algumas dificuldades encontradas no presente estudo e observadas nos artigos pesquisados referem-se à falta existente no Brasil de fontes de dados geográficos digitais específicos para utilização em recursos hídricos. A procura por informações digitalizadas é realizada de forma desordenada e a certeza da consistência das informações acaba ficando comprometida, existindo uma carência nesta área para que possa haver um controle maior das bases de dados utilizadas e dos produtos que estão sendo gerados e disponibilizados. Bases existentes em outros formatos necessitam ser editadas para que possam ser utilizadas em formato SIG. Faltam ainda publicações com orientações específicas, principalmente na área de recursos hídricos. Existe uma carência grande também em relação à base de mapas de caracterização do solo, como, uso e ocupação e geomorfologia, as bases disponíveis são referentes a trabalhos específicos e particulares.

Existem limitações no processo de integração dos dados necessários nas análises dos recursos hídricos com auxílio dos softwares SIG. Estas limitações são

decorrentes tanto da disponibilidade dos dados digitais como, em alguns casos, da falta de diretrizes orientando a utilização dos mesmos para os estudos hidrológicos.

As delimitações automáticas das bacias hidrográficas requerem uma verificação ou consistência dos resultados, depois de obtidas e, quando necessários, devem ser realizadas edições nos mapas obtidos, em função da utilização e qualidade final dos dados.

Dificuldade prática observada no estudo foi relacionada com a utilização da ferramenta “watershed”, disponibilizada na caixa Arctoolbox para a delimitação de bacias a partir de coordenadas geográficas ou pontos definidos pelo usuário, que não apresentou bom resultados de delimitação.

A apresentação da caracterização do solo de bacias hidrográficas, em termos do CN, permite fazer um acompanhamento qualitativo e quantitativo do comportamento destas, em termos da ocupação e do uso do solo, e em consequência, das condições de permeabilidade das mesmas que influenciarão nos hidrogramas de projeto. Concluiu-se que a determinação do parâmetro CN médio, utilizando operações de geoprocessamento, diminui a insegurança do modelo SCS, em função da grande sensibilidade do método à variação de CN, permitindo agilidade à sua obtenção.

Apesar das dificuldades apresentadas na integração dos sistemas de informação geográfica para análise de recursos hídricos, citadas anteriormente, o desenvolvimento do estudo mostrou o grande potencial apresentado por técnicas de geoprocessamento para o planejamento de recursos hídricos, apresentando procedimentos para a delimitação de bacias hidrográficas e definição da rede de drenagem utilizando modelo digital do terreno, caso sejam adotados critérios bem definidos e passíveis de serem replicados para outras regiões, mantendo um padrão de qualidade nos resultados obtidos.

Aplicar e comparar os resultados das metodologias em bacias hidrográficas específicas.

Com base nos valores dos CN's obtidos, concluiu-se que a variação de CN utilizando a classificação proposta por Setzer & Porto (1979) e a classificação proposta em Tucci (1993) não apresentaram diferenças consideráveis nos valores médios obtidos para as sub-bacias estudadas. A classificação hidrológica do solo de acordo com o método original do SCS e com aquela adaptada às condições brasileiras não apresentaram grandes diferenças, possivelmente por ter sido classificada apenas a maior classe do tipo de solo, não considerando as sub-ordens e suas características nas determinação do grupo hidrológico de solos (GHS).

Verificou-se que a distribuição temporal adotada dos blocos alternados apresenta limitações, pelo fato de caracterizar uma condição extremamente crítica e completamente hipotética, por não ter relação com o fenômeno físico. Entretanto, devido às muitas dificuldades envolvidas na seleção de um modelo de distribuição temporal, principalmente pela complexidade e aleatoriedade dos fenômenos físicos envolvidos, este tipo de distribuição é muito adotada pela sua simplicidade e praticidade, e por caracterizar uma das distribuições temporais mais críticas, trazendo segurança excessiva ao projeto.

Pela análise do parâmetro tempo de concentração para as sub-bacias de estudo, pôde-se verificar que é um parâmetro sensível na avaliação da vazão de pico de projeto, e as fórmulas existentes e de larga utilização no meio técnico resultam em valores que podem apresentar grandes diferenças. As fórmulas de tempo de concentração devem ser aplicadas para condições semelhantes para as quais foram determinadas. Caso contrário corre-se o risco de se representar um escoamento que não corresponde ao da bacia em estudo, causando grandes erros na determinação das vazões máximas de projeto.

O método adotado para o cálculo da chuva efetiva no presente estudo, do Soil Conservation Service, não leva em consideração a distribuição temporal da chuva, pois o mesmo utiliza a chuva total na determinação da taxa de infiltração, e não a chuva discretizada no tempo. Portanto, por este método, a chuva efetiva independe da distribuição temporal da chuva.

Muitas decisões empíricas precisam ser tomadas nas estimativas dos hidrogramas de projeto e das vazões máximas utilizando-se a precipitação de projeto. Entre elas destacam-se a definição das distribuições espacial e temporal da chuva de projeto que pode resultar em valores muito diferentes.

Das comparações, concluiu-se que o Método Racional, em média, apresentou maiores valores de vazão de pico para as sub-bacias analisadas, comparativamente aos outros métodos, seguido pelo hidrograma triangular do SCS e o de Santa Bárbara. A diferença da média obtida para as vazões de pico do método Racional em relação ao método do hidrograma triangular do SCS foi da ordem de 30% e de 5

declividade do talvegue e tempo de concentração, apresentaram grande influência nos valores estimados para vazões de pico.

Foram pesquisadas equações que pudessem ser representativas das relações entre características físicas da região de estudo, para alguns parâmetros importantes nas estimativas de vazões de pico, como tempo de concentração, vazão máxima e vazão específica, com o uso de análises de correlação.

Cabe ressaltar que a aplicação dessas equações requer uma análise cuidadosa, pelo fato da relação entre variáveis poder ser influenciada por outras variáveis não consideradas.

Os valores obtidos nessa análise são valores aproximados, devido às incertezas hidrológicas, às simplificações dos métodos disponíveis e os critérios adotados, mesmo considerando a atitude cuidadosa e sistemática usada na etapa de caracterização e definição dos parâmetros de entrada dos métodos, com finalidade de diminuir a probabilidade de ocorrência de erros que comprometessem as estimativas.

Existem diversas dificuldades para a escolha dos parâmetros de projeto, em função da complexidade dos fenômenos que eles se propõem a representar e dos inúmeros fatores que os influenciam. Existe um grande número de fórmulas e métodos. Contudo, devido à falta de dados históricos de vazões máximas para pequenas bacias, não existem formas mais precisas de comparação e definição dos melhores parâmetros. Por esse motivo é necessário que se tome muito cuidado na avaliação desses parâmetros, principalmente porque os resultados são muito sensíveis a pequenas variações dos mesmos.

No presente trabalho procurou-se adotar uma abordagem simples para comparação entre vazões de projeto de pequenas bacias hidrográficas, estimadas por diferentes métodos, com diferentes parâmetros. As possíveis combinações para análise de sensibilidade são inúmeras. Procurou-se ressaltar a importância de cada parâmetro. De acordo com a análise de sensibilidade, pôde-se concluir que não existem regras pré-estabelecidas na determinação das vazões de projeto. É necessário analisar cada situação em particular.

Buscou-se no presente estudo mostrar o grande potencial apresentado por técnicas de geoprocessamento, que permitem agilmente manipular informações no espaço e agregar dados de diferentes fontes, para o planejamento de recursos hídricos e, especificamente, no âmbito deste trabalho, na determinação de parâmetros utilizados para estimativas de vazões máximas de projetos de drenagem.

Recomenda-se que em pesquisas futuras, outros parâmetros sejam avaliados, tais como a distribuição espacial e temporal de chuvas de projeto utilizando outras metodologias existentes, outros modelos para determinação de escoamento superficial e outros cálculos para determinação da precipitação efetiva sejam analisados.

A recomendação principal a ser feita, é que se deve fazer sempre uma análise de sensibilidade quando da determinação das vazões de pico e os hidrogramas de projeto. Atualmente os recursos computacionais disponíveis e os sistemas de informação geográfica existentes permitem, com maior facilidade e rapidez, avaliação mais abrangente e com grande número de combinações de parâmetros de projeto.

Dada a importância do conhecimento de chuvas com curta duração e alta intensidade para projetos de drenagem, de modo geral, sugere-se a ampliação da rede brasileira de postos pluviográficos. Além disto, sugere-se a criação de microbacias experimentais nas diversas regiões brasileiras, para análise e escolha dos métodos e parâmetros mais adequados para estimativa de vazões de projeto.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHNERT, F. **Estudo de inundações devido a enchentes: uma abordagem de planejamento utilizando sistema de informação geográfica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Vitória. Vitória, 2000.

AMORIM, R. F. C.; LEOPOLDO, P. R. **Modelo SCS ajustado às condições locais da bacia do Rio Paraíso.** Acesso em: 06 de janeiro de 2005. Disponível em: <http://www.fca.unesp.br/posgradua/Energia/revista/V11N1-96/amorim.pdf>.

ANDREOLLI, I. **Comparação de métodos de estimativas da vazão máxima e do hidrograma de projeto: Caso do Rio Guaporé – RS.** XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba - PR, 23-27 de novembro de 2003.

BAENA, L. G. N., SILVA, D. D., PRUSKI, F. F., CALIJURI, M. L., SILVA E. O. **Delimitação automática e determinação de características de Bacias Hidrográficas utilizando-se modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes gerados a partir de mapas com diferentes escalas.** XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba - PR, 23-27 de novembro de 2003.

BAUNGARTEN, A. P., FELIX, D., MULLER, M. **Determinação da precipitação efetiva na bacia do Rio Chopim através do método da curva numero do SCS.** XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba - PR, 23-27 de novembro de 2003.

BENINI, R. M.; MARTIOLI, C.; MEDIONDO, E. M. **Uso de SIG associado ao método racional para previsão de vazões na bacia do Córrego do Mineirinho, São Carlos, SP.** Acesso em: 04 de janeiro de 2005. Disponível em: http://www.shs.eesc.usp.br/pessoal/docentes/technotes%5C31%5CBenini_et_al_III_SRH-Goiania-2004.pdf > .

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da República federativa do Brasil**, Brasília, 09 de janeiro de 1997.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M.A.; HEMERLY, A.; MEDEIROS, C.M.B.M.; MAGALHÃES, G. C. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. UNICAMP IX Escola de Computação, 1996 (1a. ed.). SAGRES Editora, Curitiba, 1997 (2a. ed.).

CÂMARA, G., CASANOVA, M., DAVIS, C., VINHAS, L., QUEIROZ, G. R. **Bancos de dados geográficos**. Editora MundoGeo, 2005. Acesso em: 08 de agosto de 2005. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/bdados/>.

CÂMARA, G., MEDEIROS, J. S., MONTEIRO, A. M. V. **Introdução a ciência da geoinformação**. Editado e organizado por Gilberto Câmara, Antônio Miguel Monteiro, José Simeão de Medeiros. São José dos Campos, INPE, 2004. Acesso em: 08 de agosto de 2005. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>

CÂMARA, G., ORTIZ, M. J. **Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: Uma Visão Geral**. In: SOUZA E SILVA, M., "Cartografia, Sensoriamento e Geoprocessamento", cap. 2, p. 59-88. Lavras, UFLA/SBEA, 1998. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geoprocessamento.html>.

CETESB. 1979. **Drenagem Urbana: manual de projeto**. São Paulo. 468p.

CHILDS, C., KABOT, G., MURAD-AL-SHAIKH, M., **Working with ArcGIS Spatial Analyst**. Course version 2.2. Revised September 2004. ESRI 2001-2004. Estados Unidos.

DIAS, L. S. O, ROCHA, G. A., BARROS, E. U. A., MAIA, P. H. P. **Utilização do radar interferométrico para delimitação automática de bacias hidrográficas**. Revista BAHIA ANÁLISE & DADOS., Salvador-BA, v.14, n.2, p.265-271, setembro de 2004.

ELESBON, A. A. A. **Utilização de sistemas de informação geográfica na regionalização de vazões – Estudo de caso: bacias dos Rios Mucuri, Itaúnas e**

São Mateus. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Vitória, Vitória, 2004.

FRAGA, T. C., NADAL, C. A., GIUSTI, D. A. **Uma Aplicação do reconhecimento automatizado de redes de drenagem utilizando modelo digital de terreno.** XXI Congresso Brasileiro de cartografia, 2003. Disponível em: http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc.htm. Acesso em: 06 de janeiro de 2005.

FRANCO, E, J. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no Método Racional** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2004.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. **Digital Elevation Model Issues in Water Resources Modeling.** in: **Hydrologic and Hydraulic – Modeling Support.** Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference, 1999. Disponível em: <http://campus.esri.com/campus/library/>.

GENOVEZ, A. M. **Vazões Máximas.** In: Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001, cap. 3, p. 33- 112.

GUMBO, B., MUNYAMBA, N., SITHOLE, G., SAVENIJE, H. H. G. **Coupling of digital elevation model and rainfall-runoff model in storm drainage network design.** 2nd WARFSA/WaterNet Symposium: Integrated water resources management: theory, practice, cases, Cape Town, 30-31 Oct., 2001.

HABTEC, CONSÓRCIO SANTA MARIA JUCU (CSMJ). **Diagnóstico e Plano Diretor das Bacias dos Rios Santa Maria da Vitória e Jucu.** Vitória, ES, 1997.

JENSON, S. K., DOMINGUE, J. O. **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Volume 54, nº. 11, 1988, pág. 1593-1600. Acessado em: Agosto de 2005. Disponível em: <http://edna.usgs.gov/Edna/pubs/extractingtopographicstructure1.pdf>

LACERDA , H. B., HÉRBETE D. H. R. C, FIGUEIREDO, E. E. . **Variação da Curva Número com a Escala e Uso do Solo na Bacia Representativa de Sumé**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracajú - SE. 25 a 29 de novembro de 2001.

MANOJ, J. K., UMESH, K. C., KITTUR R. R. G. **A GIS based distributed rainfall-runoff model**. Journal of Hidrology, Volume 299, pág. 107-135, 2004.

MARCELLINI, S. S. **Análise de Critérios para a determinação das tormentas de projeto e sua influencia nos hidrogramas em pequenas bacias hidrográficas** Dissertação.(Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica, São Paulo, 1994.

MARCELLINI, S. S. **Diretrizes para utilização de tecnologia de sistemas de informação geográficas (SIG) na exploração de informações hidrológicas – exemplos de aplicação**. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2002.

MARCELLINI, S. S., ZAHED, K., QUINTANILHA, J. A. **Diretrizes para utilização de tecnologia de sistemas de informação geográficas (SIG) na exploração de informações hidrológicas – exemplos de aplicação**. XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba - PR, 23-27 de novembro de 2003.

McCUEN, R. H. **A guide to hydrologic analysis using SCS methods**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey – EUA. 1982, 145p.

MENDONÇA, A. S. F. **Análise de métodos de hidrógrafa unitária**. Tese (M. Sc. Engenharia Civil) – COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 1977.

MENDONÇA, A. S. F., CAMPOS, R. B. M. **Software em linguagem BASIC para estudos de cheias pelo método do hidrograma unitário em computador**. In: VIII Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Anais 2, Foz do Iguaçu, 1989, ABRH.

MENDES, C.A.B., CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: Princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

MOORE, D. **A estatística básica e sua prática**. EUA: LTC, 1995

MORENO, J., TEJADA, K. S. **O uso de instrumental SIG na análise de parâmetros hidrológicos com vistas às ações de gestão territorial, estudo de caso: a Bacia hidrográfica do Ribeirão do Piracicamirim - PIRACICABA, SP**. XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba - PR, 23-27 de novembro de 2003.

MÜLLER, M., GARCIA, K. S. M. **Modelos digitais de terreno em escalas globais e sua utilização em recursos hídricos** In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracajú - SE. 25 a 29 de novembro de 2001.

NAYAK, T. R., JAISWAL, R. K. **Rainfall-Runoff modeling using satellite data and gis for Bebas River in Madhya Pradesh**. Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division. 2003, vol. 84, nº mai, pp. 47-50. Acessado em Novembro de 2005. Disponível em: <http://www.ieindia.org/publish/cv/0503/may03cv9.pdf>

OLIVEIRA, C. P. M., PORTO, R. L., ZAHED, K. F., ROBERTO, A. N. **ABC 6, um sistema de suporte a decisões para análise de cheias em bacias complexas**. XIII Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Belo Horizonte, MG, 1999.

PICKBRENNER, K., PEDROLLO, M. C., RISSO, A. **Determinação do CN utilizando geoprocessamento: simulação hidrológica na bacia do Rio Criciúma**. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 16., 2005, João Pessoa. Anais... João Pessoa, ABRH, 2005. 1 CD-ROM.

PILAR, J. V., CRUZ, M. A. S., MEDIONDO E. M., SANTANA, A. G. **Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 3: obtenção do hidrograma unitário**. Anais do Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos, Gramado, RS, Outubro de 1998.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A., GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**, Edgard Blücher Ltda, 1976.

PINTO, F. A., SANTANA, G. J. S. **Estimativa de chuvas intensas para a bacia do Rio Jequitinhonha**. VII CONEA, Salvador, Anais, (1996). Disponível em: <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/Conea7/410.PDF>

PORTO, R. L. **Escoamento Superficial Direto**. In: Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. da Universidade, ABRH, 1995, cap. 4, p. 107-165.

PORTO, R.L., ZAHED, K. F., GIKAS, A. N. ABC3 – **Análises de cheias complexas: manual do usuário**. São Paulo, FCTH, 1993.

ROCHA, F. A. S. **Estimativas de vazões máximas em bacias hidrográficas do Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Vitória, Vitória, 2003.

RODRIGUES, G. P. W., BOTTO, M. P., BARBOSA, M. P. R., GRADVOHL, S. T. S., CASTRO, M. A. H. **Uma análise da aplicação da metodologia do hietograma unitário de projeto do “Soil Conservation Service no Brasil**. VII Simpósio de recursos hídricos do nordeste, São Luís - MA, 30-03 de dezembro de 2004.

ROSIM, S., PELLEGRINO, S. R. M. **Extração de redes de drenagem de imagem de radar usando modelos digitais de terreno**. GIS Brasil 1999. http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/gisbrasil99/rede_drenagem.

SANTOS, A. R. **Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo, micro-região de Viçosa, MG**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do**

solo dos Estados Unidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2004.

SETZER, J; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação de escoamento superficial de acordo com o solo e o seu recobrimento vegetal nas condições do estado de São Paulo.** São Paulo, Boletim Técnico DAEE, mai/ago 1979, v.2, n.2, 82-135.

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.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.18, nº 3, p. 11-21, março de 1999.

SILVEIRA, A., L., L. **Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais.** Revista brasileira de recursos hídricos, Volume 10, n.1, jan/mar 2005, 5-23.

SOUZA, J. D., AMARAL, S. B., FERREIRA, A. M. **Sistema de informações geográficas para gestão de recursos hídricos da Bacia do Alto Iguaçu.** XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba - PR, 23-27 de novembro de 2003.

TAN, C.H., MELESSE, A.M, YEH, S.S. **Remote sensing and geographic information system in runoff coefficient in China, Taipei.** Acesso em: 25 de Janeiro de 2005. Disponível em: <
www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/pos3/217.pdf>.

TUCCI, C. E. M. **Escoamento superficial.** In: Tucci C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre, EDUSP, ABRH, 1993, cap. 11, p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. **Vazão máxima e hidrograma de projeto.** In: Tucci C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre, EDUSP, ABRH, 1993, cap. 14, p. 527-572.

TUCCI, C. E. M. **Coefficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 5 nº 1, p. 61-68, 2000.

USDA - United States Department of Agriculture. **Urban hydrology for small watersheds.** Natural Resources Conservation Service. Technical Release 55, June 1986.

VENDRAME, I. F., LOPES, W. A. B. **Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica de escoamento superficial da bacia do Pararangaba.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE Goiânia, Brasil, 16-21 abril, 2005, p. 2555-2562.

VILLELA, S. M., MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1975.

ZAHED, K. F., MARCELLINI, S. S. **Precipitações Máximas.** In: Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. da Universidade, ABRH, 1995, cap. 2, p. 37-76.

ZAMPROGNO, D. P., - **Subsídios para a definição de locais apropriados para a implantação de reservatórios de regularização de vazões: refinamento e aplicação de procedimento metodológico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Vitória. Vitória, 1999.

ZHOU, Q., YANG, X., Melville, M. D. **A GIS network model for sugarcane field drainage management.** Australian remote sensing conference, Camberra, vol. 2, p. 366-372, março de 1996.

ZUFFO, A. C. **Equações são eternas?** XXI congresso Latino Americano de hidráulica São Pedro , Brasil, Outubro de 2004.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)