

PAULO EUGÊNIO PACHECHENIK

**CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA
DO RIO DAS PEDRAS, GUARAPUAVA – PR**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Agronomia. Curso de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

CURITIBA

2004

PARECER

Para minha querida esposa Rosali:

Pela sua compreensão, paciência, amizade e sincero amor...

Dedico-lhe.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus, pela sabedoria e generosidade na sua criação.
- A UFPR/Setor de Ciências Agrárias/Departamento de Solos e Engenharia Agrícola e ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo por acolher-me como aluno de mestrado.
- Ao meu professor e orientador Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, um agradecimento especial, por aceitar-me como orientado, pela amizade, apoio, orientação, paciência e acompanhamento do trabalho.
- Ao amigo Prof^o. Dr. Masato Kobiyama, por ter sido o primeiro incentivador deste trabalho.
- Agradeço à amizade e colaboração da amiga Anelissa Gobel Donha, que ajudou a enriquecer o conteúdo apresentado neste trabalho.
- Agradeço à minha esposa Rosali, pela compreensão que teve comigo nos momentos em que me ausentei do seu convívio para desenvolver este trabalho além do apoio e amizade nos momentos mais difíceis vividos neste período.
- Aos meus pais Eugênio e Maria de Lourdes, por tudo o que fizeram por mim até o momento.
- Ao Simepar, nas pessoas de seus funcionários Osmar Stringari e Nilson Antônio de Moraes, pela presteza no fornecimento das informações solicitadas.
- Ao colega de mestrado e funcionário da Emater, Gilmar Pinto da Costa pela amizade e companheirismo nesta caminhada, mas principalmente pelo seu exemplo de vida em superar grandes desafios.
- Ao amigo Leandro Redin Vestena, pelo livro e pelos mapas, que serviram para enriquecer este trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| LISTA DE TABELAS..... | viii |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | ix |
| RESUMO..... | xii |
| ABSTRACT..... | xiii |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 OBJETIVOS..... | 4 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 4 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |
| 3 REVISÃO BIBLOGRÁFICA..... | 5 |
| 3.1 BACIA HIDROGRÁFICA..... | 5 |
| 3.2 CICLO HIDROLÓGICO..... | 7 |
| 3.3 PROCESSO CHUVA-VAZÃO | 7 |
| 3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS DE CHUVA-VAZÃO..... | 9 |
| 3.4.1 Método do Hidrograma Unitário..... | 11 |
| 3.4.2 Modelo <i>STANFORD WATERSHED MODEL</i> | 12 |
| 3.4.3 Modelo <i>TOPMODEL</i> | 12 |
| 3.4.4 Modelo <i>TANQUE</i> | 13 |
| 3.4.5 Modelo <i>HYCYMODEL</i> | 13 |
| 3.5 PRINCIPAIS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DO BALANÇO HÍDRICO..... | 15 |
| 3.5.1 Precipitação..... | 15 |
| 3.5.2 Infiltração e armazenamento de água no solo..... | 16 |
| 3.5.3 Evapotranspiração..... | 17 |
| 3.5.4 Vazão..... | 20 |
| 3.6 FRAGILIDADE AMBIENTAL..... | 20 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS..... | 24 |
| 4.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA BACIA..... | 24 |
| 4.2 MODELO <i>HYCYMODEL</i> | 26 |
| 4.2.1 Dados para processar as análises..... | 26 |
| 4.2.2 Descrição do funcionamento do modelo <i>HYCYMODEL</i> | 26 |
| 4.2.3 Modelo de fluxo de base..... | 29 |
| 4.2.4 Modelo de evaporação..... | 29 |
| 4.2.5 Modelo de transpiração..... | 30 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.6 | Modelo de evaporação de canal..... | 31 |
| 4.2.7 | Modelo de chuva efetiva para fluxo de tempestade..... | 32 |
| 4.2.8 | Armazenamento e vazão..... | 32 |
| 4.2.9 | Calibração do modelo <i>HYCYMODEL</i> : procedimento de cálculo..... | 34 |
| 4.3 | DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE EVAPOTRANSPIRAÇÃO RELATIVA (ET_r / ET_p)... | 34 |
| 4.4 | DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PROVÁVEL..... | 35 |
| 4.5 | DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL..... | 37 |
| 4.5.1 | Mapa planialtimétrico da rede de drenagem da bacia do Rio das Pedras..... | 38 |
| 4.5.2 | Mapa de declividade da Bacia do Rio das Pedras..... | 39 |
| 4.5.3 | Mapa das unidades de solos da bacia do Rio das Pedras..... | 39 |
| 4.5.4 | Mapa de uso atual do solo da bacia do Rio das Pedras..... | 39 |
| 4.5.5 | Fragilidade potencial..... | 39 |
| 4.5.6 | Fragilidade emergente..... | 39 |
| 4.6 | DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA DA BACIA..... | 40 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 41 |
| 5.1 | MODELAGEM DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO..... | 41 |
| 5.1.1 | Considerações sobre os erros F_1 e F_2 | 42 |
| 5.1.2 | Considerações sobre os parâmetros de ajustamento (desconhecidos)..... | 46 |
| 5.1.3 | Considerações referentes ao uso do modelo <i>HYCYMODEL</i> | 46 |
| 5.2 | DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO..... | 48 |
| 5.2.1 | Considerações gerais referentes à decisão de utilizar o <i>HYCYMODEL</i> , após análise do processo do balanço hídrico..... | 54 |
| 5.3 | DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE CHUVAS..... | 55 |
| 5.4 | DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL..... | 58 |
| 5.4.1 | Mapa planialtimétrico da rede de drenagem da bacia do Rio das Pedras..... | 58 |
| 5.4.2 | Mapa de declividade da bacia do Rio das Pedras..... | 60 |
| 5.4.3 | Mapa de solos da bacia do Rio das Pedras..... | 62 |
| 5.4.4 | Mapa de uso atual do solo e cobertura vegetal da bacia do Rio das Pedras.. | 64 |
| 5.4.5 | Mapa da fragilidade potencial da bacia do Rio das Pedras..... | 65 |
| 5.4.6 | Mapa da fragilidade emergente da bacia do Rio das Pedras..... | 68 |
| 5.4.7 | Parâmetros da forma da bacia..... | 71 |
| 5.4.8 | Interação entre a caracterização hidrológica e da fragilidade ambiental..... | 72 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 74 |
| | REFERÊNCIAS..... | 75 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 4.1 - Localização do município de Guarapuava no Estado do Paraná..... | 25 |
| 4.2 - Localização da bacia do Rio das Pedras no município de Guarapuava..... | 25 |
| 4.3 - Representação metodológica esquemática das principais partes do modelo <i>HYCYMODEL</i> | 27 |
| 4.4 - Estrutura do Tanque I..... | 30 |
| 5.1 - Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no <i>HYCYMODEL</i> e vazão observada (QO), para o ano de 1985 (melhor ajuste com o <i>HYCYMODEL</i>)..... | 44 |
| 5.2 - Média móvel para os ajustes de vazão calculada (QC) e vazão observada (QO), para o ano de 1999 (pior ajuste com o <i>HYCYMODEL</i>)..... | 44 |
| 5.3 - Média móvel de 365 dias da vazão calculada (QC) no <i>HYCYMODEL</i> e vazão observada (QO), para os anos de 1985 a 2002..... | 45 |
| 5.4 - Valores da evapotranspiração potencial (ET_p) e real (ET_r), obtidos entre os anos de 1985 a 1997..... | 48 |
| 5.5 - Valores obtidos entre os anos de 1985 e 1986: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no <i>HYCYMODEL</i> e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (ET_p) e real (ET_r)..... | 49 |
| 5.6 - Valores obtidos entre os anos de 1987 a 1990: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no <i>HYCYMODEL</i> e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (ET_p) e real (ET_r)..... | 50 |
| 5.7 - Valores obtidos entre os anos de 1991 a 1994: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no <i>HYCYMODEL</i> e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (ET_p) e real (ET_r)..... | 51 |
| 5.8 - Valores obtidos para o ano de 1995 a 1997: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no <i>HYCYMODEL</i> e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (ET_p) e real (ET_r)..... | 52 |
| 5.9 - Valores da Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no <i>HYCYMODEL</i> e observada (QO), obtidos para os anos entre 1998 e 2002..... | 53 |
| 5.10 - Valores de precipitação a 75% de probabilidade, calculados com a distribuição de melhor ajuste (Gama, Normal, Exponencial e Uniforme) para a bacia do Rio das Pedras (dados disponíveis de 1985 a dezembro de 2002)..... | 57 |
| 5.11 - Rede de drenagem da Bacia do Rio das Pedras e a identificação da ordem dos rios componentes da bacia..... | 59 |
| 5.12 - Mapa planialtimétrico da Bacia do Rio das Pedras, com as correspondentes altitudes encontradas no processo de digitalização da referida bacia..... | 60 |
| 5.13 - Classes de declive da bacia do Rio das Pedras, estabelecidas conforme a metodologia proposta por ROSS (1994), para a determinação da Fragilidade Ambiental..... | 61 |
| 5.14 - Mapa de solos da bacia do Rio das Pedras, com a respectiva identificação dos solos encontrados na mesma..... | 62 |
| 5.15 - Mapa de uso atual do solo na bacia do Rio das Pedras realizado a partir de imagens de satélite <i>Landsat 7</i> com o <i>software Idrisi 3.2</i> | 64 |
| 5.16 - Mapa da fragilidade ambiental potencial da bacia do Rio das Pedras, obtido da sobreposição dos mapas de solos e declividade..... | 66 |
| 5.17 - Mapa da fragilidade emergente da bacia do Rio das Pedras, obtido da sobreposição dos mapas de fragilidade potencial e uso do solo..... | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| 4.1 - Parâmetros de ajustamento (desconhecidos) do modelo <i>HYCYMODEL</i> | 33 |
| 5.1 - Valores ótimos dos parâmetros do <i>HYCYMODEL</i> e os respectivos ajustes dos erros de vazão (F_1 e F_2), obtidos com os dados compreendidos entre os anos de 1985 a 2002..... | 42 |
| 5.2 - Valores da evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr), e índice de evapotranspiração relativa $I_{(ETr/ETp)}$, obtidos entre os anos de 1985 a 1997. | 48 |
| 5.3 - Índice mensal e anual de evapotranspiração relativa $I_{(ETr/ETp)}$, obtidos entre os anos de 1985 a 1997..... | 49 |
| 5.4 - Parâmetros estatísticos decendiais obtidos nas análises de teste de aderência, a 5% de significância, com as distribuições de probabilidade Normal (N), Triangular (T), Uniforme (U), Exponencial (E) e Gama (G), e cálculo da precipitação a 75% de probabilidade com a distribuição de melhor ajuste, para a bacia do Rio das Pedras (dados disponíveis de 1985 a dezembro de 2002)..... | 56 |
| 5.5 - Classes de declividade para a determinar a Fragilidade Ambiental (ROSS, 1994) e as correspondentes áreas de cada classe encontrada no interior da Bacia do Rio das Pedras..... | 61 |
| 5.6 - Classificação dos solos da Bacia do Rio das Pedras, com as respectivas áreas encontradas na mesma..... | 63 |
| 5.7 - Solos encontrados em cada classe de declividade na bacia do Rio das Pedras..... | 63 |
| 5.8 - Uso atual dos solos na bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas, obtidas a partir de imagens de satélite <i>Landsat 7</i> com o <i>software Idrisi 3.2</i> | 64 |
| 5.9 - Tabela Matriz para a fragilidade ambiental potencial, obtida do cruzamento entre o mapa de declividade e o mapa de solos da bacia do Rio das Pedras, com as classes de fragilidade ambiental potencial encontradas..... | 66 |
| 5.10 - Classes de fragilidade ambiental potencial do solo da bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas, obtidas da sobreposição dos mapas de solos e declividade..... | 67 |
| 5.11 - Tabela Matriz para a fragilidade ambiental emergente, obtida do cruzamento entre o mapa de fragilidade ambiental potencial e o mapa de uso atual do solo da bacia do Rio das Pedras, com as classes de fragilidade ambiental emergentes encontradas..... | 68 |
| 5.12 - Classes de fragilidade ambiental emergente do solo da bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas, obtidas da sobreposição dos mapas de fragilidade potencial e uso do solo..... | 68 |
| 5.13 - Parâmetros de forma encontrados para a Bacia do Rio das Pedras, conforme as recomendações de VILLELA & MATTOS (1975)..... | 71 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Descrição | Unidade |
|-----------------|---|---------------------|
| a | Função cúbica do índice de calor (I) da região | Adimensional |
| A | Área da total bacia hidrográfica | km^2 |
| A_i | i -ésima área entre as curvas de nível da bacia hidrográfica | m^2 |
| C | Relação de área do canal | Adimensional |
| D_{16} | Profundidade efetiva do solo na qual a relação da área de contribuição da inclinação da rampa é 16% | mm |
| D_{50} | Profundidade efetiva do solo na qual a relação da área de contribuição da inclinação da rampa é 50% | mm |
| D_d | Densidade de drenagem | km^{-1} |
| $D(X)$ | Distribuição cumulativa teórica | Adimensional |
| E | Elevação média da bacia | m |
| $E(t)$ | Evapotranspiração | $mm \cdot h^{-1}$ |
| e_i | Taxa de evaporação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $e_p(i)$ | Transpiração potencial | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $E_c(t)$ | Evaporação de canal | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $E_i(t)$ | Evaporação da chuva interceptada | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $E_i^*(t)$ | Evaporação aparente da chuva interceptada | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $E_t(t)$ | Transpiração da vegetação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $E_t^*(t)$ | Transpiração aparente da vegetação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| ETp | Evapotranspiração potencial | $mm \cdot mês^{-1}$ |
| ETp_i | Evapotranspiração potencial do i -ésimo mês | $mm \cdot mês^{-1}$ |
| ETp_{anual} | Evapotranspiração potencial anual | $mm \cdot ano^{-1}$ |
| ETr | Evapotranspiração real | $mm \cdot mês^{-1}$ |
| F_1 | Erro relativo | Adimensional |
| F_2 | Erro do balanço de água | Adimensional |
| F_c | Fator de correção da evapotranspiração tabular diária | Adimensional |
| $F(X)$ | Função cumulativa da probabilidade da distribuição mista | Adimensional |
| I | Índice de calor da região | Adimensional |
| $I_{(ETr/Etp)}$ | Índice de evapotranspiração relativa | Adimensional |
| j | Relação de taxa de evaporação de canal para taxa de transpiração | Adimensional |
| K | Parâmetro de cálculo do armazenamento e vazão de água | Adimensional |
| K_b | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque III | Adimensional |
| K_c | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque V | Adimensional |
| K_{cc} | Coeficiente de compacidade | Adimensional |
| K_f | Coeficiente de forma da bacia | Adimensional |
| K_h | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque IV | Adimensional |
| K_{in} | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque II | Adimensional |
| ℓ_i | Comprimento do i -ésimo curso de água | km |

| | | |
|----------------------|--|-------------------|
| L | Comprimento do rio principal, acompanhando a sinuosidade | km |
| L_t | Comprimento do talvegue do rio principal | km |
| m | Relação da área de contribuição da inclinação da rampa | Adimensional |
| N | Número de dados observados | Dias |
| N_f | Fotoperíodo | Horas |
| P | Parâmetro de cálculo do armazenamento e vazão de água | Adimensional |
| $P_b P_c$ | Parâmetros da função do armazenamento nos Tanques III e V | Adimensional |
| P_{er} | Perímetro da bacia hidrográfica | km |
| P_h | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque IV | Adimensional |
| P_{in} | Parâmetro desconhecido para calcular a percolação | Adimensional |
| Pm_i | Ponto médio entre duas curvas de nível da i -ésima área da bacia | m |
| P_O | Probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros) | Adimensional |
| Q | Vazão | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q(t)$ | Vazão total do rio | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_b(t)$ | Fluxo básico em uma estação de observação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_b^*(t)$ | Fluxo básico aparente em uma estação de observação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_{bc} = f(S_{bc})$ | Relação da vazão de canal e de rampa em função do armazenamento de subsuperfície | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $QC(t)$ | Vazão calculada pelo <i>HYCYMODEL</i> | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_c(t)$ | Escoamento direto de canal | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_c^*(t)$ | Escoamento direto aparente de canal | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_d(t)$ | Fluxo de escoamento direto total | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_h(t)$ | Vazão direta de floresta de encosta | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_h^*(t)$ | Vazão direta aparente de floresta de encosta | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $Q_{in}(t)$ | Escoamento de água do Tanque II para o Tanque III | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $QO(t)$ | Vazão observada | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $R(t)$ | Precipitação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $R_c(t)$ | Precipitação de canal | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $R_e(t)$ | Chuva efetiva para fluxo de escoamento direto de encostas | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $R_g(t)$ | Chuva acumulada | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $R_n(t)$ | Chuva líquida | $mm \cdot h^{-1}$ |
| S | Armazenamento | $mm \cdot h^{-1}$ |
| S_1 | Capacidade de armazenamento da cobertura vegetal | $mm \cdot h^{-1}$ |
| S_2 | Capacidade de armazenamento de talos e troncos | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_b(t)$ | Capacidade de armazenamento do Tanque III | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_b^*(t)$ | Capacidade aparente de armazenamento do Tanque III | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_b^{**}(t)$ | Diferença entre a Capacidade aparente de armazenamento do Tanque III e fluxo de base | $mm \cdot h^{-1}$ |

| | | |
|---------------|--|-------------------|
| $S_b(t-1)$ | Condição de armazenamento do Tanque III antes da precipitação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| S_{bc} | Capacidade de armazenamento de sub-superfície | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_c(t)$ | Capacidade de armazenamento do Tanque V | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_h(t)$ | Capacidade de armazenamento do Tanque I | $mm \cdot h^{-1}$ |
| Sin | Sinuosidade do curso de água | Adimensional |
| $S_u(t)$ | Capacidade de armazenamento do Tanque II | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_u^*(t)$ | Capacidade de armazenamento do Tanque II | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_u^{**}(t)$ | Relação da perda de água do Tanque II | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_u(t-1)$ | Armazenamento do Tanque II antes da precipitação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_u^{**}(t)$ | Relação da perda de água do Tanque II | $mm \cdot h^{-1}$ |
| $S_u(t-1)$ | Armazenamento do Tanque II antes da precipitação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| Ti | Temperatura média mensal do ar | $^{\circ}C$ |
| T_m | Temperatura média climatológica do m -ésimo mês | $^{\circ}C$ |
| α_1 | Taxa da distribuição da água interceptada pela vegetação | $mm \cdot h^{-1}$ |
| α_2 | Taxa da distribuição da água escoada por talos e troncos | $mm \cdot h^{-1}$ |
| σ | Desvio padrão das profundidades efetivas do solo D_{16} e D_{50} | Adimensional |
| ξ | Variável para calcular a chuva efetiva para escoamento direto | Adimensional |

CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA DO RIO DAS PEDRAS, GUARAPUVA - PR

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar e discutir alternativas para efetuar a caracterização do processo chuva-vazão, índices de evapotranspiração relativa, probabilidade da ocorrência de chuvas e delimitar as diferentes potencialidades para o uso do solo, na bacia hidrográfica do Rio das Pedras, situada no município de Guarapuva, Paraná, Brasil. No estudo do processo chuva-vazão empregou-se o modelo matemático denominado *HYCYMODEL*, que divide a precipitação em dois sistemas (canais e rampas florestadas). Com a aplicação do *HYCYMODEL*, obteve-se a estimativa da vazão e da evapotranspiração real (*ET_r*) da bacia. No cálculo dos índices de evapotranspiração relativa (*ET_r/ET_p*), a evapotranspiração potencial (*ET_p*) foi estimada com o método de Thornthwaite. A ocorrência de chuvas a 75% de probabilidade foi obtido com o auxílio de uma planilha eletrônica e do “Módulo análise estatística” do modelo *MORETTI*, que realiza as análises de distribuição de frequência e teste de aderência para cinco tipos de distribuições de probabilidade (Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme). A delimitação da potencialidade de uso do solo foi realizada aplicando-se uma metodologia de análise empírica da fragilidade ambiental, digitalizando a área e rede de drenagem da bacia com o software *CartaLinx* e gerando-se, posteriormente, um modelo numérico do terreno com o software *Idrisi 3.2*. Os ajustes entre as vazões observadas e estimadas com o *HYCYMODEL* foram considerados bons quando contrastados com os valores apresentados por outros autores, porém, as estimativas da *ET_r* e conseqüentemente do balanço hídrico pelo modelo não foram consideradas adequadas no presente trabalho. Embora a distribuição Gama seja de uso consagrado na determinação da precipitação provável para períodos inferiores a um mês, verificou-se que ela não apresenta sempre o melhor ajuste nos testes de aderência e outras distribuições de probabilidade devem ser utilizadas também na estimativa da precipitação provável para uma região contendo uma pequena série de informação disponível. A área da bacia apresenta fragilidade ambiental potencial entre as classes média e alta, com os usos do solo classificando-a na fragilidade ambiental emergente muito baixa e baixa. Os limites da potencialidade de uso do solo indicam que a bacia está protegida da erosão e os fatores de forma demonstram, para as atuais condições, que há pequena possibilidade de ocorrer enchentes.

Palavras-chave: *HYCYMODEL*, processos chuva-vazão, índice de evapotranspiração, chuva provável, fragilidade ambiental

HYDROLOGICAL CHARACTERIZATION AND ENVIRONMENTAL FRAGILITY OF THE RIO DAS PEDRAS WATERSHED, GUARAPUVA - PR

ABSTRACT

The present work had the objective to evaluate and to argue alternatives to perform the characterization of the rainfall-runoff processes, relative evapotranspiration indexes, probability of the rain occurrence and to delimit the different potentialities for the land-use, in the Rio das Pedras watershed, located in the Guarapuava city, Paraná State, Brazil. In the study of the rainfall-runoff process, the mathematical model *HYCYMODEL* that divides the precipitation into two systems (forested hillslope and channel) was used. With the application of the *HYCYMODEL*, the estimation of the runoff and the real evapotranspiration (*ET_r*) of the watershed was carried out. In the calculation of the relative evapotranspiration index (*ET_r/ET_p*), the potential evapotranspiration (*ET_p*) was estimated with the Thornthwaite method. The rain occurrence with 75% of probability was obtained with the aid of an electronic spread sheet and "Statistical Analysis Mode" of *MORETTI* model, that executes frequency distribution analysis and adherence test with five types of probability distributions (Gamma, Normal, Exponential, Triangular and Uniform). The delimitation of the potentiality of the land-use was done through the application of a empirical analysis methodology of the environmental fragility. After the digitalization of the area and drainage network of the watershed with *CartaLinx*, a numerical model of the land was generated with *Idrisi 3.2*. The adjustments between the observed runoff and the one estimated with the *HYCYMODEL* were considered good when compared to the values presented by other authors. However, the estimate of *ET_r* and consequently of the water balance by the model was not considered adequate. Although the Gamma distribution is of consecrated use in the determination of the probable precipitation for periods inferiors than one month, it was verified that it does not always present the best adjustment in the adherence tests and other distributions of probability must also be utilized to estimate the probable precipitation for a region containing a short series of available information. The area of the watershed presents the potential environmental fragility between the middle and high classes, with the land-uses classified very low and low in terms of the emergent environmental fragility. The limits of the land-use potentiality indicate that the watershed is protected against the erosion. The values of the form factor demonstrate that there is very low possibility of flood occurrence in this watershed.

Key Word: *HYCYMODEL*, rainfall-runoff processes, evapotranspiration index, probable rain, environmental fragility

1 INTRODUÇÃO

O homem ao fazer parte do ambiente como um elemento ativo é capaz de modificar a paisagem, pois possui a capacidade de alterar solos, vegetação, condições hidrológicas, formas de erosão e introduzir alterações no sistema que podem propiciar o desequilíbrio, colapso ou novos arranjos que atingem o estado de equilíbrio funcional. Os ecossistemas naturais, a princípio, mostravam-se em equilíbrio dinâmico, no entanto, com o progresso das sociedades humanas, uma intervenção cada vez mais intensa na apropriação de recursos naturais foi ocorrendo. O avanço tecnológico, científico e econômico provocou rápidas modificações sobre o meio ambiente gerando desequilíbrios temporários ou permanentes.

Neste contexto, o estudo das bacias hidrográficas é importante porque elas constituem uma unidade fundamental para o estudo ambiental e representam a principal fonte de captação de água para o consumo. A interferência antrópica em uma bacia pode gerar alterações nos processos de vazão e no tempo de permanência da água nos seus diversos compartimentos. O estudo de processos hidrológicos nas bacias hidrográficas também é relevante quando se analisa o uso da água e a possível falta da mesma para abastecer a demanda mundial. Essa situação de escassez está atrelada à poluição de mananciais, consequência da ocupação desordenada promovida pelo ser humano, que invade áreas de preservação para fixar residências, propriedades agrícolas e industriais.

As principais falhas observadas no gerenciamento dos recursos hídricos geralmente são resultados da ausência de estudos com o objetivo de avaliar e discutir alternativas para efetuar a caracterização do balanço hídrico e delimitar áreas de ocupação e uso do solo em função da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica. Estes estudos podem fornecer amparo técnico para uma gestão mais eficiente e determinar até que ponto pode-se explorar os recursos de uma bacia sem correr o risco de degradá-la.

Uma contribuição para as mudanças que se fazem necessárias com relação ao uso e preservação dos recursos hídricos em uma bacia de drenagem, consiste no desenvolvimento de estudos baseando-se em modelagem matemática. A aplicação da

técnica possibilita determinar a ocorrência de eventos significativos, porém, cuidados devem ser tomados para não superestimar ou subestimar os fenômenos naturais. Para algumas situações, utilizando-se apenas dados de precipitação e vazão de uma bacia é possível simular situações como o uso da água em uma determinada região.

Os denominados modelos chuva-vazão baseiam-se em apenas duas variáveis para caracterizar o processo hidrológico da água no interior de uma bacia hidrográfica. Através da calibração dos mesmos, por meio dos seus parâmetros, é possível obter uma série de informações sobre o balanço hídrico da bacia considerada.

O processo chuva-vazão interfere no equilíbrio dinâmico ambiental de uma bacia hidrográfica e é influenciado pela cobertura vegetal que intercepta a água das chuvas, pela absorção radicular da água do solo e transpiração. Também há a interferência dos diferentes tipos de solo, resultados da forma do relevo presente bem como da geomorfologia e clima regional.

Além da caracterização do processo de chuva-vazão do balanço hídrico, é necessário também considerar a probabilidade da ocorrência da chuva e determinar a evapotranspiração em uma bacia hidrográfica. Conhecer a chuva provável ao longo dos meses do ano é importante na elaboração de projetos para o meio rural, pois a água é um recurso natural e quando necessária, não pode faltar para as atividades agropecuárias. A evapotranspiração é influenciada por fatores como clima, cobertura vegetal e solo, e o seu conhecimento é importante no planejamento de uma bacia hidrográfica por constituir-se na maior perda de água no ciclo hidrológico.

O conhecimento das fragilidades presentes no sistema de uma bacia hidrográfica, através da integração de diversas variáveis que interferem nas potencialidades dos recursos naturais, possibilita compreender a realidade e obter uma visão mais clara sobre quais são as opções mais adequadas para o uso do solo na mesma. A determinação dos solos que compõem um ambiente pode ser realizada através de ferramentas de geoprocessamento e levantamentos do quadro natural. Este levantamento é fundamental para adoção de alternativas de uso do solo, uma vez que delimita os diferentes níveis de fragilidade ambiental que uma bacia hidrográfica apresenta. A análise da fragilidade do ambiente natural, em uma bacia de drenagem, parte da possibilidade de se efetuar um zoneamento separando as distintas áreas de exploração das áreas ambientais de preservação permanente.

A bacia do Rio das Pedras está em uma Área de Proteção Ambiental (APA) sendo um manancial para a captação de água para o município de Guarapuava. A realização de estudos que permitam caracterizar os processos hidrológicos (chuva-vazão, evapotranspiração, precipitação provável) e a fragilidade ambiental da bacia, justifica-se pois a água e o solo da bacia são explorados por moradores do local, seja para moradia, atividades agrícolas ou reflorestamento, interferindo de forma direta ou indireta nas relações de equilíbrio ambiental existente na mesma. Assim, a obtenção destas informações tem um importante papel na identificação de problemas e no planejamento futuro para racionalizar a exploração dos recursos naturais da região.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Efetuar a caracterização de alguns processos hidrológicos (chuva-vazão, evapotranspiração, precipitação provável) na bacia do Rio das Pedras, baseando-se em modelos hidrológicos, e delimitar a potencialidade do uso do solo utilizando a metodologia na análise empírica da fragilidade ambiental para auxiliar no planejamento da exploração dos recursos naturais (água e solo) da bacia do Rio das Pedras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a modelagem do processo chuva-vazão da bacia do Rio das Pedras, aplicando o modelo *HYCYMODEL*;
- Obter índices de evapotranspiração relativa (ET_r/ET_p) a partir das estimativas da evapotranspiração potencial (ET_p) com o método de THORNTHWAITE (1948) e evapotranspiração real (ET_r) obtidas com o *HYCYMODEL*;
- Avaliar o melhor ajustamento dos dados decendiais de chuva da região de Guarapuava – PR com cinco distribuições de probabilidade e determinar a chuva provável na região a 75% de probabilidade;
- Mapear as distintas condições presentes no solo na bacia hidrográfica em estudo, por meio de imagens de satélite e cartas topográficas, determinando-se as classes de fragilidade ambiental e fatores de forma.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica consiste em um importante componente ambiental para estudos hidrológicos e, por definição, ela é uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água ou um sistema conectado de cursos de água, tal que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída (VIESSMAN, et al.¹, citado por VILLELA & MATTOS, 1975, p. 6).

Assim, a bacia hidrográfica é considerada um sistema físico onde o elemento de entrada é o volume de água precipitada e a saída o volume de água escoado pela vazão (SILVEIRA, 1996). Os limites topográficos de uma bacia hidrográfica são dados pelos aspectos físicos do relevo que estão presentes na paisagem. Os topos das elevações servem como divisores de águas, separando uma bacia hidrográfica de outra e os vales são na verdade o destino da água das chuvas que precipitam e formam o rio (TUCCI, 1987).

Mais do que uma área definida topograficamente, a bacia hidrográfica consiste, dentro da natureza, em uma estrutura simples que facilita a aplicação de modelos matemáticos para simulações de estudo de recursos hídricos, pois apresenta uma rede de cursos de água interligados em sistema que efetuam a drenagem da água em uma única e simples saída (VILLELA & MATTOS, 1975).

As bacias hidrográficas são importantes aos seres humanos, pois constituem na principal fonte de captação de água para o consumo. Considerando esta importância, SHULER et al. (2000) salientaram que a interferência antrópica pode gerar alterações nos processos de vazão e no tempo de permanência da água nos diversos compartimentos da bacia. Desta forma, os autores propuseram analisar a representatividade física dos parâmetros de um modelo matemático desenvolvido por BEVEN & KIRKBY (1979), denominado *TOPMODEL* com o intuito de averiguar as consequências da ação antrópica nas cabeceiras da bacia do rio Corumbataí, Estado de São Paulo, que integra a bacia do rio Piracicaba.

¹ VIESSMAN Jr.; et al. **Introduction to hydrology**. New York, Intext Educational, 1972

O *TOPMODEL* também foi aplicado por SANTOS (2001) na região metropolitana de Curitiba, na bacia do rio Pequeno, município de São José dos Pinhais, Estado do Paraná. Neste trabalho, as simulações com o modelo determinaram as propriedades hidráulicas do solo. O autor obteve boa correlação entre as vazões observadas e calculadas para esta bacia, que se localiza em uma área semelhante à área estudada por SHULER et al. (2000). Os resultados obtidos confirmam a eficiência do *TOPMODEL* em regiões com características de clima úmido e relevo suave. Para regiões montanhosas, possuindo relevo forte ondulado o *TOPMODEL* perde sua eficiência, sendo necessário utilizar outros modelos que sejam apropriados para situações em que o relevo é mais acidentado.

Um exemplo de aplicação de modelo matemático no estudo do processo chuva-vazão em área montanhosa contendo relevo predominante escarpado é encontrado em OLIVEIRA (1999), que realizou um estudo na região da Serra do Mar, município de Morretes, Paraná. A autora aplicou o modelo *TANQUE* nas bacias hidrográficas dos rios Marumbi e Nhundiaquara e os resultados obtidos para a região foram razoáveis. A maior dificuldade encontrada consistiu na obtenção dos picos nos hidrogramas, devido à rápida resposta destes em função das condições de relevo em que se encontram as duas bacias e de suas pequenas áreas. Mesmo assim, concluiu-se no trabalho que a modelagem do processo chuva-vazão é válida, desde que sejam observadas as limitações que os modelos venham a apresentar na representação de fenômenos naturais.

THOMAZ & VESTENA (2003), realizaram um estudo visando a caracterização da precipitação e vazão anual média na bacia do Rio das Pedras e verificaram que: a precipitação média mensal variou entre 130 e 200 mm; os meses de novembro e dezembro apresentaram a menor vazão ($3,2 \text{ m}^3/\text{s}$) e o mês de outubro a maior vazão (17 m^3). Por interferir diretamente na vazão, THOMAZ (2002) avaliou a infiltração da água no solo em áreas de pastagens, capoeira, agricultura mecanizada, plantio direto, agricultura de subsistência, florestas e áreas degradadas. O maior impacto sobre a infiltração da água das chuvas e vazão recaiu sobre as estradas.

As considerações feitas anteriormente, neste item, permitem verificar que o estudo hidrológico de uma bacia de drenagem, empregando-se modelagem matemática, pode ser efetuado sem maiores problemas. No entanto, cuidados devem ser tomados para não superestimar ou subestimar os fenômenos naturais. Para algumas situações, utilizando-se apenas dados de precipitação e vazão de uma bacia é possível simular situações como o uso da água em uma determinada região.

3.2 CICLO HIDROLÓGICO

HONBERGER et al. (1998) define ciclo hidrológico como sendo o processo de recirculação contínua e infinita da água entre a atmosfera, continentes e oceanos. O processo de recirculação da água pode ocorrer na fase sólida (granizo ou neve), líquida (chuva) ou gasosa (vapor d'água). Diretamente na forma de chuva, a água escoar sobre a superfície, infiltra-se no subsolo e aquíferos até atingir os oceanos ou é absorvida pelas plantas, retornando a atmosfera pela evaporação e transpiração, tornando a precipitar-se posteriormente (BARTH et al., 1987). O conhecimento do ciclo hidrológico é fundamental na realização dos estudos hidrológicos e no planejamento das atividades humanas.

O ciclo hidrológico não é um fenômeno isolado, ele resulta de uma interação entre processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos, tendo como agentes dinâmicos a água e o clima. Cada processo interfere e sofre a interferência dos demais processos interagidos. A litosfera age sobre a biosfera como fornecedor de alimentos minerais e orgânicos, servindo de substrato para todos os seres vivos (KOBAYAMA et al., 1998).

Sabe-se que a água distribui-se de maneira irregular no tempo e no espaço. Essa distribuição está condicionada às características geográficas, climáticas e meteorológicas atuantes no ambiente. Em função desta distribuição, observa-se que a vazão média sofre variações sazonais ou multianuais significativas, reduzindo o potencial econômico a ser explorado. BARTH et al. (1987), consideram a água como um recurso natural não renovável, porém, devido ao seu escoamento superficial e pelos aquíferos, ela é um recurso móvel, ao contrário dos recursos minerais não renováveis.

3.3 PROCESSO CHUVA-AZÃO

OLIVEIRA (1999), comenta que o processo chuva-vazão é complexo e engloba não somente a influência hidrológica, mas também a influência da geologia e da biologia, o que demonstra as relações ambientais que compõem o meio. Desta forma, faz-se necessário lançar mão de leis empíricas e hipóteses que auxiliem na compreensão do processo. De acordo com a autora a modelagem matemática é uma ferramenta importante para a compreensão e manejo de bacias hidrográficas.

Para CORDERO et al. (1999), as condições de seca geralmente trazem conseqüências indesejáveis para uma comunidade, como por exemplo o racionamento ou a falta de água. No entanto, os autores consideram que os problemas resultantes da inundação são mais graves nas áreas de várzea, pois estas sofrem constantemente algum tipo de interferência da ocupação humana como moradia, lazer, agricultura e atividades

comerciais e industriais. É importante observar que a inundação é um problema que também promove a erosão.

As inundações podem ocorrer devido a condições meteorológicas e hidrológicas. As condições hidrológicas podem produzir inundações naturais e artificiais e o seu entendimento e tratamento geralmente é mais simples do que as condições meteorológicas. Como condições hidrológicas naturais tem-se o relevo, a cobertura vegetal, a capacidade de drenagem, o tipo de precipitação, entre outros. As condições hidrológicas artificiais são aquelas propiciadas pelo homem, como as obras hidráulicas, urbanização, desmatamento, reflorestamento e uso agrícola. Uma bacia rural caracteriza-se por maior área de interceptação, maior permeabilidade das áreas, menor escoamento superficial e drenagem mais lenta. A bacia urbana possui superfícies impermeáveis e escoamento acelerado, o que resulta no aumento da máxima vazão e escoamento superficial, e redução do tempo de pico e de base. Conseqüentemente, a urbanização e o desmatamento promovem aumento nas freqüências de inundação das pequenas e médias cheias. Nas grandes cheias, o efeito final é menor pois a capacidade de saturação do solo e o armazenamento são atingidos (CORDERO et al., 1999).

Relacionado os fatores hidrológicos naturais e artificiais, SANTOS (2001) ressalta a importância do conhecimento do ponto de equilíbrio da bacia. O autor relata em seu estudo que os cursos de água de perfil côncavo têm a inclinação acentuada em direção às nascentes, decrescendo à medida que se aproximam da desembocadura. Assim, há um estado de equilíbrio no perfil, ou seja, há uma igualdade na atuação dos processos erosivos, transporte e deposição. O perfil de equilíbrio de um rio pode sofrer interferência de fatores com o volume, carga da corrente, tamanho e peso dos sedimentos, declividade, litologia do leito, regime das chuvas, entre outros. O equilíbrio longitudinal do rio pode ser quebrado através de alterações no volume da corrente e na carga de sedimentos. Essas alterações estão relacionadas com mudanças cíclicas das condições climáticas e também com a ação antrópica. A ação antrópica implica diretamente nos canais de drenagem, através de obras de engenharia, ou indireta, nas vertentes que afetam o mecanismo natural dos processos erosivos e no regime hidrológico de toda uma bacia hidrográfica.

Como mencionado anteriormente, as condições meteorológicas apresentam uma complexidade maior que as condições hidrológicas. Fenômenos naturais de proporções globais podem interferir de forma marcante no processo chuva-vazão. É o que se verifica com a ocorrência do fenômeno El Niño, que segundo GIACOSA et al. (2000) consiste em uma elevação anormal das temperaturas das águas do Oceano Pacífico Central – Leste,

sendo este também denominado de Oscilação Sul. Esta oscilação provoca alterações no clima tropical, em especial no regime de precipitações, ocorrendo uma elevação do volume precipitado, normalmente no período de inverno. Há também o fenômeno inverso ao El Niño, denominado de La Niña, que consiste na queda das temperaturas do Oceano Pacífico, interferindo no clima através da diminuição das precipitações.

No Brasil, os efeitos do El Niño são mais discutidos e divulgados devido aos estragos que o mesmo provoca em decorrência de inundações e outros prejuízos para o país devido ao maior volume de chuvas. Para estudos de modelagem matemática, o referido fenômeno foi registrado por PILAR et al. (1998) quando estes aplicaram em uma pequena bacia hidrográfica um modelo numérico para obtenção do Hidrograma Unitário. Neste estudo foram avaliados dois eventos de precipitação, sendo que em um deles registrou-se a presença do fenômeno El Niño. Segundo os autores o El Niño provocou alterações na precisão do modelo e interferiu na confiabilidade do mesmo.

3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS DE CHUVA-VAZÃO

Ao abordar este tópico, é necessário prestar esclarecimento sobre a diferença entre sistema e modelo, pois ambos os termos são comumente utilizados em estudos hidrológicos. TUCCI (1987) considera sistema como sendo um mecanismo que apresenta respostas através de uma saída para uma determinada entrada. Por exemplo, uma bacia hidrográfica que recebe a precipitação e a transforma em vazão. Quanto ao modelo, o autor comenta que este consiste em uma representação do sistema. Assim, um mesmo sistema pode ser representado por diferentes tipos de modelos matemáticos, que podem resultar em respostas semelhantes, mas não comparáveis entre si.

Como os modelos representam um sistema, no caso do processo chuva-vazão em uma bacia hidrográfica, estes necessitam ser alimentados com dados inerentes ao processo a ser estudado. Entretanto, na aplicação de modelos em uma bacia hidrográfica, os resultados podem não corresponder a todas as características envolvidas, mostrando que na modelagem é necessário e importante definir os objetivos em conformidade com o detalhamento e precisão desejada. Há necessidade de equilibrar a simplicidade do modelo com o grau de precisão requerida para a simulação do protótipo, conforme descreve DOOGE (1974).

DOOGE², citado por TUCCI (1987, p. 215), descreve que os modelos podem ser classificados como físico, matemático e analógico. O modelo físico nada mais é do que um

² DOOGE, J. C. I. **Linear theory of hydrologic systems**, ARS, US Department of Agriculture 1973, Technical Bulletin n. 1948.

protótipo ou uma maquete, em uma escala adequada, do sistema que se deseja representar. Os modelos matemáticos ou digitais expressam a natureza do sistema através de equações matemáticas, necessitando muitas vezes de ajustes de calibração para a obtenção dos resultados. Os analógicos valem-se da analogia das equações na determinação de fenômenos complexos, compondo sistema mais convenientes e simples. TUCCI (1998) acrescenta ainda que em função da necessidade e profundidade do estudo, os modelos e sistemas podem ter outros tipos de classificação, podendo ser concentrados ou distribuídos, lineares ou não lineares, contínuos ou discretos, estáticos ou dinâmicos, estocásticos ou determinísticos e conceitual ou empírico.

O uso de modelos de simulação permite a obtenção de informações que evidenciem as variações climatológicas ocorridas devido à ação humana e suas influências no processo chuva-vazão e na disponibilidade de água doce. Utilizando um método de aplicação global, denominado Water GAP Global Hydrology Model (WGHM), DÖLL et al. (2003) testou este modelo em 724 estações de observação. Os dados de entrada necessários na utilização do método foram: informações climatológicas, precipitação e temperaturas mensais, número de dias chuvosos, nebulosidade média diária e irradiação solar. A série histórica de dados utilizada nas análises compreendeu o período de 1901 a 1995. Os resultados obtidos permitiram concluir que é possível obter um grande número de indicadores da disponibilidade da água, com alta confiabilidade, por meio da simulação matemática.

Outro exemplo de aplicação de modelo matemático foi o realizado por LINDEN & WO (2003), em uma bacia localizada abaixo do Círculo Polar Ártico, no Canadá. Neste trabalho, foram aplicados dois modelos matemáticos: um de interpretação física, denominado Semi – Distribute Land Usebased Runoff Processes Model (SLURP), que utiliza dados de séries diárias de precipitação, temperatura, horas de brilho do sol e temperatura do ponto de orvalho; e outro que consistia em um modelo conceitual do balanço hídrico, embutido em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), denominado LIARD FLOW. O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar a necessidade de modelos mais complexos ou simples em áreas situadas em locais subárticos, para a simulação da vazão. A série histórica de dados utilizada compreendeu os anos de 1981 e 1984. Por meio da aplicação destes modelos, os autores concluíram que a necessidade de modelos mais complexos aumenta conforme menor for a escala temporal e espacial a ser avaliada. Também verificaram que a evapotranspiração é um importante parâmetro a ser considerado em grandes bacias.

SHULER et al. (2000) e VARELA & CAMPANA (2000), utilizando o modelo chuva-vazão denominado *TOPMODEL* relatam a necessidade e importância de boas séries de

valores de precipitação e vazão para serem aplicadas no processo de calibração e simulação das vazões estimadas. FUKUSHIMA (1988), ao avaliar o fenômeno chuva-vazão com um modelo denominado *HYCYMODEL*, trabalhou com uma série histórica de dados diários de precipitação e vazão para um período de 10 anos, com leituras horárias. Nos modelos matemáticos de chuva-vazão somente os valores de precipitação e vazão são considerados como variáveis de entrada e são necessários para alimentar os referidos modelos hidrológicos com a finalidade de avaliar os efeitos nas vazões estimadas (SILVA & EWEN, 2000).

Há citações na literatura que apresentam o uso de vários modelos específicos em simulação matemática do processo chuva-vazão, demonstrando a diversidade de técnicas e o interesse pelo assunto, o que pode gerar dúvidas sobre qual o modelo a ser escolhido. Neste caso, vale a regra sugerida por DOOGE (1974), que consiste em selecionar um modelo que use um pequeno número de parâmetros. Por este critério é possível aumentar o conteúdo de informações por parâmetro, e assim, a correlação com as características da bacia também aumenta de forma segura. É importante observar também que um sistema de bacia hidrográfica consiste em um sistema não linear.

Os sub-itens a seguir apresentam alguns modelos utilizados em estudos de bacias hidrográficas.

3.4.1 Método do Hidrograma Unitário

SHERMAN (1932), descreveu o Método do Hidrograma Unitário, que é um dos modelos mais antigos utilizado para estimar as vazões máximas esperadas. A abordagem teórica deste modelo leva em consideração conceitos como: o tempo básico de uma hidrógrafa, também denominada de tempo de base, que compreende o início e o fim do escoamento superficial; o tempo de concentração, que é o tempo necessário para restaurar o equilíbrio entre a taxa de precipitação e a vazão consequente; o tempo de resposta da bacia, que é o tempo necessário do contato da água da chuva com o solo e a detecção da ascensão da hidrógrafa; tempo efetivo de precipitação, o qual relaciona-se com o problema da interceptação e infiltração.

O Método do Hidrograma Unitário apresenta três hipóteses a serem consideradas. A primeira considera que as ordenadas de uma hidrógrafa unitária são proporcionais ao volume total do escoamento produzido pela precipitação uniforme. A segunda hipótese considera que o tempo de base é praticamente constante e a terceira hipótese leva em conta que a relação entre o escoamento de um certo intervalo de tempo e o escoamento total é constante para todas as hidrógrafas unitárias de uma mesma bacia.

3.4.2 Modelo *STANFORD WATERSHED MODEL*

O modelo *STANFORD WATERSHED MODEL*, foi um dos primeiros programas desenvolvido para simular a vazão de cursos hídricos em computador. Este programa foi desenvolvido por LINSLEY et al. (1958) e os principais dados de entrada para computação do balanço hídrico são a precipitação horária e evapotranspiração potencial diária. A bacia é separada em segmentos que representam os diferentes tipos e usos do solo, vegetação presente e a precipitação. Cada segmento é descrito com um conjunto de parâmetro que representam as suas características físicas específicas. O modelo permite trabalhar com um grande número de segmentos, o que melhora a representação das diferentes características presentes nos limites da bacia avaliada. Entretanto, cada segmento adicional acaba por aumentar as exigências do computador na realização das simulações. Para agilizar este trabalho, faz-se necessário o uso de computadores mais potentes elevando o custo operacional e encarecendo a aplicação do modelo. O modelo oferece ainda informações precisas como resultado da modelagem computacional, porém, apresenta o inconveniente de demandar muito tempo para processar as análises quando comparado com outros modelos matemáticos.

3.4.3 Modelo *TOPMODEL*

O modelo *TOPMODEL* foi desenvolvido inicialmente por BEVEN & KIRKBY (1979) e, ao longo do tempo, em função das necessidades de diferentes autores, vem sendo aprimorado.

VARELLA & CAMPANA (2000) descrevem a aplicação do *TOPMODEL* na região da bacia do Rio Descoberto, compreendida na sua maior parte no Distrito Federal e uma pequena parte no Estado de Goiás. O modelo *TOPMODEL* permite o cálculo da vazão em uma determinada seção do rio, podendo considerar a bacia como um todo ou subdividi-la em várias sub-bacias. As entradas do modelo e os valores de precipitação potenciais, para a bacia como um todo, são considerados homogêneos e assumidos como valores médios. Os autores relatam também, que o *TOPMODEL* baseia-se em hipóteses com a dinâmica e gradiente hidráulico da zona saturada, representada pela declividade do terreno. Esta última hipótese é incorporada ao modelo como índice topográfico. No estudo realizado foram utilizados 10 parâmetros para a determinação do processo de chuva-vazão na bacia do Rio Descoberto.

SHULER et al. (2000) também utilizou o *TOPMODEL* para analisar os parâmetros físicos do modelo na bacia do Rio Corumbataí. Este modelo utiliza como parâmetros de

entrada dados de chuva, vazão e evapotranspiração. Analisando a sensibilidade dos parâmetros, os autores obtiveram resultados que permitiram dar sugestões para possíveis modificações em aplicações futuras. Na realização do trabalho os autores fizeram uma análise espacial da topografia da bacia, através do *SIG ARC-INFO*, sendo esta a principal etapa da modelagem. Segundo os autores, o *TOPMODEL* possui como vantagem o fundamento nos aspectos físicos da bacia e como desvantagem a entrada dos dados da evapotranspiração, que dificultam a sua utilização.

A utilização de um modelo matemático que necessita apenas dos parâmetros chuva e vazão na entrada, fornecendo valores de evapotranspiração na saída para uma bacia contendo grande área, tem por objetivo a redução de tempo e custo na determinação do processo chuva-vazão de uma região.

3.4.4 Modelo *TANQUE*

O modelo *TANQUE* foi apresentado por SUGAWARA (1961). Segundo OLIVEIRA (1999), o modelo *TANQUE* possui uma teoria simples que é muito utilizada por apresentar excelentes ajustes às características físicas de uma bacia hidrográfica. No entanto, citando observações feitas por OZAKI³, OLIVEIRA (1999, p. 18) relata ainda que a estrutura e os parâmetros do modelo *TANQUE* são determinados de maneira muito subjetiva.

3.4.5 Modelo *HYCYMODEL*

O modelo *HYCYMODEL* foi apresentado por FUKUSHIMA (1988), que o utilizou na cadeia de montanhas Kiryu, no Japão. Através deste modelo, o autor estimou a variação mensal da evapotranspiração em um balanço hídrico para um curto período (um ano) e mediu a interceptação da precipitação, entre outros. O modelo já foi aplicado para avaliar a influência do aquecimento global sobre o ciclo hidrológico em períodos anuais, de junho de 1985 a julho de 1986, na bacia do Vale de Langtang, no Nepal. Esta bacia de drenagem possui 333 km² e está localizada entre uma cadeia de montanhas com altitude de 7.000 metros, recoberta com geleira (FUKUSHIMA et al., 1991).

O *HYCYMODEL* também foi utilizado em áreas vulcânicas, localizadas no Japão e Indonésia (Ilha de Java), onde se quantificou o volume de água da chuva que escoava sobre as encostas de áreas vulcânicas para áreas não vulcânicas. A aplicação do *HYCYMODEL* possibilitou: compreender o fenômeno do escoamento da chuva; desenvolver outro modelo para estimar a vazão do rio principal da bacia de drenagem; auxiliar na investigação do

³ OZAKI, T. On a model of a non-linear feedback system for river flow prediction. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, 1980. p. 223-231.

deslocamento de sedimentos (ocorrência de erosão). Observou-se que o material vulcânico que recobre as montanhas, apesar de muito espesso, tem alta permeabilidade, resultando em elevada capacidade de armazenamento de água, mesmo em eventos de chuva torrencial. Os autores concluíram que a influência do escoamento direto superficial é pequena, devido ao baixo volume de vazão constatado (KUBOTA et al., 1996).

Em regiões de clima subtropical e de monções, como na bacia do rio Julianshan na China, TANAKA et al. (1998) utilizou o modelo *HYCYMODEL* para calcular o balanço hídrico anual, a taxa de transpiração potencial e a vazão. Os dados utilizados nas análises compreenderam o período entre 1990 e 1994. Comparando os resultados obtidos com outras bacias localizadas no Japão, onde o *HYCYMODEL* foi utilizado, os autores concluíram que apesar da vazão total e do fluxo de base da bacia do rio Julianshan ser semelhante aos rios das bacias japonesas, a hidrógrafa encontrada é diferente.

Em um estudo mais abrangente, ARIYAKANON (2000) aplicou o modelo *HYCYMODEL* em bacias possuindo cobertura florestal para avaliar os efeitos do desmatamento ao longo do tempo sobre o escoamento superficial e a vazão. O autor também estudou a diferença entre os cálculos realizados com a entrada de dados horários e diários e aplicou uma variável de eficiência estatística na validação dos valores ideais de erro.

O modelo *HYCYMODEL* também foi utilizado por SAGARA (2001) em uma pequena bacia hidrográfica no município de General Carneiro, região sul do estado do Paraná. Em um período curto do balanço hídrico, entre julho de 2000 e junho de 2001, o autor obteve um bom ajuste entre as vazões calculadas e observadas.

A facilidade de execução, o baixo custo, a rápida obtenção dos resultados e as possibilidades de simulação de experimentos inviáveis na prática, são condições primordiais para o uso de modelos matemáticos (OLIVEIRA, 1999). Além dos itens relacionados anteriormente, FUKUSHIMA (1988) descreve que um modelo deve apresentar também as seguintes características: (a) ser tão físico quanto possível, sendo que o submodelo individual deve incluir resultados prévios correspondentes; e (b) ter parâmetros individuais independentes do tempo por causa da necessidade de aplicar dados com um intervalo de tempo opcional. Sobre esses aspectos, KUBOTA et al. (1996) relatam que o modelo *HYCYMODEL* é de fácil operação e não gera elevados custos para ser utilizado.

Desta forma, observa-se que o modelo *HYCYMODEL* apresenta-se como uma boa opção a ser utilizado em estudos de quantificação do volume de água disponível. Apenas com os parâmetros de chuva e vazão é possível obter informações para simular o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

3.5 PRINCIPAIS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DO BALANÇO HÍDRICO

3.5.1 Precipitação

A precipitação é um importante componente do ciclo hidrológico e origina-se a partir da condensação do vapor d'água que cai sobre o solo de forma dispersa. A maior parte da precipitação fica temporariamente retida no solo, retornando à atmosfera por meio da evaporação e da transpiração vegetal, o restante escoar sobre a superfície do solo até os rios ou penetra nas camadas mais profundas do solo, até o lençol de água subterrânea. Sua ocorrência é influenciada por outros fatores climáticos ou meteorológicos, como por exemplo: posição da região em relação à circulação geral da atmosfera, ocorrência de umidade, distribuição da temperatura e vento na atmosfera (VILLELA & MATTOS, 1975). Os valores horários ou diários de precipitação e vazão constituem-se nos principais dados hidrológicos de entrada necessários para estimar o balanço hidrológico de uma bacia hidrográfica, em um modelo do tipo chuva-vazão.

O conhecimento da probabilidade da chuva ao longo dos meses do ano é importante para a elaboração de projetos agrícolas, conforme pode ser verificado nos trabalhos de CASTRO NETO & SILVEIRA (1983), ANDRADE JUNIOR & BASTOS (1997), CUNHA et al. (1997) e RIBEIRO & LUNARDI (1997). Para tanto, é necessária a obtenção de uma série temporal de dados de precipitação, a fim de efetuar uma análise estatística dos mesmos, o que permite averiguar a frequência que determinada chuva venha a ocorrer (CASTRO NETO & SILVEIRA, 1983; SEDIYAMA et al., 1996). Segundo ASSIS et al. (1996), a análise estatística de dados climatológicos deve ser realizada em séries compreendendo um período mínimo de 25 anos.

Utilizando dados de precipitação de uma série temporal de 29 anos (1962 a 1990), no município de Uruçuí, no cerrado do estado do Piauí, ANDRADE JUNIOR & BASTOS (1997) fizeram um estudo do ajuste das frequências das chuvas nesta localidade. Entre algumas das observações, destaca-se o fato de que: o ajuste em pequenos intervalos de dias da precipitação pluviométrica foi limitante, pois tende a levar o valor para zero; a curva obtida assume um aspecto que sugere uma exponencial negativa no ajustamento. Os autores adotaram neste trabalho períodos de agrupamento dos dados de 10 dias (decêndios) e aplicou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de significância.

CUNHA et al. (1997) realizaram um estudo da distribuição e variabilidade da disponibilidade da água ao longo do ano, baseados em uma série temporal de 38 anos

(1953 a 1990). O levantamento foi realizado em seis municípios da região administrativa de Bauru, Estado de São Paulo, nos níveis de 20%, 30%, 50%, 70%, 75% e 80% de probabilidade. O nível de 75% de probabilidade, citado pelos autores como a probabilidade recomendada para projetos agrícolas, apresentou valores de chuvas maiores que o valor médio de chuva, que ficou entre 30% e 50%.

RIBEIRO & LUNARDI (1997) ajustaram a distribuição gama a uma série temporal de chuvas ocorridas em 34 anos (1961 a 1994), a um nível de 75% de probabilidade. Os dados de alturas de precipitação foram obtidos em Londrina, Estado do Paraná e agrupados em quinzenas. No trabalho, os autores constataram a homogeneidade da série de dados após a aplicação do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov e concluíram que é necessário realizar irrigação para suprimir a demanda de água nos pequenos períodos de seca que ocorrem na região.

A distribuição Gama é a distribuição que melhor se ajusta às freqüências observadas dos totais de precipitação para períodos mensais ou menores (quinzenas, decêndios, pântadas) (ASSIS et al., 1996). A comprovação do uso da distribuição gama no ajuste de freqüências se traduz nos diversos trabalhos encontrados na literatura. Com relação ao tratamento dos dados, SEDIYAMA et al. (1996) eliminaram os meses que apresentaram a falta de um ou mais elementos, bem como o último elemento nos meses de fevereiro em anos bissextos. RIBEIRO & LUNARDI (1997), em análises com dados de precipitação consideraram o último dia do mês de fevereiro nos anos bissextos.

3.5.2 Infiltração e armazenamento de água no solo

A infiltração é entendida como a passagem da água superficial para camadas interiores do solo. Esta componente do balanço hídrico é diretamente influenciada pelo tipo de solo que estabelece a velocidade de infiltração, além das quantidades iniciais de água e ar presentes no interior do mesmo. O mecanismo da infiltração ocorre de cima para baixo, ou seja, a água satura inicialmente a superfície e vai alterando posteriormente o perfil de umidade nas camadas mais profundas (SILVEIRA et al., 1993).

A capacidade de infiltração relaciona-se ao potencial de absorção que um determinado solo possui. Por sua vez, este potencial refere-se ao fluxo de drenagem interna do solo, chegando-se então ao conceito de capacidade de campo de Richardt, citado por PREVEDELLO (1999).

Quando cessa a infiltração em um solo, uma parte da água propaga-se para camadas mais profundas e outra parte é transferida para a atmosfera, pela evaporação e

pela transpiração dos vegetais. Assim, o solo recupera sua capacidade de infiltração, que é perdida quando há a coincidência da curva das capacidades de infiltração com as taxas reais de infiltração. Isto ocorre quando a intensidade do aporte de água, proveniente das precipitações ou do escoamento superficial de outras áreas, for superior ou igual à capacidade de infiltração. Quando um solo em seu estado natural é atingido por uma precipitação de intensidade menor que sua capacidade de infiltração, ocorre uma diminuição nesta capacidade, pois o solo está umedecendo. Se a precipitação persistir, chegará um determinado momento em que a capacidade de infiltração se igualará a da precipitação. Neste ponto, a infiltração real atinge as mesmas taxas que a curva da capacidade de infiltração, que decresce exponencialmente. Ao encerrar a precipitação o acréscimo de água cessa, a taxa de infiltração real anula-se e a capacidade de infiltração volta a crescer (SILVEIRA et al., 1993).

KUBOTA et al. (1996) observaram que o material vulcânico de origem recente, apesar de muito espesso, tem alta permeabilidade e possibilita elevada capacidade de armazenamento de água, mesmo na ocorrência de eventos de chuva pesada ou torrencial. O material de origem da bacia hidrográfica do Rio das Pedras consiste no Arenito Botucatu, que está sob o Basalto (material vulcânico ou magmático). A deposição desse material ocorreu pela erupção do magma através de grandes fissuras e longas fendas na superfície a cerca de 120 milhões de anos (BIGARELLA 1994). Como a bacia do Rio das Pedras tem uma formação muito antiga, a intemperização do solo deve ser levada em consideração, pois provavelmente altera as características de permeabilidade e capacidade de armazenamento de água da bacia frente às descrições observadas por KUBOTA et al. (1996).

3.5.3 Evapotranspiração

O interesse pela evapotranspiração vem desde os tempos dos antigos gregos e romanos, que já tentavam determinar as taxas de perda de água (AMORIM et al. 1999). Apesar deste interesse, não havia uma definição adequada para esse fenômeno, o que tornava difícil entendê-lo. THORNTHWAITE (1948) definiu a evapotranspiração potencial (ET_p) como sendo a água evaporada e transpirada em uma superfície natural, coberta por uma vegetação em fase de crescimento ativo, sem restrição de água no solo. Na ausência de qualquer uma dessas condições, a evapotranspiração que está ocorrendo passa a denominada-se evapotranspiração real (ET_r) (SOUZA, 1992).

Em bacias hidrográficas, a evapotranspiração é um fenômeno difícil de ser determinado, conforme afirma BARTH et al. (1987). Isso porquê as taxas de evapotranspiração variam com a influência dos ventos, tipo e estágio de desenvolvimento da cobertura vegetal presente em toda a extensão da bacia, horas de sol, tipos de solo, entre outros. A evapotranspiração resulta da presença de energia disponível e para que possa ocorrer a evaporação de 1 g de água é necessária 583 cal a 25° C (REICHARDT, 1996).

Muitos fatores locais influenciam a evapotranspiração de culturas, tais como capacidade de retenção de água do solo, salinidade, método de irrigação, dentre outros. ESPÍNDOLA SOBRINHO et al. (1989) comentam que é necessário determinar todos os fatores que influenciam as relações água-solo-planta-atmosfera, para estabelecer um balanço da água recebida da chuva e, ou, irrigação e aquela perdida através de processos como a evapotranspiração, escoamento superficial e percolação. A evapotranspiração é importante para o planejamento do uso dos recursos hídricos, pois representa a maior perda de água no ciclo hidrológico.

Na modelagem matemática do processo chuva-vazão de uma bacia hidrográfica, a evapotranspiração depende do volume precipitado e da vazão resultante, pois a mesma é componente do ciclo hidrológico. A interferência da evapotranspiração sobre a modelagem matemática inicia na evaporação da água das chuvas interceptadas pelas copas das árvores. A cobertura vegetal, o tipo e o estágio do desenvolvimento dos vegetais influenciam a evaporação. Existe também a evaporação que ocorre nos canais de escoamento, que participa da evapotranspiração e interfere na modelagem matemática do processo chuva-vazão (FUKUSHIMA, 1988). Na seqüência, ocorre a perda de água pela transpiração, em função da água do solo absorvida pelas plantas. A transpiração é controlada pela resistência dos estômatos e decresce em condições de déficit hídrico (MEYER et al., 1973). A obtenção de resultados mais confiáveis na modelagem matemática do processo chuva-vazão necessita das taxas e, ou, parâmetros de evapotranspiração, pois desta forma toda a água presumida que entrou na bacia, por meio da precipitação da chuva, será computada.

A evapotranspiração exerce também considerável influência no cálculo da taxa de infiltração, pois a presença da cobertura vegetal sobre o solo atuará como agente interceptador da água precipitada, que juntamente a água superficial sofrem o efeito da evaporação. As raízes da cobertura vegetal retiram do solo uma parte da umidade oriunda do escoamento subsuperficial, sendo que esta umidade volta para a atmosfera em forma de vapor, pela transpiração (SILVEIRA et al., 1993).

Devido à importância que a evapotranspiração tem no campo agrônomo e econômico e, também, em decorrência das dificuldades de se obter as suas medidas em campo, inúmeros autores desenvolveram métodos que permitem a sua estimativa. DOORENBOS & PRUITT (1977) relacionaram 31 fórmulas de estimativa da ET_p , bem como as respectivas variáveis necessárias a sua utilização. SEDIYAMA (1987) comenta a existência de aproximadamente 50 métodos de cálculo da ET_p e descreve 10 dos principais métodos mais utilizados na época. VILLA NOVA & REICHARDT (1989) relacionaram vários métodos de medida e estimativa da ET_p que seriam mais usuais ou teriam maior aplicação às condições brasileiras de solo e clima. PEREIRA et al. (1997) comentam que a bibliografia sobre evapotranspiração é riquíssima e citam a referência de doze trabalhos que dispõem de vasta revisão bibliográfica sobre o tema. Os mesmos autores descrevem e exemplificam a utilização de 17 métodos de estimativa da ET_p , distribuídos dentro das categorias empírico, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação dos turbilhões.

Segundo SOUZA (2001) os métodos de Thornthwaite e Tanque Classe A são utilizados com frequência devido à simplicidade e rapidez nos cálculos da evapotranspiração, no entanto, a precisão e exatidão das suas estimativas dependem muito do local e da época do ano em que foram realizados os trabalhos. Os métodos de Penman e Penman-Monteith são utilizados por serem mais consistentes e terem condições de estimar melhor a ET_p na escala diária. No entanto, o grande número de informações climáticas necessárias mostra-se como o grande problema para o emprego generalizado dos mesmos, já que em algumas regiões brasileiras não é possível encontrar nem dados de temperatura.

Estudando a evapotranspiração do Estado do Paraná, MÜLLER (1995) efetuou o cálculo da evapotranspiração potencial, real e de lago em 51 estações meteorológicas distribuídas em todo o Estado, utilizando sete métodos de determinação. Para a evapotranspiração potencial, a autora utilizou os métodos de Penman, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves e CRAE. Para obter a evapotranspiração real, utilizaram-se os métodos de CRAE, Penman, Turc e CRLE. A evapotranspiração de lago foi determinada pelo método de CRLE. Neste trabalho, a autora constatou que os métodos de Thornthwaite e Blaney-Criddle devem ser utilizados com cautela na determinação da evapotranspiração potencial e o método de CRAE foi razoável na determinação da evapotranspiração real. O método de Penman apresentou limitação, devido a falta de dados necessários para a sua utilização. Segundo a autora, os valores de evapotranspiração no Estado Paraná crescem da região sudeste para noroeste.

3.5.4 Vazão

Conforme definiu FOSTER (1949), a vazão pode ser entendida como toda a água drenada pela terra por canais superficiais dentre os quais a água é coletada dos fluxos terrestres ou passagens subterrâneas. Essa água é remanescente da precipitação, após as perdas por evaporação, transpiração e infiltração para o lençol freático. É a última fase do ciclo hidrológico, embora nem toda a água do ciclo passe por esta fase.

Para TUCCI (1993), a vazão é a variável que representa quantitativamente o escoamento superficial, sendo representada graficamente pelo hidrograma, o qual relaciona a vazão com o tempo. Normalmente, após o início de uma chuva em uma bacia típica, a elevação do nível da água apresenta a tendência de ocorrer somente a partir de um determinado intervalo de tempo. Este fenômeno relaciona-se com a interceptação da água da chuva pela vegetação e pelas depressões do solo, que geram a retardamento na resposta da elevação do nível da água. TUCCI (1993) enumera ainda os seguintes fatores que interferem na vazão em uma bacia hidrográfica: relevo; cobertura vegetal da bacia; modificações artificiais no rio; distribuição, duração e intensidade da precipitação; e as condições iniciais de umidade do solo.

3.6 FRAGILIDADE AMBIENTAL

Os estudos relacionados à decisão da melhor alternativa para o uso dos solos no Brasil são recentes. Na década de 1960, BENNEMA et al. (1964) apresentaram uma proposta para a avaliação da aptidão agrícola das terras. Esta proposta foi pioneira em se tratando de planejamento ambiental relacionado com o uso do solo, entretanto, abrangia apenas o ambiente das atividades agrícolas, atendendo às lavouras de ciclo curto e longo, juntamente com sistemas de manejo. A partir desta proposta, outros trabalhos similares foram desenvolvidos, visando aperfeiçoar o sistema de avaliação, conforme está apresentado nos itens abaixo:

(a) A metodologia desenvolvida por RAMALHO et al. (1978), intitulada Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola, é um exemplo de aperfeiçoamento da proposta de BENNEMA et al. (1964), que foi desenvolvida com o apoio da EMBRAPA e órgãos de governos estaduais das cinco regiões do país. Os autores citam que o desenvolvimento da metodologia fundamentou-se também nas orientações do "Soil survey manual"⁴ e na metodologia da FAO (1976), que recomendavam a avaliação da aptidão agrícola das terras baseando-se em resultados de levantamentos sistemáticos, realizados com o suporte de atributos como o

solo, clima, vegetação, geomorfologia, entre outros. O termo terra é considerado em sentido amplo, incluindo todas as suas relações ambientais. A metodologia considera diferentes níveis de manejo (primitivo, pouco desenvolvido e desenvolvido), grupos, subgrupos e classes de aptidão agrícola das terras, com a finalidade de localizar as áreas distintas com os diferentes graus de limitação e obter a classificação da aptidão agrícola do terreno.

(b) A metodologia apresentada por LEPSCH et al. (1991), baseia-se na classificação das terras, denominada de Sistema de Capacidade de Uso. Essa metodologia, originalmente foi desenvolvida nos Estados Unidos, e consiste em avaliar as condições de uso da terra por meio técnico-interpretativo, sintetizando as suas diversas características e propriedades, visando obter classes homogêneas de terras, para definir sua máxima capacidade de uso, sem o risco da degradação do solo. Esse sistema apresenta categorias classificadas em hierarquia que se dividem em grupos, classes, subclasses e unidades de capacidade de uso. Efetua-se o levantamento das limitações através das condições climáticas presentes, do solo, do excesso de água e pela erosão presente ou risco de erosão, avaliando a pedregosidade, risco de inundação e secas prolongadas, mudanças texturais e condições químicas do solo.

(c) Para estudar a relação entre o espaço geográfico em conjunto com a análise espacial, ROSS (1994) propôs uma metodologia para a análise empírica da fragilidade ambiental. Esta metodologia foi desenvolvida para estudar tanto ambientes em condição naturais quanto sob ação antrópica. As avaliações são realizadas integrando os setores do estrato geográfico (solos, relevo, rochas, clima, flora, fauna, etc.) que dão suporte à vida animal e humana. A idéia central consiste em avaliar os efeitos da intervenção humana ao longo do tempo sobre os sistemas ambientais, relacionados com o desenvolvimento tecnológico, científico e econômico das sociedades humanas. Para a avaliação dos efeitos da intervenção humana sobre os sistemas ambientais é necessário o conhecimento das potencialidades dos recursos naturais, que se relacionam com as condições gerais do solo, relevo, clima e regime hídrico. Esta metodologia baseia-se no conceito de Unidades Ecodinâmicas de TRICART⁵, que avalia a fragilidade partindo de aspectos ambientais potenciais e emergentes. A Fragilidade Potencial compreende as integrações dos elementos físicos naturais, como a geomorfologia, tipos de solo, declividade, geologia entre outros. A Fragilidade Emergente, compreende a análise integrada da fragilidade potencial do meio natural com o tipo de uso do solo.

⁴ ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil survey manual**. Washington, 1951. 503 p (USDA Agriculture Handbook, 18).

⁵ TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro, IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977.

SPÖRL (2001) considera que o homem, ao fazer parte do ambiente como um elemento ativo é capaz de modificar a paisagem, pois possui a capacidade de alterar solos, vegetação, condições hidrológicas, formas de erosão e introduzir alterações no sistema que podem propiciar o desequilíbrio, colapso ou novos arranjos que atingem o estado de equilíbrio funcional. A princípio, os ecossistemas naturais mostravam-se em equilíbrio dinâmico, no entanto, com o progresso das sociedades humanas, uma intervenção cada vez mais intensa na apropriação destes recursos vem ocorrendo. O avanço tecnológico, científico e econômico provocou rápidas modificações nos sistemas de produção e, este novo cenário, proporcionou alterações irreversíveis sobre o meio ambiente.

Sendo assim, uma visão global relacionando o homem e o ecossistema é fundamental quando se pretende trabalhar com diagnósticos ambientais. Para ROSS (1995), entendimentos parciais da realidade podem induzir e decisões erradas ou insatisfatórias para efetuar um planejamento ambiental para o uso do solo. RODRIGUES (1997) ressalta que o reconhecimento das formas de utilização da terra é fundamental para o planejamento direcionado a uma política de ocupação do espaço com a intenção de manter e melhorar as condições de vida atual e futura. Os dados sobre o uso da terra são imprescindíveis para a metodologia de análise da fragilidade e problemas ambientais.

A contribuição de uma metodologia baseada em estudos de fragilidade ambiental está em servir de subsídio para uma gestão territorial planejada e sustentável, que evite problemas de ocupação desordenada (SPÖRL, 2001).

O estudo da fragilidade ambiental deve iniciar com a observação da natureza do espaço geográfico e da análise espacial. O espaço geográfico é constituído por toda a superfície terrestre que abrange o meio sólido (litosfera), líquido (hidrosfera), gasoso (atmosfera) e vivo (biosfera), ou seja, engloba um sistema ambiental de equilíbrio complexo que é verificado através de rochas, montanhas, vales, rios, florestas, campos, lavouras, entre outros. A análise espacial consiste na descrição, classificação e comparação de mapas. Primeiro é realizado uma descrição e classificação individual de alguns mapas e, posteriormente, realiza-se uma comparação entre dois ou mais mapas, identificando as relações existentes entre eles e incrementando a funcionalidade de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) (PAREDES, 1994),

Autores como THOMAZ (2000), SPÖRL (2001), DONHA (2003), DETONI et al. (2004) e PENTEADO et al. (2004) adotaram a metodologia da análise empírica da fragilidade ambiental proposta por ROSS (1994) e conseguiram gerar boas informações para um planejamento adequado de uso do solo.

Estudando a geomorfologia ambiental no município de Guarapuava, região centro sul do Estado do Paraná, THOMAZ (2000) relata que o desenvolvimento sócio-econômico deste local foi ligado à exploração dos recursos naturais (tropeirismo, erva-mate, madeira, sistema faxinal e agropecuária comercial). Como as práticas de manejo agropecuárias foram inadequadas, ocorreu a compactação do solo e, conseqüentemente, a diminuição da infiltração e da capacidade de armazenamento de água no solo. Como a região apresenta pluviosidade média de 1960 mm/ano, o fato da compactação resultou em um elevado potencial erosivo, agravado pelas características morfopedológicas (relevo-solo). Nesse diagnóstico, ao aplicar a metodologia de ROSS (1994), o autor conseguiu obter bons resultados para colaborar no planejamento agrícola da região.

Na região de Curitiba, no Centro de Estações Experimentais do Cangüiri, Universidade Federal do Paraná, que se encontra na APA do Rio Irai, DONHA (2003) determinou a fragilidade ambiental através do conhecimento do espaço geográfico e das potencialidades dos recursos naturais aplicando a classificação de ROSS (1994) com múltiplos critérios. Após a digitalização da carta planialtimétrica, a autora determinou para o local a declividade, a rede de drenagem, o tipo e uso dos solos com o auxílio do *software Idrisi 3.2*. O programa utilizado mostrou-se eficiente na análise e geração das imagens de fragilidade e possibilitou identificar que a área estudada possui baixa fragilidade potencial e emergente.

Na bacia hidrográfica da Serra Negra, região litorânea do Paraná, PENTEADO et al. (2004) também aplicou a metodologia de ROSS (1994) e constatou que a maior parte da área da bacia encontra-se preservada e que a fragilidade emergente foi menor que a potencial em razão da pequena ocupação humana. A autora ressalta a importância de se planejar racionalmente a ocupação ambiental de uma bacia hidrográfica como a da Serra Negra, devido à presença marcante da Floresta Atlântica e da diversidade da fauna e flora existente no interior da bacia estudada.

O conhecimento das fragilidades presentes no sistema de uma bacia hidrográfica, através da integração de diversas variáveis que interferem nas potencialidades dos recursos naturais, possibilita compreender a realidade e obter uma visão mais clara sobre quais são as opções mais adequadas para o uso do solo na mesma (SPÖRL, 2001).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA BACIA.

A bacia do Rio das Pedras localiza-se no município de Guarapuava, região Centro-Sul do estado do Paraná. As coordenadas geográficas da bacia foram obtidas da Carta Topográfica de Guarapuava, editada pelo Ministério do Exército (1972), estando situadas entre as latitudes 25° 12' S e 25° 26' S, entre as longitudes 51° 13' W e 51° 28' W, com área de 327,88 km² e extensão do rio principal de 57 km. A bacia desenvolve-se no reverso da escarpa basáltica, localmente denominada Serra da Esperança, sendo que para oeste chega-se a limitar com o perímetro urbano de Guarapuava, iniciando a 1280 m de altitude na Serra da Esperança e terminando na sua foz a 950 m de altitude (Figuras 4.1 e 4.2).

Devido a sua localização geográfica, o clima regional da bacia tem a sua configuração influenciada pelas seguintes massas de ar: Massa Polar Atlântica (MPA), Massa Tropical Atlântica (MTA), Massa Tropical Continental (MTC) e Massa Equatorial Continental (MEC) (THOMAZ & VESTENA, 2003). O conhecimento das massas de ar reflete no modelo matemático a ser utilizado, quando este necessita de dados como precipitação e vazão. Assim, sabe-se que no verão há um aumento das massas MTC e MEC, quando ocorrem as maiores médias de precipitação na região. A partir do outono, a massa MPA começa a se tornar mais ativa. No inverno, as massas MTA e principalmente a MPA, atingem seus picos de força, provocando ondas de frio nesta região. Conseqüentemente, reduz-se a precipitação média, que volta a elevar-se na primavera, quando ocorre gradativamente o enfraquecimento da MPA e o fortalecimento da MTA e outras massas intertropicais, sendo comum chuvas torrenciais. A classificação climática do município de Guarapuava, segundo Köppen, classifica-se como Cfb, o que significa que o clima é pluvial, sempre úmido, com verões chuvosos e frescos (MAACK, 1981).

A vegetação original da bacia é composta basicamente pela floresta subtropical perenifólia, possuindo explorações agropecuárias (milho, feijão e pastagens) e reflorestamento (pinus e bracatinga) (LIMA, 1999).

O Rio das Pedras une-se ao Rio Bananas aproximadamente 2 km ao sul da cidade de Guarapuava, formando o Rio Jordão que se prolonga por 140 km até atingir o Rio Iguazu em sua margem direita.

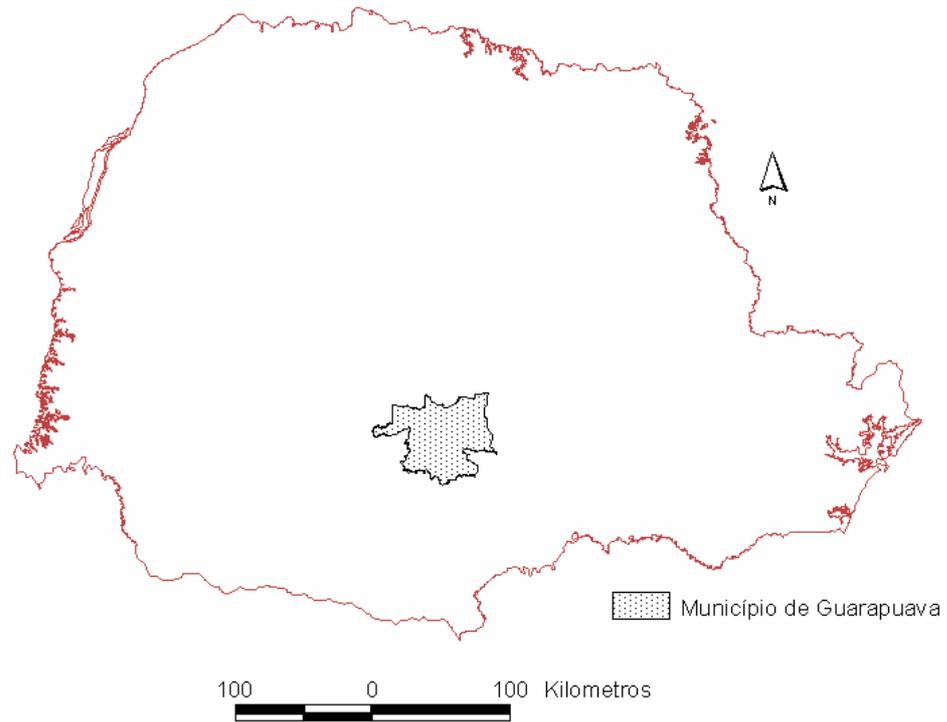


Figura 4.1 – Localização do município de Guarapuava no Estado do Paraná.

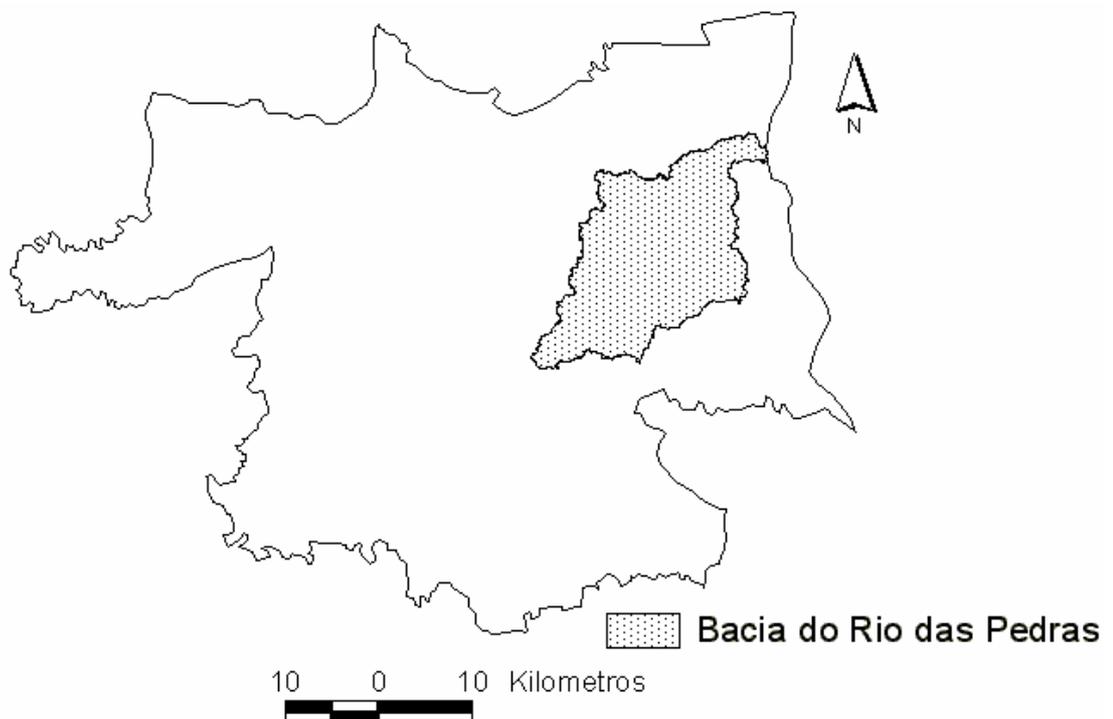


Figura 4.2 – Localização da bacia do Rio das Pedras no município de Guarapuava.

4.2 MODELO *HYCYMODEL*

O modelo utilizado neste trabalho para estimar o processo chuva-vazão da bacia do Rio das Pedras foi o *HYCYMODEL*. Este modelo foi desenvolvido por FUKUSHIMA (1988) e o seu ambiente de trabalho foi elaborado no *software Fortran PowerStation*. Basicamente, o seu funcionamento está condicionado a um esquema de cinco Tanques (I a V), conforme está apresentado na Figura 4.1.

4.2.1 Dados para processar as análises

A caracterização do processo chuva-vazão no *HYCYMODEL* é realizada basicamente com as variáveis chuva e vazão. Para realizar as análises no referido modelo, os dados de precipitação utilizados foram obtidos junto ao Instituto Meteorológico SIMEPAR, na Estação IAPAR 2551010, em Guarapuava. Os dados compreendem leituras realizadas diariamente, uma vez ao dia, desde junho de 1973 até dezembro de 2002. Os dados de vazão compreendem o período de 14 de março de 1985 a 31 de dezembro de 2002, e foram obtidos na Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA), na Estação de Captação SANEPAR 65809000, situada no município de Guarapuava, nas coordenadas 25° 23' 52" de latitude Sul e 51° 26' 09" de longitude Oeste, a 950 metros acima do nível do mar.

4.2.2 Descrição do funcionamento do modelo *HYCYMODEL*

A partir deste ponto, entre os subitens 4.2.2 e 4.2.8, devido à complexidade das equações e parâmetros envolvidos no modelo *HYCYMODEL*, será realizada uma descrição metodológica resumida das partes principais do modelo, tal como foi apresentada por FUKUSHIMA (1988) em seu trabalho original.

Na Figura 4.1, os tanques que apresentam a borda superior reta ou retangular representam um sistema linear e aqueles que apresentam bordas superiores abertas representam um sistema não linear. O modelo distribui a precipitação $R(t)$ nos tanques e a subdivide em subsistemas individuais denominados fluxo de escoamento $Q(t)$ e evaporação $E(t)$. A $R(t)$ é distribuída no sistema de canais como uma área impermeável e para um sistema de floresta de encosta como uma área permeável, baseando-se em um parâmetro C (relação de área do canal).

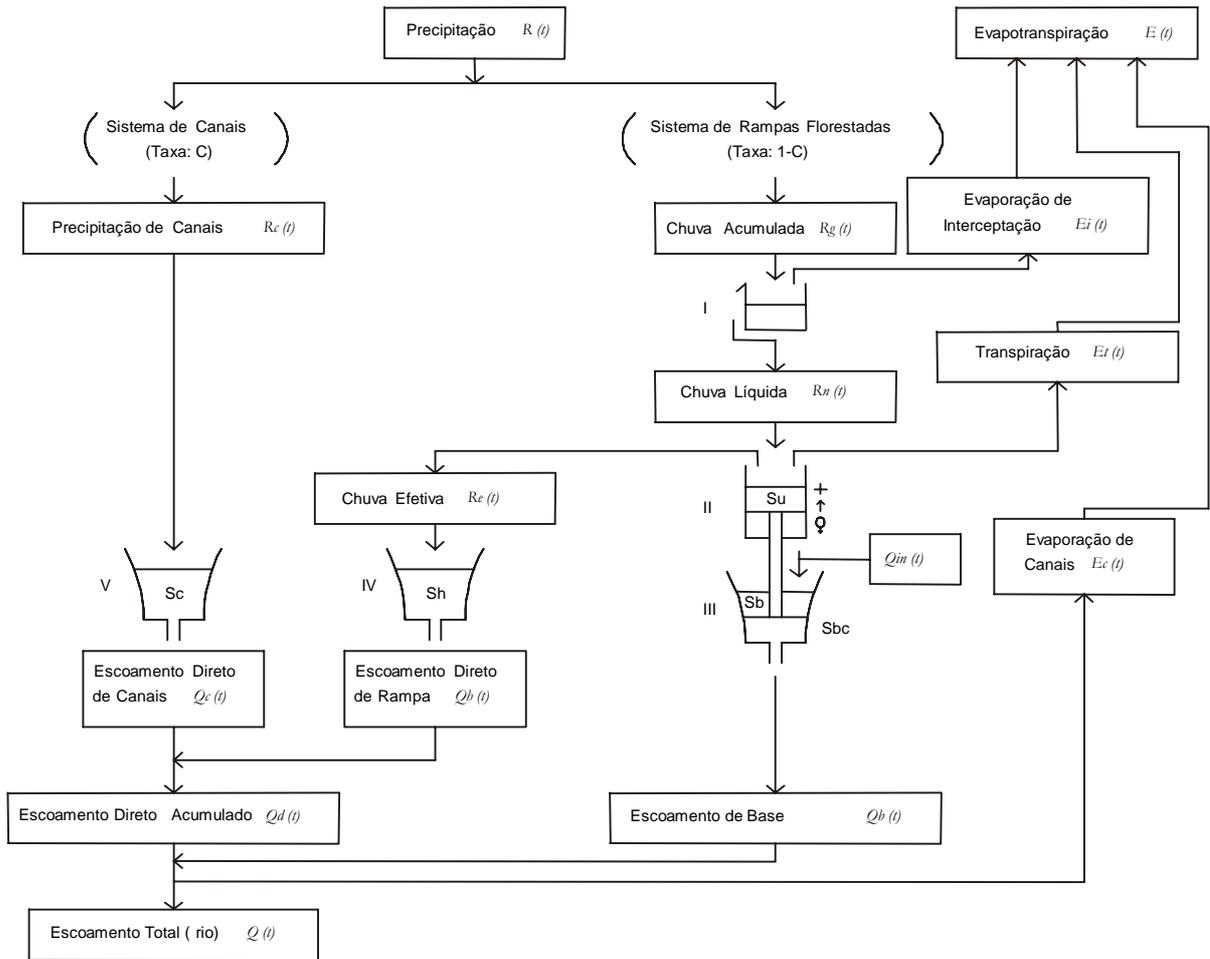


Figura 4.3 – Representação metodológica esquemática das principais partes do modelo *HYCYMODEL*

No sistema de canal, a precipitação de canal $R_c(t)$ iguala-se a $R(t)$, que abastece o Tanque V, que possui uma capacidade de armazenamento $S_c(t)$. O acúmulo de água resultante no Tanque V gera o escoamento direto de canal $Q_c(t)$. O escoamento direto aparente do canal $Q_c^*(t)$ é calculado pela expressão,

$$Q_c^*(t) = C \cdot Q_{c(t)} \quad (4.1)$$

Em um ambiente de florestas de encostas, a chuva acumulada sobre a cobertura $R_g(t)$ se iguala a $R(t)$, e na seqüência $R_g(t)$ é interceptada parcialmente no Tanque I. O excesso do Tanque I cairá sobre a superfície como chuva líquida $R_n(t)$, que entrará no Tanque II. O Tanque II possui capacidade de armazenamento $S_u(t)$ que é calculada conforme as equações,

$$S_u^*(t) = S_u(t-1) + R_n(t) - R_e(t) \quad (4.2)$$

$$S_u^{**}(t) = S_u^*(t) - Q_{in}(t) \quad (4.3)$$

$$S_u(t) = S_u^{**}(t) - E_t(t) \quad (4.4)$$

sendo, $R_e(t)$ a chuva efetiva para fluxo de escoamento direto em uma floresta de encosta; $Q_{in}(t)$ o escoamento da água no solo do Tanque II para o Tanque III; $E_t(t)$ a transpiração das árvores. A obtenção do parâmetro $R_e(t)$ será explicada posteriormente no Item 4.2.7.

A $R_e(t)$ é adicionada ao Tanque IV, sendo que este possui um armazenamento $S_h(t)$ que é transformado em vazão direta (fluxo direto) em uma floresta de encosta ($Q_h(t)$). A vazão direta aparente das florestas de encostas $Q_h^*(t)$ é calculado pela expressão,

$$Q_h^*(t) = (1 - C) \cdot Q_h(t) \quad (4.5)$$

o fluxo de escoamento direto total $Q_d(t)$ é obtido pela equação,

$$Q_d(t) = Q_c^*(t) + Q_h^*(t) \quad (4.6)$$

A Transpiração $E_t(t)$, que é o retorno da água do solo para a atmosfera por meio da vegetação, acontece no Tanque II. Logo abaixo do Tanque II está localizado o Tanque III que está conectado ao primeiro (Tanque II) por um tubo capilar (Figura 4.3). O Tanque II representa os macroporos e o Tanque III representa os microporos da superfície dos solos de floresta. Entre os Tanques II e III ocorre o escoamento da água no solo ou percolação $Q_{in}(t)$. A $Q_{in}(t)$ é sucedida pela vazão de base (fluxo básico) $Q_b(t)$ que é somado ao armazenamento $S_b(t-1)$ do Tanque III. O armazenamento crítico S_{bc} está relacionado com a diminuição da transpiração durante uma seca. A evaporação de canal $E_c(t)$ acontece após a coleta de todos os fluxos no canal. O fluxo básico aparente em uma estação de observação $Q_b^*(t)$ é definido pela Equação 4.7,

$$Q_b^*(t) = (1 - C) \cdot Q_b(t) - E_c(t) \quad (4.7)$$

Assim, a vazão total do rio $Q(t)$ é,

$$Q(t) = Q_d(t) + Q_b^*(t) \quad (4.8)$$

4.2.3 Modelo vazão de base

Nem toda $R(t)$ escoa, uma parte é armazenada e a relação entre armazenamento e vazão (escoamento) da água, normalmente usada em modelos com tanques vem a ser,

$$S = K \cdot Q^P \quad (4.9)$$

sendo, S o armazenamento; Q a vazão; K e P são parâmetros. O parâmetro P é igual a 1 para modelos lineares e diferente da unidade para modelos não lineares.

4.2.4 Modelo de evaporação

A estrutura do Tanque I mostrada na Figura 4.4 (SUZUKI et al)⁶, representa a cobertura vegetal e possui capacidade máxima de armazenamento S_1 . Quando a chuva acumulada $R_g(t)$ ultrapassa a capacidade máxima de armazenamento S_1 o excesso de água do Tanque I é distribuído sobre a superfície do solo para outro tanque, que representa a capacidade máxima de armazenamento nos talos e troncos (S_2). A distribuição da água entre os tanques é controlada através das taxas α_1 e α_2 que representam, respectivamente, a água interceptada pela vegetação que chegou a superfície do solo diretamente ou escoou pelos talos e troncos. Quando a água da chuva permanece em ambos os tanques, sua taxa de evaporação é e_i (mm/h). Os valores de S_1 e S_2 relacionam-se com a densidade e a idade da floresta, tipo de árvores e área foliar.

A chuva líquida $R_n(t)$ corresponde ao excesso de S_1 e S_2 , e a soma de ambos define a quantia máxima de armazenamento. A evaporação da chuva interceptada $E_i(t)$ é dado pelas equações,

$$E_i(t) = e_i \quad \text{se } S_1 + S_2 \geq e_i \quad (4.10)$$

$$E_i(t) = S_1 + S_2 \quad \text{se } S_1 + S_2 < e_i \quad (4.11)$$

A evaporação aparente $E_i^*(t)$ é dada por,

$$E_i^*(t) = (1 - C) \cdot E_i(t) \quad (4.12)$$

⁶ SUZUKI, M., KATO, H., TANI, M., FUKUSHIMA, Y., , Throughfall, stemflow and rainfall interception in Kiryu experimental catchment (1) Throughfall and stemflow', **J. Jap. For. Soc.**, v. 61, p. 202-210, 1979.

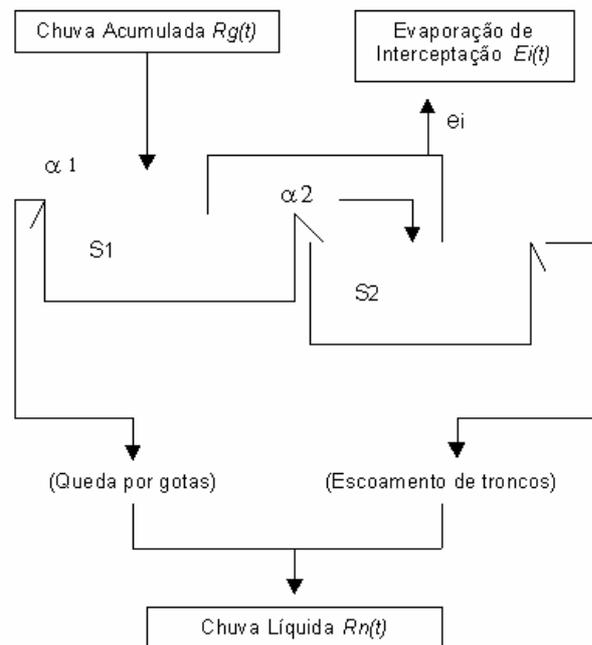


Figura 4.4 – Estrutura do Tanque I

4.2.5 Modelo de transpiração

Para uma mesma área, as variações sazonais da transpiração relacionam-se com as diferenças anuais da evaporação, isto porque as árvores controlam a transpiração através da resistência estomática. Porém, as taxas de transpiração diminuem em condições de déficit de água no solo. Na condição de déficit hídrico, a variação sazonal da transpiração é denominada transpiração potencial $e_p(i)$, onde i é o i -ésimo mês.

Quando há o armazenamento nos Tanques II e III, a transpiração atual $E_t(t)$ pode ser estimada por uma das seguintes equações apresentadas,

$$E_t(t) = e_{p(i)} \quad \text{se } S_u \geq 0 \quad (4.13)$$

$$E_t(t) = e_{p(i)} \quad \text{se } S_u < 0 \text{ e } S_b \geq S_{bc} \quad (4.14)$$

$$E_t(t) = e_{p(i)} \cdot \frac{Q_b(t)}{Q_{bc}} \quad \text{se } S_u < 0 \text{ e } S_b < S_{bc} \quad (4.15)$$

sendo, $Q_{bc} = f(S_{bc})$

Na Equação 4.13, $E_t(t)$ iguala-se a $e_p(i)$ e a transpiração consome o equivalente a S_u de água, conforme a Equação 4.5. Na Equação 4.14 a perda da transpiração no Tanque II é recuperada rapidamente através do tubo capilar do Tanque III. Aparentemente neste caso, a transpiração acontece da seguinte forma:

ao invés da Equação 4.5 para o Tanque II, tem-se,

$$S_u(t) = S_u^{**}(t) \quad (4.16)$$

e para o Tanque III,

$$S_b(t) = S_b^{**}(t) - E_t(t) \quad (4.17)$$

sendo,

$$S_b^*(t) = S_b(t-1) + Q_{in}(t) \quad (4.18)$$

$$S_b^{**}(t) = S_b^*(t) - Q_b(t) \quad (4.19)$$

Na Equação 4.15 a diminuição na taxa de transpiração acontece “devido ao corte parcial fora do tubo capilar”. Assume-se que na Equação 4.15 há uma relação que expressa este fenômeno. A transpiração neste caso também pode ser expressa no Tanque II usando-se a Equação 4.5, porque o tubo capilar está cortado. Neste caso, S_u gradualmente diminui para valores menores que zero e a transpiração aparente $E_t^*(t)$ é dada por,

$$E_t^*(t) = (1 - C) \cdot E_t(t) \quad (4.20)$$

4.2.6 Modelo de evaporação de canal

Com a determinação da variação sazonal da evaporação no canal, a evaporação atual $E_c(t)$ pode ser calculado pela equação,

$$E_c(t) = j \cdot C \cdot e_p(i) \quad (4.21)$$

sendo, j um parâmetro.

4.2.7 Modelo de chuva efetiva para o escoamento direto

O modelo para calcular a precipitação efetiva, utilizado no *HYCYMODEL*, foi proposto por FUKUSHIMA⁷. Neste modelo a chuva efetiva $R_c(t)$ é determinada pelo armazenamento no Tanque II, $S_u(t-1)$, e pela chuva líquida $R_n(t)$ que é expressa no modelo pelas Equações 4.22 a 4.25. São determinados dois parâmetros de profundidade (D_{16} e D_{50}), definidos como a profundidade efetiva do solo superficial, na qual a relação da área de contribuição equivale a 16% e 50 %, respectivamente, sendo σ o desvio padrão,

$$\sigma = \log\left(\frac{D_{50}}{D_{16}}\right) \quad (4.22)$$

e ξ uma variável,

$$\xi = \frac{1}{\sigma} \cdot \log\left\{\frac{[S_u(t-1) + R_n(t)]}{D_{50}}\right\} \quad (4.23)$$

assim, o valor da relação da área de contribuição m será,

$$m = \int_{-\infty}^{\xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) d\xi \quad (4.24)$$

então,

$$R_e(t) = m \cdot R_n(t) \quad (4.25)$$

sendo que a chuva líquida $R_n(t)$ é usado para igualar S_u à zero, quando o seu valor for menor que zero. Tal condição expressa, no modelo, um fenômeno no qual o valor de m diminui com a ocorrência de uma chuva após um período de seca. Então, S_u relaciona-se com a transpiração e a chuva efetiva.

4.2.8 Armazenamento e vazão

Em geral, a relação entre armazenamento e vazão é expressa pela Equação 4.9, e alguns dos parâmetros do *HYCYMODEL* que usam a mesma devem ser determinados. Analisando os processos do Tanque II para o Tanque V, ocorrem quatro transformações, sendo que nos Tanques IV e V são produzidos a vazão direta acumulada e os parâmetros

⁷ FUKUSHIMA, Y. Effects of reforestation and check-dams on storm runoff and sediment transport. In: **Proc. Interpraevent, Villach, 3.** 1984, p. 245-256.

da Equação 4.9, isto é P_c e P_h . Os parâmetros P_c e P_h igualam-se a 0,6, usando os resultados do modelo de rampa paralela (FUKUSHIMA & TAKEI)⁸. Assim, os únicos parâmetros desconhecidos são K_c e K_h .

Assumindo-se que ocorra uma transformação linear no Tanque II, K_{in} é o parâmetro desconhecido que está sob $P_{in}=1$. E os parâmetros P_b e K_b são considerados desconhecidos para o Tanque III. Embora os parâmetros sejam transformados adequadamente em cada sistema de unidade na realização dos cálculos, a unidade mm/h é considerada como o sistema de unidade padrão (FUKUSHIMA, 1988).

Desta forma, o *HYCYMODEL* tem nove parâmetros que permitem o seu ajustamento, ou seja, que são desconhecidos. Eles são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros de ajustamento (desconhecidos) do modelo *HYCYMODEL*

| Parâmetro | Especificação |
|------------------|---|
| C | Relação de área do canal |
| j | Relação de taxa de evaporação de canal para taxa de transpiração |
| D_{16}, D_{50} | Profundidade efetiva do solo na qual a relação da área de contribuição da inclinação da rampa é 16% e 50%, respectivamente. |
| K_c | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque V |
| K_h | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque IV |
| K_{in} | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque II |
| P_b, K_b | Parâmetro da função de armazenamento do Tanque III |

Os parâmetros de ajustamento mostrados na Tabela 4.1 têm as seguintes características: C distribui a chuva para o canal e sistemas de rampa; j determina o equilíbrio total da água; D_{16} e D_{50} distribuem a chuva líquida entre o fluxo direto e o fluxo de base; K_c, K_h, K_{in} e K_b relacionam-se, respectivamente, com o movimento mais rápido da água da chuva para o mais lento. Somente o parâmetro K_{in} relaciona-se com a distribuição da vazão direta porque determina a diminuição do armazenamento do Tanque II. Os parâmetros K_c e K_h podem ser determinados com dados de intervalos horários e os outros sete parâmetros devem ser determinados com dados de intervalos diários. No presente trabalho, K_c e K_h foram determinados em intervalos diários.

⁸ FUKUSHIMA, Y. TAKEI, A. A model for storm runoff in several small mountainous basins. In: **Proc. Jap. Conf. on Hydraul.**, 25. 1981, p. 229-236.

4.2.9 Calibração do modelo HYCYMODEL: procedimento de cálculo

Na aplicação do modelo *HYCYMODEL* foram utilizados dados diários. Os dados de chuva e vazão disponíveis para a bacia do Rio das Pedras compreenderam o período contínuo entre 14 de março de 1985 a 31 de dezembro de 2002. O processo de calibração do modelo foi realizado anualmente e para o período de 18 anos. Logo, foram obtidos parâmetros de ajustamento (desconhecidos) do *HYCYMODEL* (Tabela 4.1) para cada ano analisado e para o período de 18 anos. Apenas os meses de janeiro de 1990 e setembro de 2002 foram excluídos das análises, por não haver registros de valores de vazão.

As seguintes equações foram utilizadas para a avaliação do erro,

$$F_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{|QO(t) - QC(t)|}{QO(t)} \quad (4.26)$$

$$F_2 = \frac{|\sum QO(t) - \sum QC(t)|}{\sum QO(t)} \quad (4.27)$$

sendo, F_1 o erro relativo; F_2 o erro do balanço de água; $QO(t)$ o vazão observado; $QC(t)$ o vazão calculado; N o número de dados observados. Como S_b é determinado através de Equação 4.9, o dia 14 de março de 1985 representa a condição de armazenamento inicial no cálculo e, assume-se que S_c , S_h e S_u são iguais a 0 mm. Para os demais anos, considerou-se o dia 01 de janeiro como a condição de armazenamento inicial.

Os resultados das simulações realizados com o modelo *HYCYMODEL* são apresentados em arquivos de saída no formato “*.txt”. Este arquivo contém os valores diários e totais do período compreendido e traz como informação: os dados de entrada para rodar o modelo (mês, precipitação e vazão); os valores calculados de vazão, evapotranspiração, transpiração, evaporação de interceptação, escoamento inicial dos canais, vazão de base e direta. O balanço hídrico calculado resulta da soma entre vazão e evapotranspiração do período analisado.

4.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO RELATIVA (ETr / ETp)

O modelo *HYCYMODEL* fornece como uma de suas saídas os valores calculados de evapotranspiração real diária (ETr) na bacia hidrográfica, que somados permitem a obtenção da ETr para o período desejado (semanal, decendial, mensal, anual). Visando aferir e também simplificar a estimativa da ETr , sem necessariamente utilizar o

HYCYMODEL, calculou-se os índices de evapotranspiração relativa (ETr / ETp) para os treze anos de dados disponíveis (1985 a 1997).

Para o cálculo da estimativa dos valores de evapotranspiração potencial (ETp) utilizou-se o método Thornthwaite, baseando-se nos dados disponíveis de temperatura coletados na Bacia do Rio das Pedras pelo SIMEPAR, entre os anos de 1985 a 1997. Para utilização do método seguiram-se as recomendações de cálculo sugeridas por PEREIRA et al. (1997).

$$ETp = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{Ti}{I} \right)^a \cdot Fc \quad \text{sendo } Ti > 0^\circ C \quad (4.28)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (4.29)$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} (0,2 \cdot T_m)^{1,514} \quad \text{sendo } T_m > 0^\circ C \quad (4.30)$$

sendo, ETp evapotranspiração potencial ($\text{mm} \cdot \text{mês}^{-1}$); Ti temperatura média mensal do ar ($^\circ\text{C}$); a função cúbica do índice de calor (I) da região; I índice de calor da região; T_m temperatura média climatológica do m -ésimo mês. Obs.: T_m foi calculada com valores de temperatura média de 13 anos (1985 a 1997); Fc fator de correção da evapotranspiração tabular diária para ajustá-la ao fotoperíodo (N) e ao número de dias do mês.

O cálculo da evapotranspiração potencial anual foi obtido pela expressão,

$$ETp_{anual} = \sum_{i=1}^{12} ETp_i \quad (4.31)$$

sendo, ETp_{anual} a evapotranspiração potencial anual ($\text{mm} \cdot \text{ano}^{-1}$); ETp_i a evapotranspiração potencial do i -ésimo mês ($\text{mm} \cdot \text{mês}^{-1}$).

Os índices de evapotranspiração relativa foram calculados pela expressão,

$$I_{(ETr/ETp)} = \frac{ETr}{ETp} \quad (4.32)$$

sendo, $I_{(ETr/ETp)}$ o índice de evapotranspiração relativa (adimensional); ETr e evapotranspiração real mensal ou anual obtida no *HYCYMODEL* ($\text{mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ ou $\text{mm} \cdot \text{ano}^{-1}$); ETp a evapotranspiração potencial mensal ou anual obtida com o método de Thornthwaite ($\text{mm} \cdot \text{mês}^{-1}$ ou $\text{mm} \cdot \text{ano}^{-1}$).

4.4 DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PROVÁVEL

Os dados diários de precipitação utilizados para determinar a precipitação provável na bacia do Rio das Pedras consistiram na mesma série temporal utilizada no processo

chuva-vazão com o modelo *HYCYMODEL*, ou seja, as precipitações diárias de 1985 a 2002 fornecidas pelo SIMEPAR.

O agrupamento dos dados de precipitação diária foi feito em períodos de dez dias (decêndios) e realizado em uma planilha eletrônica. Nos casos em que houve a falta de elementos nas seqüências utilizadas, descartou-se o período. Nos meses de fevereiro da série temporal, os dias dos anos bissextos ou não foram considerados conforme as recomendações feitas por RIBEIRO & LUNARDI (1997).

As análises de distribuição de freqüência e teste de aderência foram realizadas utilizando-se um programa extraído do módulo “Análise Estatística” do modelo *MORETTI* (SOUZA, 2001), que foi adaptado e melhorado especialmente para realizar estas análises estatísticas empregando cinco distribuições de probabilidade (normal, triangular, uniforme, exponencial e gama). O modelo *MORETTI* foi desenvolvido na linguagem de programação *Visual Basic (Macros)* aplicado à Planilha Eletrônica *Excel 97 (Microsoft)*. O módulo “Análise Estatística”, utilizado para calcular as medidas de tendência e dispersão, distribuições de freqüência/probabilidade e teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, foi construído levando-se em consideração os procedimentos recomendados por AQUINO (1981), ASSIS et al. (1996) e FRIZZONE (1999).

Após determinar os parâmetros da melhor distribuição de freqüência para estimar a precipitação provável, respectiva de cada decêndio, a partir das análises de distribuição de freqüência e teste de aderência no *MORETTI*, avaliou-se a ocorrência das precipitações a 75% de probabilidade em uma planilha eletrônica. A interceptação da chuva pela vegetação da bacia hidrográfica não foi considerada.

Como algumas das distribuições analisadas não admitem valores nulos, adotou-se o conceito de distribuição mista, conforme as recomendações de ASSIS et al. (1996). Assim, a função cumulativa de probabilidade foi determinada em duas partes,

$$F(X) = P_0 + (1 - P_0) \cdot D(X) \quad (4.33)$$

sendo, $F(X)$ a função cumulativa de probabilidade da distribuição mista; P_0 a probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros); $D(X)$ a distribuição cumulativa teórica, onde os parâmetros são estimados na ausência de zeros.

Os decêndios contendo valores de precipitação menores que 1 mm foram considerados na probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros).

4.5 DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

A fragilidade ambiental foi determinada conforme a metodologia proposta por ROSS (1994), que consiste em relacionar o relevo, solo e subsolo ao uso da terra e clima, considerando a necessidade de esclarecer as interações dinâmicas que atuam sobre o sistema natural. A metodologia proposta permite realizar um zoneamento para o conhecimento das limitações presente na área da bacia de drenagem e obter subsídios para alternativas de uso do solo.

Os procedimentos operacionais propostos por ROSS (1994) para executar a determinação da fragilidade ambiental consistem basicamente em:

- Levantamentos de campo sobre relevo, subsolo, solo, uso da terra e clima;
- Atividades no laboratório para gerar produtos cartográficos temáticos de geomorfologia, geologia, pedologia, climatologia e uso da terra/vegetação.

É importante observar que no presente trabalho apenas as etapas dos serviços de laboratório foram realizadas, baseando-se em mapas, cartas e imagens já existentes.

Baseando na metodologia de ROSS (1994), foram elaborados os mapas planialtimétrico, declividade, solos, uso do solo, fragilidade potencial e fragilidade emergente. Para a confecção dos mesmos utilizou-se:

- Carta Topográfica de Guarapuava editada pelo Ministério do Exército, Departamento de Engenharia e Comunicações, na escala 1:100.000, ano 1972, folha SG.22-V-D-III, articulação MI – 2338, para realizar o levantamento do relevo da bacia;
- Mapa do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Centro-Sul do Paraná (área 9), elaborado pela EMBRAPA (1979);
- mesa Digitalizadora *Digigraf*, modelo *Van Gogh A1*, para a digitalização da área da bacia;
- Imagens *Land Sat 7*, órbita 222, pontos 77 e 78, bandas 3, 5 e 8 (para resolução de 15 m);
- *Software CartaLinx*, para a digitalização na mesa;
- *Software Idrisi 3.2* e *ArcView* para elaborar o material digitalizado.

O Laboratório de Fotointerpretação do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, foi o local utilizado para a realização de todos os mapas.

Especificamente no Laboratório de Fotointerpretação, as atividades realizadas foram:

- Digitalização da Carta Topográfica de Guarapuava, escala 1:100.000, no *software CartaLinx*, para delimitar o perímetro, rede de drenagem e curvas de nível;
- Digitalização do Mapa Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Centro-Sul do Paraná, escala 1:300.000;
- Composição dos mapas de declividade, solos, uso da terra, fragilidade ambiental potencial e fragilidade ambiental emergente, no *software Idrisi 3.2* e editado posteriormente no *software ArcView*.

A fragilidade potencial foi determinada a partir da relação entre as informações de declividade e unidades de solo presentes na Bacia do Rio das Pedras, obtidas através das atividades no laboratório. A fragilidade emergente resultou da relação feita entre as informações originadas na determinação da fragilidade potencial com as informações do uso atual do solo e cobertura vegetal da bacia do Rio das Pedras.

4.5.1 Mapa planialtimétrico da rede de drenagem da bacia do Rio das Pedras

O mapa planialtimétrico da rede de drenagem da bacia do Rio das Pedras foi obtido através da digitalização da Carta Topográfica de Guarapuava editada pelo Ministério do Exército, após a delimitação manual de toda a bacia hidrográfica pelos pontos mais altos que identificam os divisores de água das chuvas.

A digitalização foi feita com o *software CartaLinx* e foram extraídas informações como o perímetro da bacia hidrográfica, rede de drenagem e curvas de nível. As cotas das curvas de nível digitalizadas correspondem às cotas da carta topográfica.

Com o mapa da bacia digitalizado gerou-se um modelo numérico do terreno, que foi elaborado após a importação dos dados do *software CartaLinx* para o *software Idrisi 3.2*. O modelo numérico do terreno (MNT) ou modelo digital de elevação (MDE), nada mais é do que uma imagem onde cada *pixel* possui o valor *Z* de altitude correspondente as suas coordenadas *X* e *Y*. Estes modelos são gerados automaticamente a partir da interpolação das curvas de nível e, neste caso, a interpolação utilizada foi uma Rede Triangular Irregular (TIN) onde a elevação digital é convertida em um modelo de terreno no qual a superfície é coberta por triângulos continuamente conectados (DONHA, 2003). A partir do modelo numérico do terreno podem ser geradas imagens para interpretação de solos e mapas de declividade.

4.5.2 Mapa de declividade da Bacia do Rio das Pedras

O mapa de declividade foi obtido a partir do modelo numérico do terreno, dentro do *software Idrisi 3.2*, através dos módulos *SURFACE* e *RECLASS*. O mecanismo do módulo *SURFACE* para determinar a declividade consiste basicamente em comparar a altitude de uma célula qualquer com a altitude das células vizinhas. A comparação é possível uma vez que as cotas das curvas de nível estão presentes no modelo numérico. As classes de declividade no mapa estão em porcentagem. Os dados de imagem gerados no *SURFACE* foram re-classificados no módulo *RECLASS*, o que permitiu delimitar sete intervalos de classes de declividade, conforme a metodologia de ROSS (1994).

4.5.3 Mapa das unidades de solos da bacia do Rio das Pedras

O mapa de solos foi gerado com o auxílio do *software CartaLinx*, utilizado para digitalizar a área correspondente à bacia do Rio das Pedras no Mapa do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Centro-Sul do Estado do Paraná (área 9), escala 1:300.000, elaborado pela EMBRAPA (1979). A delimitação dos diferentes tipos de solos presentes na área da bacia em estudo foi feita apenas na fase de escritório, sem identificação de campo, atualizando-se a nomenclatura por meio da Legenda de Identificação de Mapa de Solos do Paraná.

4.5.4 Mapa de uso atual do solo da bacia do Rio das Pedras

O mapa de uso atual do solo foi gerado através de classificação automática por máxima verossimilhança supervisionada, no programa *Idrisi 3.2*, utilizando-se a imagem do Satélite *Landsat 7*, órbita 222, pontos 77 e 78, bandas 3, 5 e 8 (para resolução de 15 m).

4.5.5 Fragilidade potencial

A composição do mapa de fragilidade potencial foi realizada a partir das informações obtidas do cruzamento do mapa de solos com o mapa de declividade, que geraram a Tabela Matriz da fragilidade potencial, que determina as classes de fragilidade ambiental potencial do solo da bacia do Rio das Pedras.

4.5.6 Fragilidade emergente

A composição do mapa de fragilidade emergente foi realizada a partir das informações obtidas do cruzamento do mapa do uso atual do solo com o mapa da

fragilidade potencial da bacia do Rio das Pedras, que geraram a Tabela Matriz da fragilidade emergente, que determina as classes de fragilidade ambiental emergente do solo da bacia do Rio das Pedras.

4.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA DA BACIA

Na caracterização da bacia hidrográfica do Rio das Pedras, aplicou-se ainda a metodologia descrita por VILLELA & MATTOS (1975) para determinar o coeficiente de compacidade (K_c), fator de forma (K_f), densidade de drenagem (D_d), sinuosidade do curso de água (Sin) e elevação média da bacia (E), da seguinte forma,

$$K_{cc} = \frac{0,28 \cdot P_{er}}{\sqrt{A}} \quad (4.34)$$

sendo, K_c o coeficiente de compacidade (adimensional); P perímetro da bacia hidrográfica (km); A área da bacia hidrográfica (km²).

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (4.35)$$

sendo, K_f o fator de forma (adimensional); A área da bacia hidrográfica (km²); e L o comprimento axial do curso de água (km).

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n \ell_i}{A} \quad (4.36)$$

sendo, D_d a densidade de drenagem (km⁻¹); ℓ_i o comprimento do i -ésimo curso d'água (km); e A área da bacia hidrográfica (km²).

$$Sin = \frac{L}{L_i} \quad (4.37)$$

sendo, Sin a sinuosidade do curso de d'água (adimensional); L comprimento do rio principal acompanhando toda a sua sinuosidade (km); L_i comprimento do talvegue do rio principal (km).

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (Pm_i \cdot A_i)}{A} \quad (4.38)$$

sendo, E a elevação média da bacia (m); Pm_i ponto médio entre duas curvas de nível da i -ésima área da bacia (m); A_i a i -ésima área entre as curvas de nível da bacia hidrográfica (m²); A é a área total da bacia (m²).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MODELAGEM DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO

A modelagem matemática do processo chuva-vazão foi realizada com a aplicação do *HYCYMODEL* em cada um dos dezoito anos avaliados, o que compreendeu o período entre 14 de março de 1985 a 31 de dezembro de 2002. Os parâmetros ótimos de ajustamentos determinados nas simulações realizadas com o referido modelo estão apresentados na Tabela 5.1.

A Tabela 5.1 possui uma série de parâmetros de ajustamento que têm o seguinte significado:

- C : taxa de área de canais;
- D_{16} e D_{50} : correspondem à espessura efetiva do solo superficial, em que a taxa da área de contribuição da rampa de floresta é 16% e 50%, respectivamente;
- K_c : coeficiente de armazenamento nos canais;
- K_h : coeficiente de armazenamento do escoamento direto da área florestal;
- K_u : coeficiente de armazenamento da camada superficial da área florestal (rampa);
- K_b : coeficiente de armazenamento da camada subsuperficial da área florestal (rampa);
- P_{ta} : coeficiente que fornece o valor médio da distribuição mensal da transpiração;
- P_{tb} : coeficiente de variação da distribuição mensal da transpiração;
- P_{tc} : coeficiente de retardo da distribuição mensal da transpiração;
- Q_{ac} : escoamento crítico para ocorrer redução de transpiração;
- $STAD$: coeficiente de evaporação da chuva interceptada para cálculo diário;
- $STOR$: coeficiente de evaporação da chuva interceptada para cálculo diário em mm;
- F_1 : erro relativo, correspondente à avaliação dos ajustes das vazões calculadas dia a dia;
- F_2 : erro do balanço de água, correspondente à avaliação dos ajustes das vazões calculadas no período anual.

Tabela 5.1. Valores ótimos dos parâmetros do *HYCYMODEL* e os respectivos ajustes dos erros de vazão (F_1 e F_2), obtidos com os dados compreendidos entre os anos de 1985 a 2002

| Ano | Parâmetros de ajustamento do <i>HYCYMODEL</i> | | | | | | | | | | | | | Erros | |
|----------------------------------|---|----------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | C | D_{16} | D_{50} | K_c | K_h | K_u | K_b | P_{fa} | P_{fb} | P_{fc} | Q_{ac} | STAD | STOR | F_1 | F_2 |
| 1985 | 0,017 | 12 | 97 | 9 | 7 | 150 | 217 | 85 | 18 | 0,01 | 77 | 0,646 | 2,600 | 0,244 | 0,244 |
| 1986 | 0,005 | 29 | 56 | 9 | 20 | 285 | 1193 | 86 | 30 | 0,90 | 25 | 0,685 | 1,630 | 0,296 | 0,224 |
| 1987 | 0,045 | 16 | 56 | 9 | 30 | 297 | 1130 | 79 | 49 | 0,001 | 30 | 0,690 | 1,710 | 0,285 | 0,285 |
| 1988 | 0,012 | 19 | 58 | 9 | 175 | 310 | 805 | 85 | 16 | 2,650 | 32 | 0,772 | 1,200 | 0,340 | 0,340 |
| 1989 | 0,076 | 13 | 51 | 1 | 101 | 625 | 1350 | 115 | 40 | 2,700 | 40 | 0,890 | 1,579 | 0,331 | 0,192 |
| 1990 | 0,032 | 21 | 81 | 1 | 11 | 160 | 270 | 85 | 60 | 0,01 | 77 | 0,819 | 1,500 | 0,275 | 0,210 |
| 1991 | 0,017 | 7 | 87 | 1 | 58 | 200 | 1191 | 83 | 15 | 10 | 1,3 | 0,956 | 1,772 | 0,563 | 0,038 |
| 1992 | 0,032 | 21 | 81 | 9 | 9 | 160 | 1170 | 85 | 60 | 0,011 | 77 | 0,955 | 1,169 | 0,409 | 0,049 |
| 1993 | 0,047 | 5 | 32 | 9 | 68 | 625 | 3500 | 115 | 39 | 2,700 | 43 | 0,978 | 1,578 | 0,395 | 0,085 |
| 1994 | 0,024 | 21 | 81 | 1 | 6 | 160 | 380 | 61 | 13 | 0,170 | 51 | 0,654 | 1,433 | 0,369 | 0,205 |
| 1995 | 0,027 | 22 | 38 | 1 | 16 | 176 | 410 | 55 | 44 | 0,120 | 51 | 0,658 | 1,434 | 0,240 | 0,162 |
| 1996 | 0,027 | 18 | 36 | 9 | 14 | 120 | 790 | 83 | 50 | 2,536 | 38 | 0,886 | 1,648 | 0,278 | 0,074 |
| 1997 | 0,014 | 12 | 38 | 9 | 8 | 230 | 500 | 60 | 45 | 0,080 | 51 | 0,853 | 1,120 | 0,387 | 0,084 |
| 1998 | 0,004 | 30 | 44 | 9 | 12 | 121 | 235 | 74 | 35 | 0,070 | 59 | 1,071 | 1,136 | 0,348 | 0,074 |
| 1999 | 0,032 | 1 | 80 | 35 | 500 | 70 | 240 | 20 | 45 | 10,30 | 17 | 0,986 | 1,850 | 0,832 | 0,159 |
| 2000 | 0,009 | 19 | 40 | 9 | 15 | 116 | 320 | 83 | 50 | 2,489 | 27 | 0,972 | 1,675 | 0,387 | 0,074 |
| 2001 | 0,0007 | 28 | 44 | 9 | 20 | 293 | 450 | 79 | 60 | 2,521 | 27 | 0,979 | 1,729 | 0,391 | 0,034 |
| 2002 | 0,020 | 27 | 58 | 1 | 37 | 250 | 700 | 85 | 47 | 2,525 | 32 | 0,902 | 1,661 | 0,295 | 0,130 |
| Período entre 1985 e 2002 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,032 | 16 | 30 | 9 | 30 | 297 | 1110 | 67 | 50 | 0,01 | 30 | 0,920 | 1,700 | 0,589 | 0,000 |

5.1.1 Considerações sobre os erros F_1 e F_2

Os parâmetros mostrados na Tabela 5.1 são os resultados finais obtidos nas simulações para os períodos analisados. Para alcançar os referidos parâmetros várias simulações tiveram de ser realizadas no *HYCYMODEL* visando à obtenção dos valores ideais de F_1 e F_2 . É importante observar que F_1 e F_2 são considerados ideais quando possuem valores iguais e próximos a zero. KUBOTA et al. (1996) utilizando o *HYCYMODEL* para estudar o escoamento superficial em uma área vulcânica, finalizaram as análises de sensibilidade quando F_1 ficou entre 0,146 e 0,328 e F_2 foi menor que 0,07. TANAKA et al. (1998), utilizando o *HYCYMODEL* nos estudos do balanço hídrico e vazão em uma bacia de clima subtropical e de monções, finalizou as análises de sensibilidade quando o valor de F_1 foi próximo de 0,2.

Nas simulações, inúmeras alterações individuais nos valores dos parâmetros de ajustamento do modelo foram realizadas (análise de sensibilidade). Após cada simulação os

valores dos erros F_1 e F_2 eram conferidos e os parâmetros de ajustamento analisados para verificar qual deles estava proporcionando maior sensibilidade. As análises de cada parâmetro e período considerado terminavam quando as alterações feitas não produziam melhores resultados para F_1 e F_2 .

Na realização das análises de sensibilidade com o *HYCYMODEL*, verificou-se para os dados de chuva e vazão da bacia do Rio das Pedras que é mais fácil obter valores de erro F_2 próximos de zero do que o erro F_1 . Esta constatação deve-se provavelmente ao fato de que F_1 leva em consideração o somatório das diferenças diárias entre as vazões observadas e calculadas (Equação 4.26), ao passo que F_2 considera uma diferença entre os somatórios das vazões observadas e calculadas no período (Equação 4.27). Junto com a análise do valor dos erros (F_1 e F_2), considerou-se também nas análises de sensibilidade os resultados do cálculo da vazão e da evapotranspiração, que somados originam o balanço hídrico.

O ano de 1985 foi o primeiro da série de dados a ser analisado. Como o início de leitura da série de vazões ocorreu apenas no dia 14 de março de 1985, as análises foram processadas com apenas 293 dias para este ano. Por ter sido o primeiro, o ano de 1985 foi o que necessitou de maior número de simulações para alcançar bons valores de F_1 e F_2 . A visualização das vazões observadas e calculadas foi feita graficamente em uma planilha eletrônica, considerando o valor observado e calculado em cada dia. No entanto, as alternâncias dos picos de vazão apresentados no gráfico dificultavam a visualização e verificação dos melhores ajustes. Para contornar este problema, optou-se por uma análise gráfica considerando-se uma média móvel de 10 dias (Figura 5.1 e 5.2), que possibilitou visualizar e interpretar melhor os dados. Os anos de 1990 e 2002 não tiveram os valores diários de vazão dos meses de janeiro e setembro computados, respectivamente.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, o ano em que foram obtidos o melhor (1985) e o pior ajuste (1999) do processo chuva-vazão empregando o *HYCYMODEL*. A Figura 5.3 apresenta a média móvel de 365 dias da vazão observada (QO) e calculada (QC) no *HYCYMODEL*, para o período total entre os anos de 1985 a 2002. Todas as figuras contendo os gráficos de média móvel de 10 dias para os ajustes de vazão calculada (QC) e observada (QO), entre os anos 1985 a 1997, poderão ser visualizados no Item 5.2.

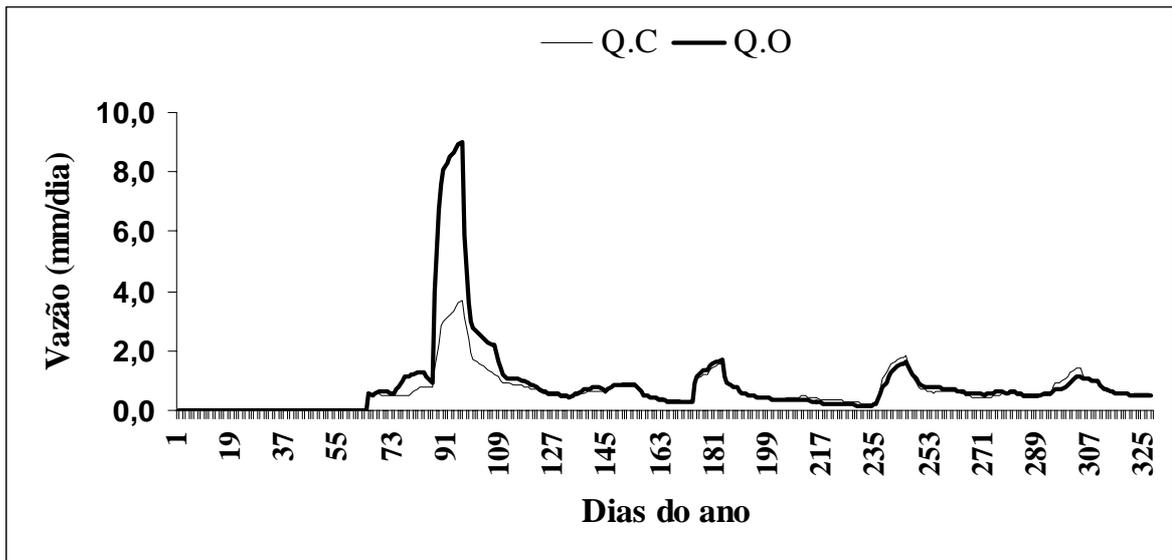


Figura 5.1 – Média móvel de 10 dias da vazão observada (QO) e calculada (QC) no *HYCYMODEL*, para o ano de 1985 (melhor ajuste com o *HYCYMODEL*)

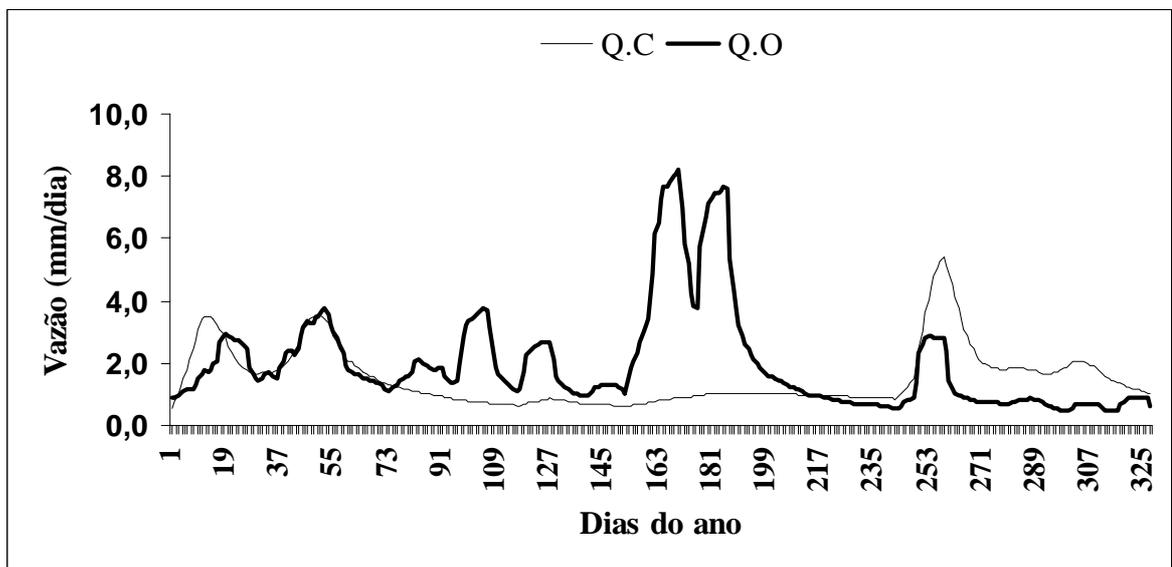


Figura 5.2 – Média móvel de 10 dias da vazão observada (QO) e calculada (QC) no *HYCYMODEL*, para o ano de 1999 (pior ajuste com o *HYCYMODEL*).

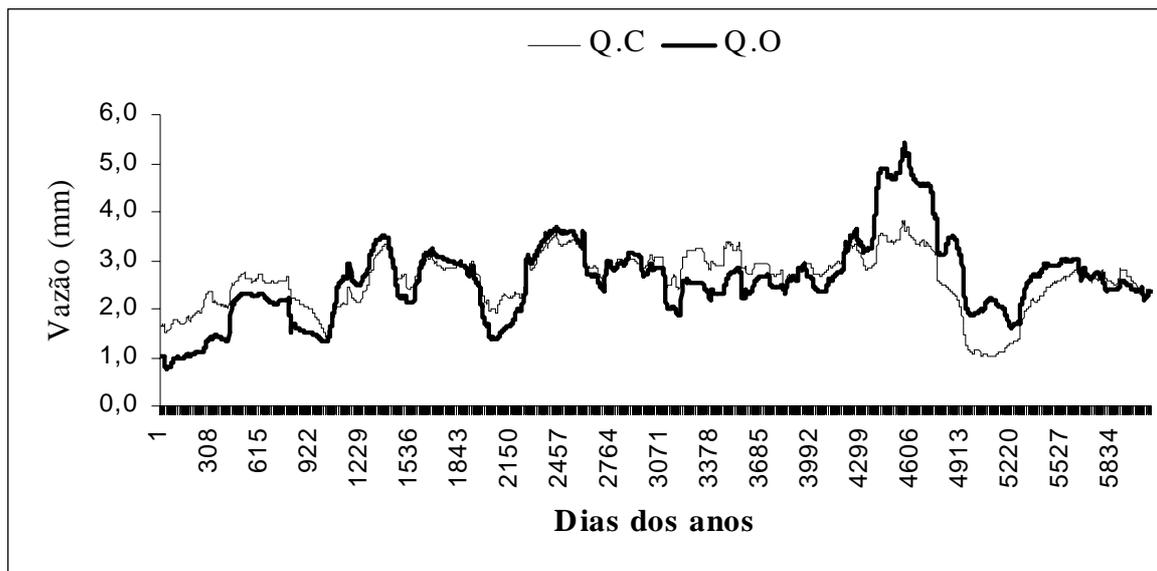


Figura 5.3 – Média móvel de 365 dias da vazão observada (QO) e calculada (QC) no *HYCYMODEL*, para os anos de 1985 a 2002.

Constatou-se que o ajustamento das vazões observadas (QO) e calculadas (QC) com o modelo *HYCYMODEL* apresentou bons resultados para períodos de um ano, ou seja, períodos curtos. O bom ajustamento pode ser confirmado avaliando-se os erros F_1 e F_2 obtidos nas análises com os valores ideais indicados por KUBOTA et al. (1996) e TANAKA et al. (1998). No entanto, quando se utilizou o *HYCYMODEL* na simulação de um grande período (18 anos por exemplo) a visualização dos resultados dos ajustes da vazão observada (QO) e calculada (QC) foi mais complicada e houve menor exatidão, devido à dificuldade de calibrar os parâmetros desconhecidos.

Para o período entre 1985 e 2002, que totalizaram 6.434 dias, a vazão total observada (QO) foi de 16.462 mm e a vazão total calculada (QC) no *HYCYMODEL* foi de 16.460 mm. Os erros F_1 e F_2 foram iguais a 0,589 e 0,000, respectivamente. Conforme se verifica na Figura 5.3, o ajuste das curvas das vazões calculadas e observadas não apresentaram exatidão na maior parte do período analisado, embora os valores observados e calculados tenham sido praticamente iguais. Nas análises de sensibilidade realizadas ano a ano, como pode ser observado nas Figuras 5.5a a 5.8a e 5.9, a dificuldade em ajustar as vazões calculada e observada também foi verificada, mas com menor discrepância. Desta forma, verifica-se uma limitação do modelo em processar um número elevado de dados, como por exemplo, o período compreendido entre 1985 a 2002.

Apesar de ter obtido valores de F_1 e F_2 (Tabela 5.1) próximos dos indicados por KUBOTA et al. (1996) e TANAKA et al. (1998), principalmente devido às colocações que serão apresentadas no Item 5.2, considerou-se no presente trabalho que não foi possível obter resultados de balanço hídrico (precipitação, vazão e evapotranspiração) consistentes nas simulações em todos os períodos analisados da bacia do Rio das Pedras (1985 a 2002).

5.1.2 Considerações sobre os parâmetros de ajustamento (desconhecidos)

Entre todos os parâmetros avaliados, os que correspondem à evaporação (*STAD* e *STOR*) foram a base para o ajustamento do modelo e apresentaram o melhor ajuste para a obtenção dos valores ótimos dos erros F_1 e F_2 , bem como os valores de vazão calculada e evapotranspiração. Os demais parâmetros avaliados (C , D_{16} , D_{50} , K_h , K_u , K_b , P_{ta} , P_{tb} , P_{tc} e Q_{ac}) ajustaram-se bem na obtenção dos erros F_1 e F_2 , especialmente nos ajustes mais finos. O parâmetro K_c foi o único que não apresentou interferência nos resultados.

Os parâmetros de transpiração (P_{ta} , P_{tb} , P_{tc} e Q_{ac}) influenciaram menos que os parâmetros de evaporação *STAD* e *STOR* na obtenção dos valores de F_1 e F_2 . Possivelmente, este fato ocorreu porque o modelo considera que a evaporação ocorre de forma acentuada na água das chuvas interceptada pela vegetação, pelo solo e também na água que atinge o leito dos rios da bacia. Já a água transpirada provém dos vegetais, que a absorvem do solo através das raízes e a perdem pelas folhas devido a fatores como a radiação solar, temperatura do ar, umidade e vento. Assim, nas avaliações da transpiração, pequenos ajustes nos parâmetros P_{ta} , P_{tb} , P_{tc} e Q_{ac} foram suficientes para a obtenção do resultado final nas simulações com o modelo.

Nas análises de sensibilidade verificou-se inicialmente que é melhor ajustar os parâmetros C , D_{16} e D_{50} e depois ajustar os parâmetros de armazenamento (K_h , K_u e K_b). As alterações nos parâmetros C , D_{16} e D_{50} influenciaram na aproximação dos valores da vazão (calculada e observada) e na evapotranspiração. Posteriormente, alterações nos parâmetros de coeficientes de armazenamento (K_h , K_u e K_b) permitiram um ajustamento nos resultados da vazão calculada.

5.1.3 Considerações referentes ao uso do modelo *HYCYMODEL*

O modelo *HYCYMODEL* possibilitou realizar para cada período analisado (1985 a 2002): ajustar razoavelmente as curvas de vazão calculada (QC) e observada (QO); obter os valores de evapotranspiração real (*ETr*) diária e anual; estabelecer o balanço hídrico diário e anual. Apesar de não serem considerados neste trabalho, o modelo fornece

também resultados diários e anuais do escoamento inicial dos canais, escoamento total direto, escoamento total de base, evaporação da precipitação interceptada e transpiração.

Um ponto negativo a ser ressaltado no uso do modelo *HYCYMODEL* refere-se ao número de simulações e análises de sensibilidade necessárias para se obter o valor final do balanço hídrico. É importante observar que o modelo não faz estas análises automaticamente e todos os parâmetros tiveram de ser alterados manualmente. Para os períodos analisados (1985 a 2002), por exemplo, foram necessárias aproximadamente 50.000 simulações o que demandou um tempo muito grande no processamento dos resultados. Cada parâmetro de ajustamento (Tabela 5.1) necessitou de uma análise individual para verificar se estava influenciando ou não nos resultados do balanço hídrico. Nos trabalhos realizados com o modelo, sentiu-se falta de um módulo que possibilitasse alterar os parâmetros de ajustamento e ao mesmo tempo permitisse a visualização destes resultados graficamente na tela do computador.

Outro ponto negativo verificado no modelo refere-se à inexistência de ferramentas que permitissem uma análise diferente da unidade dos dados de entrada, ou seja, o modelo não faz agrupamento dos dados em períodos (pêntadas, decêndios, semanas, quinzenas, meses) e não possibilita fazer uma suavização dos dados de saída, como por exemplo, a realização de uma média móvel para um determinado período considerado.

Observou-se também grande amplitude nos valores de alguns parâmetros que a princípio não deveriam apresentar alterações desta magnitude ao longo dos anos para a obtenção de valores ótimos dos erros F_1 e F_2 . O parâmetro que é identificado como a relação da área de um sistema de canais (parâmetro C), por exemplo, variou entre um valor mínimo de 0,0007 (2001) a um máximo de 0,076 (1989). Por se tratar da área de canais superficiais, essa situação somente ocorreria com uma grande alteração no solo da bacia e variações consideráveis do tamanho da área dos canais ano a ano, o que provavelmente não ocorreu.

Como se verificou nos parágrafos anteriores, o modelo *HYCYMODEL* apresentou qualidades no que se refere à sua lógica e processamento de cálculo. No entanto, devido à versão do modelo (disponível e utilizada) ser muito antiga (1988) a interface computador-usuário se encontra desatualizada. Talvez, este seja o ponto mais vulnerável do modelo e que necessite ser melhorado em trabalhos futuros.

5.2 DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Os cálculos da evapotranspiração potencial (ETp) para o período entre os anos de 1985 e 1997 foram determinados através do método de THORNTHWAITTE (1948). A Evapotranspiração real (ETr) foi determinada para o mesmo período através do modelo matemático *HYCYMODEL* (FUKUSHIMA, 1988). Os resultados da ETp , ETr e do índice de evapotranspiração relativa ($I_{ETr/ETp}$) obtidos das análises estão apresentados na Tabela 5.2. e Figura 5.4.

Tabela 5.2. Valores da evapotranspiração potencial (ETp), real (ETr) e índice de evapotranspiração relativa ($I_{ETr/ETp}$), obtidos entre os anos de 1985 a 1997

| Ano | Unidade | Anos analisados | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
| ETp | mm/ano | 504 | 781 | 764 | 771 | 724 | 682 | 766 | 763 | 772 | 793 | 790 | 753 | 781 |
| ETr | mm/ano | 649 | 1.444 | 1.312 | 802 | 1.339 | 944 | 967 | 982 | 1.142 | 1.299 | 1.221 | 883 | 965 |
| $I_{ETr/ETp}$ | — | 1,287 | 1,849 | 1,723 | 1,041 | 1,850 | 1,383 | 1,262 | 1,287 | 1,478 | 1,639 | 1,546 | 1,172 | 1,236 |

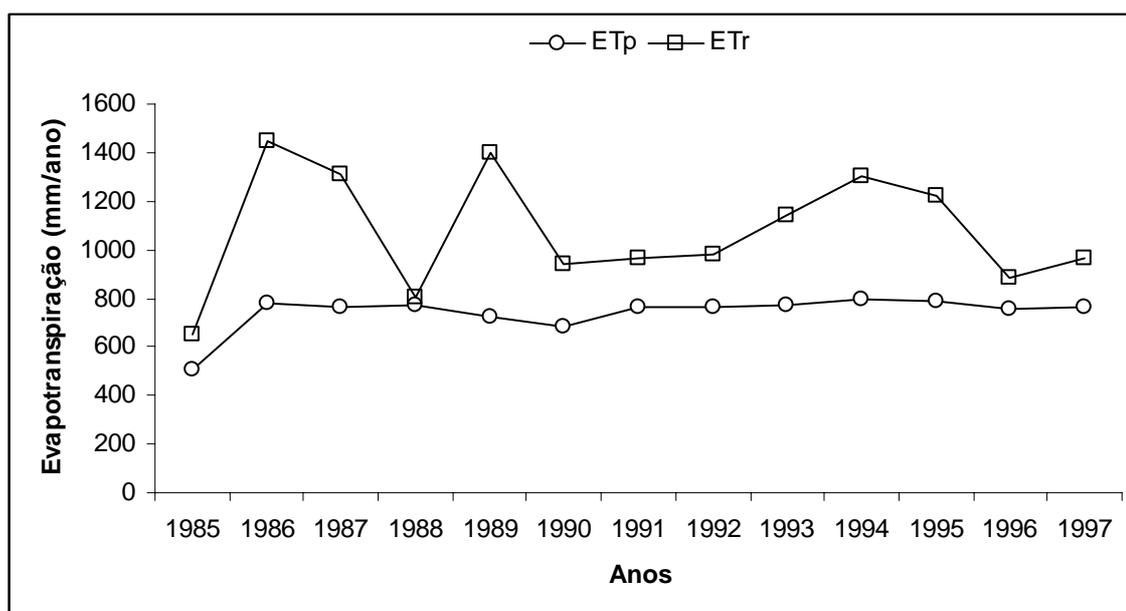


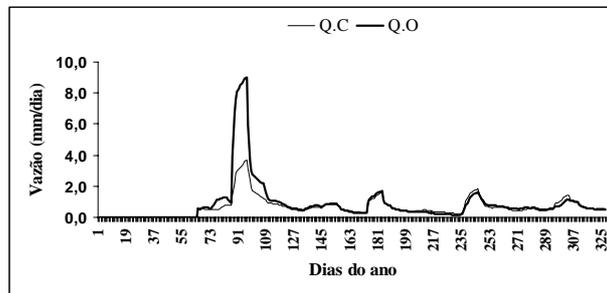
Figura 5.4 – Valores da evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr), obtidos entre os anos de 1985 a 1997

Os resultados apresentados na Tabela 5.2 e Figura 5.4, evidenciam que a evapotranspiração real anual (ETr) obtida no *HYCYMODEL* superestimou, em média, 44,2% os valores de ETp estimados com o método de Thornthwaite. Tal resultado representa um absurdo, visto que o método de Thornthwaite não subestima geralmente nesta magnitude os valores de evapotranspiração potencial, conforme foi verificado por FUKUSHIMA (1988), SOUZA (1992), MÜLLER (1995) e AMORIM (1999).

Para entender melhor como o modelo *HYCYMODEL* procedeu a estimativa da evapotranspiração real (ET_r), os resultados de vazão calculada (QC) e observada (QO) obtidos entre os anos de 1985 e 1997 foram dispostos, respectivamente, ao lado dos valores da evapotranspiração potencial (ET_p) e real (ET_r) (Figuras 5.5 a 5.8). A Tabela 5.3 apresenta também os resultados do índice de evapotranspiração relativa ($I_{(ET_r / ET_p)}$) mensal e anual para a região da Bacia do Rio das Pedras entre os anos 1985 a 1997.

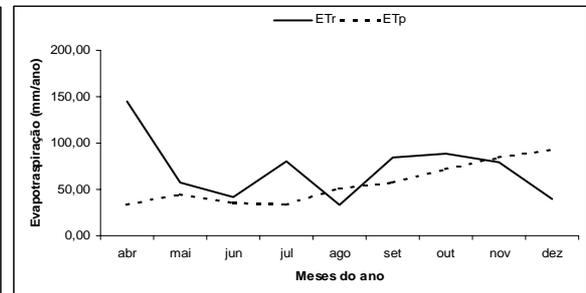
Tabela 5.3. Índice mensal e anual de evapotranspiração relativa ($I_{(ET_r / ET_p)}$), obtidos entre os anos de 1985 a 1997

| Meses | Anos analisados | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
| Jan | — | 2,08 | 0,74 | 0,63 | 1,97 | — | 0,81 | 1,00 | 1,11 | 1,49 | 2,54 | 1,11 | 1,49 |
| Fev | — | 2,14 | 1,62 | 1,18 | 1,72 | 0,65 | 0,84 | 0,99 | 1,43 | 1,85 | 2,02 | 1,16 | 1,58 |
| Mar | — | 1,16 | 0,67 | 0,67 | 1,34 | 0,98 | 0,99 | 1,53 | 1,42 | 0,73 | 0,86 | 1,75 | 0,92 |
| Abr | 4,34 | 2,10 | 1,62 | 1,94 | 1,57 | 1,73 | 1,35 | 1,64 | 1,37 | 1,18 | 1,24 | 0,69 | 0,85 |
| Mai | 1,30 | 3,29 | 6,58 | 3,87 | 2,42 | 1,88 | 1,45 | 2,56 | 2,77 | 2,24 | 0,44 | 0,47 | 1,18 |
| Jun | 1,17 | 0,79 | 2,79 | 3,09 | 1,66 | 3,15 | 2,51 | 1,42 | 1,81 | 3,65 | 1,90 | 1,96 | 2,66 |
| Jul | 2,37 | 0,73 | 1,36 | 0,47 | 2,87 | 3,30 | 2,42 | 2,22 | 3,20 | 2,93 | 1,83 | 1,70 | 1,17 |
| Ago | 0,66 | 2,17 | 1,51 | 0,24 | 2,99 | 1,78 | 1,52 | 1,49 | 0,59 | 0,43 | 0,29 | 0,85 | 1,05 |
| Set | 1,48 | 1,79 | 1,58 | 0,38 | 3,02 | 1,86 | 1,09 | 0,92 | 1,94 | 0,64 | 2,05 | 1,77 | 0,98 |
| Out | 1,24 | 1,70 | 1,83 | 1,04 | 2,19 | 1,24 | 1,47 | 0,85 | 1,56 | 1,88 | 1,96 | 1,60 | 1,47 |
| Nov | 0,94 | 1,51 | 1,61 | 0,43 | 1,28 | 1,07 | 1,02 | 1,11 | 0,88 | 2,16 | 0,99 | 0,58 | 0,97 |
| Dez | 0,43 | 2,11 | 1,90 | 0,61 | 1,04 | 0,77 | 1,46 | 0,83 | 1,20 | 1,64 | 1,82 | 1,05 | 0,97 |
| ANO | 1,287 | 1,847 | 1,723 | 1,041 | 1,850 | 1,383 | 1,262 | 1,287 | 1,478 | 1,639 | 1,546 | 1,172 | 1,235 |

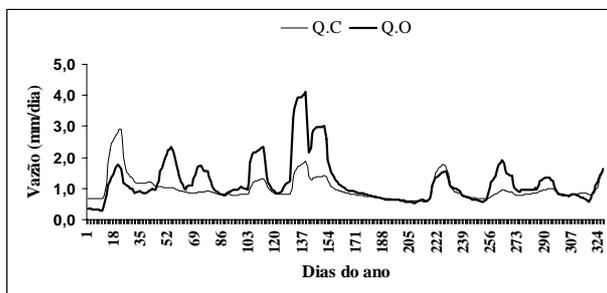


Ano 1985

(a)

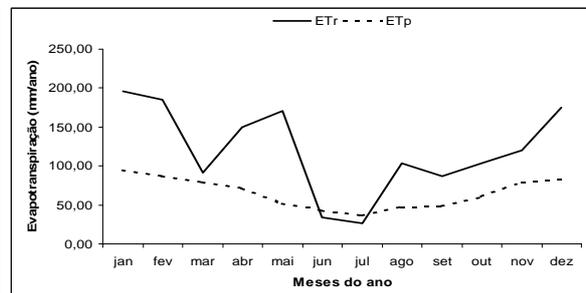


(b)



Ano 1986

(a)



(b)

Figura 5.5 – Valores obtidos entre os anos de 1985 e 1986: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (ET_p) e real (ET_r)

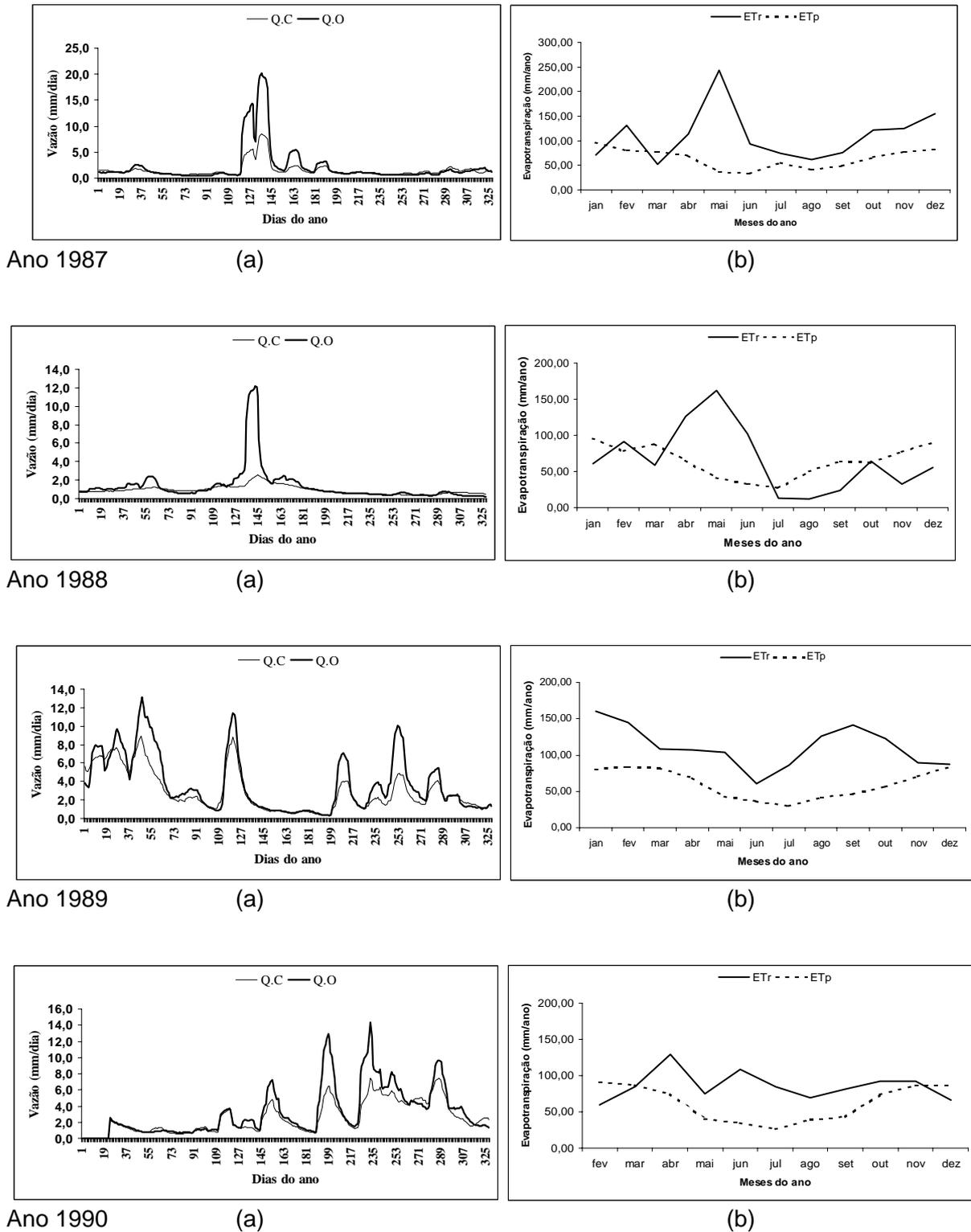
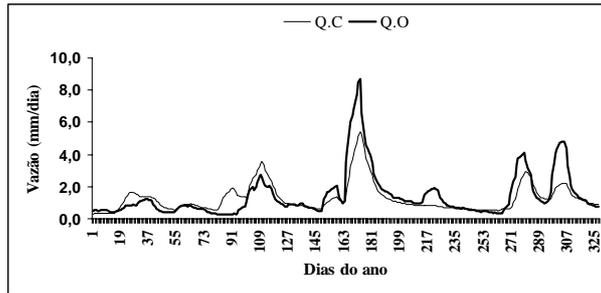
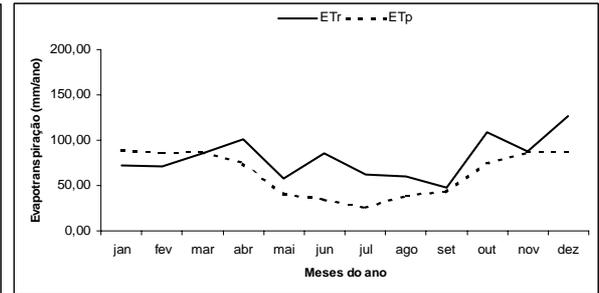


Figura 5.6 – Valores obtidos entre os anos de 1987 a 1990: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (*ETp*) e real (*ETr*)

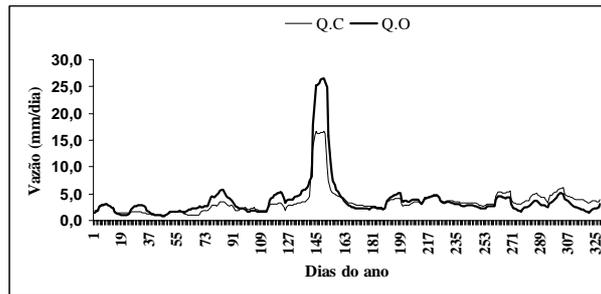


Ano 1991

(a)

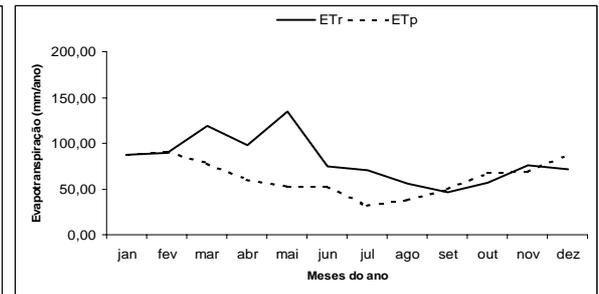


(b)

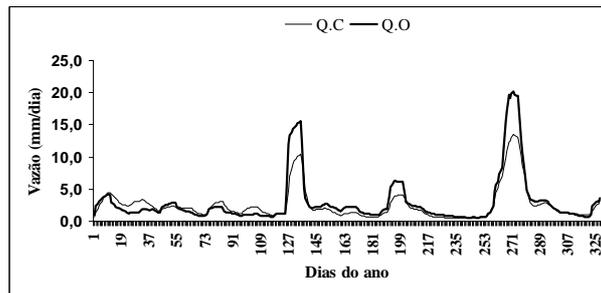


Ano 1992

(a)

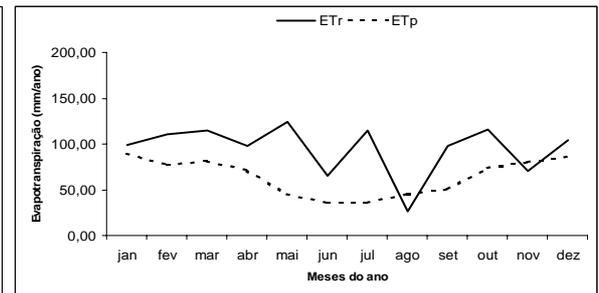


(b)

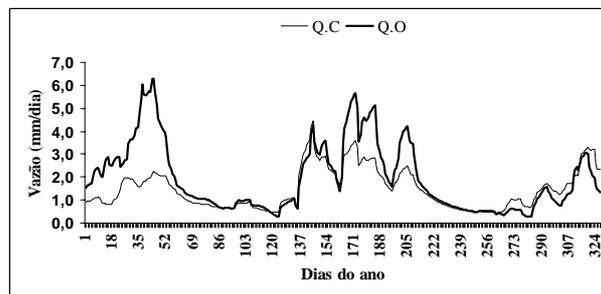


Ano 1993

(a)

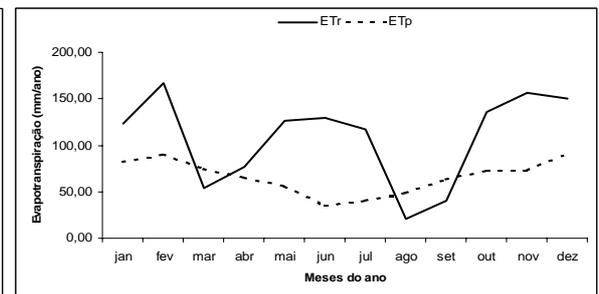


(b)



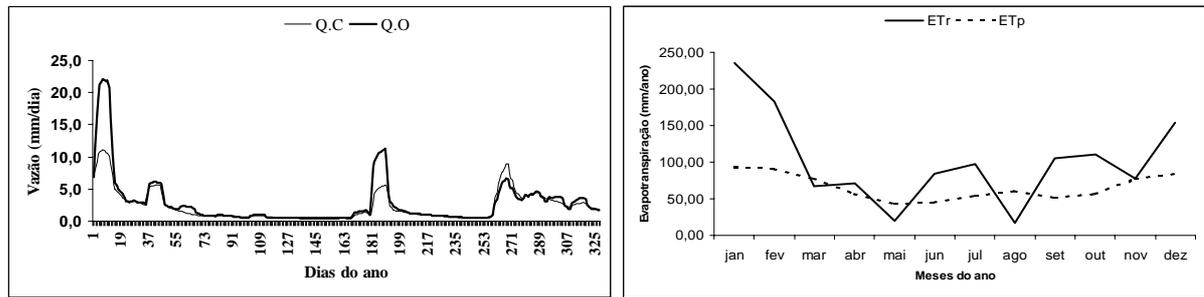
Ano 1994

(a)



(b)

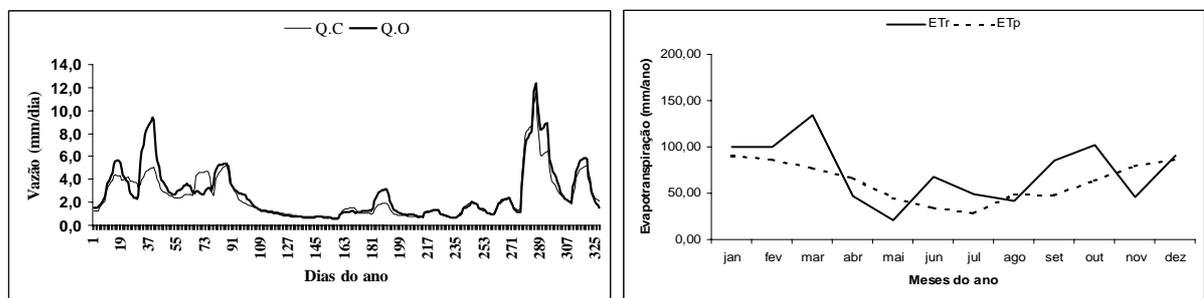
Figura 5.7 – Valores obtidos entre os anos de 1991 a 1994: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (*ETp*) e real (*ETr*)



Ano 1995

(a)

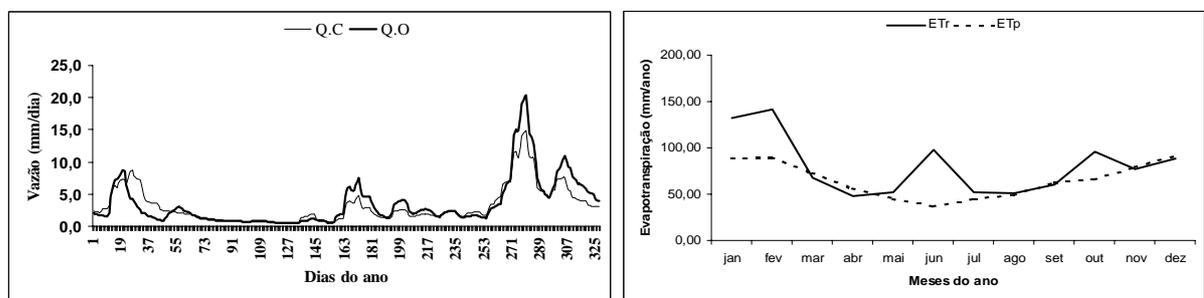
(b)



Ano 1996

(a)

(b)



Ano 1997

(a)

(b)

Figura 5.8 – Valores obtidos para o ano de 1995 a 1997: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (*ETp*) e real (*ETr*)

A Figura 5.9 apresenta apenas os valores da média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO), obtidos para os anos entre 1998 e 2002. A evapotranspiração potencial (*ETp*) não foi calculado para os anos entre 1998 e 2002 por não haver disponibilidade de temperaturas médias neste período para a bacia do Rio do Rio das Pedras.

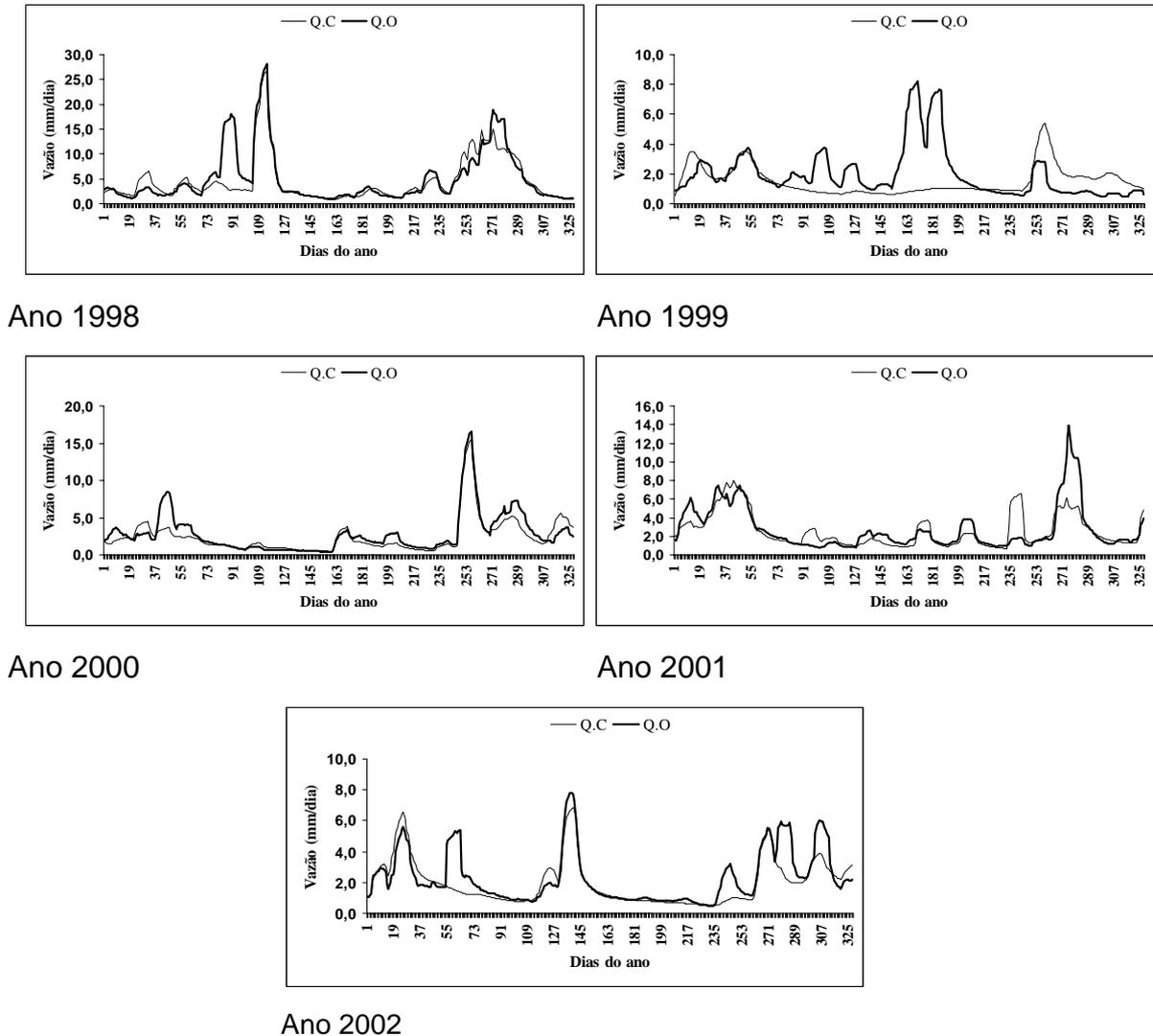


Figura 5.9 – Valores de média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO), obtidos para os anos entre 1998 e 2002

Analisando as Figuras 5.5a a 5.8a, constata-se que a vazão calculada (QC) pelo modelo *HYCYMODEL* geralmente foi subestimada na maior parte dos períodos, quando comparada com a vazão observada (QO), especialmente nos picos de vazão. Observou-se também, principalmente para os anos de 1986, 1991, 1994 (Figura 5.5a e 5.7a) e 1999, 2001 e 2002 (Figura 5.9), que os ajustes entre as vazões calculadas (QC) e observadas

(QO) não foram adequados, visto que não foi possível obter valores de F_1 e F_2 próximos dos sugeridos ou recomendados como ideais por KUBOTA et al. (1996) e TANAKA et al. (1998).

A recomendação dos valores de F_1 e F_2 feitas por KUBOTA et al. (1996) e TANAKA et al. (1998) podem não ser adequadas para a situação do presente estudo, uma vez que para conseguir na bacia do Rio das Pedras valores de ETr , obtida através do balanço hídrico com *HYCYMODEL*, aproximadamente iguais ao de ETp faz-se necessário que os valores de erros F_1 e F_2 sejam ainda menores. Conforme mencionado anteriormente, somente com a obtenção de valores de erros F_1 e F_2 próximos de zero os ajustamentos entre as vazões observadas (QO) e calculadas (QC) ficariam mais estreitos e os valores de ETr calculados nas análises diminuiriam. O problema maior consiste em fazer com que os valores de F_1 e F_2 fiquem próximos de zero, pois em mais de 50.000 simulações realizadas manualmente não se chegou a este resultado, principalmente para o erro F_1 .

Outro importante fator a ser observado refere-se à representatividade dos dados disponíveis para processar as análises em modelos do tipo *HYCYMODEL*. Especificamente para os dados de precipitação, verifica-se que a utilização de dados de apenas um posto meteorológico para representar toda uma bacia como a do Rio das Pedras, contida em uma área total de 327,88 km², pode estar interferindo acentuadamente nos resultados do balanço hídrico da mesma. Este ponto é falho, pois precipitações em outras regiões da bacia podem ter ocorrido no período analisado e não ter sido computadas na modelagem do processo chuva-vazão. O ideal seria a existência de postos de coleta de dados distribuídos uniformemente sobre a área da bacia e trabalhar com um valor médio ponderado, em função das metodologias apresentadas na literatura.

5.2.1 Considerações gerais referentes à decisão de utilizar o *HYCYMODEL*, após análise do processo do balanço hídrico

O uso do modelo *HYCYMODEL* no presente trabalho e o entendimento do processo chuva-vazão na Bacia do Rio das Pedras apresentou algumas dificuldades. Desta forma, os itens dispostos a seguir têm a função de esclarecer pontos considerados importantes e que de certa forma impossibilitaram a obtenção de melhores resultados com o referido modelo.

– O *HYCYMODEL* foi criado a partir de cinco modelos básicos, que foram desenvolvidos a partir de uma série de experimentos realizados desde a década de 1970. A composição destes cinco modelos gerou um trabalho que foi publicado no ano de 1988 (FUKUSHIMA, 1988), e que por melhor tenha sido a sua apresentação no periódico, não contém todos os detalhes para um entendimento aprofundado e adequado do modelo (*HYCYMODEL*);

- As potencialidades que o *HYCYMODEL* oferece não puderam ser alcançadas em toda a plenitude, visto que faltou a proximidade com os seus idealizadores, o contato com disciplinas ministradas pelos mesmos, material didático e exemplos, que permitissem identificar mais facilmente os pontos vulneráveis e possibilitasse a sugestão de alternativas para o seu melhoramento;
- O modelo foi desenvolvido em um local com clima temperado, tendo somente cobertura vegetal característica para este tipo climático em áreas montanhosas. No presente estudo, a área avaliada está em uma região de clima subtropical, com relevo ondulado, vegetação característica de clima subtropical, além de reflorestamentos com espécies de clima temperado e culturas agrícolas. Essas condições distintas podem ter interferido na calibração dos parâmetros do modelo, dificultando a obtenção de bons resultados no local de estudo.
- A utilização de modelos matemáticos como o *HYCYMODEL*, que teve o seu desenvolvimento baseado em condições ambientais específicas (Ásia), distintas das condições presentes no Brasil, pode gerar problemas quanto ao uso e obtenção de resultados confiáveis. Na adoção de um modelo deste tipo, é importante observar a necessidade e disponibilidade de informações detalhadas sobre o seu funcionamento e reais limitações, principalmente no que se refere às relações entre os parâmetros de ajustes.

5.3 DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE CHUVAS

Com os dados de precipitação diária no período compreendido entre os anos de 1985 e 2002, agrupados em decêndios, obteve-se os parâmetros estatísticos das cinco distribuições de probabilidade analisadas. Com o auxílio do modelo *MORETTI* as distribuições de frequência foram determinadas levando-se em consideração seis intervalos de classe e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov foi realizado a 5% de probabilidade. Os parâmetros determinados, os decêndios com a distribuição que melhor se ajustou aos dados e a precipitação a 75% de probabilidade estão apresentados na Tabela 5.4 e Figura 5.10.

Tabela 5.4. Parâmetros estatísticos decendiais obtidos nas análises de teste de aderência, a 5% de significância, com as distribuições de probabilidade Normal (N), Triangular (T), Uniforme (U), Exponencial (E) e Gama (G), e cálculo da precipitação a 75% de probabilidade com a distribuição de melhor ajuste, para a bacia do Rio das Pedras (dados disponíveis de 1985 a dezembro de 2002)

| Decêndio | Série (anos) | Menor valor (mm) | Maior valor (mm) | Média (mm) | Desvio padrão (mm) | Parâmetro Alfa | Parâmetro Beta | Dmax Tab. 5% | Dmax Calculado | Melhor Distribuição | Prob. Prec. zero * | Prec. Prov. 75%** |
|----------|--------------|------------------|------------------|------------|--------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| 1 | 17 | 4,8 | 176,1 | 59,3 | 51,6 | 1,5 | 39,6 | 0,33 | 0,08 | E | 0,0 | 17,0 |
| 2 | 17 | 25,6 | 169,6 | 81,0 | 41,6 | 3,8 | 21,4 | 0,33 | 0,06 | N | 5,9 | 46,4 |
| 3 | 17 | 9,1 | 166,8 | 88,6 | 47,6 | 2,5 | 35,2 | 0,33 | 0,10 | U | 0,0 | 48,5 |
| 4 | 17 | 14,0 | 104,3 | 66,6 | 28,7 | 3,7 | 17,9 | 0,33 | 0,09 | N | 0,0 | 47,2 |
| 5 | 17 | 7,0 | 176,0 | 66,3 | 49,4 | 1,7 | 38,7 | 0,33 | 0,07 | G | 0,0 | 28,8 |
| 6 | 17 | 3,6 | 87,6 | 42,4 | 20,7 | 2,9 | 14,4 | 0,33 | 0,07 | N | 5,9 | 25,2 |
| 7 | 17 | 7,6 | 73,0 | 35,9 | 21,4 | 2,5 | 14,2 | 0,33 | 0,12 | N | 0,0 | 21,4 |
| 8 | 17 | 3,1 | 94,8 | 34,0 | 31,4 | 1,1 | 30,5 | 0,33 | 0,08 | E | 0,0 | 9,8 |
| 9 | 18 | 2,4 | 126,1 | 53,0 | 39,4 | 1,4 | 39,1 | 0,32 | 0,14 | G | 5,9 | 17,5 |
| 10 | 18 | 6,0 | 151,4 | 43,9 | 36,8 | 1,6 | 26,6 | 0,32 | 0,03 | G | 5,9 | 15,2 |
| 11 | 18 | 5,8 | 107,6 | 47,8 | 28,6 | 2,0 | 24,0 | 0,32 | 0,06 | N | 5,9 | 24,0 |
| 12 | 18 | 1,6 | 321,2 | 61,8 | 78,9 | 0,9 | 71,4 | 0,32 | 0,12 | G | 23,5 | 0,9 |
| 13 | 16 | 1,8 | 188,1 | 47,5 | 52,2 | 0,8 | 57,8 | 0,34 | 0,04 | E | 35,3 | 0,0 |
| 14 | 14 | 2,4 | 196,1 | 82,8 | 71,2 | 1,3 | 64,1 | 0,34 | 0,09 | G | 17,6 | 12,2 |
| 15 | 17 | 9,2 | 360,3 | 71,3 | 86,8 | 1,1 | 66,0 | 0,33 | 0,05 | G | 11,8 | 13,4 |
| 16 | 16 | 6,4 | 134,1 | 33,8 | 35,4 | 1,3 | 26,3 | 0,34 | 0,15 | G | 18,8 | 4,4 |
| 17 | 15 | 14,2 | 131,9 | 54,6 | 34,7 | 2,7 | 20,3 | 0,32 | 0,07 | G | 6,3 | 26,7 |
| 18 | 17 | 1,5 | 160,0 | 42,2 | 40,4 | 1,1 | 38,1 | 0,33 | 0,06 | E | 12,5 | 6,5 |
| 19 | 18 | 1,1 | 166,0 | 43,2 | 45,5 | 0,9 | 49,6 | 0,32 | 0,07 | G | 12,5 | 5,8 |
| 20 | 13 | 1,2 | 151,8 | 45,8 | 50,8 | 0,8 | 55,6 | 0,36 | 0,15 | G | 18,8 | 2,1 |
| 21 | 16 | 1,8 | 169,8 | 39,0 | 44,0 | 1,0 | 39,9 | 0,34 | 0,04 | G | 12,5 | 6,1 |
| 22 | 15 | 1,0 | 100,0 | 33,9 | 27,8 | 1,2 | 28,9 | 0,32 | 0,04 | G | 18,8 | 3,9 |
| 23 | 14 | 1,0 | 141,4 | 35,1 | 47,7 | 0,7 | 50,0 | 0,34 | 0,16 | G | 18,8 | 1,1 |
| 24 | 13 | 1,0 | 149,2 | 44,7 | 45,2 | 0,8 | 57,3 | 0,36 | 0,12 | E | 25,0 | 0,0 |
| 25 | 15 | 3,2 | 101,0 | 47,6 | 38,5 | 1,7 | 28,0 | 0,32 | 0,08 | E | 12,5 | 7,3 |
| 26 | 18 | 1,3 | 228,0 | 72,0 | 62,0 | 1,1 | 62,7 | 0,32 | 0,12 | G | 6,3 | 17,1 |
| 27 | 17 | 1,2 | 210,4 | 76,6 | 64,9 | 1,1 | 70,2 | 0,33 | 0,10 | E | 6,3 | 17,0 |
| 28 | 18 | 14,5 | 154,8 | 72,1 | 41,3 | 2,8 | 25,6 | 0,32 | 0,07 | G | 0,0 | 40,1 |
| 29 | 18 | 12,0 | 253,2 | 76,3 | 58,8 | 1,9 | 40,0 | 0,32 | 0,09 | G | 0,0 | 35,5 |
| 30 | 18 | 16,2 | 156,0 | 56,8 | 32,5 | 3,7 | 15,5 | 0,32 | 0,04 | G | 0,0 | 35,5 |
| 31 | 17 | 1,8 | 92,3 | 40,2 | 24,9 | 1,7 | 23,0 | 0,33 | 0,06 | N | 0,0 | 23,4 |
| 32 | 18 | 4,4 | 113,8 | 43,1 | 34,8 | 1,5 | 28,5 | 0,32 | 0,07 | E | 0,0 | 12,4 |
| 33 | 16 | 3,0 | 123,2 | 60,2 | 30,5 | 2,7 | 22,7 | 0,34 | 0,07 | N | 0,0 | 39,6 |
| 34 | 18 | 2,1 | 172,5 | 59,8 | 47,0 | 1,4 | 44,0 | 0,32 | 0,12 | G | 0,0 | 23,7 |
| 35 | 18 | 4,2 | 125,3 | 50,1 | 34,2 | 2,1 | 23,5 | 0,32 | 0,05 | G | 0,0 | 24,3 |
| 36 | 17 | 11,7 | 142,4 | 65,7 | 40,3 | 2,5 | 25,9 | 0,33 | 0,05 | G | 0,0 | 34,6 |

* Probabilidade de ocorrer precipitação menor 1,0 mm em cada decêndio.

** Valor de precipitação em mm, respectiva a cada decêndio, contendo 75% de probabilidade de ser igualado ou superado.

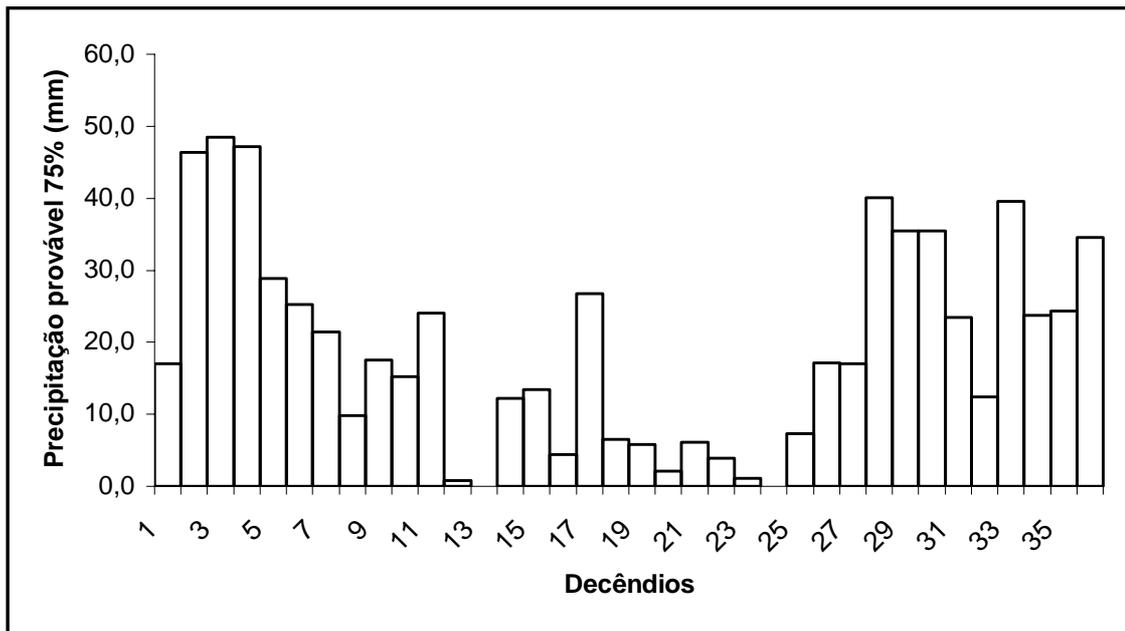


Figura 5.10 – Valores de precipitação a 75% de probabilidade, calculados com a distribuição de melhor ajuste (Gama, Normal, Exponencial e Uniforme) para a bacia do Rio das Pedras (dados disponíveis de 1985 a dezembro de 2002)

A distribuição Gama apresentou o melhor ajuste em 20 decênios, confirmando as considerações feitas por ASSIS et al (1996), SEDIYAMA et al (1996), ANDRADE JUNIOR & BASTOS (1997), CUNHA et al. (1997), RIBEIRO & LUNARDI (1997). Entretanto, alguns decênios apresentaram melhor ajuste para outras três distribuições de probabilidade analisadas. A distribuição Gama não se ajustou bem no verão, ou seja, na estação mais chuvosa da região. A distribuição Triangular não obteve melhor ajustamento em nenhum dos decênios analisados.

A distribuição Normal foi melhor em sete decênios, ou seja, 2º decênio de janeiro, 1º e 3º decênios de fevereiro, 1º decênio de março, 2º decênio de abril e 1º e 3º decênios de novembro. É interessante observar, com exceção do 2º decênio de abril, que os melhores ajustes para a distribuição Normal ocorreram nos períodos mais chuvosos da região (final da primavera e verão).

A distribuição Exponencial apresentou o melhor ajuste em oito decênios, ou seja, 1º decênio de janeiro, 2º decênio de março, 1º decênio de maio, 3º decênio de junho, 3º decênio de agosto, 1º e 3º decênios de setembro e 2º decênio de novembro. Dos oito melhores ajustes obtidos pela distribuição Exponencial, três ocorreram na estação mais seca da região.

Os resultados de precipitação provável a 75% também podem ser visualizados na Tabela 5.4. De forma geral, verificou-se que a média e desvio padrão (s) das precipitações prováveis para o verão, outono, inverno e primavera, ficaram em 31,0 mm ($s = 14,1$ mm), 12,7 mm ($s = 9,5$ mm), 5,5 mm ($s = 5,0$ mm) e 27,9 mm ($s = 10,1$ mm), respectivamente.

Outra informação apresentada na Tabela 5.4, refere-se ao período de menor ocorrência de precipitação, que foi verificada nos decêndios localizados entre o 3º decêndio de abril e o 1º decêndio de setembro, quando a precipitação provável a 75% de probabilidade ficou em 6,5 mm ($s = 7,2$ mm), em média. Constata-se também que o período seco na região é bem definido, ocorrendo a redução da precipitação entre o outono e inverno.

Os resultados obtidos após a aplicação do teste de aderência de Kolmogorov–Smirnov apresentaram a distribuição Gama com o maior número de ajustes aos dados da série histórica de precipitação, agrupados em decêndios. No entanto, outras distribuições apresentaram melhor ajuste em alguns decêndios, como ocorreu em sete decêndios com a distribuição Normal, oito decêndios com a distribuição Exponencial e um decêndio com a distribuição Uniforme. Desta forma, embora a distribuição Gama seja de uso consagrado na determinação da precipitação provável para períodos inferiores a um mês, verificou-se que outras distribuições de probabilidade devem ser utilizadas, pois nem sempre a Gama apresenta o melhor ajuste para estimar a precipitação provável de uma determinada região dispondo de uma série com poucos anos de informação disponível.

5.4 DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

A fragilidade do ambiente da bacia do Rio das Pedras foi determinada pelo método de ROSS (1994). Pela determinação das classes de fragilidade, procurou-se compreender as interações dinâmicas que atuam sobre o sistema natural da bacia hidrográfica do Rio das Pedras e assim permitir o reconhecimento das limitações presentes para o uso do solo da bacia bem como das alternativas para o uso visando a proteção do ambiente da bacia, principalmente no que diz respeito à rede de drenagem, conforme será apresentado nos subitens a seguir.

5.4.1 Mapa planialtimétrico da rede de drenagem da bacia do Rio das Pedras

A rede de drenagem e as curvas de nível, obtidas na digitalização com o *software CartaLinx* estão apresentadas na Figura 5.11 e Figura 5.12, respectivamente. Observa-se

na Figura 5.11 que a rede de drenagem é bem ramificada, sendo o Rio das Pedras um rio de ordem 4. Com o mapa planialtimétrico (Figura 5.12), foi possível a obtenção do mapa de declividade (Figura 5.13), que serviu de base para a obtenção da fragilidade potencial da bacia do Rio das Pedras. Na Figura 5.12, os intervalos entre as cotas das curvas de nível são de 40 m e estão compreendidas entre 1320 m e 960 m.

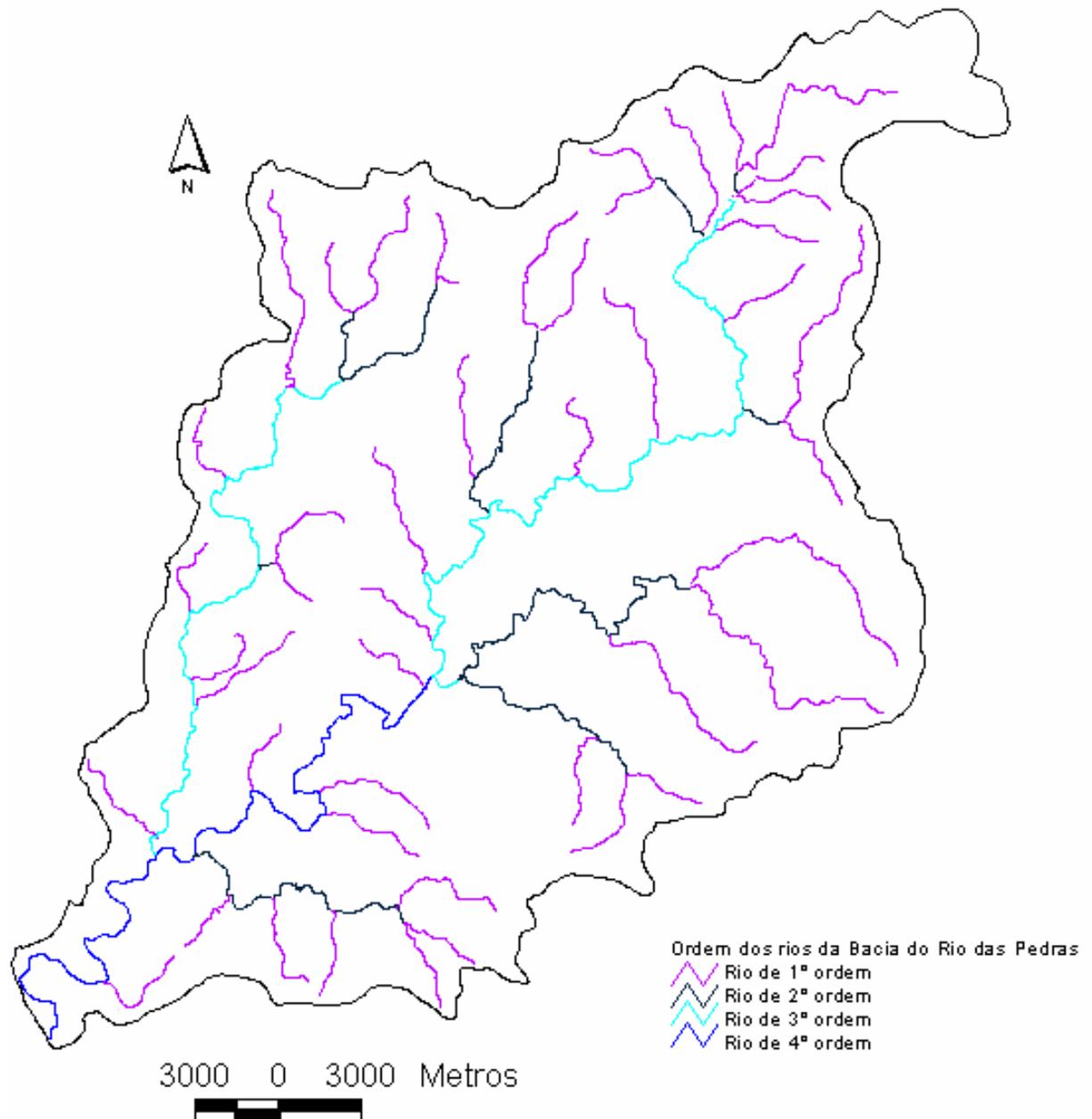


Figura 5.11 – Rede de drenagem da Bacia do Rio das Pedras e a identificação da ordem dos rios componentes da bacia.

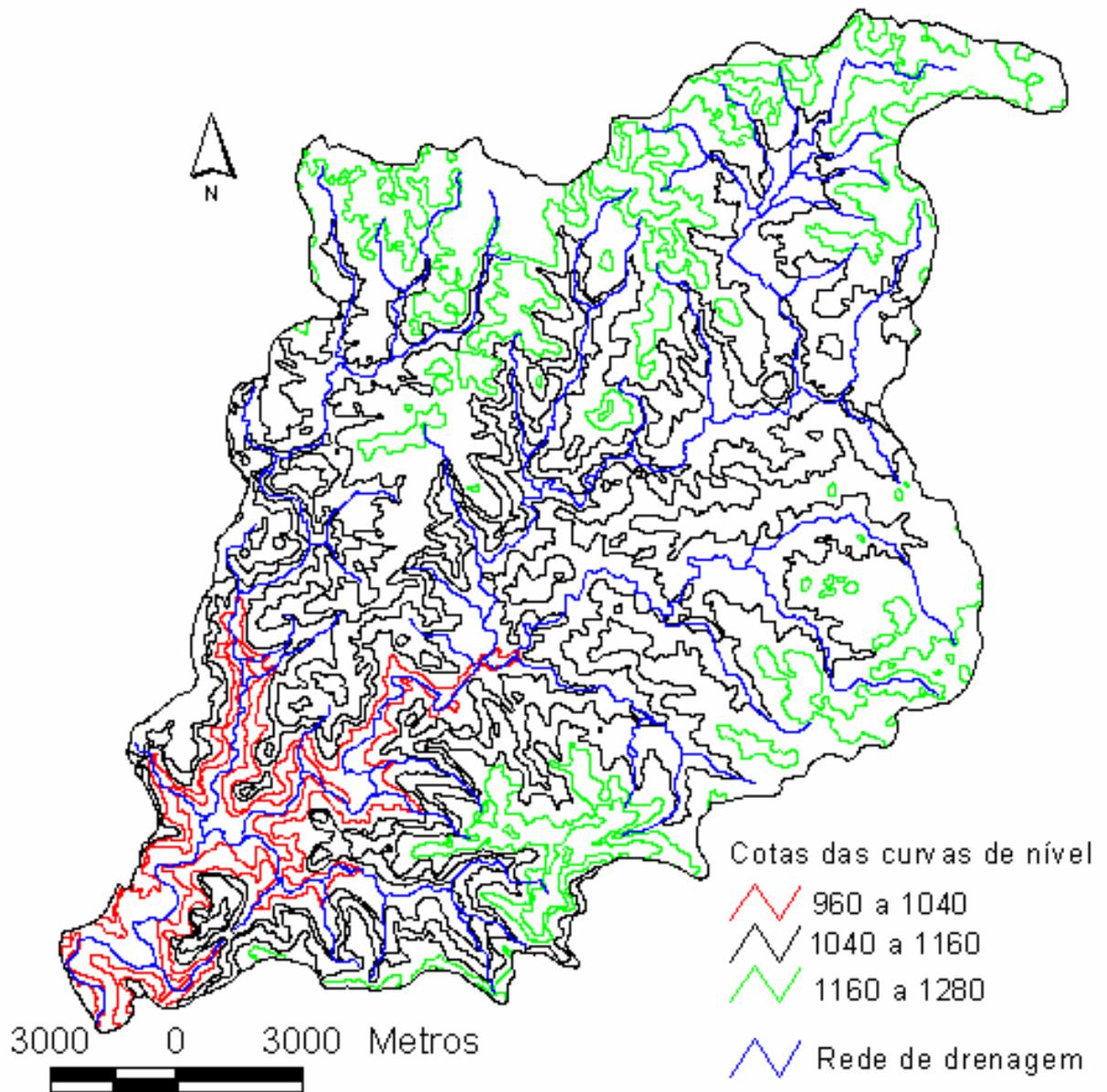


Figura 5.12 – Mapa planialtimétrico da Bacia do Rio das Pedras, com as correspondentes altitudes encontradas na digitalização da referida bacia.

5.4.2 Mapa de declividade da bacia do Rio das Pedras

O mapa de declividade apresentado na Figura 5.13 foi obtido a partir do modelo numérico do terreno, dentro do *software Idrisi 3.2*. A Tabela 5.5, mostra a relação entre as categorias hierárquicas de fragilidade conforme ROSS (1994) e os percentuais de declividades determinados na bacia. Observou-se que 72,87% do total da área da bacia possuíam declividade abaixo de 12%, o que resulta, segundo ROSS (1994), em uma categoria de fragilidade muito fraca e fraca. Conforme EMBRAPA (1999), as fases do relevo interferem na ocorrência das diferentes unidades de solo.

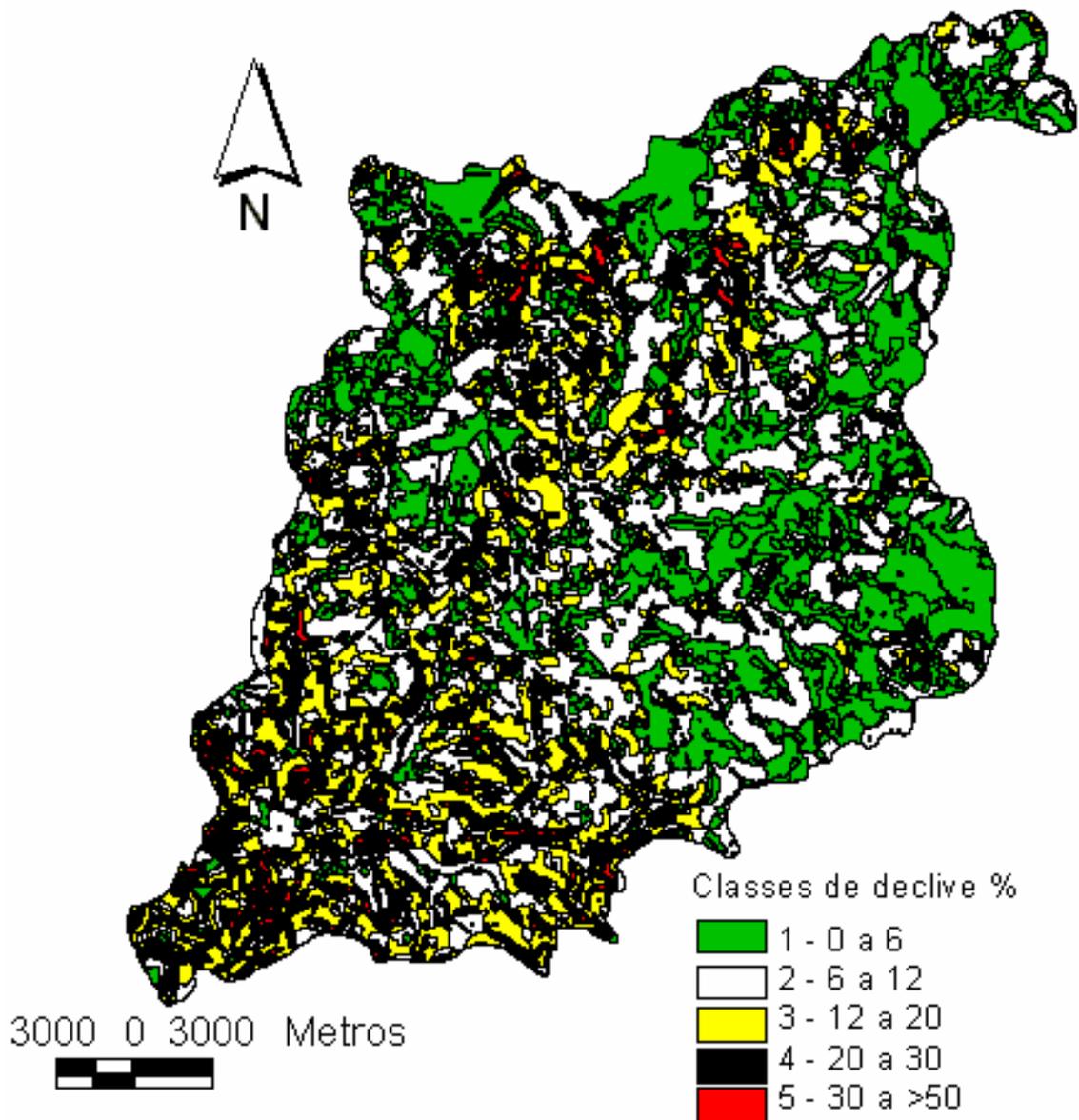


Figura 5.13 – Classes de declive da bacia do Rio das Pedras, estabelecidas conforme a metodologia proposta por ROSS (1994), para a determinação da Fragilidade Ambiental

Tabela 5.5. Classes de declividade para determinar a Fragilidade Ambiental (ROSS, 1994) e as correspondentes áreas de cada classe encontrada no interior da Bacia do Rio das Pedras

| Classe | Percentual de declividade (%) | Área na bacia (ha) | Percentagem (%) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------|-----------------|
| 1 – Muito fraca | 0 – 6 | 12014 | 36,64 |
| 2 – Fraca | 6 – 12 | 11878 | 36,23 |
| 3 – Média | 12 – 20 | 6108 | 18,63 |
| 4 – Alta | 20 – 30 | 2148 | 6,55 |
| 5 – Muito alta | > 30 | 640 | 1,95 |

5.4.3 Mapa de solos da bacia do Rio das Pedras

O mapa de solos apresentado na Figura 5.14 contém as cinco classes de solos que foram digitalizadas a partir do Mapa do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Centro-Sul do Estado do Paraná (área 9), na escala 1:300.000, elaborado pela EMBRAPA (1979).

Na Tabela 5.6 encontra-se a classificação dos solos e as suas respectivas áreas (ha) dentro da Bacia do Rio das Pedras e a Tabela 5.7 apresenta os solos encontrados em cada classe de declividade na bacia do Rio das Pedras, obtidos conforme a metodologia proposta por ROSS (1994).

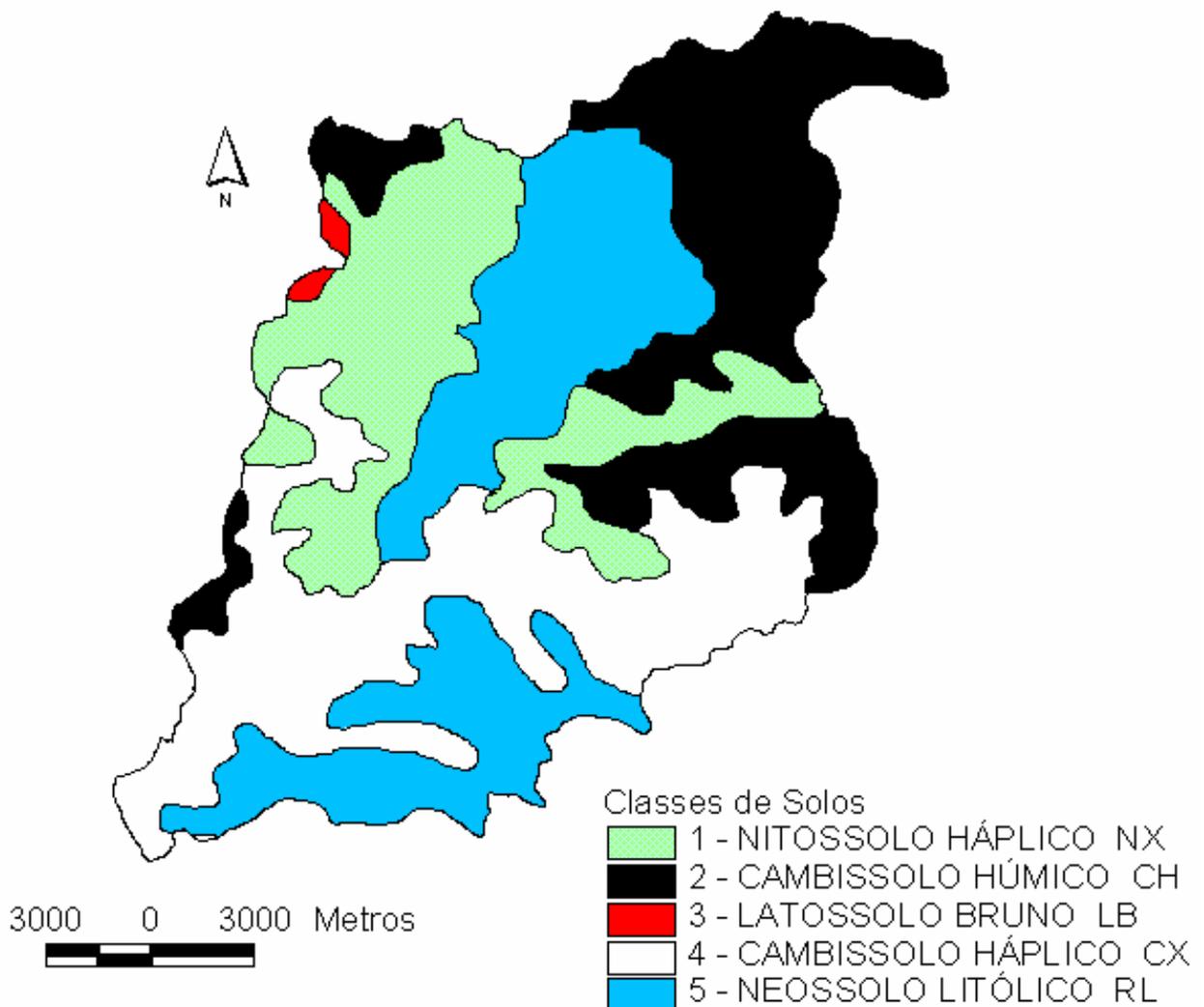


Figura 5.14 – Mapa de solos da bacia do Rio das Pedras, com a respectiva identificação dos solos encontrados na mesma.

Tabela 5.6. Classificação dos solos da Bacia do Rio das Pedras, com as respectivas áreas encontradas na mesma

| Sigla | Solo | Área (ha) | Percentual (%) |
|--------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| 1 – NX | NITOSSOLO HÁPLICO | 6.800 | 20,74 |
| 2 – CH | CAMBISSOLO HÚMICO | 8.459 | 25,80 |
| 3 – LB | LATOSSOLO BRUNO | 170 | 0,52 |
| 4 – CX | CAMBISSOLO HÁPLICO | 8.709 | 26,56 |
| 5 – RL | NEOSSOLO LITÓLICO | 8.650 | 26,38 |

Tabela 5.7. Solos encontrados em cada classe de declividade na bacia do Rio das Pedras

| Declividade (%) | Classes de Solos |
|------------------------|-------------------------|
| 0 – 6 | NX, CH, LB, CX, RL |
| 6 – 12 | NX, CH, LB, CX, RL |
| 12 – 20 | NX, CH, LB, CX, RL |
| 20 – 30 | NX, CH, CX, RL |
| > 30 | NX, CH, CX, RL |

Baseando-se nas Tabelas 5.6 e 5.7 verifica-se para a bacia do Rio das Pedras que:

- As classes de solo existentes são NX, CH, LB, CX e RL;
- A textura argilosa está presente em todos os solos encontrados na bacia;
- Entre as classes 0 a 6% e maior que 30%, os solos encontrados apresentaram horizonte A proeminente, exceto o RL, que possui horizonte A moderado. Segundo a EMBRAPA (1999) o horizonte A proeminente apresenta-se relativamente espesso, com estrutura de solo bem desenvolvida em relação à agregação e grau de desenvolvimento. Já o horizonte A moderado consiste em um horizonte mais superficial comparado ao A proeminente, apresentando maior suscetibilidade aos processos erosivos;
- Na declividade acima de 50% os solos encontrados também apresentam horizonte A proeminente e textura argilosa;

Segundo EMBRAPA (1999) os substratos dos solos consistem em: rochas do derrame de Trapp para os solos NX e LB; filitos e sedimentos pleistocênicos para o CH; siltitos, argilitos e folhelhos para o CXbd3; arenitos e gnaisses e anfibolitos para o RL.

Conforme ROSS (1994), os solos encontrados na bacia apresentam também a seguinte relação: LB (fragilidade muito baixa); NX (fragilidade média); CH e CX (fragilidade forte); RL (fragilidade muito forte). Cruzando as informações de fragilidade dos solos da bacia com as de declive, obtém-se a fragilidade ambiental potencial, apresentadas no Item 5.4.5.

5.4.4 Mapa de uso atual do solo e cobertura vegetal da bacia do Rio das Pedras

O mapa de uso atual do solo foi gerado no programa *Idrisi 3.2*, utilizando-se da imagem do Satélite *Landsat 7* e está apresentado na Figura 5.15. A Tabela 5.8 mostra os diferentes usos do solo com suas respectivas áreas para a bacia do Rio das Pedras.

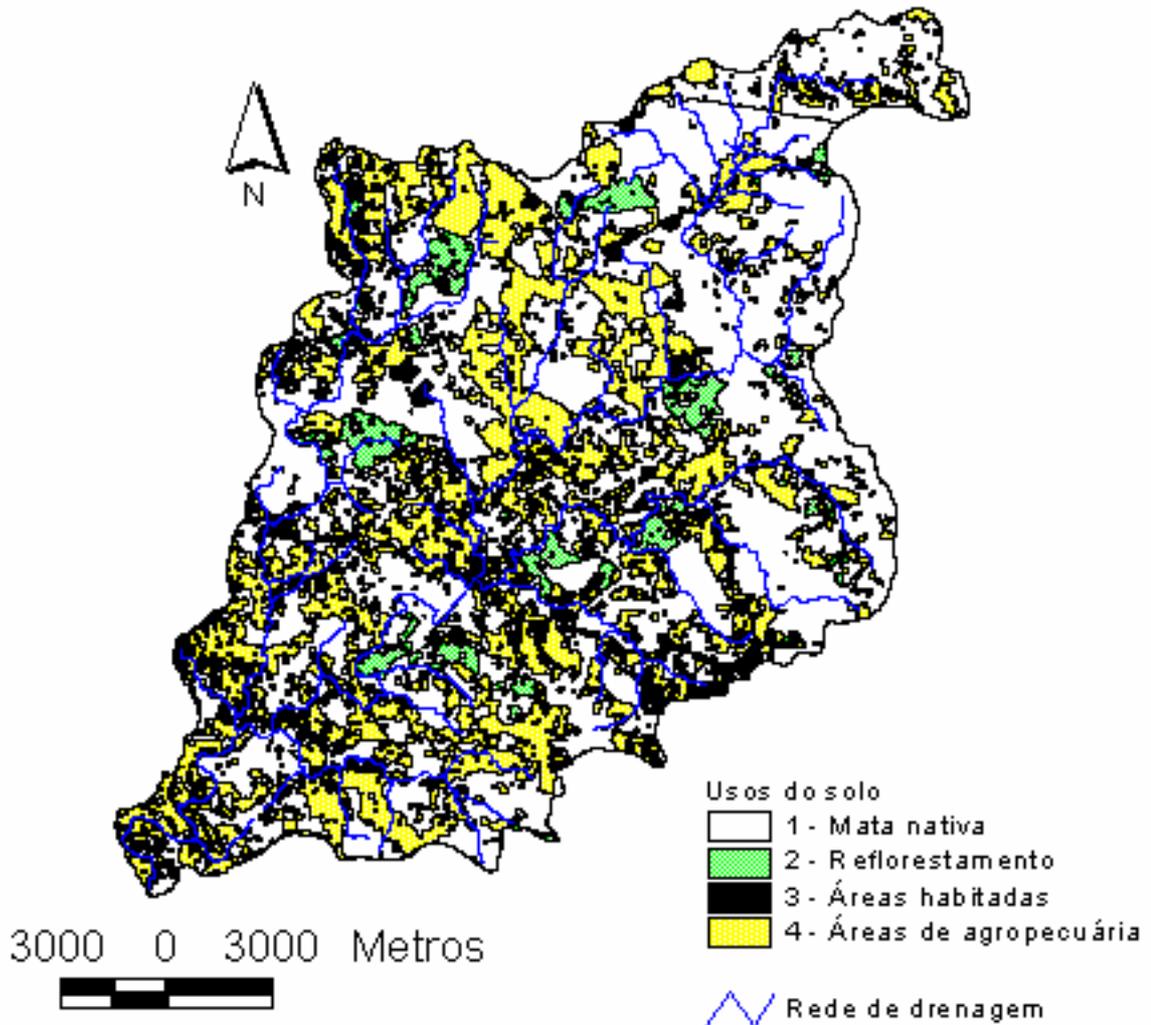


Figura 5.15 – Mapa de uso atual do solo na bacia do Rio das Pedras realizado a partir de imagens do satélite *Landsat 7* e do software *Idrisi 3.2*

Tabela 5.8. Uso atual dos solos na bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas, obtidas a partir de imagens do satélite *Landsat 7* e do software *Idrisi 3.2*

| Uso atual | Área (ha) | Percentual (%) |
|---------------------|-----------|----------------|
| 1 – Mata nativa | 19.892 | 60,67 |
| 2 – Reflorestamento | 1.427 | 4,35 |
| 3 – Áreas urbanas | 1.852 | 5,65 |
| 4 – Agropecuária | 9.617 | 29,33 |

Analisando-se a Figura 5.15 e a Tabela 5.8 verifica-se que:

- Em torno de 60,67% da área total da bacia do Rio das Pedras é coberta com mata nativa, o que é muito bom pois conforme ROSS (1994), a cobertura do solo com mata nativa oferece um grau de proteção muito alto e a bacia compreende uma Área de Preservação Ambiental (APA);
- A nascente do rio principal ainda apresenta-se com elevada cobertura vegetal nativa;
- Segundo os critérios de ROSS (1994), o grau de proteção do solo é muito alto visto que ainda existe boa cobertura de mata natural nas nascentes e na bacia (60,67%);
- O reflorestamento representa 4,35% da área total da bacia e este fato também propicia alto grau de proteção do solo (ROSS, 1994);
- As áreas de uso urbano, basicamente constituídas por pequenos vilarejos próximos às estradas (vias principais e secundárias), representam 5,65% da área total. O método de ROSS (1994) não apresenta uma classificação para esses casos. THOMAZ (2002) considera que as estradas são agentes erosivos que cortam o leito de rios, vertentes e canais escoadouros das águas das chuvas. Como as áreas urbanas são interligadas por muitas estradas, vias e ruas, pode-se esperar que o grau de proteção do solo nestes locais seja muito baixo.
- As atividades agropecuárias compreendem 29,33% da área total da bacia, consistindo basicamente em pastagens e culturas anuais. Para essas atividades, ROSS (1994) considera o grau de proteção média para pastagens com pouco pisoteio ou cultivo de ciclo longo; baixa para culturas de ciclo longo possuindo baixa densidade ou ciclo curto em nível e, muito baixa a nula para áreas desmatadas, queimadas, solo exposto por arado, gradeação e ao longo de estradas, cultivos de ciclo curto sem práticas conservacionistas.

5.4.5 Mapa da fragilidade potencial da bacia do Rio das Pedras

A Figura 5.16 apresenta as classes de fragilidade ambiental potencial, determinadas a partir do cruzamento das informações de declividade e unidades de solos, definidas pela Tabela 5.9, onde as classes de fragilidade são: muito baixa (MB), baixa (B), média (M), forte (F) e muito forte (MF). A Tabela 5.10 apresenta as classes de fragilidade ambiental potencial do solo da bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas.

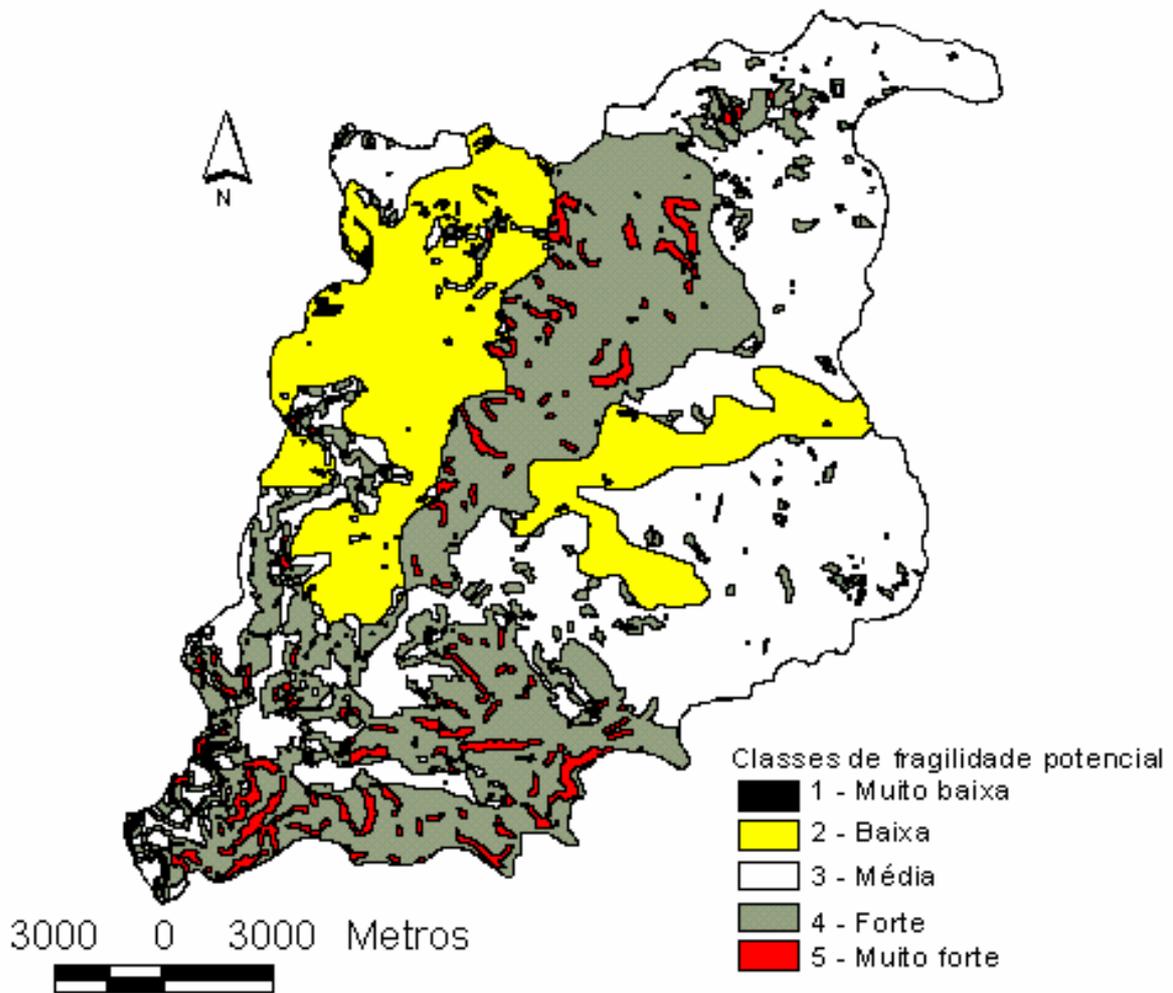


Figura 5.16 – Mapa da fragilidade ambiental potencial da bacia do Rio das Pedras, obtido da sobreposição dos mapas de solos e declividade

Tabela 5.9. Tabela Matriz para a fragilidade ambiental potencial, obtida do cruzamento entre o mapa de declividade e o mapa de solos da bacia do Rio das Pedras, com as classes de fragilidade ambiental potencial encontradas

| Declividade | Solos | | | |
|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------|
| | LB (M B) | NX (M) | CH, CX (F) | RL (M F) |
| 0 – 6 (M B) | M B | B | M | F |
| 6 – 12 (B) | M B | B | M | F |
| 12 – 20 (M) | B | M | F | F |
| 20 – 30 (F) | – | F | M F | M F |
| > 30 (M F) | – | F/ M F | M F | M F |

Tabela 5.10. Classes de fragilidade ambiental potencial do solo da bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas, obtidas da sobreposição dos mapas de solos e declividade

| Classe de Fragilidade | Área (ha) | Percentual (%) |
|------------------------------|------------------|-----------------------|
| 1 – Muito baixa | 58 | 0,20 |
| 2 – Baixa | 6.592 | 20,10 |
| 3 – Média | 13.665 | 41,67 |
| 4 – Alta | 10.909 | 33,27 |
| 5 – Muito Alta | 1.564 | 4,76 |

Considerando-se os critérios da metodologia de ROSS (1994) com as informações obtidas nas Tabelas 5.9 e 5.10, e Figura 5.16, verificou-se para a bacia do Rio das Pedras que:

- Em função apenas da declividade, 72,87% da área total da bacia estava classificada como área de fragilidade muito baixa e baixa. Após o cruzamento entre os mapas de declividade e solos (análise de fragilidade ambiental potencial), apenas 0,2% e 20,1%, respectivamente, da área total da bacia apresentou a classe de fragilidade muito baixa e baixa. Desta forma verificou-se que a classe de solo influenciou e limitou decisivamente a composição da fragilidade ambiental potencial.
- Os solos presentes nas áreas classificadas como fragilidade ambiental potencial muito baixa e baixa foram o LATOSSOLO BRUNO (LB) e o NITOSSOLO HÁPLICO (NX), que apresentam poucas restrições para o seu uso, mas é recomendável a adoção de práticas conservacionistas nas atividades agropecuárias, principalmente nas áreas com o solo NX.
- A maior percentagem de área da bacia encontra-se na classe média de fragilidade ambiental potencial do solo (41,67%), incluindo a área da nascente do rio principal, onde predominam os solos NITOSSOLO HÁPLICO (NX), CAMBISSOLO HÁPLICO (CX) e CAMBISSOLO HÚMICO (CH). Estas áreas apresentam maiores restrições ao uso por atividades agropecuárias, pois as condições identificadas de solo e relevo exigem a adoção de práticas conservacionistas como culturas em nível, plantio direto, maior área de preservação da floresta.
- Identificou-se na bacia do Rio das Pedras que 33,27% de sua área está classificada como área de fragilidade ambiental potencial alta e 4,76% da sua área como fragilidade ambiental potencial muito alta, onde predomina a unidade NEOSSOLO LITÓLICO (RL), que são solos com maiores afloramentos de rocha pobres de vegetação e alto grau de erodibilidade.

– Como a área de fragilidade ambiental potencial do solo da bacia é de aproximadamente 41,67% para a classe média e 38,03% para o somatório das classes forte e muito forte, pode-se considerar para toda a bacia uma fragilidade potencial ambiental “média a forte”, o que geralmente promove maiores restrições para o uso do solo.

5.4.6 Mapa da fragilidade emergente da bacia do Rio das Pedras

A determinação da fragilidade ambiental emergente obtida a partir do cruzamento das informações da fragilidade ambiental potencial e uso atual do solo está apresentada na Tabela 5.11, onde as classes de fragilidade seguem a seguinte ordem: muito baixa (MB), baixa (B), média (M), forte (F) e muito forte (MF). A Tabela 5.12 e a Figura 5.17 apresentam as classes de fragilidade ambiental emergente do solo da bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas.

Tabela 5.11. Tabela Matriz para a fragilidade ambiental emergente, obtida do cruzamento entre o mapa de fragilidade ambiental potencial e o mapa de uso atual do solo da bacia do Rio das Pedras, com as classes de fragilidade ambiental emergentes encontradas.

| Fragilidade Potencial | Usos e cobertura do solo | | | |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| | Mata Nativa (M B) | Reflorestamento (B) | Área urbana (MF) | Agropecuária (F) |
| 1 – Muito baixa | M B | M B | M | B |
| 2 – Baixa | M B | B | F | M |
| 3 – Média | B | M | F | M |
| 4 – Forte | B | M | M F | F |
| 5 – Muito Forte | F | F | M F | M F |

Tabela 5.12. Classes de fragilidade ambiental emergente do solo da bacia do Rio das Pedras e suas respectivas áreas, obtidas da sobreposição dos mapas de fragilidade potencial e uso do solo

| Classe de Fragilidade | Área (ha) | Percentual (%) |
|-----------------------|-----------|----------------|
| 1 – Muito baixa | 3.637 | 11,10 |
| 2 – Baixa | 15.954 | 48,66 |
| 3 – Média | 4.364 | 13,31 |
| 4 – Forte | 8.307 | 25,33 |
| 5 – Muito forte | 526 | 1,60 |

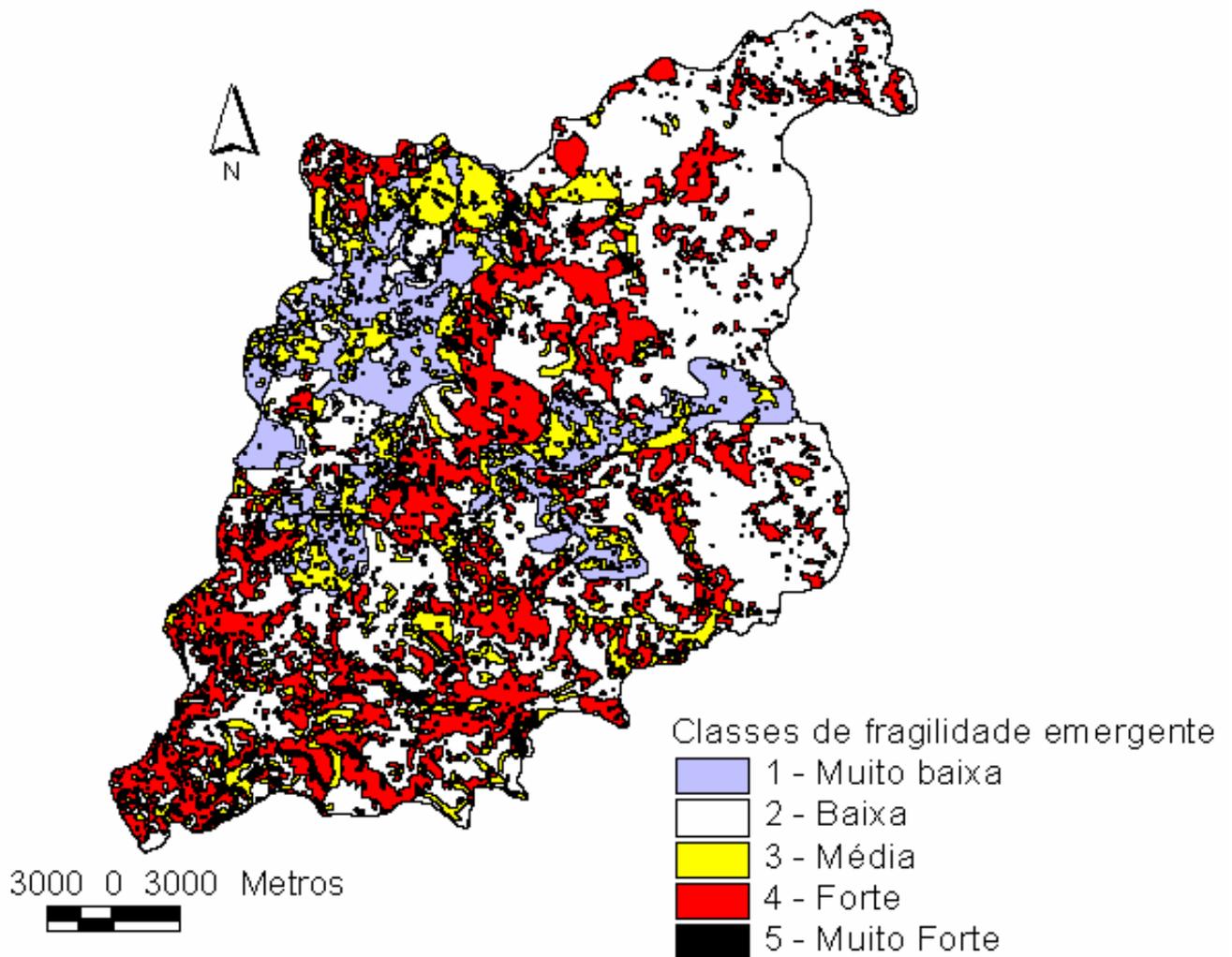


Figura 5.17 – Mapa da fragilidade emergente da bacia do Rio das Pedras, obtido da sobreposição dos mapas de fragilidade potencial e uso do solo

Na análise da fragilidade ambiental potencial, determinou-se as restrições para o uso do solo, relacionado com as classes de declive e unidades de solo, obtendo-se uma idéia para alternativas adequadas para a exploração da área da bacia, bem como da necessidade de se adotar práticas de conservação do solo, independente da atividade a ser implementada. A fragilidade ambiental emergente, resultante do cruzamento entre a fragilidade potencial e a atual condição de usos do solo na bacia, oferece uma idéia do grau de proteção do solo da bacia. Desta forma, considerando-se os critérios da metodologia de ROSS (1994) com as informações obtidas na Tabela 5.11 e Figura 5.17 e realizando-se um contraste com as informações discutidas no Item 5.4.4 e 5.4.5, verifica-se para a bacia do Rio das Pedras que:

- 11,10% da área total da bacia do Rio das Pedras encontram-se na classificação fragilidade ambiental emergente muito baixa. O uso do solo nestas áreas é exclusivamente de mata nativa e os solos identificados foram NITOSSOLO HÁPLICO (NX) e LATOSSOLO BRUNO (LB). ROSS (1994) considera a proteção do solo para esta condição de uso como muito alta. As áreas com o solo LB podem ser utilizadas para a agropecuária, de forma mais intensa. Já as áreas do solo NX apresentam maiores problemas para a agropecuária, mais podem ser utilizadas sem restrições para o reflorestamento;
- 48,66% da área total da bacia do Rio das Pedras encontram-se na classificação fragilidade ambiental emergente baixa. O uso do solo nestas áreas consiste em mata nativa e reflorestamento. Como esta classe de fragilidade constitui a maior área da bacia, ela contém todos os tipos de solos identificados. Embora a classificação identificada nos 48,66% da área seja de fragilidade ambiental emergente baixa, estas áreas não devem ser utilizadas para a agropecuária, visto que a fragilidade ambiental potencial identificada ficou entre média e alta.
- 13,31% da área total da Bacia do Rio das Pedras foram classificadas como fragilidade ambiental emergente média. O uso atual do solo nestas áreas consiste em atividades agropecuárias e ocupação humana (áreas habitadas) e os solos identificados foram o NITOSSOLO HÁPLICO (NX), LATOSSOLO BRUNO (LB), NEOSSOLO LITÓLICO (RL) e CAMBISSOLO HÁPLICO (CX). Estas áreas são consideradas de fragilidade média em virtude de se concentrarem em locais com declividade entre 0 a 3%. A atividade agropecuária nestas áreas requer a adoção de práticas conservacionistas ou a adoção de reflorestamento, o que possibilitaria maior preservação do solo.
- 25,33% da área total da bacia do Rio das Pedras foram classificadas como fragilidade ambiental emergente forte. O uso atual do solo nestas áreas é constituído basicamente por atividades agropecuárias. As classes de solos presentes, denominadas CAMBISSOLO HÁPLICO (CX) e NEOSSOLO LITÓLICO (RL), geram fortes restrições a essa atividade. O ideal seria a implantação do reflorestamento como alternativa de uso do solo, visando a sua conservação.
- 1,60% da área total da bacia encontra-se na classificação de fragilidade ambiental emergente muito alta. Estas áreas estão em locais de NEOSSOLO LITÓLICO (RL), utilizado basicamente nas atividades agropecuárias. ROSS (1994) considera que esta condição é extremamente limitante para o uso do solo. A melhor alternativa de uso do solo seria destinar essas áreas para a preservação da mata nativa.

- 59,76% da área total da bacia, apresentam fragilidade ambiental emergente considerada baixa e muito baixa, demonstrando que o uso do solo na bacia não atingiu os limites potenciais de fragilidade. Desta forma, a bacia do Rio das Pedras encontra-se bem preservada, especialmente quanto à erosão do solo, que por sua vez protege a rede de drenagem contra o assoreamento dos leitos dos rios.

5.4.7 Parâmetros da forma da bacia

Os parâmetros de forma da bacia foram calculados conforme metodologia sugerida por VILLELA & MATTOS (1975) e estão dispostos na Tabela 5.13. A finalidade de determinar os parâmetros de forma da bacia consiste em averiguar as condições propícias para a ocorrência de enchentes. Através dos valores encontrados, é possível discutir as reais condições presentes na conformação do relevo, da velocidade de infiltração e na velocidade de escoamento da vazão do rio principal, levando-se em consideração não somente as condições do relevo mas a textura média dos solos presentes na bacia.

Tabela 5.13. Parâmetros de forma encontrados para a Bacia do Rio das Pedras, conforme as recomendações de VILLELA & MATTOS (1975)

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|--|----------|------------------|
| Coeficiente de compacidade (K_c) | 1,56 | Adimensional |
| Fator de forma (K_f) | 0,102 | Adimensional |
| Densidade de drenagem (D_d) | 0,82 | km ⁻¹ |
| Sinuosidade do curso de água (Sin) | 1,79 | Adimensional |
| Elevação média da bacia (E) | 1.146,98 | M |

Mediante os resultados presentes na Tabela 5.12, pode-se verificar para a bacia do Rio das Pedras que:

- A área não está propensa a grandes enchentes, pois o coeficiente de compacidade encontrado na bacia do Rio das Pedras (1,56) é superior ao valor de propensão para picos elevados de cheia (1,50);
- O parâmetro fator de forma (K_f) encontrado para a bacia do Rio das Pedras foi baixo (0,102) e confirma a baixa propensão para picos elevados de cheia, encontrados para o K_c . O valor de K_f encontrado ($\leq 0,50$) significa que a bacia é estreita, longa e a possibilidade de uma chuva intensa atingir toda a área da bacia simultânea é pequena.
- O parâmetro densidade de drenagem (D_d) encontrado na bacia do Rio das Pedras (0,82) indica que o seu relevo é regular com características de drenagem pobre, pois a densidade de drenagem é baixa e inferior a 5;

- O curso principal da bacia do Rio das Pedras apresentou elevado valor de sinuosidade (1,79) o que pode interferir na ocorrência de enchentes, pois a velocidade dos tributários é maior em função da ausência de trechos sinuosos. Porém, a probabilidade de ocorrência destes fenômenos na bacia é pequena, conforme valores obtidos para os parâmetros K_c e K_f . Além dos valores dos parâmetros K_c e K_f , deve-se acrescentar também que a bacia acha-se com 60,67% de sua área coberta com mata nativa, o que interfere de forma positiva no controle de enchentes;
- O valor determinado para a elevação média (1.146,98 m) caracteriza a bacia do Rio das Pedras como um local de áreas predominantemente elevadas. A localização da bacia encontra-se no reverso da escarpa basáltica, localmente denominada como Serra da Esperança, que divide o 2º do 3º planalto paranaense.

5.4.8 Interação entre a caracterização hidrológica e da fragilidade ambiental

O ciclo hidrológico, como já foi abordado anteriormente, consiste na recirculação contínua e infinita da água entre atmosfera, continentes e oceanos, e este ciclo é influenciado pelo processo chuva-vazão, que pode ser representado por meio de modelos matemáticos. Desta forma, a modelagem matemática auxilia na obtenção de informações que evidenciam as variações ocorridas devido à ação do homem e suas influências na disponibilidade de água doce em uma bacia hidrográfica. A disponibilidade de água doce também é influenciada pela modalidade de uso do solo adotada pelo homem, que pode provocar condições hidrológicas artificiais, erosão, assoreamento dos rios e influenciar no regime hídrico de uma bacia. No entanto, a influência da ação do homem pode ser identificada e atenuada pelo estudo da fragilidade ambiental, que permite, no interior de uma bacia hidrográfica, identificar os locais mais apropriados às diferentes modalidades de uso do solo.

Ao aliar a modelagem matemática com o estudo da fragilidade ambiental na bacia hidrológica do Rio das Pedras, obteve-se informações que permitiram avaliar as condições atuais e futuras, com relação à disponibilidade de água doce para as atividades humanas e a preservação do solo no interior da mesma. Assim, algumas considerações são apresentadas a partir deste ponto:

- (a) Conforme já apresentado, a fragilidade ambiental divide-se em potencial (obtida a partir do cruzamento das informações sobre declividade e solos) e emergente (obtido a partir do cruzamento do uso do solo com a fragilidade ambiental potencial). Ambas são classificadas como muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. As áreas que

apresentaram fragilidade ambiental potencial ou emergente, e são classificadas como alta e muito alta, são as áreas com maior suscetibilidade a processos erosivos que aceleram a degradação do solo e cursos de água, devido à ação humana;

- (b) Na série de 18 anos avaliados, os anos de 1986, 1991, 1994, 1999 e 2002, apresentaram as vazões reduzidas quando comparadas com os demais anos. A princípio não se pode afirmar que a redução da vazão nos anos identificados ocorreu sob influência das variáveis que interferem na fragilidade ambiental, como a erosão provocada pelo uso do solo. Neste caso, a vazão deveria reduzir de forma contínua ano a ano, o que não foi constatado durante esse estudo. Essa evidência é reforçada pelo fato de que a bacia hidrográfica apresentou 59,76% do total de sua área classificada como fragilidade ambiental emergente baixa e muito baixa, em virtude do predomínio de áreas recobertas com mata nativa e reflorestamento. Essa condição atual garante além da preservação do solo contra processos erosivos acentuados, a manutenção do equilíbrio da vazão. O mais provável é que a redução de vazão ocorrida nestes anos deveu-se a influência climática, ou seja, devido a menor incidência de chuvas.
- (c) A área onde se encontra a estação de captação de água no Rio das Pedras para a cidade de Guarapuava, situada no terço final da bacia, foi considerada o local com maior probabilidade de interferência na vazão pela ação humana, pois a fragilidade ambiental emergente foi classificada como forte e muito forte. Nestes locais, o solo está sendo utilizado para agropecuária e habitação, o que favorece a ocorrência da erosão e o assoreamento da rede de drenagem;
- (d) Como 79,7% das áreas da bacia do Rio das Pedras apresentaram fragilidade ambiental potencial classificadas entre média a forte, alterações nas condições ambientais devido o aumento do desmatamento e a intensificação das áreas urbanas e agropecuária, poderão promover alterações nos mecanismos naturais da erosão e no regime hidrológico da bacia.

6 CONCLUSÕES

Conforme as informações obtidas e analisadas neste trabalho concluiu-se para a bacia do Rio das Pedras que:

- O modelo chuva-vazão denominado *HYCYMODEL* apresentou bons ajustes para períodos curtos (um ano) entre os valores respectivos de vazão observada e calculada. Porém, a estimativa da evapotranspiração real (*ET_r*) e conseqüentemente do balanço hídrico pelo modelo não são adequados.
- Os índices de evapotranspiração relativa (*ET_r / ET_p*) evidenciam que a evapotranspiração real (*ET_r*) calculada no balanço hídrico com o *HYCYMODEL* superestimou, em média, 44,2% dos valores de evapotranspiração potencial (*ET_p*) calculada com o método de Thornthwaite.
- Embora a distribuição Gama seja de uso consagrado na determinação da precipitação provável para períodos inferiores a um mês, outras distribuições de probabilidade devem ser consideradas para estimar a precipitação provável de uma região contendo pequena série de informação disponível, pois a Gama não apresenta o melhor ajuste em todos os decêndios analisados.
- A fragilidade potencial da bacia do Rio das Pedras classifica-se entre média e alta, pois 41,67% da área total da bacia encontram-se na classe de fragilidade média e 32,27% encontram-se na classe de fragilidade alta para fins agrícolas.
- A bacia apresenta 60,67% e 4,35% da sua área total utilizada com mata nativa e reflorestamento, respectivamente. Os usos do solo da bacia classificam-na como fragilidade ambiental emergente muito baixa (11,10%) e baixa (48,66%). Os limites da potencialidade de uso do solo não foram atingidos, estando a bacia protegida da erosão.
- Para as condições atuais analisadas, os fatores de forma da bacia demonstram que não há riscos de ocorrência de enchentes.

REFERÊNCIAS

- AMORIN, M. C. de; ROSSATO, L.; TOMASELLA, J. Determinação da evapotranspiração potencial do Brasil aplicando o modelo de Thornthwaite a um sistema de informação geográfica. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4 n. 3, p. 83-90, jul./set. 1999.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A. Precipitação provável para o município de Uruçui, no cerrado Piauiense, utilizando a função de distribuição gama. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997 Piracicaba. **Anais...** Sociedade Brasileira de Agrometeorologia /ESALQ – USP/CNPQ/FAPESP/FINEP, 1997, p. 110-112.
- AQUINO, L.H. de **Estatística**. Lavras: UFLA, 1981. 202p.
- ARIYAKANON, N. **Studies on long-term trend in discharge characteristics in forested watersheds**. Laboratory of Forest Hydrology and Erosion Control Engineering Department of Forest Science, Graduate School of Agricultural and Live Sciences. University of Tokyo, 2000. 161 p.
- ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Universitária/UFPel, 1996. 161p.
- BARTH, F. T. et al. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo, Nobel: ABRH, 1987. 526 p.
- BENNEMA, J., BEEK, K.J., CAMARGO, M.N. **Um sistema de classificação de capacidade de uso da terra para levantamentos de reconhecimentos de solos**. DPFS/DPEA/MA/FAO, Rio de Janeiro, 1964.
- BEVEN, K. J; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**. n. 24, p 43-69, 1979
- BIGARELLA, J. J. et al. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis, UFSC, 1994. 425 p.
- CASTRO NETO, P.; SILVEIRA, J.V. Precipitação provável para Lavras - MG, baseada na função de distribuição de probabilidade gama. **Ciências Práticas Lavras**, v. 7, n. 1, jan./jun. 58-65, 1983.
- CORDERO, A.; MEDEIROS, P. A.; TERAN A. L. Medidas de controle de cheias e erosões. **Revista de estudos ambientais**, Blumenau, v. 1, n. 2, p. 27-45, maio./ago. 1999.
- CUNHA, A. R.; MARTINS, D.; PASSOS, J. R. de S. O modelo gama de probabilidade aplicado ao estudo da distribuição da chuva mensal na região administrativa de Bauru. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997 Piracicaba. **Anais...** Sociedade Brasileira de Agrometeorologia /ESALQ – USP/CNPQ/FAPESP/FINEP, 1997, p. 107-109
- DETONI, S. F.; MELO, M. A. de; DIAS, L. **Geoprocessamento aplicado à análise de fragilidade ambiental**. São Paulo: USP. Relatório de pesquisa. Disponível em: www.cibergeo.org/agbnacional/VICBG-2004/Eixo2/E2-078.htm. Acessado em: 14/09/2004.

DÖLL, P., KASPAR, F., LEHNER, B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 270, p. 105-134, 2003.

DONHA, A. G. **Avaliação do uso de técnicas de suporte a decisão na determinação da fragilidade em ambiente de geoprocessamento: o caso do Centro de Estações Experimentais do Cangüiri – Universidade Federal do Paraná**. Curitiba, 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

DOOGE, J. C. I. **Mathematical models for surface water hydrology**. Problems and methods of Rainfall – Runoff Modelling. Editado por Ciriani et al., John Wiley and Sons, London: 71 – 108, 1974, 423 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

EMBRAPA, IAPAR. **Levantamento de reconhecimento dos solos do centro-sul do Estado do Paraná** (área 9). Brasília, 1979.

ESPÍNDOLA SOBRINHO, J; et al. **Estimativa da evapotranspiração máxima e coeficientes de cultivo para feijão caupí e milho**. Mossoró, ENA/ESAM, 1989, 32 p. (ENA/ESAM, Boletim Técnico Científico, 009).

FAO. **Framework for land evaluation**. Roma, FAO. (Soil, Bull, 29) e Wageningen, ILRL, 1976. 72 p. (Publ.22).

FOSTER, E. E. **Rainfall and Runoff**. New York: The Macmillan Company, 1949. 487 p.

FRIZZONE, J. A. **Planejamento da irrigação: Uma abordagem às decisões de investimento**. Piracicaba, 1999. USP/ ESALQ/Departamento de Engenharia Rural, 110 p.

FUKUSHIMA, Y.; WATANABE, O.; HIGUCHI, K. Estimation of streamflow change by global warming in a glacier – covered high mountain area of the Nepal Himalaya. **Snow, Hydrology and Forest in High Alpine Areas**. IAHS Publ., n. 205, p. 181-189, 1991.

FUKUSHIMA, Yoshihiro. A model of river flow forecasting for a small forested mountain catchment. **Hydrological Processes**. v. 2, p 167-185, 1988.

GIACOSA, R. et al. Conocimiento del régimen hidrológico. In: PAULI, C. et al. **El río paraná en su tramo médio: contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de Ilanura**. Santa Fé, Argentina, Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral, 2000, tomo 1, p. 71-103.

HORNBERGER, G. M.; et al. **Elements of physical hydrology**. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1998. 302 p.

KOBYAMA, M.; GENZ, F.; MENDIONDO, E. M. Geo-Bio-Hidrologia. In: FÓRUM GEO – BIO – HIDROLOGIA: ESTUDO EM VERTENTES E MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS, 1, 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1998, p. 1-25.

KUBOTA, J.; OHTA, T.; SHIBANO, H. An analysis of runoff characteristics on volcanic areas using the HYCYMODEL. **Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering**. Japan, v. 48, p. 77-89, 1996.

LANDSAT TM 7. Escala 1:100.000. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001-2002. Imagem de satélite. Canais 3, 4 e composição colorida 3, 5 e 8 (para resolução de 15 m);

- LEPSCH, I. F. ; BELLINAZZI JR, R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras nos sistema de capacidade de uso**. 2. ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1991, 175p.
- LIMA, A. G. Caracterização geomorfológica preliminar da bacia do rio das pedras, Guarapuava-PR. **Geografia**, Rio Claro, v. 24, n. 2, p. 37-51, agosto 1999.
- LINDEN, S. Van Der; WO, M. Application of hydrological models within increasing complexity to subartic catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 270, p. 145-157, 2003.
- LINSLEY, R. K. Jr. et al. **Hydrology for engineers**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1958. 340 p.
- MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. 2 ed. Rio de Janeiro, J. Olympio, 1981. 350 p.
- MEYER, B. et al. **Introdução à fisiologia vegetal**. 2. ed. Local: Fundação Calouste Gulbenkian, 1973. 710 p.
- MINISTERIO DO EXÉRCITO. **Carta topográfica de Guarapuava**. Porto alegre: Diretoria do Serviço Geográfico-Brasil, 1991. color.; 54,5 x 50,5 cm. Escala 1: 100.000
- MÜLLER, I. I. **Métodos de avaliação da evaporação e evapotranspiração – análise comparativa para o Estado do Paraná**. Curitiba, 1995, 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, Universidade Federal do Paraná.
- OLIVEIRA, S. M. de. **Análise do processo chuva-vazão de duas bacias hidrográficas na região litorânea do estado do Paraná, através do modelo de tanque**. Curitiba, 1999 116 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- PAREDES, E. A. **Sistema de informação geográfica:(geoprocessamento) princípios e aplicações**. São Paulo: Érica, 1994. 227 p.
- PENTEADO, A. F.; FIORI, C. O.; CANALI, N. E. Fragilidade Ambiental da Bacia do Rio Serra Negra-PR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10. Disponível em: <<http://www.cibergeo.org/xsbgfa/cdrom/eixo3/3.3/060/060.htm>> Acessado em: 14/09/2004.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PILAR, J.; CRUZ, M. A.; SANTANA, A. G. Modelos numéricos do terreno 3: obtenção do hidrograma unitário. In: FÓRUM DE GEO-BIO-HIDROLOGIA: ESTUDO EM VERTENTES E MICROBACIAS, 1, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1998. p. 93-102
- PREVEDELLO, Celso L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4 n. 3, p. 23-28, jul./set. 1999.
- RAMALHO FILHO, A.; PEREIRA, E. G.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. Brasília: SUPLAN/EMBRAPA-SNLCS, 1978. 70p.
- RIBEIRO, A. M. A.; LUNARDI, D. M. C.. A precipitação quinzenal provável para Londrina-PR, Através da Função Gama. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997 Piracicaba. **Anais...** Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ESALQ-USP/CNPQ/ FAPESP/FINEP, 1997, p. 95-97
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 513 p.
- RODRÍGUEZ. S. R. **O uso da terra e a qualidade das águas superficiais da bacia do rio Sapucaí-guaçu, no município de Campos do Jordão – SP**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) - FFLCH – Universidade de São Paulo.

- ROSS, J. L. S. Análise e síntese na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, n. 9, 1995.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994.
- SAGARA, F. T. **Estudo hidrológico de uma pequena bacia hidrográfica experimental no município de General Carneiro – PR, através de monitoramento e modelagem**. Curitiba, 2001. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SANTOS, I. dos. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio pequeno, São José dos Pinhais-PR**. Curitiba, 2001. 93 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- SEDIYAMA, G.C.; MELO, J. S. P. de; ALVES, A. R; COELHO, D. T. Determinação dos parâmetros da distribuição gama, em função das alturas médias mensais de precipitação dos dias chuvosos. **Revista Ceres**. Viçosa, v. 43, n. 247, p. 254-266, 1996.
- SEDIYAMA, G. Necessidades de água para os cultivos. In: ABEAS. **Curso de engenharia da irrigação, módulo 4**. Brasília: ABEAS, 1987. 143p.
- SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graf method. **Engineering News-Record**, New York, v. 108, p. 501-505 1932.
- SHULER, A. E., MORAES, J. M. de; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.. Análise da representatividade física dos parâmetros do TOPMODEL em uma bacia de meso escala localizada nas cabeceiras do rio corumbataí, São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 5-25, abr./jun. 2000.
- SILVA, L. P.; EWEN, J. Modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas: a necessidade de novas metodologias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 81-92, out./dez. 2000.
- SILVEIRA, A. L. da; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In TUCCI, C. E. M.; et al. **Hidrologia - ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993. p. 335 - 372.
- SILVEIRA, G. L. Gerenciamento dos recursos hídricos no Rio Grande do Sul - histórico e propostas de sistema estadual. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9. e SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS, 5., 1991, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro, ABRH/APRH, 1996. p. 567-577.
- SOUZA, J.L.M. de. **Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. Piracicaba, 2001. 253 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-11102001-180056/>>
- SOUZA, J. L. M. de. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro (*G. hirsutum* L.) submetido a diferentes profundidades do lençol freático**. Piracicaba, 1992. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP.
- SPÖRL, C. **Análise da fragilidade ambiental relevo-solo com aplicação de três modelos alternativos nas altas bacias do rio jaguari-mirim, ribeirão do quartel e ribeirão da prata**. São Paulo, 2001. 159 f. Tese (Doutorado) Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18012002-225147/>> Acessado em: 14/09/2004
- SUGAWARA, M. On the analysis of runoff struture about several Japanese rivers. **Japanese Journal Geophysics**, Tokyo, v. 2, p. 1-76, 1961

- TANAKA, H.; FUKUSHIMA, Y.; LI, C.; KUBOTA, J.; OHTA, T.; SUZUKI, M.; KOSUGI, K. Water discharge property of evergreen broad-leaved forest river basin Julianshan, Jiangxi province, China. **Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources**, Tóquio, v. 11, n. 3, p. 240-252, 1998.
- THOMAZ, E. L. Geomorfologia ambiental e agricultura familiar na bacia do rio iratim – Guarapuava-PR. **R.RA'GA**, Curitiba, n. 4, p. 37-48, 2000.
- THOMAZ, E. L.. **Caracterização hidroclimática da bacia do rio das pedras**: primeira versão. Guarapuava:UNICENTRO, 2002. 22 p. Relatório de pesquisa.
- THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R. **Aspectos climáticos de Guarapuava-PR**. Guarapuava: UNICENTRO, 2003. 106 p.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94 1948.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998. 669 p.
- TUCCI, C. E. M.; et al. **Hidrologia - Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993. 943 p.
- TUCCI, C.E.M. Modelos determinísticos. In: BARTH, F. T.; et al.. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel/ABRH, 1987. p. 211 – 324.
- VARELLA, R. F.; CAMPANA, N. A. Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL.**Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 121-139, out./dez. 2000.
- VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C. de; CLEARY, R. W. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. p. 43-97.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.