

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**UM ESTUDO DOS EFEITOS DE ESCALA E USO DO SOLO NA  
PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO NAVMO COM DADOS DE BACIAS DO  
CARIRI PARAIBANO**

**HILDEBERTO BERNARDES DE LACERDA JÚNIOR**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2002**

**HILDEBERTO BERNARDES DE LACERDA JÚNIOR**

**UM ESTUDO DOS EFEITOS DE ESCALA E USO DO SOLO NA  
PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO NAVMO COM DADOS DE BACIAS DO  
CARIRI PARAIBANO**

**Dissertação apresentada ao curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, na  
área de Engenharia de Recursos  
Hídricos, em cumprimento às exigências  
para obtenção ao Grau de Mestre**

**Área de Concentração: RECURSOS HÍDRICOS**

**Orientador: EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**MARÇO – 2002**



L131e Lacerda Júnior, Hildeberto Bernardes de.  
Um estudo dos efeitos de escala e uso do solo na parametrização do modelo NAVMO com dados de bacias do Cariri paraibano / Hildeberto Bernardes de Lacerda Júnior.  
- Campina Grande, 2002.  
104 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -  
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e  
Tecnologia, 2002.

Orientação: "Prof. Dr. Eduardo Eneas de Figueiredo".  
Referências.

1. Escoamento - Bacias - Engenharia Civil - Rio Grande do Norte(RN). . 2. Recursos Hídricos - Efeito de Escala. 3. Escoamento - Bacias do Cariri Paraibano - Efeito de Escala. 4. Engenharia Civil - Dissertação. I. Figueiredo, Eduardo Eneas de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 624:556.16(813.3)(043)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

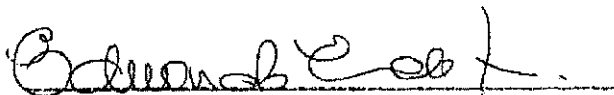
**MESTRANDO**

**HILDEBERTO BERNARDES DE LACERDA JÚNIOR**

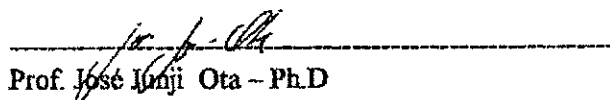
**DISSERTAÇÃO**

**TÍTULO "UM ESTUDO DOS EFEITOS DE ESCALA E USO DO SOLO NA  
PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO NAVMO COM DADOS DE BACIAS DO  
CARIRI PARAIBANO"**

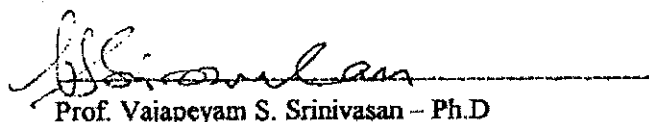
**COMISSÃO EXAMINADORA**



**Prof. Eduardo Encas de Figueiredo – Ph.D**



**Prof. José Irajá Ota – Ph.D**



**Prof. Vajapeyam S. Srinivasan – Ph.D**

**Campina Grande, 27 de março de 2002**

Aos meus pais, Hildeberto e Fleunice,  
que com a maior boa vontade sempre  
me estimularam aos estudos.

## AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho. Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela vida e a saúde.

Aos professores da Área de Recursos Hídricos: Sarma K. Seemanapalli, Heber Pimentel Gomes, Janiro Costa Rêgo, Raimundo Sergio Góis, Carlos Oliveira Galvão, Vajapeyan S. Srinivasan, Eduardo Enéas de Figueredo, Rosires Catão Curi, pelos conhecimentos adquiridos e dedicação dispensada durante o curso.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica pelos auxílios prestados, atenção e respeito.

Ao CNPq pelo suporte financeiro, através de bolsa de estudos, para a realização desta pesquisa.

Ao professor Eduardo Eneas de Figueiredo, meu orientador, pela disponibilidade, paciência e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos colegas, em especial, Lucílio José Vieira, José Florentino P. Júnior, Leonardo Neves, Marcus Carlos Santos, Héberte Davi pelo companheirismo e união durante o curso.

Aos meus tios Gilvan e Fátima Gusmão pela carinhosa acolhida em seu lar durante este período.

À minha família, meus irmãos e meus pais pelo apoio incansável e indispensável. A minha noiva Marcela Verônica pela sua paciência e ajuda durante os momentos difíceis.

## RESUMO

Os efeitos de escala e do uso do solo sobre o escoamento nas bacias da região semi-árida da Paraíba ainda são pouco conhecidos. O impacto das alterações, causado principalmente pelo desmatamento, reflete-se nos parâmetros de infiltração da água no solo e, conseqüentemente no escoamento. A escala da bacia pode também exercer influência nos valores dos parâmetros devido à heterogeneidade do clima e do solo. Nesta pesquisa, os efeitos de escala e do uso do solo são estudados, tanto em relação aos parâmetros físicos relacionados ao escoamento quanto ao comportamento do escoamento simulado em bacias do Cariri Paraibano através do modelo distribuído NAVMO. Inicialmente foi feita uma estimativa dos valores da curva número (CN), do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos e do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ), com base nos dados observados em diferentes escalas na Bacia Representativa de Sumé. E em seguida, a validade dos parâmetros estimados foi investigada através do modelo distribuído NAVMO que considera estes parâmetros no processo de simulação do escoamento. Foram investigados ainda os efeitos de escala e uso do solo sobre outros parâmetros do modelo, associados aos processos de evaporação e escoamento. Os resultados mostram que os parâmetros físicos (CN,  $n$ ), variam tanto com a escala quanto com as condições de uso do solo. O mesmo comportamento foi verificado para os outros parâmetros do modelo. Quanto ao comportamento do escoamento verifica-se também que sofre os efeitos do uso solo, pois nas áreas desmatadas o valor médio das vazões máximas foi 90% maior do que nas áreas vegetadas. Já o volume anual médio foi 170% maior nas áreas desmatadas.

## ABSTRACT

The effects of scale and land use change on the runoff generated in the watersheds of the semiarid region of the state of Paraíba are not well known. The deforestation impacts are principally on the processes of infiltration and runoff. In addition, the basin scale can affect the value of the parameters related to these processes due to the heterogeneities in the catchment (climate, soil, land use). In this research, the runoff curve number index (*CN*), introduced by the Soil Conservation Service of the United States, and the Manning roughness coefficient (*n*) that affect the infiltration and runoff characteristics are evaluated using data from the Representative Basin of Sumé, measured at various basin scales, located in the semiarid northeastern region of the state of Paraíba, Brazil. Afterwards the validity of the parameters evaluated are analysed in the simulation of the runoff through the distributed model NAVMO, that consider such parameters as *CN* and *n* among others. Investigation of the effects of scale and land use on the other parameters of the model, those for which the runoff generation is mostly sensitive, were carried out too. The results showed that the investigated parameters vary with the basin scale and land use condition. Also, the results demonstrated that the process of discharge is markedly affected by the land use, with the simulated maximum annual discharge and volume in deforested areas being 90% and 170 % greater than those simulated in forested ones.



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| DEDICATÓRIA.....   | i         |
| AGRADECIMENTOS.....  | ii        |
| RESUMO.....  | iii       |
| ABSTRACT.....  | iv        |
| SUMÁRIO.....   | v         |
| LISTA DE TABELAS.....  | viii      |
| LISTA DE FIGURAS.....  | x         |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1. O Ciclo Hidrológico.....  | 4         |
| 2.2. Modelos Hidrológicos.....   | 6         |
| 2.3. Modelos de Chuva– Vazão.....  | 7         |
| 2.4. Estudos Sobre Efeito de Escala e Uso do Solo.....                             | 9         |
| 2.4.1. Efeito de Escala.....   | 9         |
| 2.4.2. Efeito de Uso do Solo.....  | 12        |
| 2.4.3. Comentários Finais.....   | 15        |
| <b>3. ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS.....</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>3.1. Área de Estudo.....</b>  | <b>17</b> |
| 3.1.1. Generalidades.....  | 17        |
| 3.1.2. Características da Bacia Representativa de Sumé.....                        | 18        |
| 3.1.3. Características Climatológicas.....   | 22        |
| <b>3.2. Dados Disponíveis.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>4. ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....</b>    | <b>24</b> |
| <b>4.1. Avaliação dos Valores CN.....</b>  | <b>24</b> |
| 4.1.1. Metodologia do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (SCS)..... | 24        |
| 4.1.2. Aplicação da Metodologia do SCS.....  | 28        |
| 4.1.3. Análise dos Resultados.....   | 32        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1.4. Discussão.....   | 33        |
| <b>4.2. Avaliação do Coeficiente de Rugosidade n de Manning.....</b>  | <b>34</b> |
| 4.2.1. Metodologia.....   | 34        |
| 4.2.2. Aplicação da Metodologia.....  | 36        |
| 4.2.3. Análise dos Resultados.....  | 39        |
| 4.2.4. Discussão.....   | 40        |
| <b>4.3. Comentários finais.....</b>   | <b>41</b> |
| <br>  |           |
| <b>5. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO COM O MODELO NAVMO .....</b>  | <b>42</b> |
| <br>  |           |
| <b>5.1. Características Gerais.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>5.2. Cálculo das Lâminas dos Escoamentos nas Sub - Bacias.....</b>   | <b>43</b> |
| 5.2.1. Balanço Hídrico dos Reservatórios.....   | 46        |
| 5.2.2. Capacidades dos Reservatórios e Cálculo do Escoamento.....   | 46        |
| 5.2.3. Transformação das Lâminas do Escoamento.....   | 49        |
| <br>  |           |
| <b>5.3. Propagação do Escoamento nos Canais.....</b>  | <b>51</b> |
| <br>  |           |
| <b>5.4. Resultados Gerados pelo Modelo.....</b>   | <b>52</b> |
| <br>  |           |
| <b>5.5. Validação dos Parâmetros Utilizando o Modelo NAVMO.....</b>   | <b>52</b> |
| 5.5.1. Aplicação do Modelo NAVMO.....   | 53        |
| 5.5.2. Análise dos Resultados.....  | 67        |
| 5.5.3. Comentários Finais.....  | 71        |
| <br>  |           |
| <b>6. EFEITOS DE ESCALA E DE USO DO SOLO.....</b>   | <b>72</b> |
| <br>  |           |
| <b>6.1. Efeito de Escala.....</b>   | <b>72</b> |
| 6.1.1. Efeito de Escala Sobre Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Médio.....                              | 72        |
| 6.1.2. Efeito de Escala Sobre Escoamento com Valor CN médio.....  | 74        |
| 6.1.3. Efeito de Escala Sobre Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Conforme Condição Antecedente.....      | 75        |
| 6.1.4. Efeito de Escala Sobre o Escoamento com Valor CN Conforme Condição Antecedente.....                    | 79        |
| <b>6.2. Efeito do Uso .....</b>   | <b>82</b> |
| 6.2.1. Efeito do Uso do Solo Sobre Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Médio.....                         | 82        |
| 6.2.2. Efeito do Uso do Solo Sobre Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Conforme Condição Antecedente..... | 83        |
| 6.2.3. Efeito do Uso do Solo Sobre o Escoamento com Valor CN Médio.....                                       | 83        |
| 6.2.4. Efeito do Uso do Solo Sobre o Escoamento com Valor CN Conforme Condição Antecedente.....               | 84        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>                                      | <b>86</b> |
| <b>7.1. Conclusões.....</b>  | <b>86</b> |
| <b>7.2. Recomendações.....</b>   | <b>88</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>89</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>   | <b>94</b> |
| A . 1 : Hidrogramas da Validação dos Parâmetros para as Diversas Bacias da BRS | 94        |

## LISTA DE TABELAS NOS CAPÍTULOS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Capítulo 1 |   |    |
| 1.1        | Índice de Aridez para os Vários Climas da Terra( <a href="http://www.desert.org.br">www.desert.org.br</a> ) | 2  |
| Capítulo 2 |   |    |
| 2.1        | Distribuição de Água Doce no Planeta.(MMA)  | 4  |
| 2.2        | Classificação sobre a mudança e uso do solo.  | 14 |
| Capítulo 3 |   |    |
| 3.1        | Características da Bacia Representativa de Sumé - BRS   | 21 |
| 3.2        | Características das Microbacias   | 21 |
| 3.3        | Características das Parcelas de Escoamento  | 21 |
| 3.4        | Precipitação e Lâmina Escoada na BRS  | 23 |
| 3.5        | Evaporação Média Diária Mensal – Estação de Ouro Velho  | 23 |
| Capítulo 4 |   |    |
| 4.1        | Classificação do Grupo de Solo  | 27 |
| 4.2        | Valores CN <sub>II</sub> para Bacias Rurais (Tucci, 1993).  | 27 |
| 4.3        | Valores CN Conforme Condição Antecedente  | 29 |
| 4.4        | Valores CN na Condição Antecedente II   | 30 |
| 4.5        | Relação entre os Valores CN e a Escala da Bacia   | 30 |
| 4.6        | Funções de Regressão entre CN e Área da Bacia   | 32 |
| 4.7        | Valores típicos do Coeficiente de Rugosidade (n), Tucci (1993)  | 34 |
| 4.8        | Valores Médios do Coeficiente de Mannig   | 38 |
| Capítulo 5 |   |    |
| 5.1        | Parâmetros calibráveis do modelo NAVMO e seus significados  | 52 |
| 5.2        | Volumes Simulados e Observados - Micro Bacias (com valores CN médios).                                      | 56 |
| 5.3        | Volumes Simulados e Observados - Bacia Representativa (com valores CN médios).                              | 56 |
| 5.4        | Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Micro Bacias (com valores CN médios).                               | 57 |
| 5.5        | Vazões Máximas Simuladas e Observadas - Bacia Representativa (com valores CN médios).                       | 57 |
| 5.6        | Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Parcelas (com valores CN médios).                                   | 58 |
| 5.7        | Volumes Simulados e Observados – Parcelas (com valores CN médios).  | 59 |
| 5.8        | Volumes Simulados e Observados - Micro Bacias (com valores CN conforme condição antecedente)                | 62 |
| 5.9        | Volumes Simulados e Observados - Bacia Representativa (com valores CN conforme condição antecedente)        | 62 |
| 5.10       | Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Micro Bacias (com valor CN conforme condição antecedente)           | 63 |
| 5.11       | Vazões Máximas Simuladas e Observadas - Bacia Representativa (com valor CN conforme condição antecedente)   | 63 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| 5.12       | Volumes Simulados e Observados – Parcelas (com valor CN conforme condição antecedente)                           | 64 |
| 5.13       | Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Parcelas (com valor CN conforme condição antecedente)                    | 65 |
| 5.14       | Coefficientes de Determinação Calculados   | 68 |
| 5.15       | Coefficientes de Determinação Calculados, de Acordo com as Condições Antecedentes de Umidade.                    | 70 |
| Capítulo 6 |  |    |
| 6.1        | Valores Médios de ALFA e EET, de acordo com o os ajustes.  | 73 |
| 6.2        | Valores Médios de ALFA e EET   | 73 |
| 6.3        | Valores Médios de ALFA e EET de acordo com os ajustes, conforme condição antecedente.                            | 76 |
| 6.4        | Valores Médios de ALFA e EET, conforme condição antecedente.   | 76 |
| 6.5        | Funções de Regressão entre ALFA e a Área da Bacia  | 79 |
| 6.6        | Valores Médios de ALFA e EET conforme o tipo de uso do solo  | 82 |
| 6.7        | Valores Médios de ALFA e EET conforme o tipo de uso do solo e condição de umidade antecedente do solo.           | 83 |
| 6.8        | Volumes e Vazões Médias de acordo com as condições de uso do solo  | 84 |
| 6.9        | Volumes e Vazões Médias de acordo com as condições de uso do solo, com valores CN conforme condição antecedente. | 85 |

## LISTA DE FIGURAS NOS CAPÍTULOS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Capítulo 1 |  |    |
| 1.1        | Limite da Caatinga ( <a href="http://www.nmnh.si.edu">www.nmnh.si.edu</a> )  | 3  |
| Capítulo 2 |  |    |
| 2.1        | Ciclo Hidrológico representado como uma seqüência de armazenamento. (Porto e Zahed, 1986).                                     | 5  |
| 2.2        | Varição do valor <i>CN</i> com a escala da Bacia. Simanton et al, 1986.  | 10 |
| 2.3        | Varição do coeficiente de Rugosidade de Manning ( <i>n</i> ) com a área da bacia (Figueiredo, 1998).                           | 10 |
| 2.4        | Tipos de Escalas Segundo Disciplinas Hidrológicas, IGPB (1993) e Célia et al (1993).   | 12 |
| Capítulo 3 |  |    |
| 3.1        | Bacia Representativa de Sumé (Figueiredo, 1998).   | 19 |
| 3.2        | Bacia Experimental de Sumé, (Carier e Freitas, 1982).  | 20 |
| Capítulo 4 |  |    |
| 4.1        | Valores <i>CN</i> conforme condição Antecedente e Escala da Bacia  | 31 |
| 4.2        | Valores <i>CN</i> conforme Condição Antecedente II e Escala da Bacia   | 31 |
| 4.3        | Cheias nas Microbacias (Evento 42)   | 37 |
| 4.4        | Hietograma da chuva (Evento 42 na Microbacia 1) e curvas de infiltração  | 38 |
| 4.5        | Varição do coeficiente de rugosidade de Manning com a escala da bacia.   | 39 |
| 4.6        | Varição do coeficiente de Manning - Strickler com a escala da bacia.   | 39 |
| Capítulo 5 |  |    |
| 5.1        | Fluxograma do modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)   | 44 |
| 5.2        | Representação do processo de precipitação-vazão-evaporação no modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989).                            | 45 |
| 5.3        | Seção transversal do rio (Kleeberg et al., 1989).  | 51 |
| 5.4        | Esquema Linear da Bacia Representativa de Sumé.  | 55 |
| 5.5        | Hidrogramas observado e simulado com valor <i>CN</i> médio na parcela 5, vegetada com caatinga, no ano de 1985                 | 60 |
| 5.6        | Hidrogramas observado e simulado com valor <i>CN</i> médio e na microbacia 3, desmatada, no ano de 1984                        | 60 |
| 5.7        | Hidrogramas observado e simulado com valor <i>CN</i> médio na sub-bacia de Jatobá, no ano de 1976.                             | 61 |
| 5.8        | Hidrogramas observado e simulado na parcela 5 (caatinga), com valor <i>CN</i> conforme condição antecedente, no ano de 1985    | 66 |
| 5.9        | Hidrogramas observado e simulado na microbacia 3 (desmatada), com valor <i>CN</i> conforme condição antecedente no ano de 1984 | 66 |
| 5.10       | Hidrogramas observado e simulado na sub-bacia de Jatobá, com valor <i>CN</i> conforme condição antecedente, no ano de 1979     | 67 |
| 5.11       | Relação entre o escoamento observado e simulado com valor <i>CN</i> médio nas parcelas 1 e 4.                                  | 68 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.12 | Relação entre o escoamento observado e simulado com valor CN médio nas sub - bacias da BRS                          | 69 |
| 5.13 | Relação entre o escoamento observado e simulado com valor CN conforme condição antecedente nas sub - bacias da BRS. | 70 |

## Capítulo 6

|      |   |    |
|------|---|----|
| 6.1  | Variação de EET com a escala da Bacia, com valores CN médios.                                     | 74 |
| 6.2  | Variação de ALFA com a escala da Bacia, com valores CN médios.                                    | 74 |
| 6.3  | Variação dos volumes com a escala da Bacia, com valores CN médios.                                | 75 |
| 6.4  | Variação das vazões máximas com a escala da Bacia, com valores CN médios.                         | 75 |
| 6.5  | Variação de EET com a escala da Bacia com valores CN conforme condição antecedente                | 76 |
| 6.6  | Variação de ALFA com a escala da Bacia com valores CN conforme condição antecedente               | 77 |
| 6.7  | Variação de ALFA com a escala da Bacia, de acordo com os critérios (a) e (b).                     | 78 |
| 6.8  | Variação de ALFA com a escala da Bacia em diferentes faixas de pluviometria anual.                | 79 |
| 6.9  | Variação do volumes com a escala da Bacia com valores CN conforme condição antecedente.           | 80 |
| 6.10 | Variação das vazões máximas com a escala da Bacia com valores CN conforme condição antecedente    | 80 |
| 6.11 | Variação volumes médios com a escala da Bacia, em diferentes faixas de pluviometria anual.        | 81 |
| 6.12 | Variação vazões máximas médias com a escala da Bacia, em diferentes faixas de pluviometria anual. | 81 |

## ANEXOS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| A.1 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 1, vegetada com caatinga, no ano de 1984 | 94 |
| A.2 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 1, vegetada com caatinga, no ano de 1985 | 94 |
| A.3 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 3, desmatada, no ano de 1984             | 95 |
| A.4 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 3, desmatada, no ano de 1986             | 95 |
| A.5 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 3, desmatada, no ano de 1988             | 96 |
| A.6 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 4, desmatada, no ano de 1984             | 96 |
| A.7 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 4, desmatada, no ano de 1985             | 97 |
| A.8 | Hidrogramas simulado e observado na microbacia 4, desmatada, no ano de 1988             | 97 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| A.9  | Hidrogramas simulado e observado na parcela1, desmatada, no ano de 1983     | 98  |
| A.10 | Hidrogramas simulado e observado na parcela1, desmatada, no ano de 1985     | 98  |
| A.11 | Hidrogramas simulado e observado na parcela1, desmatada, no ano de 1984     | 99  |
| A.12 | Hidrogramas simulado e observado na parcela 5, vegetada, no ano de 1984     | 99  |
| A.13 | Hidrogramas simulado e observado na parcela 5, vegetada, no ano de 1985     | 100 |
| A.14 | Hidrogramas simulado e observado na parcela 5, vegetada, no ano de 1983     | 100 |
| A.15 | Hidrogramas simulado e observado na sub -- bacia de Umburana no ano de 1977 | 101 |
| A.16 | Hidrogramas simulado e observado na sub -- bacia de Umburana no ano de 1978 | 101 |
| A.17 | Hidrogramas simulado e observado na sub -- bacia de Jatobá no ano de 1977   | 102 |
| A.18 | Hidrogramas simulado e observado na sub -- bacia de Jatobá no ano de 1980   | 102 |
| A.19 | Hidrogramas simulado e observado na sub -- bacia de Gangorra no ano de 1977 | 103 |



## 1 INTRODUÇÃO

A interferência do homem sobre o meio ambiente pode ser percebida através das variações dos processos do ciclo hidrológico, podendo provocar em algumas regiões, a escassez de água. As interferências podem provocar alterações na circulação da água no sistema terra – atmosfera. “As modificações naturais e artificiais na cobertura vegetal das bacias hidrográficas influenciam o seu comportamento hidrológico. Essas alterações produzem os mais variados impactos sobre o meio ambiente e a disponibilidade dos recursos hídricos” (Tucci e Clarke, 1997).

O desenvolvimento econômico tem provocado sérios impactos no meio ambiente, entre os quais destacam – se os impactos provocados pelo desmatamento. Atualmente o desmatamento das matas originais já atinge 46% das matas nativas, ou seja, dos 62.200.000 km<sup>2</sup> da superfície, 33.400.000 km<sup>2</sup> apresentam – se sem cobertura. O Brasil é o recordista em desmatamento no mundo. No semi-árido brasileiro, nos últimos 15 anos do século XX, aproximadamente 40 mil Km<sup>2</sup> de vegetação nativa, caatinga, (Figura 1.1), foram desmatados devido à interferência do homem no meio ambiente ([www.wwf.org.br](http://www.wwf.org.br)). Entre as principais formas de desmatamento estão as queimadas de extensas áreas para a prática de agricultura e pecuária, expansão dos centros urbanos, construção de estradas e a implantação de grandes projetos minerais e hidrelétricos. A comercialização de madeira e o extrativismo de inúmeras espécies de interesse econômico são outras formas de desmatamento que podem ocasionar efeitos significativos no escoamento superficial.

Grande parte da região semi-árida do nordeste é conhecida também como “polígono das secas”. A região Nordeste é uma região que possui uma população de 18 milhões de habitantes distribuídos em uma área de 841.260,90 km<sup>2</sup> (<http://www.sudene.gov.br>), e que caracteriza-se principalmente por apresentar um período

prolongado de estiagens, pela distribuição irregular das chuvas, como também pelo elevado índice de devastação da vegetação natural, a caatinga, a qual apresenta-se de forma irregular, contrastando entre áreas semelhantes a florestas e áreas com solo quase descoberto.

O sistema econômico na região semi-árida depende principalmente das precipitações, pois existe pouca disponibilidade de água no solo para as plantas. Cerca de 70% da área total da região semi-árida apresenta escassez de água subterrânea, por ser formada por subsolo cristalino (Rebouças, 1999).

A maior parte da população sobrevive da agricultura de subsistência, pecuária precária e do extrativismo vegetal. Segundo Carvalho (1973), o potencial de áreas irrigáveis com recursos hídricos locais no semi-árido nordestino é de cerca de 15.000 km<sup>2</sup>.

Recentes trabalhos realizados (SUDENE - ORSTOM, 1990) com modelos hidrológicos, que consideram além da pluviometria, parâmetros de relevo, solo e vegetação, mostram que a influência do conjunto solo x vegetação é bastante significativa sobre o regime hidrológico de pequenas bacias do semi-árido nordestino.

A escala é outro fator bastante importante nos estudos de modelagem hidrológica, pois o efeito da variação da área considerada (efeito de escala) pode afetar os parâmetros físicos, devido à heterogeneidade do clima e do solo. Em consequência, variáveis hidrológicas se comportam de maneiras distintas conforme a escala da bacia hidrográfica.

Estudos sobre os efeitos provocados pelas mudanças de escala são de grande importância em regiões semi-áridas, pois estas regiões se caracterizam pelo baixo regime pluviométrico, pela elevada evaporação, e conseqüentemente ser expresso pelo baixo índice de aridez (Tabela 1.1), expresso pela razão entre a precipitação e a evaporação

Tabela 1.1 - Índice de Aridez para os Vários Climas da Terra.

| Climas            | Índice de Aridez |
|-------------------|------------------|
| Hiper-Árido       | < 0,05           |
| Árido             | 0,05- 0,20       |
| Semi-Árido        | 0,21- 0,50       |
| Sub-Úmido Seco    | 0,51- 0,65       |
| Sub-Úmido e Úmido | > 0,65           |

Fonte: (<http://www.desert.org.br/>).

Os efeitos da ação do homem (uso do solo) e da escala da bacia só podem ser melhor avaliados através da utilização de modelos distribuídos que utilizem parâmetros associados as condições físicas da bacia e consideram a variabilidade do clima, principalmente a precipitação.

Neste trabalho os parâmetros CN, do Serviço de Conservação do Solo - SCS (McCuen, 1982) dos Estados Unidos, e o coeficiente de rugosidade (n) de Manning (Chow, 1959), são estimados com base em dados medidos e utilizados na simulação do escoamento em várias bacias do Cariri paraibano através do modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989; Figueiredo et al., 1991). São investigados os efeitos de escala e uso do solo sobre o escoamento superficial, por meio de simulações hidrológicas nas diversas escalas e condições de cobertura vegetal.

Esses aspectos ainda não haviam sido avaliados na região e serão investigados nesta pesquisa.

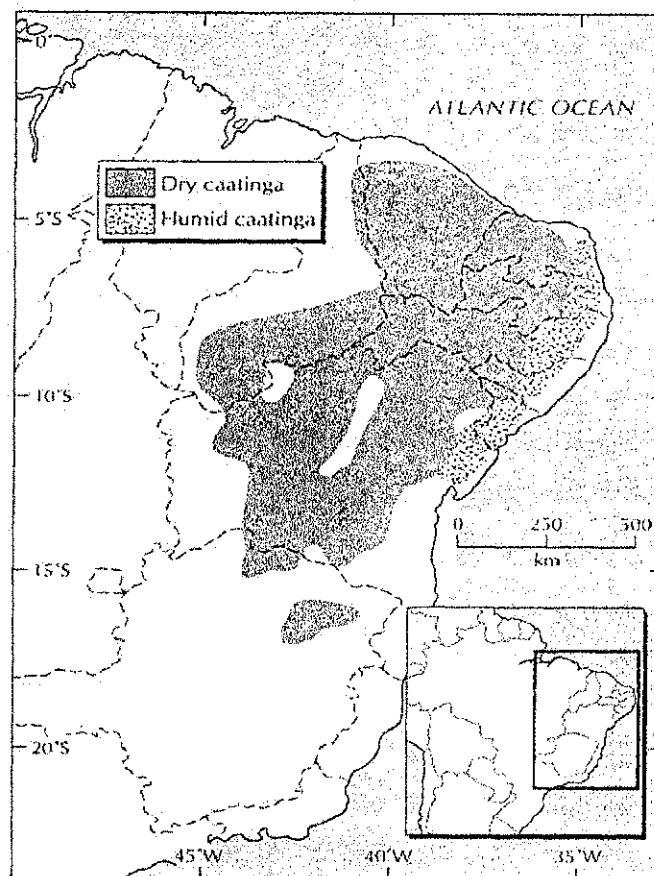


Figura 1.1- Limite da Caatinga ( [www.nmnh.si.edu](http://www.nmnh.si.edu) )

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O Ciclo Hidrológico

“O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre” (Silveira, 1993).

No sistema atmosférico a circulação da água está associada a fatores como: temperatura, pressão atmosférica, ventos, umidade relativa do ar, bem como ao comportamento do próprio sistema atmosférico que é um fator responsável pela distribuição da água.

A ocorrência, distribuição (Tabela 2.1) e a circulação da água na superfície terrestre estão associadas a fatores como relevo, redes de drenagem e bacias hidrográficas. Portanto, tanto a terra quanto a atmosfera são tratadas como dois grandes reservatórios por onde a água circula e se distribui.

Tabela 2.1 - Distribuição de Água Doce no Planeta.

| Fonte                               | Volume (Km <sup>3</sup> ) | Porcentagem (%) |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Geleiras, e Capotas Polares.        | 29.181.620                | 77,20%          |
| Água subterrânea*, umidade do solo. | 8.467.200                 | 22,40%          |
| Lagos e pântanos                    | 132.300                   | 0,35%           |
| Atmosfera                           | 15.100                    | 0,04%           |
| Rios (superficial)                  | 37.780                    | 0,09%           |
| Soma                                | 37.800.000                | 100%            |

Fonte: MMA (Ministério do Meio Ambiente), 2001.

Os processos hidrológicos responsáveis pela circulação da água no sistema terra – atmosfera são a precipitação, a interceptação, a evaporação, a transpiração, a infiltração e o escoamento. Estes processos são impulsionados principalmente pela gravidade e energia solar.

No sentido terra – atmosfera ocorre a evaporação da água dos rios, lagos, oceanos e a transpiração das plantas. O processo conjunto da evaporação e transpiração é denominado de evapotranspiração.

No sentido atmosfera – terra ocorre a precipitação, que corresponde à entrada da água no sistema terrestre. No sistema terrestre, parte da água precipitada não atinge o solo devido a interceptação pela cobertura vegetal; parte da precipitação que atinge a superfície penetra no interior do solo através do processo de infiltração.

Se a chuva exceder a capacidade de infiltração do solo, o excesso de água na superfície irá formar o escoamento superficial. Parte da água que infiltra contribui para o escoamento subsuperficial, que ocorre na zona não saturada do solo, e parte percola atravessando a zona não saturada até atingir o lençol freático originando o escoamento subterrâneo, podendo este ressurgir na superfície e atingir o leito dos rios. Um esquema do ciclo hidrológico e seus processos são apresentados por Porto e Zahed, 1986 (Figura 2.1)

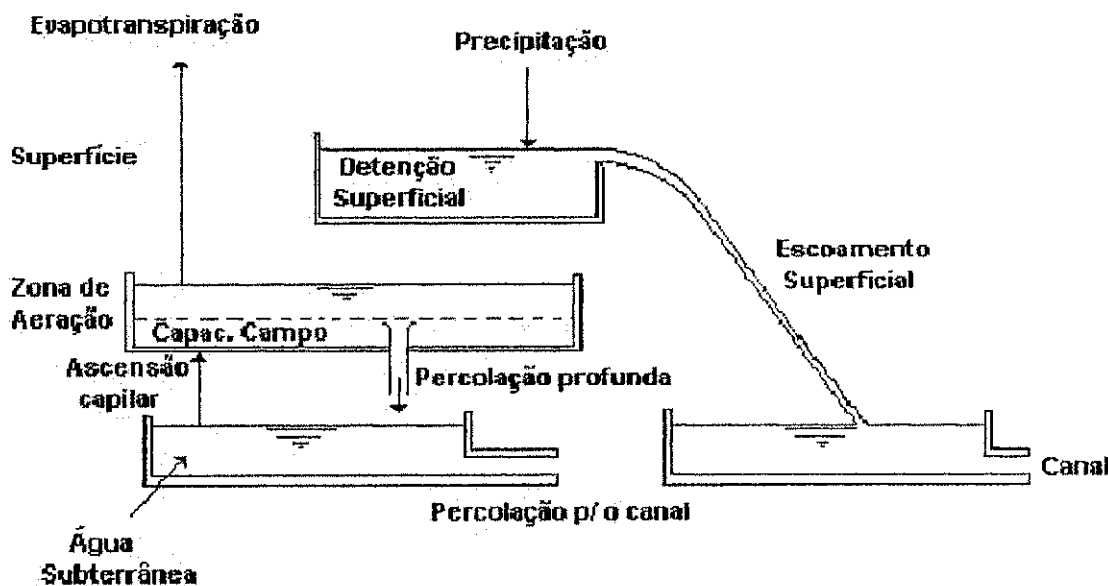


Figura 2.1 - Ciclo Hidrológico representado como uma seqüência de armazenamentos

Nas últimas décadas foram desenvolvidos vários modelos hidrológicos, com a finalidade de simular os processos do ciclo hidrológico, de forma que se possa entender e quantificar melhor os recursos hídricos.

## 2.2 Modelos Hidrológicos

“O Modelo Hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas” (Tucci, 1998).

De acordo com Hermann (1983), “A estrutura matemática de modelos de simulação hidrológica consta essencialmente de um conjunto de equações descritas, de cada um dos processos de transporte de massa presentes na fase terrestre do ciclo hidrológico e equações (que representam a condição de continuidade) que transferem água de diferentes reservatórios associados a cada processo”.

Modelos hidrológicos são geralmente classificados em modelos físicos, analógicos e matemáticos. O modelo físico representa um determinado sistema através de um protótipo em escala reduzida como, por exemplo, um modelo reduzido de uma barragem ou canal. No modelo analógico é feita a analogia de equações de diferentes fenômenos para modelar o processo desejado.

Já o modelo matemático pode ser definido como um conjunto de expressões matemáticas, que tem a finalidade de representar o comportamento de um determinado sistema quando submetido a um dado de entrada. No modelo matemático a bacia hidrográfica é substituída por um processo matemático que transforma o dado de precipitação (entrada) em um dado de vazão (saída).

Segundo Fleming, 1977, os modelos matemáticos podem ser classificados, em dois tipos: modelos determinísticos e modelos estocásticos.

a) Os modelos determinísticos podem ser:

a.1) Empíricos - conhecidos também como modelos “caixa – preta”, são aqueles que buscam ajustar os valores calculados com os valores observados, porém não consideram os processos físicos internos; também encontra-se os empíricos hidrológicos que utilizam uma função linear para associar a vazão com a precipitação;

a.2) Conceituais - utilizam funções que consideram os processos físicos envolvidos, ou seja, tem por base o princípio da conservação da massa aplicado à reservatórios para representar o sistema de uma bacia hidrográfica.

a.3) Concentrados - utilizam parâmetros médios, porém não consideram a variabilidade espacial, apenas a variabilidade temporal dos processos.

a.4) Distribuídos - este tipo de modelo é capaz de representar melhor as heterogeneidade da bacia, pois consideram a variabilidade espacial dos processos hidrológicos.

a.5) Distribuídos de base física - utilizam as principais equações do sistema físico para representar os processos hidrológicos de maneira distribuída.

b) Modelos Estocásticos são aqueles em que as variáveis hidrológicas são obtidas de forma casual através da utilização de conceitos probabilísticos.

A aplicação de modelos hidrológicos constitui - se em ótimo instrumento para resolver problemas de Recursos hídricos, como suporte para o planejamento, a operação e a otimização de sistemas.

### 2.3 Modelos Chuva-Vazão

A necessidade de quantificar as fases do ciclo hidrológico no desenvolvimento de projetos de obras hidráulicas fez com que os engenheiros civis passassem a utilizar métodos quantitativos para explicar os referidos processos hidrológicos.

Os primeiros modelos de chuva-vazão, os quais representam o ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, e que consideram no seu processo de simulação a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, infiltração, percolação e água subterrânea, o escoamento superficial, subsuperficial, e na calha do rio, começaram a ser utilizados na década de 50.

Modelos como o SSARR (Rockwood, 1958), que foi um dos primeiros modelos a serem utilizados e cuja principal característica é a utilização de equações que utilizam parâmetros que podem ser ajustadas, e o modelo STANFORD IV (Crawford e Linsley, 1966), procuram representar o comportamento da bacia através de equações

empíricas. Outros modelos podem ser citados tais como o HEC-1 (US Army, 1973) e o modelo Mero (Clarke, 1973).

Modelos matemáticos para a simulação de vazão, como o modelo SMAP (Lopes et al, 1982) e o modelo TKANK MODEL já foram utilizados na região do Nordeste, porém estes modelos são concentrados, com uma base de tempo longa, e não levam em consideração as diversas condições de uso do solo, ou seja, não utilizam parâmetros físicos associados aos processos hidrológicos.

Nas últimas décadas, devido principalmente à preocupação com questões ambientais, como por exemplo, o impacto causado pelo desmatamento, pela urbanização e pela contaminação de aquíferos, fez surgir novas versões de modelos hidrológicos, os quais utilizam relações empíricas entre parâmetros e características das bacias e do uso do solo. Entre estes estão os modelos CREAMS e ANSWERS (Beasley e Huggins, 1981), que tem por base uma discretização da bacia em pequenas áreas e utiliza relações empíricas entre parâmetros e características da bacia e uso do solo.

A vantagem da utilização de modelos distribuídos, que consideram a variabilidade de parâmetros físicos, os quais estão associados com as características físicas da bacia (solo, vegetação, etc), no processo de simulação hidrológica, permitem a divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias, como o modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989), ou em quadriculas como o modelo SHE (Abbott et al., 1986).

Neste trabalho o modelo NAVMO (Kleeberg et al, 1989) foi escolhido para simular o escoamento superficial, pois este modelo é um modelo conceitual, distribuído, e por utiliza o conceito da Curva Número (McCuen, 1982), no cálculo da capacidade de armazenamento da água no solo. O escoamento é propagado rio abaixo e a resistência representada pelo coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler (Chow, 1959).

Este modelo foi inicialmente utilizado por Figueiredo et al. (1991;1993). Eles utilizaram o modelo num estudo das prováveis causas da diminuição do volume de armazenamento do açude público de Sumé, que capta água da bacia hidrográfica do Rio Sucurú (748,6 km<sup>2</sup>). Eles concluíram que o problema de enchimento do açude não é devido à variação da pluviosidade, e sim devido à presença de armazenamentos a montante do reservatório.

Na literatura encontram-se outras aplicações deste modelo, como o trabalho realizado por Lopes (1994), que calibrou e validou o modelo NAVMO para avaliar o escoamento na bacia do Piancó (4550 km<sup>2</sup>), encontrando bons resultados.



Recentemente, Figueiredo e Srinivasan (1999), avaliaram os impactos do uso do solo e da presença dos açudes sobre o escoamento superficial a montante do açude público de Sumé. Braga (2001) utilizou o modelo NAVMO para avaliar os efeitos da variabilidade climática e uso do solo sobre o escoamento, concluindo que estes efeitos afetam diretamente a formação do escoamento nas bacias da região.

## 2.4 Estudo Sobre os Efeitos de Escala e Uso do Solo

### 2.4.1 Efeito de Escala

Para uma avaliação dos processos hidrológicos em bacias, os quais são variáveis no espaço e no tempo, é necessária uma caracterização da variabilidade espacial dos parâmetros e variáveis envolvidas, como por exemplo, o valor do CN (método curva numérico) e  $n$  (coeficiente de rugosidade de Manning). Russo e Bresler (1981) demonstraram que os parâmetros relacionados à água no solo são altamente variáveis, inclusive em pequenas áreas.

A escala da bacia exerce influência nos valores dos parâmetros devido à heterogeneidade do clima e do solo. Segundo Singh (1995) a heterogeneidade das características é pequena em escalas menores e grande em escalas maiores, devido à variabilidade dos fatores climáticos e físicos da área.

Por outro lado, os parâmetros físicos de uma bacia podem ser afetados pela modificação das condições de uso do solo e fatores climáticos (Bathurst et al, 1996; Figueiredo, 1998; Chiew et al, 1995).

Estudos já foram realizados no sentido de verificar a variabilidade do do escoamento de superfície com a área da bacia hidrográfica. Simanton et al. (1986) estudaram a variação dos valores curva-número (CN), com o aumento da área da bacia de drenagem, para a bacia experimental de Walnut Gulch ( $150 \text{ km}^2$ ), localizada no sudoeste do Arizona, através da aplicação de três diferentes metodologias. Constataram que os três métodos apresentaram resultados semelhantes, e que os valores *CN* variaram inversamente com a área da bacia Figura (2.2), devido principalmente à variabilidade espacial das precipitações e as perdas na propagação nas escalas maiores. No entanto, eles não consideraram alguns fatores importantes como: variabilidade das condições de uso do solo, bem como as condições antecedentes de umidade do solo.

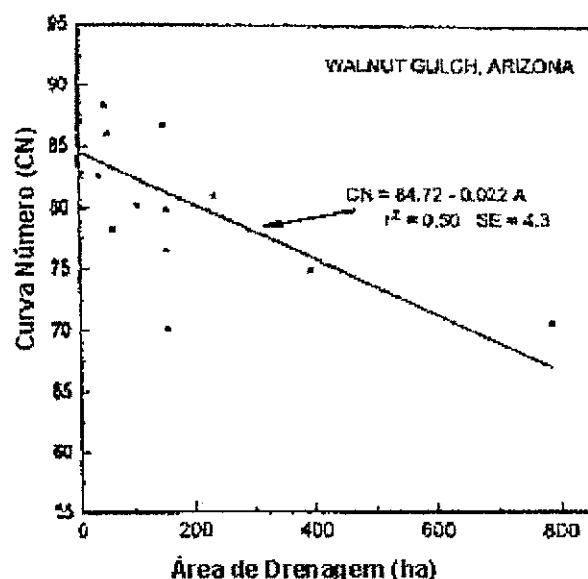


Figura 2.2 - Variação do valor CN com a escala da Bacia. ( Simanton et al, 1986).

O coeficiente de rugosidade de Manning é utilizado no cálculo da velocidade de fluxo. Este parâmetro depende de vários fatores como: vegetação, superfície, alinhamento, tamanho, e forma do rio ou canal (Chow, 1959). O efeito de escala sobre o valor do coeficiente de rugosidade  $n$  de Manning foi observado por Figueiredo (1998) na simulação do escoamento e erosão do solo com o modelo SHETRAN (Bathurst e Purnama, 1996) em uma bacia do semi - árido paraibano (Figura 2.3).

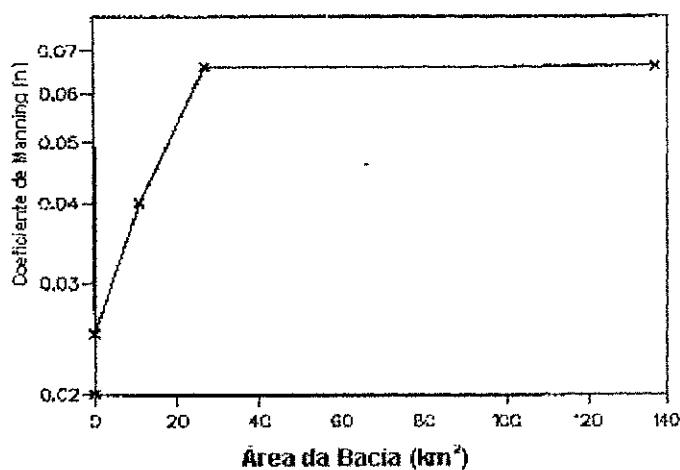


Figura 2.3 – Variação do coeficiente de Rugosidade de Manning ( $n$ ) com a área da bacia (Figueiredo, 1998).

Os processos hidrológicos como a infiltração e o escoamento, se comportam de diferentes maneiras conforme a escala considerada (micro, meso e macro). Portanto, entender as interações entre os vários processos e escalas necessita - se de grande

quantidade de conhecimentos de diferentes áreas, como: hidrologia, meteorologia e ecologia. Ver Figura 2.4.

Segundo Mendingo e Tucci (1997), a representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas tem sido limitada nos seguintes aspectos principais:

- a heterogeneidade espacial dos sistemas hidrológicos (bacia) e a incerteza com os parâmetros em diferentes escalas;
- a dificuldade de representar os processos caracterizados e analisados na microescala em outras escalas;
- A falta de relação entre parâmetros de modelos matemáticos com as diferentes configurações espaciais encontradas na natureza.

Segundo Bloschl e Sivapalan (1995), a compreensão da interação entre as escalas caracteriza – se como um dos problemas mais complexos na modelagem de fenômenos físicos naturais. Compreender a escala em que os diversos processos hidrológicos ocorrem é um dos grandes desafios a ser enfrentados pelos hidrólogos, devido principalmente à dificuldade de representar todos os processos em diferentes escalas. Collischonn e Tucci (2001), afirmam que dificilmente parâmetros estimados em pequenas escalas podem ser aplicados em grande escala.

Bathurst et al.(1995) utilizaram o modelo SHE em uma bacia de 701 Km<sup>2</sup>, em Portugal, com discretização de malha quadrada de 2 Km de lado, usando parâmetros efetivos que são valores médios usados para representar as variabilidades de cada quadricula.



Figura 2.4 – Tipos de Escalas Segundo Disciplinas Hidrológicas, IGPB (1993) e Célia et al (1993).

### 2.4.2 Efeito de Uso do Solo

A interferência do homem sobre o meio ambiente através da construção de açudes, perímetros irrigados, agricultura e pastagem provoca modificações significativas na superfície do solo.

A agricultura e a pecuária são atividades que estão associadas à retirada e substituição da cobertura vegetal nativa por plantios e pastagens respectivamente. O impacto causado pela retirada da cobertura vegetal, devido ao desmatamento, reflete-se nos parâmetros de infiltração da água no solo, e conseqüentemente, no escoamento superficial.

O valor *CN* do método do SCS (McCuen, 1982), é um parâmetro que está associado ao solo e as condições de uso no cálculo da capacidade de armazenamento de água no solo. Este número, que depende das características e do tipo do uso do solo, pode variar dentro de uma escala que vai de 0 (solo com permeabilidade infinita) a 100 (solo totalmente impermeável). Os solos com florestas apresentam alta capacidade de infiltração

(Pritchett, 1979) e, conseqüentemente, a quantidade de escoamento superficial produzida é pequena.

O coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) é um parâmetro utilizado no cálculo da velocidade de fluxo que vai afetar o escoamento. Alterações nas condições de cobertura vegetal, causadas principalmente pelo desmatamento, provocam modificações nos valores do coeficiente de rugosidade de Manning e conseqüentemente no processo de escoamento, (Chow, 1959; Shih e Rahi, 1982).

Um estudo realizado por Pickels (1931) citado por Chow (1959), por exemplo, nos canais de drenagem da cidade de Illinois, Estados Unidos, constatou que houve um aumento do coeficiente de rugosidade dos canais devido ao crescimento da vegetação.

Engman (1986) apresentou, em forma tabelar, os coeficientes de rugosidade de Manning para vários tipos de superfícies naturais e agrícolas, avaliados através da análise de hidrogramas observados, oriundos de chuvas simuladas. Outros trabalhos relativos à avaliação do coeficiente de rugosidade de Manning podem ser encontrados na literatura (Woolhiser, 1975; Huggins, 1966; Foster, 1968; Burman, 1970; Ree, 1977).

O comportamento do escoamento superficial em bacias rurais depende principalmente das características físicas da bacia de drenagem como a declividade, sistema de drenagem e cobertura vegetal.

Os efeitos das alterações nas condições naturais de uso do solo sobre o escoamento podem ser percebidos, principalmente, nas vazões médias e mínimas e no comportamento das enchentes. “Estudos experimentais existentes mostram que existe aumento do escoamento médio em pequenas bacias hidrográficas rurais com o aumento do desmatamento” (Tucci, 1997). A classificação dos principais tipos de alterações do uso do solo é mostrada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Classificação Sobre a Mudança e Uso do Solo.

| Classificação         | Tipo   |
|-----------------------|--|
| Mudança da superfície | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desmatamento</li> <li>▪ Reflorestamento</li> <li>▪ Impermeabilização</li> </ul>   |
| O uso da superfície   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Urbanização</li> <li>▪ Reflorestamento para exploração sistemática</li> <li>▪ Desmatamento: extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas perenes.</li> </ul> |
| Método de alteração   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Queimada</li> <li>▪ Manual</li> <li>▪ Equipamentos</li> </ul>   |

Fonte: Tucci e Clark (1997).

A retirada da vegetação pode provocar alterações também nas precipitações da região, pois ocorre uma redução do volume evaporado devido à diminuição da interceptação vegetal. Bruijnzell (1996) cita o trabalho de Meher – Homji (1989) onde são mostrados alguns estudos que procuram associar evidências circunstanciais de redução de precipitação associados ao desmatamento. Porém, McCulloch e Robson (1993) afirmam que não existe nenhuma evidência de que a retirada ou aumento da vegetação afete a precipitação.

Na literatura encontram – se diversos artigos sobre bacias experimentais, que mostram que o desmatamento produz o aumento do escoamento superficial em bacias rurais (Lal, 1983). No entanto, para as bacias de médio e grande porte os efeitos ainda são pouco conhecidos (Tucci e Clarke, 1997).

Na Ásia, Hsia e Koh (1983) analisaram os resultados de duas bacias experimentais, com a mesma declividade (~ 40%), sendo que uma bacia, de 8,39 hectares, permaneceu com condições naturais e a outra bacia, com, 5,86 hectares foi mantida desmatada. Eles constataram o aumento da vazão média após o desmatamento.

A tendência de crescimento da vazão média, devido à diminuição da cobertura da floresta nas pequenas bacias, é uma das conclusões dos estudos experimentais apresentados por Bosch e Hewlett (1882) e por Bruijnzeel (1990).

No entanto, os resultados indicados na literatura foram obtidos considerando apenas pequenas bacias hidrográficas, o que torna difícil realizar um prognóstico para as grandes bacias, devido a fatores como: variabilidade temporal e espacial, da precipitação, tipo de solo, cobertura etc. (Bruijnzeel, 1996).

Burch et al. (1987) analisaram os hidrogramas de duas bacias, uma de 7,8 e outra 5,0 hectares, com vegetação rasteira e floresta respectivamente, e constataram que o efeito da vegetação foi maior nos períodos secos, com eventos de pequena e média intensidade, pois em áreas com vegetação densa as precipitações de baixa intensidade não produzem escoamento.

Modelos hidrológicos, que possam considerar os efeitos das mudanças de uso do solo vêm sendo utilizados por pesquisadores em seus estudos. Hugues e Smakhtin (1998) utilizaram dois modelos de precipitação – vazão em bacias distintas considerando a variabilidade de uso do solo. Concluíram que o comportamento dos modelos foi satisfatório e que os resultados nas simulações correspondiam às modificações introduzidas nos parâmetros.

No Brasil, Figueiredo e Srinivasan (1999) utilizaram o modelo NAVMO para avaliar os impactos causados pelo uso do solo e a influência dos açudes sobre o escoamento na bacia hidrográfica do açude de Sumé. Os diferentes tipos de uso de solo foram reproduzidos através de três tipos de cenários. No primeiro cenário, que representa o ressurgimento da vegetação foi considerada uma redução de 40% no valor CN e nos outros cenários, que representavam o desmatamento acelerado da caatinga, foram considerados um aumento de 40% do valor CN, no cenário 2, e de 80% no cenário 3. De acordo com os resultados obtidos concluíram que houve um aumento médio de 120% em relação ao volume anual e de 80% em relação às vazões máximas anuais.

#### 2.4.3 Comentários Finais:

Estudos com modelos distribuídos, que utilizem parâmetros associados aos tipos de uso do solo, são importantes principalmente em regiões semi – áridas, pois estas regiões sofrem grandes alterações com a degradação da vegetação nativa (caatinga).

Quando o modelo utiliza parâmetros físicos associados aos processos hidrológicos, alguns deles podem ser estimados com base em dados observados como, por exemplo, o valor da curva número e o coeficiente de rugosidade de Manning.

No entanto, este procedimento é raramente levado em consideração e os parâmetros são geralmente calibrados.

Outro aspecto geralmente desconsiderado é o comportamento dos parâmetros com a mudança de escala e uso do solo. Estes aspectos são investigados nesta pesquisa.



### 3 ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS

#### 3.1 Área de Estudo

##### 3.1.1 Generalidades:

A área de estudo, a Bacia Representativa de Sumé, (BRS), foi escolhida para a realização desta pesquisa. A BRS dispõe de uma área experimental denominada, Bacia Experimental de Sumé, com dados hidroclimatológicos necessários para realização da pesquisa. A área está situada em uma região que apresenta um regime pluviométrico irregular e uma elevada degradação dos recursos naturais.

A BRS, que tem uma área de 137,4 km<sup>2</sup>, é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do açude de Sumé (748,6 km<sup>2</sup>), localizada no semi-árido do Estado da Paraíba, e localiza – se nas proximidades dos municípios de Sumé, Monteiro, Prata e OuroVelho. Por sua vez a bacia de Sumé é uma sub – bacia do Rio Paraíba a montante do açude de Boqueirão (~14.000 km<sup>2</sup>).

Neto et al, (1996) com o propósito de avaliar o desmatamento na Bacia do Alto Rio Sucuru, identificaram, através da utilização imagens TM/LANDSAT-5 (bandas 3 e 4), em duas diferentes datas (10/dez/1984 e 8/jul/1990), na escala de 1:100. 000, duas classes de uso do solo: a classe de uso agrícola e a classe de vegetação natural.

Durante este período, ocorreu na região um aumento de 36,4% nas áreas de uso agrícola, como consequência houve uma diminuição, em igual percentagem, nas áreas ocupadas por vegetação natural. As áreas ocupadas por grandes propriedades (> que 300 ha) cresceram em 22%. As áreas de pequenas propriedades (< que 30 ha) cresceram em 10,3% e as áreas de médias propriedades (30-300 ha) cresceram em 4,1%.

Na região de Sumé predominam propriedades de médio e pequeno porte, porém estas propriedades ocupam apenas uma pequena porção da área total. Nas propriedades de grande porte ocorre o aproveitamento de grandes áreas com vegetação nativa, que servem de pastagem natural, porém ocorre também o desmatamento da cobertura vegetal nativa para o plantio de capim e construção de açudes. De acordo com um estudo da ATECEL (1993) ocorre na região um elevado índice de devastação da vegetação nativa (Caatinga), para a fabricação de carvão vegetal e plantio de forragieras.

A pecuária e a agricultura de subsistência (milho e feijão), bem como o plantio de hortaliças e fruteiras em terrenos de aluviões, caracterizam o uso do solo nas propriedades de médio porte. As propriedades de pequeno porte caracterizam-se principalmente pela agricultura de subsistência

Existem na região açudes e barragens de pequeno, médio e grande porte onde se destacam o açude São Paulo, com capacidade de armazenamento de 21 milhões de m<sup>3</sup> e o açude público de Sumé, com capacidade de armazenamento de 44,86 milhões de m<sup>3</sup>, segundo a ATECEL (1993).

O açude público Sumé, foi construído na década de 50 pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), com as finalidades de suprir as demandas do abastecimento público da cidade de Sumé, com 15.331 habitantes (IBGE, 1997), e atender as necessidades das famílias de colonos do Projeto de Irrigação Público instalado em 1967 e controlado pelo DNOCS.

No entanto, a escassez de água provocou desativação do perímetro irrigado e comprometeu o abastecimento público da cidade de Sumé. A última vez que o açude encheu foi em 1985, sendo que na seca de 1998 o açude chegou a secar completamente.

### 3.1.2 Características da Bacia Representativa de Sumé – BRS.

A importância da Bacia Experimental e da Bacia Representativa na região, é a possibilidade da realização de estudos hidrológicos que visam quantificar as consequências hidrológicas das alterações provocadas no meio ambiente. Ademais, por ser representativa, os resultados obtidos nessas áreas poderão ser estendidos para outras regiões, desde que apresentem as mesmas características físicas e climáticas.

A Bacia Representativa de Sumé (Figura 3.1) referência – se pela estação de Gangorra e limita –se a 7°40' Sul e 37°00' Oeste. Conta com duas sub - bacias internas,

Umburana (10,7 km<sup>2</sup>) e Jatobá (26,8 km<sup>2</sup>), e com uma área experimental, a Bacia experimental de Sumé – BES (Figura 3.2) constituída de quatro microbacias (0,5 – 1,0 hectare) e nove parcelas de escoamento (100 m<sup>2</sup>). Esse sistema apresenta-se com diferentes condições de cobertura do solo e relevo (Tabelas 3.1, 3.2, 3.3).

A bacia apresenta precipitação anual em torno de 550 mm, e altitude variando entre 500 a 700 metros. O relevo vai de moderado a forte com embasamento cristalino, e conseqüentemente o subsolo é impermeável.

Os solos desta região são formados principalmente de associações de solos Bruno e solos Litólicos, que apresentam permeabilidade moderada e permeabilidade lenta respectivamente, além de existir manchas de solos Podzólicos e solos Aluvionais, cuja permeabilidade é alta, ocorrem alguns afloramentos de rochas.

O tipo de vegetação predominante na BRS, assim como em toda bacia hidrográfica, é a caatinga hiperxerófila na qual se destacam algumas espécies como: Xiquexique (*Cerus gounellei*), Umbuzeiro (*Ipondias tuberosa*), Mandacaru (*Cerus Jamararu*) e Macambira (*Bromélia laciniosa*).

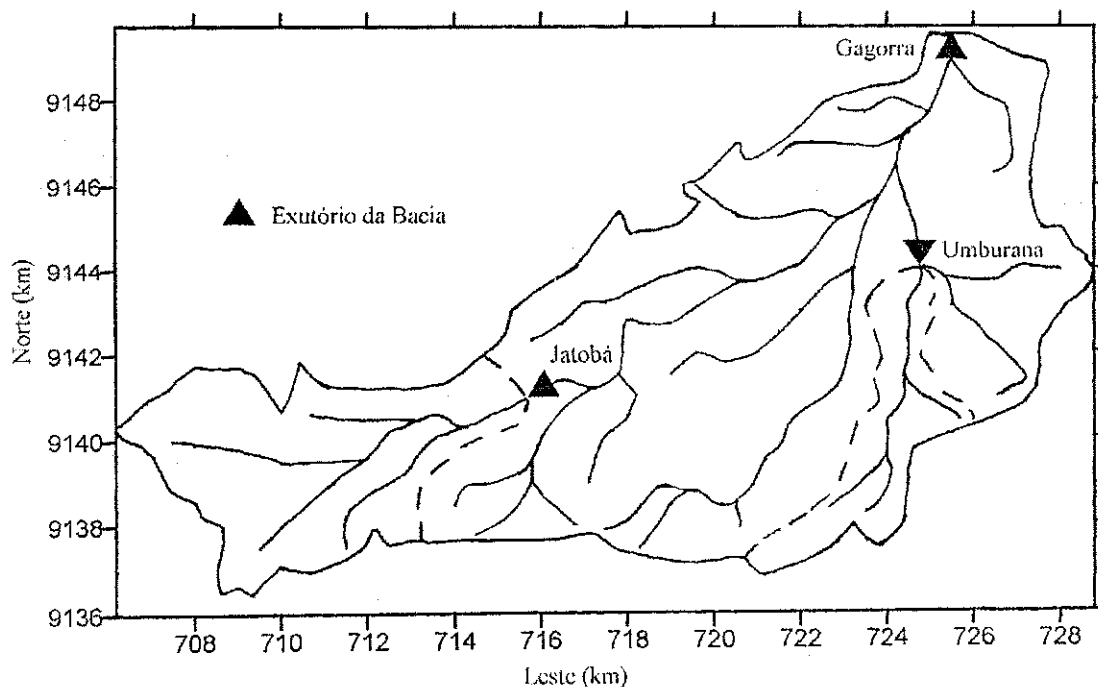


Figura 3.1 - Bacia Representativa de Sumé (fonte: Figueiredo, 1998).

### BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ CROQUI DE LOCALIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES

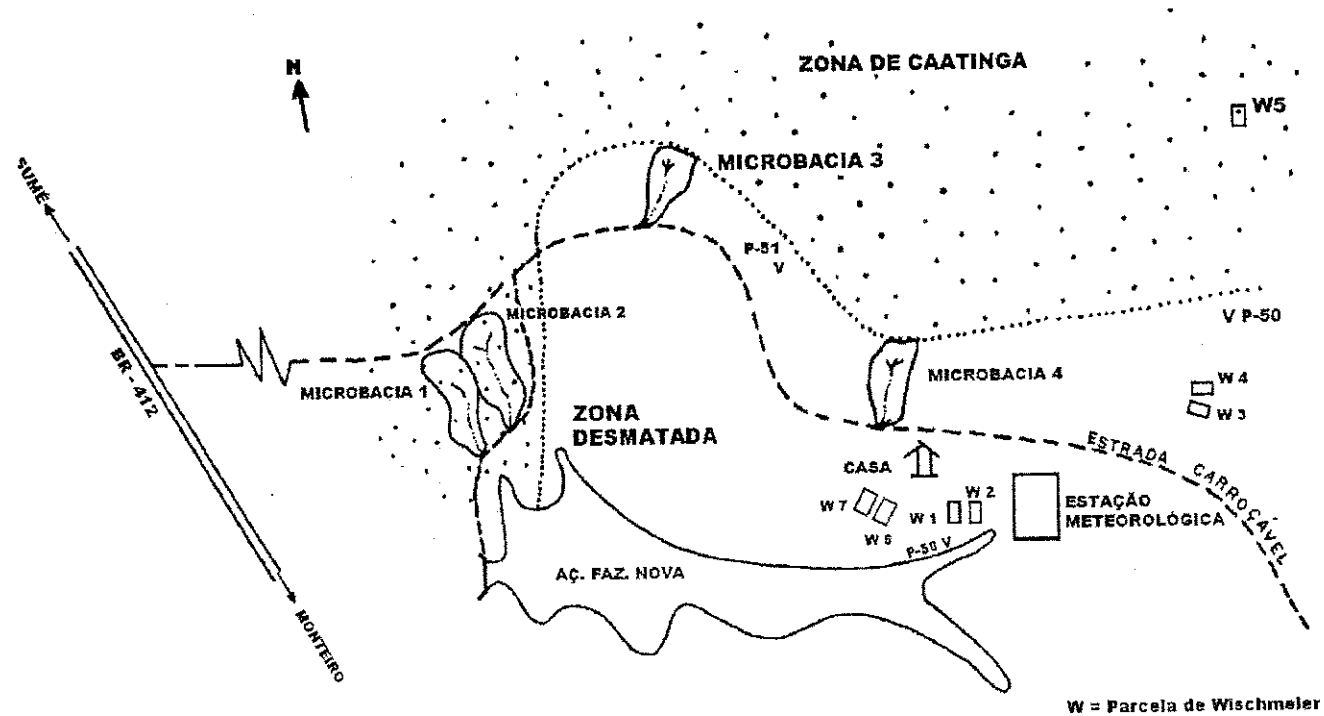


Figura 3.2 - Bacia Experimental de Sumé (Carier e Freitas, 1982).

Tabela 3.1 - Características da BRS

| Parâmetro                                   | BRS (Gangorra) | Umburana | Jatobá |
|---|----------------|----------|--------|
| Área (km <sup>2</sup> )                     | 137.4          | 10.7     | 26.8   |
| Perímetro (km)                              | 69.5           | 18.2     | 28.5   |
| Declive (m/km)                              | 3.94           | 6.79     | 9.33   |
| Densidade de drenagem (km/km <sup>2</sup> ) | 2.30           | 1.86     | 1.28   |
| Altitude (m)                                | 592            | 588      | 651    |

Fonte: Cardier e Freitas, 1982

Tabela 3.2 - Características das Micro Bacias.

| Micro Bacia | Área (ha) | Perímetro (m) | Declive (%) | Cobertura |
|-------------|-----------|---------------|-------------|-----------|
| M1          | 0.62      | 398           | 7.0         | Caatinga  |
| M2          | 1.07      | 466           | 6.2         | Caatinga  |
| M3          | 0.52      | 302           | 7.1         | Desmatada |
| M4          | 0.48      | 270           | 6.8         | Desmatada |

Fonte: Cadier et al., 1983

Tabela 3.3 - Características das Parcelas de Escoamento.

| Parcela | Declive (%) | Cobertura                   | Instalação |
|---------|-------------|-----------------------------|------------|
| P1      | 3.8         | Desmatada                   | 1982       |
| P2      | 3.9         | Vegetação morta             | 1982       |
| P3      | 7.2         | Vegetação morta             | 1982       |
| P4      | 7.0         | Desmatada                   | 1982       |
| P5      | 9.5         | Caatinga                    | 1982       |
| P6      | 4.0         | Palma cultivada em declive  | 1983       |
|         |             | Milho                       | 1989       |
| P7      | 4.0         | Palma cultivada em contorno | 1983       |
|         |             |                             | 1989       |
| P8      | 4.0         | Feijão                      | 1986       |
| P9      | 4.0         | Desmatada com solo solto    | 1986       |
|         |             | Caatinga renovada           |            |

Fonte: Srinivasan et al, 1988; 1993

### 3.1.3 Características climatológicas

O clima desta região é, segundo a classificação de Koppen, do tipo BSH seco (semi-árido), que se caracteriza por apresentar altas temperaturas, acentuada evaporação e pela carência de chuvas. O período chuvoso nesta região é de apenas quatro meses (fevereiro, março, abril e maio), sendo março e abril os meses de maior precipitação.

Segundo Cadier e Freitas (1982), a temperatura média anual é de 24° C com valores máximos em novembro e dezembro e mínimos em julho e agosto.

A umidade relativa do ar varia com as estações do ano, atingindo um máximo na estação chuvosa (abril e maio), 70% e um mínimo na estação seca (outubro e novembro), de 60%.

Os ventos nesta região são geralmente fracos e alcançam maiores velocidades no período seco. A velocidade média anual do vento observada na estação de Ouro Velho é de 1,40 m/s.

O total médio de insolação por ano, situa-se em torno de 2800 horas, no entanto o período que apresenta maior duração de insolação é o período que compreende os meses de setembro a dezembro, com duração de 8,5 horas em média por dia.

A evaporação média anual varia de 2600 a 3200mm. Os meses que apresentam evaporação máxima (9,5 mm/dia) são os meses de novembro e dezembro. No meses de junho e julho ocorre evaporação mínima (6,0 mm/dia).

## 3.2 Dados Disponíveis

Dados diários de precipitação e vazão, e dados mensais de evaporação são disponíveis para a região de estudo.

Os dados pluviométricos diários disponíveis são, dos postos, de Gangorra, Umburana e Jatobá (1976–1980), na BRS bem como dos postos de Monteiro (1965 /1985), Bananeiras (1962 /1990), Prata (1962 / 1989) e Sumé (1962 / 1992). Dados instantâneos do pluviógrafo 49 da Bacia Representativa de Sumé também foram utilizados.

Os dados fluviométricos disponíveis são as vazões médias diárias dos postos de Gangorra (137,4 km<sup>2</sup>), Jatobá ( 26,8 km<sup>2</sup>) e Umburana (10,7 km<sup>2</sup>) para os anos de 1976 a 1980. São também disponíveis nove eventos de cheia e chuvas instantâneas, 3 em cada uma das suas estações de medição. São eles: (a) Umburana: Cheia nº1 (30/04 a 01/05/1977); Cheia nº9 (06/03 a 07/03/1978) e Cheia nº11 (11/03 a 12/03/1978); (b)

Jatobá: Cheia nº11 (15/03 a 16/03/1978); Cheia nº16 (27/03 a 28/03/1979) e Cheia nº 19 (12/02 a 13/02/1980) e (c) Gangorra: Cheia nº6 (31/03 a 01/04/1976); Cheia nº7 (22/01 a 23/01/1977) e Cheia nº13 (01/05 a 02/05/1977). A Tabela 3.4 mostra as características de chuva e escoamento superficial desses eventos.

Tabela 3.4 - Precipitação e Lâmina Escocada na BRS

| Cheia | Bacia    | P(mm) | Q(mm) |
|-------|----------|-------|-------|
| 1     | Umburana | 112,9 | 62,00 |
| 9     | Umburana | 37,0  | 11,40 |
| 11    | Umburana | 50,0  | 6,11  |
| 11    | Jatobá   | 13,8  | 2,41  |
| 16    | Jatobá   | 102,8 | 7,09  |
| 19    | Jatobá   | 73,0  | 2,86  |
| 6     | Gangorra | 62,0  | 4,68  |
| 7     | Gangorra | 57,7  | 1,17  |
| 13    | Gangorra | 53,5  | 7,02  |

Fonte: Cadier e Freitas, 1982.

Os dados disponíveis de evaporação (Tabela 3.5), são os valores médios diários observados na estação de Ouro Velho (SUDENE, 1982).

Tabela 3.5 – Evaporação Média Diária em (mm) na Estação de Ouro Velho.

| Jan  | Fev  | Mar  | Abr  | Mai  | Jun  | Jul  | Ago  | Set  | Out  | Nov  | Dez  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 9.40 | 8.25 | 8.21 | 8.16 | 7.05 | 5.92 | 6.55 | 7.91 | 8.56 | 9.08 | 9.69 | 9.41 |

Para as outras escalas (parcelas e micro bacias), dispõe – se de dados hidroclimatológicos da BES (Aragão, 2000) para os anos de 1982 a 1991, constando de 264 eventos observados de chuvas e lâminas escoadas (nas parcelas e micro bacias) bem como os hidrogramas de cheias das micro bacias.

## **4 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL.**

A maioria dos modelos hidrológicos conceituais, que são aplicados na área de recursos hídricos, utiliza geralmente um sistema de reservatórios para representar os processos hidrológicos. Estes modelos empregam equações matemáticas, que definem os níveis dos reservatórios, os quais utilizam alguns parâmetros físicos que estão associados às características da bacia. A escala e o uso do solo exercem influência sobre os parâmetros e conseqüentemente sobre os processos hidrológicos como infiltração e escoamento.

Portanto, o emprego de parâmetros médios, disponíveis na literatura, nos processos de simulação do escoamento, como parâmetros efetivos (Figueiredo, 1998), podem distorcer os resultados obtidos. Uma caracterização da variabilidade espacial, das condições de uso de solo e dos parâmetros físicos correspondentes quando utilizados nas simulações pode levar a resultados mais consistentes.

Para tanto, torna – se necessário a estimativa de parâmetros físicos que condicionam processos hidrológicos como a infiltração e o escoamento, com base em dados observados, considerando a variabilidade espacial destes parâmetros.

### **4.1 Avaliação dos Valores CN**

#### **4.1.1 Metodologia do Serviço de Conservação do Solo (SCS) dos Estados Unidos.**

CN (Curva Número) é um índice utilizado no cálculo da capacidade de armazenamento de água no solo, sendo dependente das características do solo, seu uso e condições antecedentes de umidade (McCuen, 1982).

O SCS desenvolveu a metodologia de cálculo da lâmina d'água efetiva com base no grupo de solo, uso do solo e condições de umidade antecedente. Considera também



as abstrações iniciais até que a lâmina do escoamento seja iniciada. A metodologia está descrita em detalhes em McCuen (1982). Uma descrição sucinta é encontrada em Chow et al (1988).

De acordo com este método, o escoamento superficial é calculado por:

$$Q_{es} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad P > 0,2 S \quad (4.1)$$

onde  $Q_{es}$  é a lâmina do escoamento superficial (mm),  $P$  é a precipitação total (mm) e  $S$  é o armazenamento potencial (mm). O termo  $0,2 S$  no numerador da equação (4.1) é a abstração inicial.

A equação (4.1) é válida para precipitações maiores que a abstração inicial. De outro modo, ou seja, quando  $P < 0,2 S$ , não se produz escoamento superficial. O armazenamento potencial  $S$  pode ser calculado a partir da equação (4.1) desde que sejam conhecidos  $Q$  e  $P$ . Explicitando  $S$  a partir da equação (4.1) obtém-se:

$$S = 5[P + 2Q_{es} - (4Q_{es}^2 + 5PQ_{es})^{1/2}] \quad (4.2)$$

Por outro lado, o armazenamento potencial depende de condições de umidade antecedente do solo e do uso do solo, podendo ser determinado pela relação abaixo:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.3)$$

onde  $CN$  é um índice que depende da umidade antecedente, do grupo de solo e do uso do solo.

A partir da equação (4.3) o valor  $CN$ , em termos de  $S$ , é calculado pela equação:

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \quad (4.4)$$

A equação (4.4) permite calcular o valor CN com base no armazenamento potencial  $S$ , conhecidos  $Q$  e  $P$ . Por outro lado, o valor CN é dependente das condições de umidade antecedente, do grupo do solo e do seu uso. O método considera três condições de umidade antecedente do solo em termos do total precipitado nos 5 dias antecedentes ao do evento em consideração. As condições antecedentes são:

- a) condição I, seca, ( $P_{5\text{dias}} < 36 \text{ mm}$ )
- b) condição II, normal, para a qual a equação (4.4) é válida ( $36 \text{ mm} < P_{5\text{dias}} < 54 \text{ mm}$ )
- c) condição III, úmida, ( $P_{5\text{dias}} > 54 \text{ mm}$ )

Para as condições seca (I) e úmida (III) são usadas as equações abaixo no cálculo do valor da curva número:

$$CN_I = \frac{4,2CN_{II}}{10 - 0,058CN_{II}} \quad (4.5)$$

$$CN_{III} = \frac{42,3CN_{II}}{10 + 0,13CN_{II}} \quad (4.6)$$

onde  $CN_I$  e  $CN_{III}$  são os valores para as condições seca e úmida e  $CN_{II}$  é o valor para a condição normal (equação 4.4).

Valores para a condição normal são encontrados em tabelas em termos do grupo de solo e do seu uso. Quatro grupos de solos podem ser definidos em termos da capacidade mínima de infiltração (Tabela 4.1). A Tabela 4.2 mostra os valores CN para a condição normal em bacias rurais (Tucci, 1993).

Tabela 4.1 - Classificação do Grupo de Solo.

| Grupos de solos | Valor mínimo da capacidade de infiltração (mm/h) | Características do solo   |
|-----------------|--|---|
| A               | 8-12   | Areias profundas, solos susceptíveis à erosão profundos, solos agregados.   |
| B               | 4-8  | Solos susceptíveis à erosão pouco profundos e solos franco-arenosos.  |
| C               | 1-4  | Solos franco-argilosos, solos franco-arenosos pouco profundos, solos com baixo teor em matéria orgânica e solos com elevado teor de argila. |
| D               | 0-1  | Solos com grande percentagem de matérias expansíveis, argilas plásticas pesadas e alguns solos salinos.                                     |

Fonte: Lencastre e Franco (1984).

Tabela 4.2 - Valores CN<sub>II</sub> para Bacias Rurais (Tucci, 1993).

| USO DO SOLO SUPERFÍCIE     |                | A  | B  | C  | D  |
|----------------------------|----------------|----|----|----|----|
| lavrado                    | c/sulcos retos | 77 | 86 | 91 | 94 |
|                            | em filas retas | 70 | 80 | 87 | 90 |
| plantações regulares       | curva de nível | 67 | 77 | 83 | 87 |
|                            | em terraços    | 64 | 76 | 84 | 88 |
|                            | em filas retas | 64 | 76 | 84 | 88 |
| plantações de cereais      | curva de nível | 62 | 74 | 82 | 85 |
|                            | em terraços    | 60 | 71 | 79 | 82 |
|                            | em filas retas | 62 | 75 | 83 | 87 |
| plantações legumes         | curva de nível | 60 | 72 | 81 | 84 |
|                            | em terraços    | 57 | 70 | 78 | 89 |
|                            | pobres         | 68 | 79 | 86 | 89 |
|                            | normais        | 49 | 69 | 79 | 94 |
| pastagens                  | boas           | 39 | 61 | 74 | 80 |
|                            | pobres         | 47 | 67 | 81 | 88 |
|                            | normais        | 25 | 59 | 75 | 83 |
| campos permanentes         | boas           | 6  | 35 | 70 | 79 |
|                            | normais        | 30 | 58 | 71 | 78 |
|                            | esparsos       | 45 | 66 | 77 | 83 |
| chácaras estradas de terra | densos         | 25 | 55 | 70 | 77 |
|                            | normais        | 56 | 75 | 86 | 91 |
|                            | más            | 72 | 82 | 87 | 89 |
| florestas                  | superf. duras  | 74 | 84 | 90 | 92 |
|                            | muito esparsas | 56 | 75 | 86 | 91 |
|                            | esparsas       | 46 | 68 | 78 | 84 |
|                            | densas         | 26 | 52 | 62 | 69 |
|                            | normais        | 36 | 60 | 70 | 76 |

#### 4.1.2 Aplicação da metodologia do SCS

No cálculo dos valores CN nas áreas maiores, foram admitidos quatro tipos de solo e três usos principais condizentes com as ocorrências na BRS. Os principais usos são: pastagens pobres, campos normais e plantações de legumes pobres. De acordo com os mapas de solo da região foram estimados os percentuais de área dos principais grupos (A, B, C e D), assim distribuídos: para a sub-bacia de Gangorra, solos A (30%), B (50%), C (10%) e D (10%), para a sub-bacia de Jatobá solos B (60%), C (30%) e D (10%) e para a sub-bacia de Umburana solos B (50%) e C (50%).

Os solos foram definidos conforme a descrição dos solos da bacia e capacidades de infiltração medidas para cada um deles (Cadier e Freitas, 1982). O valor da curva número (CN), de cada evento das sub-bacias, foi determinado considerando-se as áreas dos solos e os vários tipos de uso do solo. O valor CN foi ponderado, em cada bacia, pelas respectivas áreas de ocorrência dos solos através da equação:

$$CN_{II} = \sum A_i CN_i / A \quad (4.7)$$

onde  $A_i$  é a área de ocorrência do grupo de solo  $i$ ,  $CN_i$  é o valor médio dos vários usos no grupo de solo  $i$  e  $A$  é a área da bacia.

Os valores CN foram corrigidos conforme condição de umidade antecedente, verificada através do total precipitado nos 5 dias antecedentes ao do evento. De conformidade com a condição identificada, o valor CN foi corrigido pela equação (4.5), na condição I ou seca, e pela equação (4.6), na condição III ou úmida.

Os valores CN calculados foram então aplicados na equação (4.3) para a determinação do armazenamento potencial (S) e em seguida na equação (4.1) para o cálculo da lâmina (Q). Uma otimização com o SOLVER do EXCEL foi realizada de modo a minimizar a diferença entre as lâminas calculadas e as observadas indicadas na Tabela 3.4. Uma checagem foi também realizada com as equações (4.2) e (4.4) a partir das chuvas e lâminas observadas. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os resultados obtidos.

Os valores CN nas parcelas e micro bacias, foram calculados com as equações (4.2) e (4.4) através de um programa em FORTRAN. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 e figuras 4.1 e 4.2. Os resultados da Tabela 4.3 são apresentados, para todos os valores CN calculados independentemente da condição de

umidade antecedente (coluna Tudo), como também conforme a condição de umidade antecedente. Os resultados na Tabela 4.4 são para a condição II, porém foram separados de acordo com o total precipitado nos 5 dias antecedentes para efeito de comparação com os resultados da Tabela 4.3. A Tabela 4.5 resume os valores médios para análise do efeito da escala da bacia. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os resultados dos valores CN relacionados graficamente com a área da bacia.

Tabela 4.3 - Valores CN Conforme Condição Antecedente

| Local    | Área (km <sup>2</sup> ) | Tudo <sup>1</sup> | CN <sub>I</sub> <sup>2</sup> | CN <sub>II</sub> <sup>3</sup> | CN <sub>III</sub> <sup>4</sup> |
|----------|-------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| P1       | 0,0001                  | 86                | 81                           | 93                            | 97                             |
| P2       | 0,0001                  | 67                | 53                           | 77                            | 92                             |
| P3       | 0,0001                  | 71                | 59                           | 76                            | 92                             |
| P4       | 0,0001                  | 87                | 83                           | 92                            | 96                             |
| P5       | 0,0001                  | 62                | 47                           | 68                            | 87                             |
| P6       | 0,0001                  | 86                | 79                           | 89                            | 96                             |
| P7       | 0,0001                  | 80                | 83                           | 92                            | 96                             |
| P8       | 0,0001                  | 80                | 47                           | 68                            | 87                             |
| P9       | 0,0001                  | 61                | 49                           | 66                            | 92                             |
| Média    | 0,0001                  | 76                | 65                           | 80                            | 93                             |
| M1       | 0,0062                  | 58                | 45                           | 66                            | 85                             |
| M2       | 0,0107                  | 62                | 45                           | 69                            | 91                             |
| M3       | 0,0052                  | 84                | 80                           | 88                            | 96                             |
| M4       | 0,0048                  | 81                | 76                           | 70                            | 84                             |
| Média    | 0,006725                | 71                | 62                           | 75                            | 89                             |
| Umburana | 10,7                    | 79                |                              | 70                            | 84                             |
| Jatobá   | 26,8                    | 64                | 51                           |                               | 91                             |
| Gangorra | 137,4                   | 47                | 35                           | 70                            |                                |

(1) Média de todos os valores; (2, 3, 4) média dos valores conforme a condição de umidade antecedente (I, II e III).

Tabela 4.4 - Valores CN na Condição Antecedente II

| Local    | Área (km <sup>2</sup> ) | CN <sub>II</sub> <sup>1</sup> | CN <sub>II</sub> <sup>2</sup> | CN <sub>II</sub> <sup>3</sup> | CN <sub>II</sub> <sup>4</sup> |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| P1       | 0,0001                  | 92                            | 91                            | 93                            | 94                            |
| P2       | 0,0001                  | 76                            | 71                            | 77                            | 84                            |
| P3       | 0,0001                  | 78                            | 75                            | 76                            | 85                            |
| P4       | 0,0001                  | 92                            | 91                            | 92                            | 92                            |
| P5       | 0,0001                  | 69                            | 66                            | 68                            | 76                            |
| P6       | 0,0001                  | 90                            | 89                            | 89                            | 91                            |
| P7       | 0,0001                  | 87                            | 91                            | 92                            | 92                            |
| P8       | 0,0001                  | 89                            | 66                            | 68                            | 76                            |
| P9       | 0,0001                  | 71                            | 68                            | 66                            | 83                            |
| Média    | 0,0001                  | 83                            | 79                            | 80                            | 86                            |
| M1       | 0,0062                  | 66                            | 65                            | 66                            | 71                            |
| M2       | 0,0107                  | 70                            | 65                            | 69                            | 81                            |
| M3       | 0,0052                  | 90                            | 90                            | 88                            | 91                            |
| M4       | 0,0048                  | 88                            | 87                            | 70                            | 70                            |
| Média    | 0,006725                | 79                            | 77                            | 75                            | 80                            |
| Umburana | 10,7                    | 70                            |                               | 70                            | 70                            |
| Jatobá   | 26,8                    | 73                            | 71                            |                               | 77                            |
| Gangorra | 137,4                   | 62                            | 58                            | 70                            |                               |

(1) média de todos os valores; (2, 3, 4) média dos valores selecionados por faixa de precipitação (seco, normal e úmido).

Tabela 4.5 - Relação entre os Valores CN e a Escala da Bacia

| Conforme Condição Antecedente |                               |                               |                               |                                |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Área (km <sup>2</sup> )       | Tudo <sup>1</sup>             | CN <sub>I</sub> <sup>2</sup>  | CN <sub>II</sub> <sup>3</sup> | CN <sub>III</sub> <sup>4</sup> |
| 0,0001                        | 76                            | 65                            | 80                            | 93                             |
| 0,006725                      | 71                            | 62                            | 75                            | 89                             |
| 10,7                          | 79                            |                               | 70                            | 84                             |
| 26,8                          | 64                            | 51                            |                               | 91                             |
| 137,4                         | 47                            | 35                            | 70                            |                                |
| Condição Antecedente II       |                               |                               |                               |                                |
| Área (km <sup>2</sup> )       | CN <sub>II</sub> <sup>5</sup> | CN <sub>II</sub> <sup>6</sup> | CN <sub>II</sub> <sup>7</sup> | CN <sub>II</sub> <sup>8</sup>  |
| 0,0001                        | 83                            | 79                            | 80                            | 86                             |
| 0,006725                      | 79                            | 77                            | 75                            | 80                             |
| 10,7                          | 70                            |                               | 70                            | 70                             |
| 26,8                          | 73                            | 71                            |                               | 77                             |
| 137,4                         | 62                            | 58                            | 70                            |                                |

(1) média de todos os valores; (2, 3, 4) média dos valores nas condições umidade antecedente (I, II e III).

(5) média de todos os valores; (6, 7, 8) média dos valores por faixa de precipitação (seco, normal e úmido).

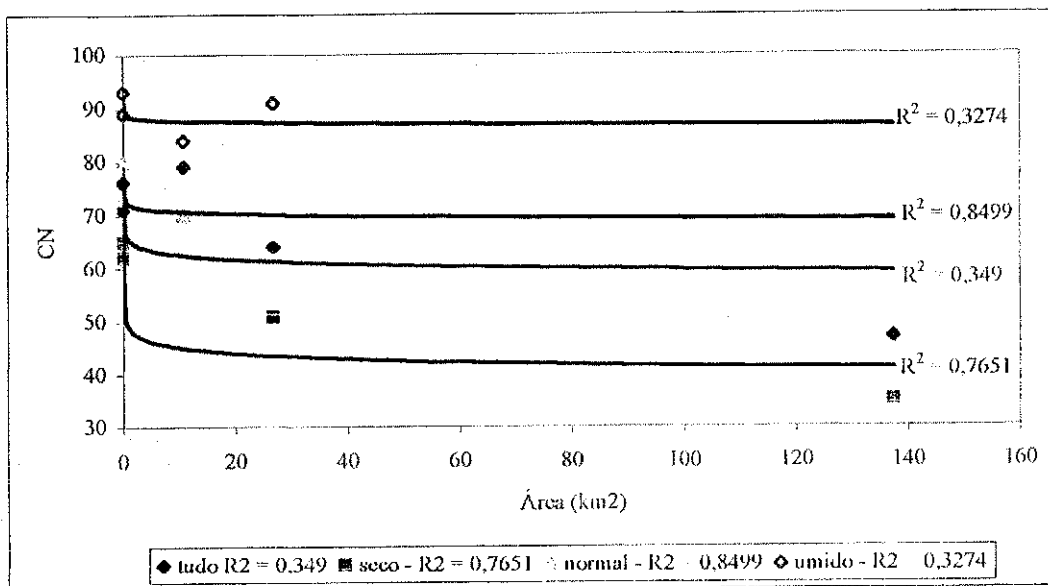


Figura 4.1 - Valores CN conforme condição Antecedente e Escala da Bacia.

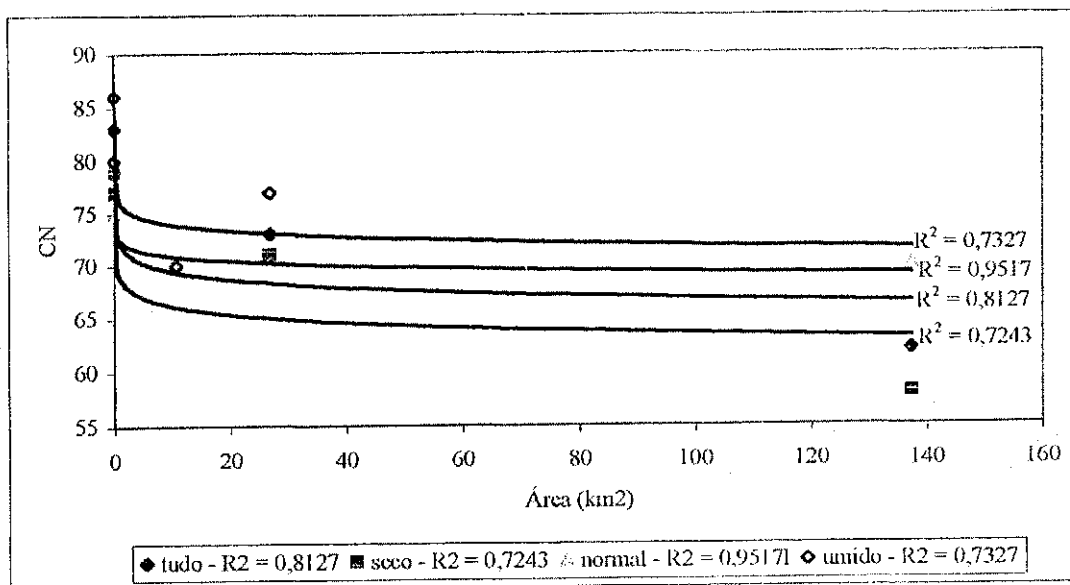


Figura 4.2 - Valores CN conforme Condição Antecedente II e Escala da Bacia.

### 4.1.3 Análise dos Resultados

Foram analisados os valores CN em diferentes escalas da bacia, envolvendo pequenas áreas (100 - 10000 m<sup>2</sup>) até grandes áreas (10 - 137 km<sup>2</sup>). Os resultados foram obtidos, em cada escala estudada, para dois casos típicos: a) sem considerar as condições de umidade antecedente do solo e b) considerando a umidade antecedente de cada evento analisado, representada pela chuva acumulada nos cinco dias antecedentes. Os resultados foram apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 e nas Figuras 4.1 e 4.2 construídas a partir dos valores médios dos vários eventos em cada caso.

Comparando-se os resultados entre as condições (a) e (b) pode-se notar o grande efeito causado pelas condições antecedentes, mais pronunciadas para as condições secas devido à semi-aridez da região do estudo. Comparando os resultados das Tabelas 4.3 e 4.4 observa-se uma diminuição média no valor CN de 22%, devido à condição antecedente I (seca), e um aumento de 11% na condição III (úmida). Uma comparação entre as escalas menores, na mesma condição de uso do solo (ex. P1 com P4, P2 com P3, P5 com P9, P6 com P7, M1 com M2 e M3 com M4) indica que os valores são semelhantes qualquer que seja a condição analisada. Observa-se também que a condição vegetada apresenta valores CN menores, indicando o efeito da cobertura vegetal em todos os casos.

Para análise do efeito da escala sobre os valores da curva número, os valores médios das nove parcelas e das quatro micro bacias (indicados nas Tabelas 4.3 e 4.4) juntamente com os valores das bacias de Umburana, Jatobá e Gangorra, foram correlacionados com as respectivas áreas. A correlação foi feita para os casos (a) e (b). Os resultados (Figuras 4.1 e 4.2) mostram que o valor CN varia com a escala da bacia, sendo representada por funções do tipo potencial. As funções e respectivos coeficientes de determinação encontra-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Funções de Regressão entre CN e Área da Bacia

| Conforme Condição Antecedente                             |   |   |   |
|---|---|---|---|
| Tudo <sup>1</sup>   | CN <sub>I</sub> <sup>2</sup>                              | CN <sub>II</sub> <sup>3</sup>                             | CN <sub>III</sub> <sup>4</sup>                            |
| CN=65,345 A <sup>-0,00202</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,349 | CN=49,023 A <sup>-0,0366</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,7651 | CN=72,023 A <sup>-0,0089</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,8499 | CN=88,393 A <sup>-0,0042</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,3274 |
| Condição Antecedente II                                   |   |   |   |
| CN <sub>II</sub> <sup>5</sup>                             | CN <sub>II</sub> <sup>6</sup>                             | CN <sub>II</sub> <sup>7</sup>                             | CN <sub>II</sub> <sup>8</sup>                             |
| CN=72,147 A <sup>-0,0168</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,8127 | CN=68,891 A <sup>-0,0177</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,7243 | CN=72,424 A <sup>-0,0096</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,9517 | CN=76,21 A <sup>-0,0122</sup><br>R <sup>2</sup> = 0,7327  |

(1) média de todos os valores; (2, 3, 4) média dos eventos nas condições I, II e III.

(5) média de todos os valores; (6, 7, 8) média dos eventos por faixa de precipitação (seco, normal e úmido).



De acordo com os resultados indicados na Tabela 4.6, pode-se notar uma baixa correlação entre os valores CN e a área da bacia, para todos os valores ( $R^2 = 0,349$ ) e para a condição antecedente III ( $R^2 = 0,3274$ ). No primeiro caso, o valor de Umburana foi obtido com uma distribuição uniforme dos dois solos considerados (B e C) o que pode ter afetado o resultado final. No segundo caso, o valor CN obtido para a bacia de Jatobá foi influenciado pelo único evento úmido. A razão para os baixos valores de  $R^2$  deve-se aos valores fora de tendência de Umburana (CN = 79), no primeiro caso, e Jatobá (CN = 91), no segundo caso (Tabela 4.6). A retirada desses valores eleva  $R^2$  para 0,99 e 0,7329 respectivamente. Considerando os valores CN na condição II (normal) e seca (I), os resultados são bastante razoáveis, com valores de  $R^2$  acima de 0,7 (Tabela 4.6).

#### 4.1.4 Discussão

A metodologia do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (SCS), apresentada em detalhes por McCuen (1982), foi empregada para avaliar os efeitos de escala e uso do solo sobre a infiltração representada pelos valores da curva número (CN).

Através da análise geral e dos casos particulares, e de acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que as condições de uso do solo afetam significativamente o escoamento das bacias da região, devido ao efeito causado no processo de infiltração do solo.

As parcelas e micro-bacias desmatadas juntamente com as bacias da Bacia Representativa de Sumé - BRS (Umburana, Jatobá e Gangorra) apresentaram resultados consistentes com as indicações na literatura (Simanton et al., 1996) em todas as condições analisadas demonstrando os efeitos da cobertura e da escala sobre os valores CN.

Pode-se constatar que, tanto a vegetação quanto o aumento da escala diminuem os valores CN. Os resultados mostram a sensibilidade do método às condições de umidade antecedente, que influi bastante no escoamento superficial devido à heterogeneidade das condições físicas da região considerada no estudo.

Atribui -se que o comportamento do valor CN, em relação à escala e ao uso do solo, deve-se tanto a variabilidade dos parâmetros do clima e do solo, quanto ao efeito das perdas na propagação do escoamento nas escalas maiores. Contudo, o pequeno número de pares de valores pode ser uma limitação, mas segue a tendência indicada na literatura do comportamento do parâmetro com a mudança da área da bacia (ex. Simanton et al., 1986).

## 4.2 Avaliação do Coeficiente de Rugosidade de Manning ( $n$ )

### 4.2.1 Metodologia

A fórmula de Manning foi apresentada pela primeira vez pelo engenheiro irlandês Robert Manning, em 1889. Esta fórmula é usada no cálculo da velocidade do fluxo uniforme e considera a natureza da superfície através de um coeficiente de aspereza, que representa a resistência das paredes, dos canais naturais e artificiais, ao fluxo.

O valor do coeficiente de rugosidade depende de vários fatores que são associados à natureza do canal como: aspereza da superfície, vegetação e irregularidade e alinhamento do canal, etc. Uma descrição detalhada dos fatores que afetam o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ), bem como os procedimentos utilizados para determinação do mesmo são encontrados em Chow (1959). Alguns valores típicos de  $n$  são apresentados por Tucci (1993).

Tabela 4.7 – Valores típicos do Coeficiente de Rugosidade ( $n$ ).

| Tipo                              | Intervalo de $n$ |
|-----------------------------------|------------------|
| <b>CANAIS COM REVESTIMENTO</b>    |                  |
| paredes pouco lisas               | 0,017 - 0,019    |
| superfície lisa                   | 0,010 - 0,013    |
| paredes rugosas                   | 0,019 - 0,021    |
| paredes de terra com vegetação    | 0,028 - 0,032    |
| <b>RIOS</b>                       |                  |
| Limpos e retilíneos               | 0,025 - 0,033    |
| Limpos e retilíneos com vegetação | 0,030 - 0,040    |
| com meandros, vegetação e pedras  | 0,033 - 0,060    |
| com área de inundação e vegetação | 0,075 - 0,150    |

Fonte: Tucci (1993).

Os valores de rugosidade para canais artificiais já são relativamente conhecidos e podem ser determinados com auxílio de fotografias, porém para superfície naturais os valores são pouco estudados. Engman (1986) apresentou valores do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) para diferentes tipos de superfícies naturais, como: solo descoberto, solo arado, grama curta, grama densa, pasto natural, etc.

O coeficiente de rugosidade pode ser determinado em termos da vazão e características do canal, a partir da equação desenvolvida por Manning em 1889, pela equação:

$$n = \frac{A}{Q} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

onde Q é a vazão em m<sup>3</sup>/s, A é a área da seção transversal em m<sup>2</sup>, R é o raio hidráulico (m) e I é o declive da linha de energia.

A área (A) e o perímetro (P) molhado para canais com seções trapezoidais são dados pelas equações (4.9) e (4.10) respectivamente.

$$A = (b + z \cdot y) \cdot y \quad (4.9)$$

$$P = b + 2y \sqrt{1 + z^2} \quad (4.10)$$

onde b é a largura do canal em metros, y é a profundidade da lâmina escoada em metros e z corresponde à declividade lateral do canal.

Da mesma forma o valor do raio hidráulico (R), que é a razão entre a área e o perímetro molhado ( $R = A/P$ ), pode ser calculado de acordo com a equação (4.11).

$$R = \frac{(b + z \cdot y) \cdot y}{b + 2 \cdot y \cdot \sqrt{1 + z^2}} \quad (4.11)$$

No entanto quando a largura do canal for bem maior, relativamente, do que a profundidade da lâmina escoada, o canal pode ser considerado como um canal de grande largura. Neste caso pode - se considerar o raio hidráulico igual à altura da lâmina escoada. Deste modo, o coeficiente de rugosidade de Manning é expresso pela equação (4.12), que foi originada da equação (4.8) considerando os valores do raio hidráulico  $R = y$  e da área da seção transversal  $A = b \cdot y$ .

$$n = \frac{(y)^{\frac{5}{3}} \cdot (I)^{\frac{1}{2}}}{Q/b} \quad (4.12)$$

#### 4.2.2 Aplicação da Metodologia.

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) nas áreas maiores, as sub – bacias de Umburana (10,7 Km<sup>2</sup>), Jatobá (26,8 Km<sup>2</sup>) e Gangorra (137,4 Km<sup>2</sup>), foram calculados a partir de cada um dos nove hidrogramas de cheias descritos em Cardier e Freitas (1982). A partir dos hidrogramas foram calculadas as vazões médias do escoamento superficial e as lâminas escoadas ( $y$ ) obtidas através da utilização da tabela de calibragem da curva – chave disponível (Cardier e Freitas, 1982).

Os elementos geométricos das seções transversais como: largura ( $b$ ) e declives ( $z$ ) das paredes laterais do canal foram obtidos dos cortes transversais das seções de medição das sub – bacias (Umburana, Jatobá e Gangorra), as quais encontram-se no Anexo 4 do relatório da SUDENE, (Cardier e Freitas, 1982).

Com os elementos geométricos foram calculados a área e o perímetro através das equações (4.9) e (4.10). O raio hidráulico foi obtido através da equação (4.11).

A equação (4.8) foi utilizada para o cálculo do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) nas áreas maiores (10 – 137 Km<sup>2</sup>) através de condições: (a) considerando a declividade ( $I$ ) de cada uma das três sub - bacias, (b) declividade média dos trechos de rios podendo - se os comprimentos dos trechos, conforme indicados em Cardier e Freitas (1982). As Figuras 4.5a e 4.6a mostram os resultados obtidos utilizando a declividade de cada sub- bacia e as Figuras 4.5b e 4.6b mostram os resultados obtidos utilizando a declividade média ponderada pelos os comprimentos dos trechos de rios da bacia.

Nas microbacias os hidrogramas e hietogramas dos eventos foram traçados a partir dos dados de chuvas instantâneas e linigrafia (Ver Figura 4.3 como exemplo), disponíveis para a Bacia Representativa de Sumé – BES (Aragão, 2000). Com base nos hidrogramas dos eventos foram obtidos as lâminas em cada instante e o coeficiente de rugosidade calculado pela equação 4.12, considerando –se uma largura ( $b$ ) de 1 metro e as declividades das unidades experimentais. Muitos eventos foram desconsiderados devido aos baixos valores das lâminas.

Para as parcelas, como não se dispunham de hidrogramas foram utilizadas as metodologias de Horton e do índice  $\Phi$  para tentar definir os hidrogramas e as lâminas do escoamento superficial. (Ver exemplo da figura 4.4)

Através da utilização da ferramenta SOLVER do ECXEL foi feita a otimização dos resultados produzidos pelas duas metodologias, para minimizar a diferença entre lâminas calculadas com as lâminas disponíveis para os 264 eventos.

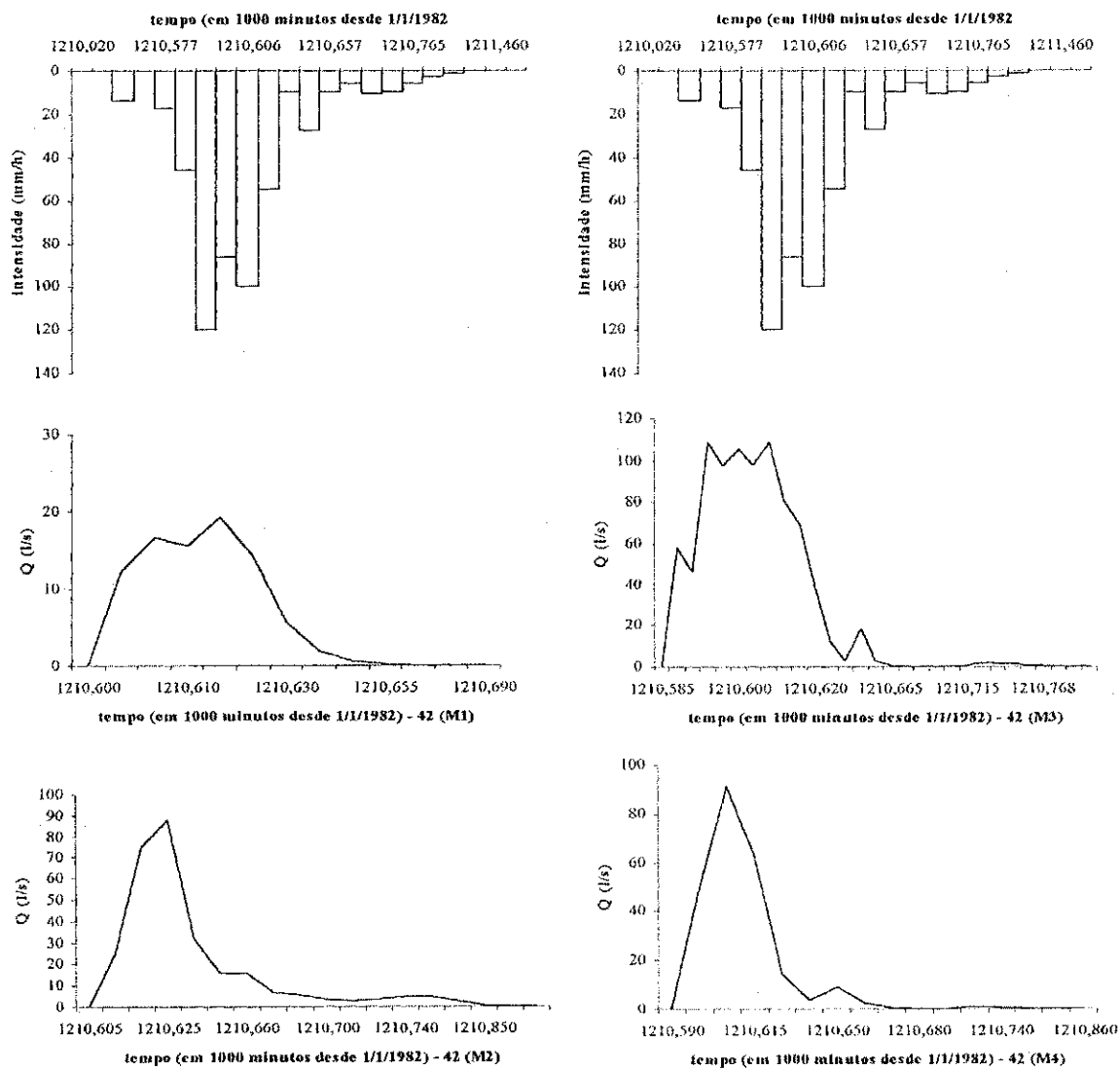


Figura 4.3 - Cheias nas Microbacias (Evento 42).

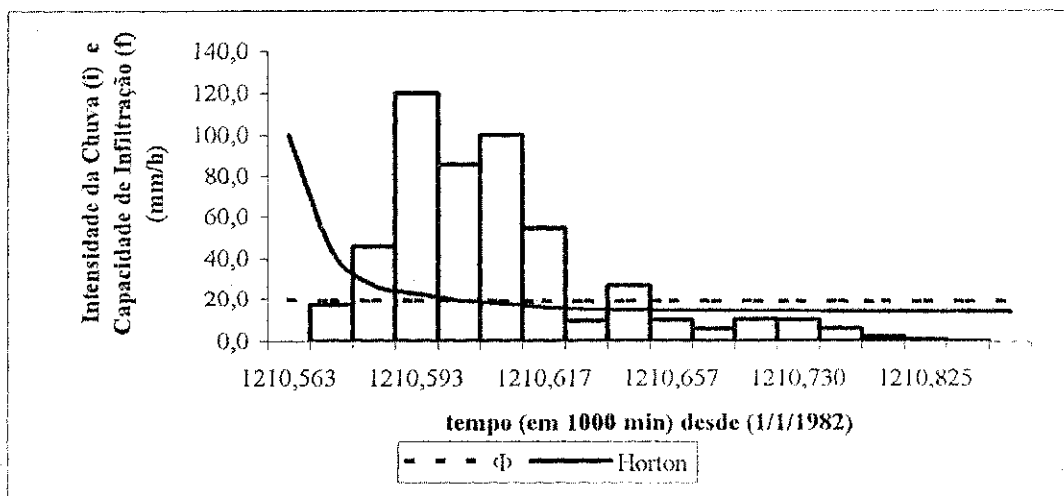


Figura 4.4 – Histograma da chuva (evento 42) e curvas de infiltração.

O cálculo do coeficiente de rugosidade, nas parcelas, foi feito através da utilização da equação (4.12), considerando – se inicialmente a largura original da parcela (4,5 m).

A Tabela 4.8 mostra os valores médios do coeficiente de Manning obtidos a partir da aplicação da metodologia anteriormente descrita. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram o comportamento do coeficiente de Manning (n) e de Manning - Stricler (1/n) com a área da bacia.

Tabela 4.8 – Valores Médios do Coeficiente de Rugosidade.

| Local    | Condição    | Área (Km <sup>2</sup> ) | n         | 1/n       |
|----------|-------------|-------------------------|-----------|-----------|
| M1       | vegetada    | 0,0062                  | 0,0351581 | 28,442973 |
| M2       | vegetada    | 0,0107                  | 0,0309862 | 32,272457 |
| M3       | Desmatada   | 0,0052                  | 0,0167039 | 59,866144 |
| M4       | Desmatada   | 0,0048                  | 0,0245936 | 40,660995 |
| Média    |             | 0,006725                | 0,0268604 | 37,229469 |
| Umburana | Vários.usos | 10,7                    | 0,1159507 | 8,6243559 |
| Jatobá   | Vários.usos | 26,8                    | 0,0528865 | 18,908426 |
| Gangorra | Vários.usos | 137,4                   | 0,0980165 | 10,202361 |

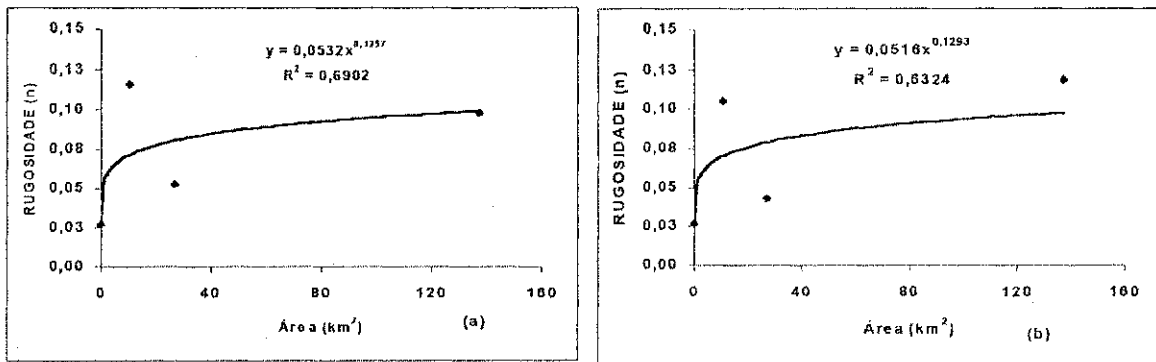


Figura 4.5 – Variação do coeficiente de Rugosidade n de Manning com a Escala da Bacia.

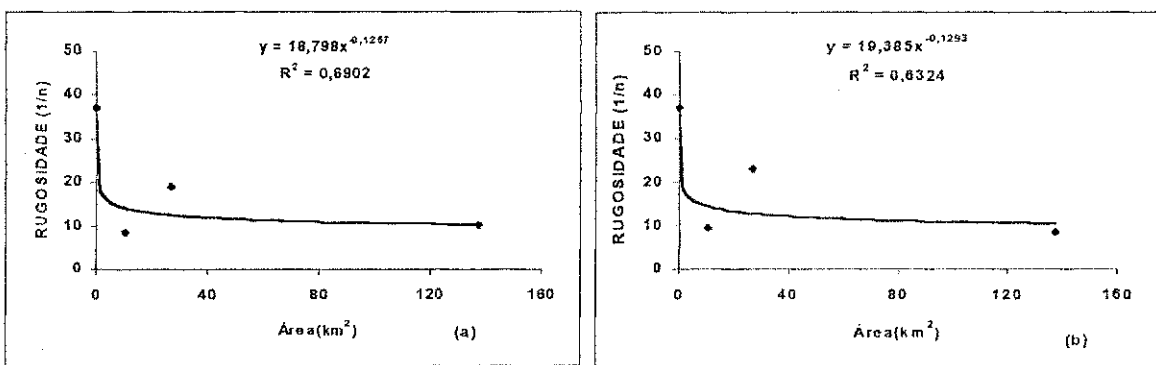


Figura 4.6 – Variação do coeficiente de Manning – Strickler (1/n) com a Escala da Bacia.

#### 4.2.3 Análise de Resultados:

Foram obtidos valores do coeficiente de rugosidade de Manning em diferentes escalas (0,0001 – 137,4 Km<sup>2</sup>). Os valores médios dos vários eventos considerados foram mostrados na Tabela 4.8 e nas Figuras 4.5 e 4.6. Os resultados encontrados para as parcelas de 100 m<sup>2</sup> foram considerados inconsistentes, ou seja, com a metodologia empregada os valores dos coeficientes de rugosidade foram bastante elevados, mesmo quando se usou uma largura efetiva menor que a largura da parcela.

Observando os resultados na Tabela 4.8 percebe –se o efeito da cobertura vegetal sobre a rugosidade, pois as áreas vegetadas (M1 e M2) apresentam coeficiente de rugosidade (n) médio igual a 0,033, o qual é maior do que o valor médio das áreas desmatadas (M3 e M4), que foi igual a 0,020. Houve, portanto, uma diminuição de aproximadamente 65% no valor do coeficiente de rugosidade (n) devido à retirada da vegetação.

Observa - se também que os valores de rugosidade ( $n$ ) aumentam com a escala da bacia, pois na escala menor o valor médio de rugosidade (0,02) foi aproximadamente cinco vezes menor que o valor médio na escala maior (0,09).

Os valores médios dos coeficientes de rugosidade de Manning ( $n$ ) e Manning - Strickler ( $1/n$ ) das microbacias e sub - bacias da BRS (Umburana, Jatobá e Gangorra) foram correlacionados com as respectivas áreas (Tabela 4.8), com o objetivo de verificar o efeito de escala sobre este parâmetro.

Os valores de  $n$  e  $1/n$  variam com a escala da bacia conforme as funções potenciais mostradas nas figuras 4.5 e 4.6. Percebe-se que os valores médios apresentaram boa correlação com a área da bacia, ou seja,  $R^2 = 0,69$  para o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) e Manning-Strickler. Contudo, o pequeno número de postos pode limitar os resultados, embora estejam condizentes com os resultados de Engman (1986) e de Figueiredo (1998).

#### 4.2.4 Discussão

A metodologia empregada para avaliar os efeitos de escala e uso do solo sobre o escoamento levou a resultados inconsistentes quando aplicada nas parcelas de escoamento. Os baixos valores das lâminas escoadas podem ser a razão para os altos valores obtidos. Outro aspecto é que o escoamento nestas áreas não é uniforme e pode ocorrer em micro - canais. Mesmo considerando uma largura efetiva dez vezes menor que a largura da parcela, os resultados não foram consistentes. Nas demais escalas da BRS, microbacias e sub-bacias (Jatobá, Umburana e Gangorra) a metodologia comportou-se de maneira satisfatória apresentando valores médios consistentes com a literatura, próximos aos valores encontrados por Engman (1986). Contudo, muitos eventos de pequena profundidade foram excluídos da análise.

Através da análise dos resultados encontrados observa-se que as condições de uso do solo exercem um efeito sobre o escoamento em bacias da região, pois a retirada da vegetação provoca a uma diminuição considerada nos valores do coeficiente de rugosidade de Manning.

Verifica - se também que, assim como a vegetação, o aumento da escala provoca o aumento dos valores do coeficiente de rugosidade ( $n$ ). Este comportamento também foi verificado por Figueiredo (1998) na simulação do escoamento com o modelo SHETRAN, e deve -se principalmente a presença de diferentes fatores, nas escalas



maiores, que provocam o aumento da rugosidade em canais naturais como: irregularidades variações na seção transversal, tamanho e forma, alinhamento, obstruções e irregularidades no fundo do canal.

### 4.3 Comentários Finais

O comportamento dos parâmetros físicos, CN e n de Manning, que condicionam a infiltração e o escoamento, e que estão associados às características físicas da bacia hidrográfica, são dependentes tanto da escala, quanto do uso do solo. Faz-se necessário, contudo, à aplicação de modelos hidrológicos que utilizem esses parâmetros estimados, no processo de simulação do escoamento, com a finalidade de validar os valores determinados neste estudo.

De acordo com sugestões de trabalhos anteriores (Lopes, 1994; Braga, 2001 ; Júnior, 2001), os valores estimados de parâmetros que influem na geração do escoamento devem ser utilizados na simulação por um modelo distribuído como forma de validação.

Para tanto, será usado nesta pesquisa o modelo NAVMO que considera esses parâmetros além de outros. Uma descrição do modelo e sua aplicação são dadas no próximo capítulo.

## 5 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO COM O MODELO NAVMO

### 5.1 Características Gerais do Modelo

O modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989), Niederschlag, Abfluss, Verdunstungs Modell (modelo de precipitação, vazão, evaporação), foi desenvolvido no Instituto de Recursos Hídricos da Universidade de Bundeswehr, Munique, Alemanha, para simular o escoamento.

O NAVMO é um modelo diário, determinístico, conceitual e distribuído, que permite considerar as variabilidades tanto de fatores climáticos (evaporação e precipitação) quanto do sistema da bacia.

O processo de transformação da precipitação efetiva em escoamento superficial utiliza a equação do balanço hídrico que é aplicada à bacia através de dois reservatórios hipotéticos: um superficial e outro sub-superficial que controlam o escoamento. Para avaliar a capacidade de armazenamento de água nos reservatórios, os quais são dependentes do tipo e das condições de uso do solo, é utilizado o método da curva numérico (CN) desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos – SCS (McCuen, 1982).

Este modelo considera a área da bacia hidrográfica em sub-bacias, podendo-se definir para cada sub - bacia as características climáticas e fisiográficas. O escoamento total gerado, em cada sub-bacia, é obtido através da soma das vazões do escoamento superficial, sub - superficial e subterrâneo. A Figura 5.1 mostra o fluxograma do modelo NAVMO.

São utilizados como dados de entrada os valores de precipitação, evaporação, vazões observadas e as características físicas das sub-bacias como: área, cotas, declividades, características geométricas dos canais.

O cálculo da precipitação média no modelo NAVMO pode ser feito através da aplicação de duas metodologias, as quais são versões modificadas do método de Thiessen e do método do Ponto Reticular (usado nesta pesquisa) ou método das quadrículas.

A propagação do escoamento pode ser feita utilizando diferentes métodos como: o método de Williams (1969), o método de Kalinin-Miljukov (1958), apud Fread (1985), e o método da velocidade de fluxo. O modelo apresenta também critérios alternativos para avaliar a qualidade dos resultados como desvio médio, desvio hidrológico, centróides dos hidrogramas, além dos hidrogramas simulado e observado.

## 5.2 Cálculo das Lâminas dos Escoamentos nas Sub-Bacias

O cálculo dos escoamentos no modelo NAVMO é feito individualmente para cada sub-bacia, considerando um sistema de reservatórios, conforme apresentado no esquema físico mostrado na (Figura 5.2). Pode –se observar também as diversas etapas dos processos considerados para o cálculo da vazão total nas Figuras 5.1 e 5.2.

O escoamento superficial é calculado a partir do reservatório superficial, que é abastecido pela precipitação e sobre ele age a evaporação potencial. Quando o reservatório superior enche, ocorre o transbordamento. Parte da lâmina do transbordamento do reservatório superficial irá abastecer o reservatório sub-superficial e outra parte será transformada no escoamento direto após aplicação de uma função de transformação.

O escoamento sub-superficial é calculado a partir do reservatório sub-superficial que é alimentado por uma parte do transbordo do reservatório superficial. A evaporação deste reservatório é calculada em função do seu déficit de umidade. Quando esta parcela é suficiente para encher o reservatório sub- superficial faz surgir uma lâmina de transbordamento, a qual divide –se em duas lâminas. Uma dá origem ao escoamento sub-superficial e a outra será usada no cálculo do escoamento subterrâneo. O escoamento total simulado na saída da sub – bacia é soma dos três escoamentos. Os hidrogramas em cada caso são obtidos através de funções de transformação e adicionados para se obter o hidrograma total.

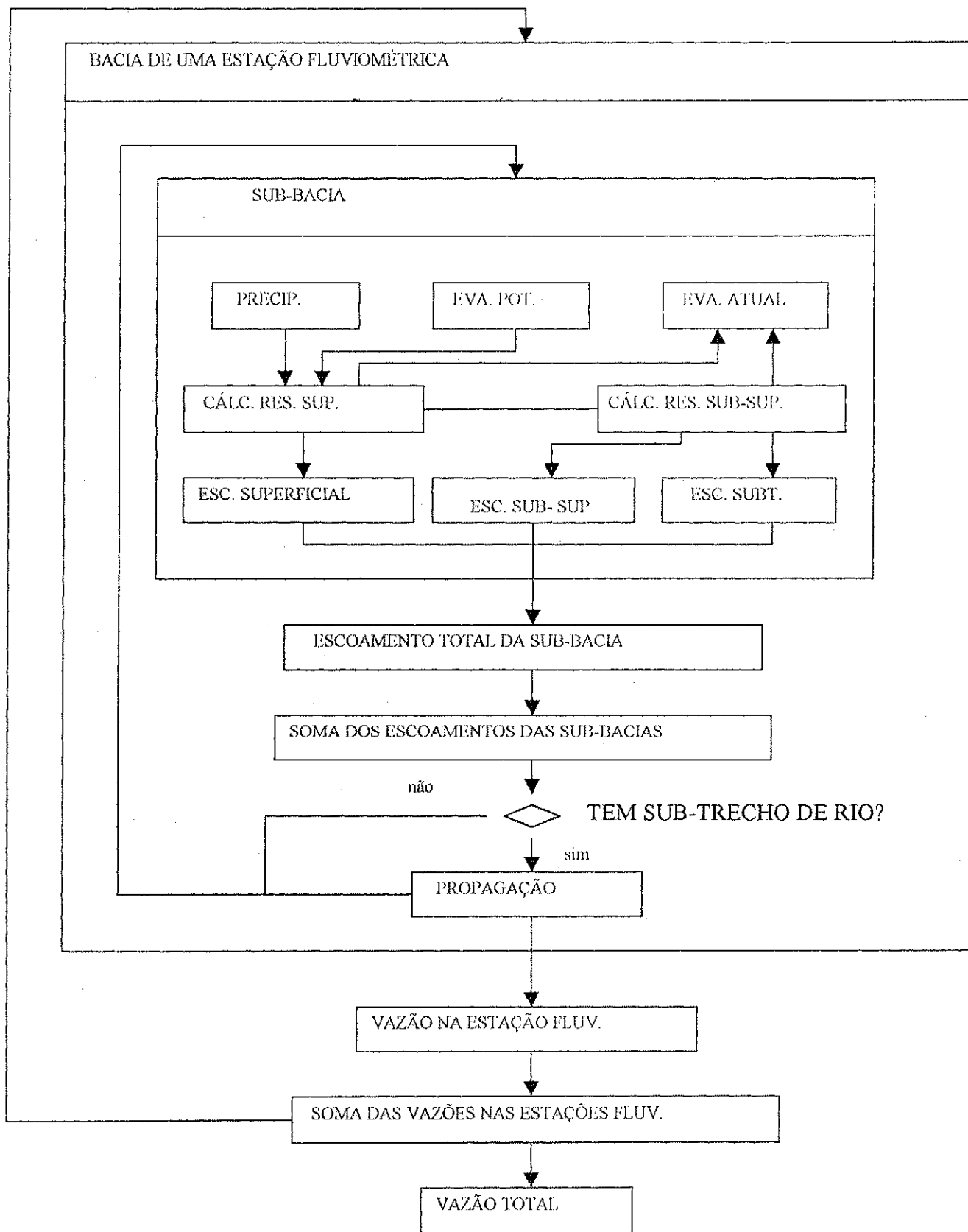
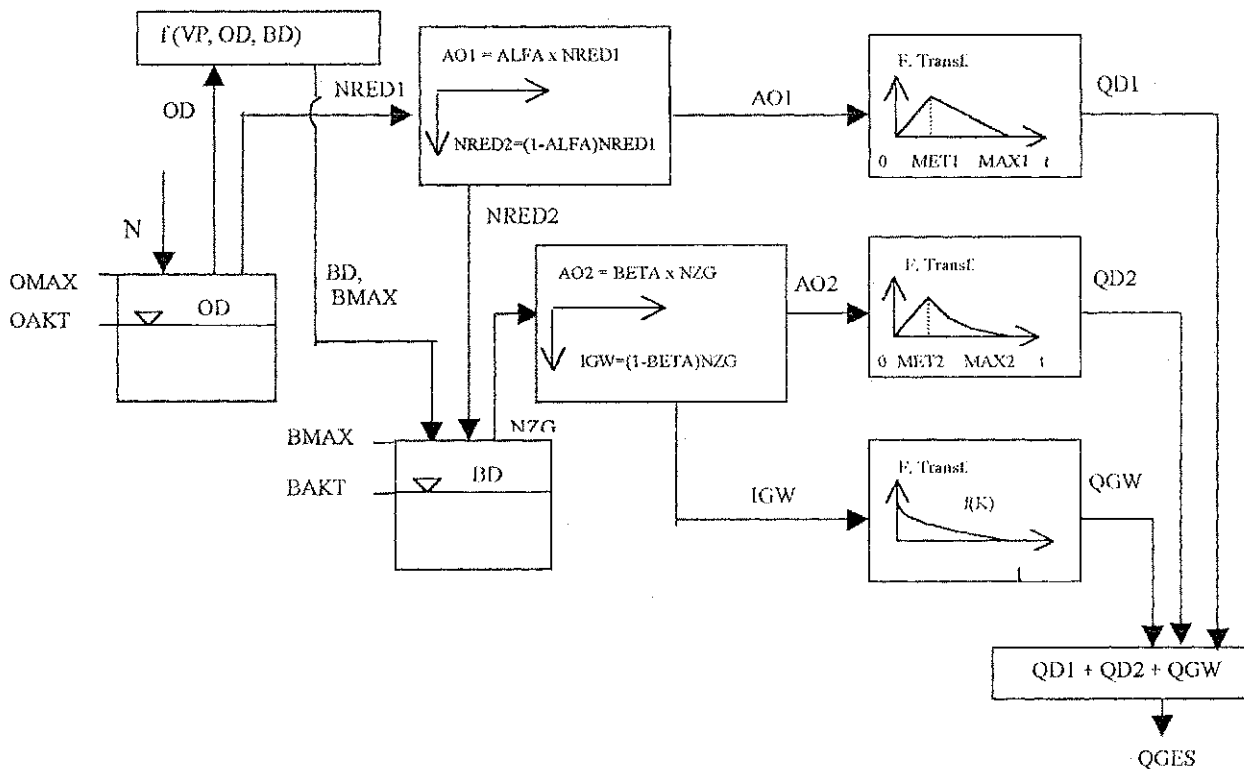


Figura 5.1 – Fluxograma do modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)



Definição de termos:

- ALFA – Parâmetro do reservatório superficial
- AO1 – Precipitação efetiva para o escoamento superficial
- AO2 – Lâmina d’água efetiva para o escoamento sub-superficial
- BAKT – Umidade atual do reservatório do solo
- BD – Déficit de umidade do reservatório do solo
- BETA – Parâmetro do reservatório sub-superficial
- BMAX – Capacidade de armazenamento máxima do solo
- IGW – Lâmina d’água efetiva para o escoamento subterrâneo
- K – Parâmetro do reservatório subterrâneo
- MAX1 – Tempo de base do escoamento superficial
- MAX2 – Tempo de base do escoamento sub-superficial
- MET1 – Tempo para atingir o pico do escoamento superficial
- MET2 – Tempo para atingir o pico do escoamento sub-superficial
- N – Precipitação
- NRED1 – Transbordo do reservatório superficial
- NRED2 – Parte do transbordo de água que vai suprir o solo
- NZG – Transbordo do reservatório sub-superficial
- OAKT – Umidade atual do reservatório superficial
- OD - Déficit de umidade do reservatório superficial
- OMAX – Capacidade de armazenamento máxima de superfície
- QD1 – Escoamento direto
- QD2 – Escoamento sub-superficial
- QGES – Descarga total
- QGW – Escoamento subterrâneo
- VA – Evaporação atual
- VP – Evaporação potencial.

Figura 5.2 – Representação do processo de precipitação-vazão-evaporação no modelo NAVMO (Kleberg et al., 1989).

### 5.2.1 Balanço Hídrico dos Reservatórios

A atualização da umidade, dos reservatórios superficial e sub-superficial, é feita através da equação do balanço hídrico, considerando que o escoamento só ocorrerá após o transbordamento dos dois reservatórios. As condições para a simulação do escoamento são mostradas a seguir (Kleeberg et al., 1989).

Para o reservatório superficial:

$$N(t) - VA(t) - OD(t - 1) > 0 \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.1)$$

Para o reservatório subterrâneo:

$$N(t) - VA(t) - OD(t - 1) - AO1(t) - BD(t - 1) > 0 \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.2)$$

onde:

$N(t)$  – Precipitação durante o intervalo de tempo  $t$

$VA(t)$  – Evaporação durante no intervalo de tempo  $t$

$OD(t-1)$  – Déficit de umidade no reservatório superficial antecedente

$BD(t-1)$  – Déficit de umidade no reservatório subterrâneo antecedente

$AO1$  – Lâmina do escoamento superficial direto

Os déficits de umidade são:

$$\text{Na superfície: } OD(t) = OMAX - OAKT \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.3)$$

$$\text{No solo: } BD(t) = BMAX - BAKT \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.4)$$

onde,  $OAKT$  e  $BAKT$  são os estados de umidade inicial nos reservatórios superficial e sub-superficial, respectivamente;  $OMAX$  é a capacidade máxima do reservatório superficial e  $BMAX$  a capacidade máxima do reservatório sub-superficial.

### 5.2.2 Capacidades dos Reservatórios e Cálculo do Escoamento.

As capacidades dos reservatórios superficial e sub – superficial,  $OMAX$  e  $BMAX$ , estão associados às propriedades físicas das bacias como solos, cobertura vegetal e relevo (Lopes, 1994). São espacialmente dependentes e não mudam com o evento de

precipitação. São determinadas considerando-se a capacidade de armazenamento (S) do solo, calculada pelo o método CN (curva-número) do SCS (McCuen, 1982), dada por:

$$S = 25,4 \times [(1000/CN) - 10] \quad (\text{mm}) \quad (5.5)$$

onde CN é um número que depende das características do solo, do seu uso e das condições antecedentes de chuva.

É assumido no modelo que BMAX = S, enquanto OMAX é uma fração de S e considera também a declividade média da sub-bacia (GEBGEF), sendo calculado pela função:

$$OMAX = 0,1 \times S \times e^{-4 \times GEBGEF} \quad (\text{mm}) \quad (5.6)$$

O escoamento superficial só será gerado se a equação 5.1 for satisfeita. Caso contrário nenhuma vazão superficial será produzida. A água ficará armazenada aumentando a umidade do solo que é sujeita à evaporação depois da chuva cessada.

A evaporação assume valor potencial até que a superfície esteja completamente seca e o déficit de umidade do reservatório superficial (OD) atinja a capacidade do reservatório superficial (OMAX), ou seja:

$$VA = VP \quad (\text{mm/dia}) \quad \text{enquanto } OD < OMAX \quad (5.7)$$

Quando o reservatório superficial atingir o nível mínimo de umidade, ou seja, secar completamente, dá-se então o início da evaporação da água no sub-solo, aumentando seu déficit de umidade (BD). A evaporação atual do sub-solo é calculada multiplicando-se a evaporação potencial (VP) pelo fator de calibração EET do modelo. Assim:

Para  $OD \geq OMAX$ :

$$VA(t) = EET \cdot (VP) \cdot [(BMAX - BD(t-1)) / BMAX] \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.8)$$

O déficit de umidade no solo é calculado pelas seguintes equações:

$$\text{Para } VA(t) < BAKT(t-1) \text{ e } OD(t) \geq OMAX \Rightarrow BD(t) = BD(t-1) + VA(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.9)$$

$$\text{Para } VA(t) > BAKT(t-1) \text{ e } OD(t) \geq OMAX \Rightarrow BD(t) = BMAX \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.10)$$

$$\text{Para } VA(t) = VP \text{ e } OD(t) < OMAX \Rightarrow BD(t) = BD(t-1) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.11)$$

O déficit do reservatório superficial é dado por:

$$OD(t) = OD(t-1) + VA(t) - N(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.12)$$

O escoamento efetivo ocorrerá quando a precipitação encher completamente o reservatório superficial, ou seja,  $OD(t) = 0$ . A lâmina de transbordamento (NRED1) do reservatório superficial será dada pela equação:

$$NRED1(t) = N(t) - OD(t-1) - VA(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.13)$$

Uma parte deste transbordamento produzirá a lâmina do escoamento superficial (AO1) enquanto que a lâmina complementar (NRED2) alimentará o reservatório sub-superficial conforme as equações abaixo:

$$AO1 = ALFA \times NRED1(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.14)$$

$$NRED2(t) = (1 - ALFA) \times NRED1 \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.15)$$

A redução do déficit de umidade do sub-solo será:

$$BD(t) = BD(t-1) - NRED2(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.16)$$

Caso  $NRED2(t)$  encha o reservatório sub-superficial, isto é,  $BD(t) = 0$ , a umidade excedente (NZG) será:

$$NZG(t) = NRED2(t) - BD(t-1) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.17)$$



A lâmina de transbordamento do reservatório sub – superficial será dividida, pelo parâmetro BETA, na lâmina do escoamento sub-superficial AO2(t) e na lâmina que vai para o lençol subterrâneo (IGW), ou seja:

$$AO2(t) = BETA \times NZG (t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.18)$$

$$IGW (t) = (1-BETA) \times NZG (t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (5.19)$$

onde, BETA e ALFA são parâmetros calibráveis do modelo.

### 5.2.3 Transformação das Lâminas dos Escoamentos

O escoamento Superficial (QD1) é obtido através da aplicação de duas funções lineares que transformam a lâmina do escoamento superficial (AO1) em hidrograma, uma para a subida do hidrograma e outra para a recessão. As funções são as seguintes:

Para a subida:

$$QDI(t + J) = \frac{2 \times J \times AO1(t) \times AE}{MET1 \times MAX1} \quad (\text{m}^3/\text{dia}) \quad (5.20)$$

Para a recessão:

$$QDI(t + J) = \frac{2 \times (MAX1 - J) \times AO1(t) \times AE}{MAX1 \times (MAX1 - MET1)} \quad (\text{m}^3/\text{dia}) \quad (5.21)$$

onde:

AE = área da sub-bacia

QDI(t+J) = escoamento direto num intervalo de tempo t+J

MET1 = Tempo para atingir o pico do escoamento superficial

MAX1 = Tempo de base do escoamento superficial.

A transformação da lâmina do escoamento sub-superficial (AO2) em hidrograma é feita através de uma função linear para a subida do hidrograma e por uma função exponencial para a recessão. São dadas por:

Para a subida:

$$QD2(t + J) = \frac{QM(t) \times J}{MET2} \quad (m^3/dia) \quad (5.22)$$

Para a recessão:

$$QD2(t + J) = QM(t) \times \left[ 1,1 \times e^{\frac{\ln 0,1}{1,1} \times \frac{J - MET2}{MAX2 - MET2}} - 0,1 \right] \quad (m^3/dia) \quad (5.23)$$

$$\text{onde: } QM(t) = \frac{AO2(t) \times AE}{(MAX2 - MET2) \times (1 / \ln 1,1 - 0,1) + MET2 \times 0,5} \quad (m^3/dia) \quad (5.24)$$

sendo:

MET 2 = Tempo para atingir o pico do escoamento sub-superficial

MAX 2 = Tempo de base do escoamento sub-superficial

O escoamento subterrâneo é calculado através da função:

$$QGW(t) = AGW(t) \cdot AE \quad (m^3/dia) \quad (5.25)$$

onde AGW (t) é dado por:

$$AGW(t) = \frac{AGW(t-1)}{1 + 1/K} + \frac{IGW(t)}{1 + K} \quad (mm/dia) \quad (5.26)$$

sendo:

K = constante do reservatório a ser calibrada

IGW (t) = infiltração no lençol subterrâneo.

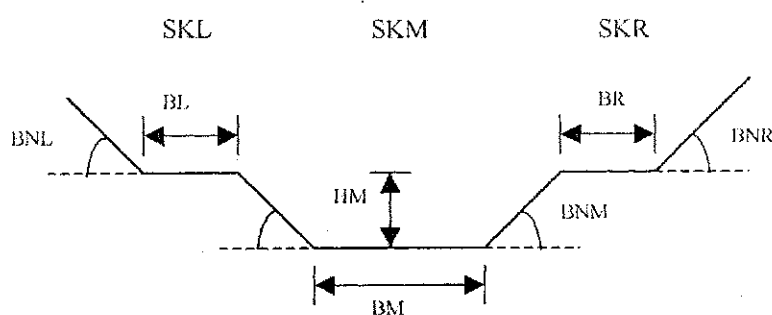
AE = área da sub-bacia

A soma das vazões superficial, sub - superficial e subterrâneo fornece o escoamento total diário:

$$QGES(t) = \frac{QD1(t) + QDZ(t) + QGW(t)}{86400} \quad (m^3/s) \quad (5.27)$$

### 5.3 Propagação do Escoamento nos Canais

O hidrograma de uma sub-bacia serve como hidrograma de entrada do trecho de rio da bacia subsequente (Kleeberg et. al., 1989). A propagação do escoamento total, é feita nos trechos de rios cuja seção é considerada trapezoidal conforme mostra a figura 5.3. A equação de Manning é utilizada, para o cálculo das velocidades de escoamento na calha principal e nos planos de inundação, as quais são multiplicadas por três coeficientes de ajuste. O modelo NAVMO pode utilizar as metodologias de Williams (1969), Kalinin-Miljukov (Fread, 1985) e velocidade de fluxo para propagar o escoamento.



Definição de termos:

BM – Largura da calha principal (m)

HM – Altura da calha principal (m)

BL – largura do plano de inundação esquerdo (m)

BR - largura do plano de inundação direito (m)

BNM – declividade das paredes laterais da calha do rio principal

BNL – declividade da parede lateral da margem esquerda

BNR – declividade da parede lateral da margem direita

SKM =  $(1/n)$ , onde n é coeficiente de Manning para a calha principal.

SKL =  $(1/n)$ , onde n é o coeficiente de Manning para a o plano de inundação da margem esquerda.

SKR =  $(1/n)$ , onde n é o coeficiente de Manning para a o plano de inundação da margem direita.

Figura 5.3 – Seção transversal do rio (Kleeberg et al., 1989).

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros calibráveis do modelo NAVMO e a sua descrição.

Tabela 5.1 – Parâmetros calibráveis do modelo NAVMO e seus significados

| Parâmetro | Significado   |
|-----------|---|
| MET1      | Tempo para atingir o pico do escoamento superficial (dias)                  |
| MET2      | Tempo para atingir o pico do escoamento sub-superficial (dias)              |
| MAX1      | Tempo de base do escoamento superficial (dias)                              |
| MAX2      | Tempo de base do escoamento sub-superficial (dias)                          |
| KG        | Parâmetro do escoamento subterrâneo (dias)                                  |
| EET       | Parâmetro de evaporação (-)   |
| EKM       | Fator de multiplicação do tempo de fluxo no leito do rio (-)                |
| EKL       | Fator de multiplicação do tempo de fluxo no plano de inundação esquerdo (-) |
| EKR       | Fator de multiplicação do tempo de fluxo no plano de inundação direito (-)  |
| ALFA      | Parâmetro de escoamento superficial (-)                                     |
| BETA      | Coefficiente de escoamento sub-superficial                                  |
| BFD       | Parâmetro que define o déficit de umidade inicial do solo (%)               |
| QBSP      | Parâmetro que define o escoamento subterrâneo inicial ( $m^3/seg/Km^2$ )    |

#### 5.4 Resultados Gerados pelo Modelo

O modelo NAVMO apresenta ao final do seu processo de simulação resultados como:

- hidrogramas de cada ano, a nível diário;
- volumes anuais;
- vazões máximas anuais;
- desvio médio
- desvio hidrológico;
- diferença de picos de vazão.

#### 5.5 Validação dos Parâmetros Utilizando o Modelo NAVMO.

O processo tradicional de modelagem hidrológica compreende as seguintes etapas: escolha do modelo, seleção e análise de dados, calibração e validação. A calibração consiste no ajuste dos valores dos parâmetros para se obter um melhor resultado.

Na fase de validação ocorre a verificação do modelo calibrado, com objetivo de observar se o modelo representa adequadamente as condições da bacia. Só após a etapa de validação dos parâmetros é que o modelo está apto a simular com outras condições, ou seja, realizar previsões sobre o sistema. Existem diferentes métodos de validação, tais como a divisão de dados, uso de duas ou mais bacias, etc. (Klemeš, 1986; Ewen e Parkin, 1996; Figueiredo, 1999; Braga, 2001). Estes métodos utilizam uma parte dos dados de uma bacia para calibrar e outra para verificar. No entanto, quando os parâmetros forem avaliados ou estimados, seus valores devem ser validados através de um modelo de simulação que os utilize no cálculo dos processos hidrológicos. Este é o procedimento adotado nesta pesquisa, através da aplicação dos parâmetros estimados (Capítulo 4) juntamente com o modelo NAVMO na simulação do escoamento das várias bacias e áreas experimentais da Bacia Representativa de Sumé.

#### 5.5.1 Aplicação do Modelo NAVMO

Para a simulação do escoamento utilizando o modelo NAVMO, fez-se necessário uma discretização da Bacia em sub-bacias. A Bacia Representativa de Sumé - BRS foi discretizada em dez sub - bacias e seis trechos de propagação do fluxo, de modo que suas sub - bacias coincidissem com as estações fluviométricas de Jatobá, Umburana e Gangorra, para as quais existem registros de vazões.

Na Bacia Experimental de Sumé, as microbacias foram discretizadas em quatro (M1) e em três (M1, M2, M3) sub - bacias de áreas iguais. No caso das parcelas não foi realizada a discretização da área, pois estas já se apresentam com uma única célula de 100 m<sup>2</sup>. Foram determinados, para cada sub - bacia e parcelas, as áreas e os parâmetros necessários para simulação do fluxo tais como as coordenadas do centróide das áreas, comprimento e declividade dos trechos de rio, elevações para o cálculo das declividades, bem como os dados da seção transversal do canal, necessários para aplicação do processo de propagação do escoamento. A Figura 5.4 mostra o esquema linear das áreas modeladas. A bacia de Jatobá corresponde a saída da sub- bacia 2, enquanto as saídas das sub- bacias 7 e 10 correspondem a Umburana e Gangorra respectivamente.

Os valores de CN e n de Manning estimados na fase anterior foram aplicados no processo de simulação do escoamento em cada uma das sub - bacias (Jatobá, Umburana e Gangorra), microbacias e parcelas de acordo com a área e o tipo de uso do

solo. No entanto, inicialmente foram utilizados valores CN médios de todos os valores CN na condição antecedente normal (coluna Tudo da tabela 4.3), ou seja, utilizaram – se valores independentemente das reais condições antecedente de umidade do solo. Esse procedimento foi para análise e comparação.

Dos treze parâmetros calibráveis do modelo NAVMO, onze foram fixados, pois não afetam significativamente a formação do escoamento na região do estudo (Figueiredo e Srínivasan, 1999). Como a contribuição do escoamento subterrâneo é praticamente desprezível na região semi – árida a vazão de base (QBSP) foi considerada igual a zero. Da mesma forma, o parâmetro que define o déficit de umidade do solo (BDF) foi fixado em 95% nas áreas menores (parcelas e microbacias) e em 85% nas sub-bacias da BRS, devido o início das simulações ocorrer no período de estiagem.

Os valores dos outros dois parâmetros, que se mostram mais sensíveis, ALFA e EET, foram ajustados segundo os critérios de vazões máximas anuais, volumes anuais e comparação de hidrogramas observados e simulados nos anos de 1976 a 1980, nas sub – bacias da BRS, e nos anos de 1982 a 1988 nas áreas da BES (microbacias e parcelas). As Tabelas 5.2 a 5.7 mostram os valores ajustados de ALFA e EET, de acordo com as vazões máximas e volumes, considerando os valores CN médios na condição antecedente normal. As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 mostram os hidrogramas simulados e observados em diferentes escalas da BRS.

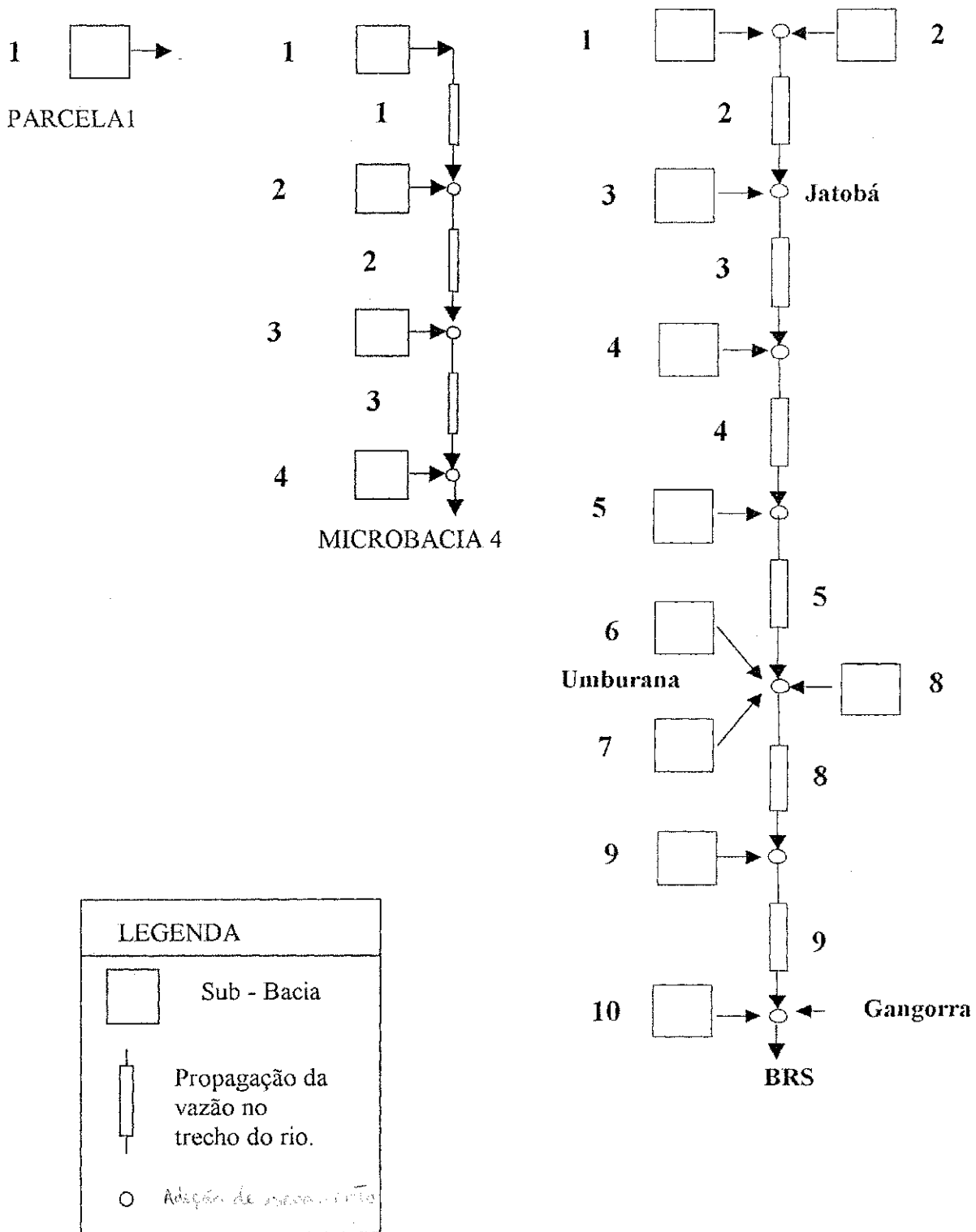


Figura 5.4- Esquema Linear da Bacia Representativa de Sumé.

Tabela 5.2 – Volumes Simulados e Observados - Micro Bacias (com valores CN médios).

| MICRO BACIA 1 (0,62 ha) |      |      |          | MICRO BACIA 2 (1,07 ha) |      |      |          | MICRO BACIA 3 (0,52 ha) |      |      |          | MICRO BACIA 4 (0,48ha) |      |      |          |          |
|-------------------------|------|------|----------|-------------------------|------|------|----------|-------------------------|------|------|----------|------------------------|------|------|----------|----------|
| ANO                     | ALFA | EET  | VOL (m3) |                         | ALFA | EET  | VOL (m3) |                         | ALFA | EET  | VOL (m3) |                        | ALFA | EET  | VOL (m3) |          |
| 1982                    | 0,01 | 5,00 | obs      | 0,39                    | 0,01 | 5,00 | obs      | 0,24                    | 0,01 | 5,00 | obs      | 35,67                  | 0,10 | 4,00 | obs      | 137,71   |
|                         |      |      | calc     | 6,80                    |      |      | calc     | 12,05                   |      |      | calc     | 129,00                 |      |      | calc     | 121,68   |
| 1983                    |      |      | obs      | 0,00                    | 0,01 | 5,00 | obs      | 0,10                    | 0,04 | 5,00 | obs      | 11,06                  | 0,20 | 2,00 | obs      | 84,96    |
|                         |      |      | calc     |                         |      |      | calc     | 4,15                    |      |      | calc     | 1,00                   |      |      | calc     | 72,00    |
| 1984                    | 0,10 | 5,00 | obs      | 31,76                   | 0,10 | 4,00 | obs      | 194,97                  | 0,50 | 4,00 | obs      | 635,77                 | 0,50 | 5,00 | obs      | 593,02   |
|                         |      |      | calc     | 94,2                    |      |      | calc     | 203,60                  |      |      | calc     | 663,00                 |      |      | calc     | 550,90   |
| 1985                    | 0,30 | 3,00 | obs      | 410,46                  | 0,20 | 5,00 | obs      | 1.877,72                | 0,35 | 5,00 | obs      | 2.396,70               | 0,30 | 5,00 | obs      | 1.991,29 |
|                         |      |      | calc     | 1239                    |      |      | calc     | 2283,00                 |      |      | calc     | 2711,80                |      |      | calc     | 2318,8   |
| 1986                    | 0,03 | 2,50 | obs      | 186,03                  | 0,10 | 5,00 | obs      | 628,94                  | 0,40 | 4,00 | obs      | 1.501,20               | 0,50 | 5,00 | obs      | 1.469,51 |
|                         |      |      | calc     | 219,00                  |      |      | calc     | 467,50                  |      |      | calc     | 1452,60                |      |      | calc     | 1369,75  |
| 1987                    | 0,01 | 5,00 | obs      | 0,22                    | 0,01 | 5,00 | obs      | 0,51                    | 0,30 | 3,00 | obs      | 367,73                 | 0,25 | 3,00 | obs      | 298,91   |
|                         |      |      | calc     | 6,30                    |      |      | calc     | 12,36                   |      |      | calc     | 284,70                 |      |      | calc     | 207,00   |
| 1988                    | 0,01 | 5,00 | obs      | 17,04                   | 0,01 | 5,00 | obs      | 22,25                   | 0,65 | 5,00 | obs      | 1.268,72               | 0,55 | 4,00 | obs      | 1.110,59 |
|                         |      |      | calc     | 15,16                   |      |      | calc     | 29,08                   |      |      | calc     | 1266,8                 |      |      | calc     | 1058,7   |

Tabela 5.3 – Volumes Simulados e Observados - Bacia Representativa (com valores CN médios).

| SAIDA          | ANO 1976 |      |                          | ANO 1977 |      |                          | ANO 1978 |         |                          | ANO 1979 |      |                          | ANO 1980 |      |                          |        |
|----------------|----------|------|--------------------------|----------|------|--------------------------|----------|---------|--------------------------|----------|------|--------------------------|----------|------|--------------------------|--------|
|                | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET     | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) |        |
| 2<br>Jatobá    | 0,04     | 2,00 | obs                      | 601,00   | 0,12 | 4,00                     | obs      | 600,00  | 0,20                     | 3,00     | obs  | 1930,00                  | 0,07     | 4,00 | obs                      | 350,00 |
|                |          |      | calc                     | 388,80   |      |                          | calc     | 598,90  |                          |          | calc | 1220,60                  |          |      | calc                     | 220,90 |
| 7<br>Umburana  | 0,04     | 2,00 | obs                      | 1066,00  | 0,15 | 4,00                     | obs      | 1070,00 | 0,20                     | 3,00     | obs  | 600,00                   | 0,01     | 4,00 | obs                      | 30,00  |
|                |          |      | calc                     | 512,70   |      |                          | calc     | 1223,30 |                          |          | calc | 770,20                   |          |      | calc                     | 50,60  |
| 10<br>Gangorra | 0,02     | 4,00 | obs                      | 1292,00  | 0,02 | 4,00                     | obs      | 9440,00 | 0,01                     | 4,00     | obs  | 4800,00                  | 0,01     | 4,00 | obs                      | 370,00 |
|                |          |      | calc                     | 5229,10  |      |                          | calc     | 9240,60 |                          |          | calc | 6640,40                  |          |      | calc                     | 514,30 |



Tabela 5.4 – Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Micro Bacias (com valores CN médios).

| MICRO BACIA 1 (0,62 ha) |      |      |                        | MICRO BACIA 2 (1,07 ha) |      |      |                        | MICRO BACIA 3 (0,52 ha) |      |      |                        | MICRO BACIA 4 (0,48ha) |      |      |                        |      |
|-------------------------|------|------|------------------------|-------------------------|------|------|------------------------|-------------------------|------|------|------------------------|------------------------|------|------|------------------------|------|
| ANO                     | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                         | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                         | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                        | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |      |
| 1982                    | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,0045                  | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,0021                  | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,40                   | 0,10 | 4,00 | obs                    | 0,45 |
|                         |      |      | calc                   | 0,02                    |      |      | calc                   | 0,0400                  |      |      | calc                   | 0,19                   |      |      | calc                   | 0,20 |
| 1983                    | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,00                    | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,0011                  | 0,04 | 5,00 | obs                    | 0,01                   | 0,20 | 2,00 | obs                    | 0,33 |
|                         |      |      | calc                   | 0,0010                  |      |      | calc                   | 0,02                    |      |      | calc                   | 0,05                   |      |      | calc                   | 0,27 |
| 1984                    | 0,10 | 5,00 | obs                    | 0,3401                  | 0,10 | 4,00 | obs                    | 2,22                    | 0,50 | 4,00 | obs                    | 2,50                   | 0,50 | 5,00 | obs                    | 1,67 |
|                         |      |      | calc                   | 0,2500                  |      |      | calc                   | 0,48                    |      |      | calc                   | 1,20                   |      |      | calc                   | 1,09 |
| 1985                    | 0,30 | 3,00 | obs                    | 3,00                    | 0,20 | 5,00 | obs                    | 3,50                    | 0,35 | 5,00 | obs                    | 5,10                   | 0,30 | 5,00 | obs                    | 5,50 |
|                         |      |      | calc                   | 0,89                    |      |      | calc                   | 1,89                    |      |      | calc                   | 1,69                   |      |      | calc                   | 1,42 |
| 1986                    | 0,03 | 2,50 | obs                    | 1,82                    | 0,10 | 5,00 | obs                    | 6,40                    | 0,40 | 4,00 | obs                    | 5,60                   | 0,50 | 5,00 | obs                    | 4,20 |
|                         |      |      | calc                   | 0,23                    |      |      | calc                   | 0,72                    |      |      | calc                   | 1,50                   |      |      | calc                   | 1,79 |
| 1987                    | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,0019                  | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,03                    | 0,30 | 3,00 | obs                    | 1,60                   | 0,25 | 3,00 | obs                    | 1,06 |
|                         |      |      | calc                   | 0,0200                  |      |      | calc                   | 0,30                    |      |      | calc                   | 0,53                   |      |      | calc                   | 0,41 |
| 1988                    | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,02                    | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,02                    | 0,65 | 5,00 | obs                    | 2,01                   | 0,55 | 4,00 | obs                    | 1,84 |
|                         |      |      | calc                   | 0,02                    |      |      | calc                   | 0,04                    |      |      | calc                   | 1,38                   |      |      | calc                   | 1,13 |

Tabela 5.5 – Vazões Máximas Simuladas e Observadas - Bacia Representativa (com valores CN médios).

| SAÍDA          | ANO 1976 |      |                         |      | ANO 1977 |      |                         |       | ANO 1978 |      |                         |      | ANO 1979 |      |                         |      | ANO 1980 |      |                         |      |
|----------------|----------|------|-------------------------|------|----------|------|-------------------------|-------|----------|------|-------------------------|------|----------|------|-------------------------|------|----------|------|-------------------------|------|
|                | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) |      | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) |       | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) |      | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) |      | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) |      |
| 2<br>Jatobá    | 0,10     | 4,00 | obs                     | 1,12 | 0,15     | 4,00 | obs                     | 1,52  | 0,20     | 4,00 | obs                     | 1,55 | 0,17     | 3,50 | obs                     | 2,50 | 0,25     | 2,00 | obs                     | 0,90 |
|                |          |      | calc                    | 1,09 |          |      | calc                    | 1,39  |          |      | calc                    | 1,10 |          |      | calc                    | 1,28 |          |      | calc                    | 0,55 |
| 7<br>Umburana  | 0,30     | 3,00 | obs                     | 1,20 | 0,90     | 1,00 | obs                     | 9,50  | 0,40     | 4,00 | obs                     | 1,60 | 0,15     | 3,00 | obs                     | 0,30 |          |      | obs                     |      |
|                |          |      | calc                    | 1,01 |          |      | calc                    | 3,71  |          |      | calc                    | 1,06 |          |      | calc                    | 0,32 |          |      | calc                    |      |
| 10<br>Gangorra | 0,01     | 4,00 | obs                     | 7,20 | 0,20     | 3,00 | obs                     | 35,00 | 0,01     | 4,50 | obs                     | 5,00 | 0,01     | 4,00 | obs                     | 2,30 | 0,01     | 4,00 | obs                     | 0,06 |
|                |          |      | calc                    | 8,39 |          |      | calc                    | 33,04 |          |      | calc                    | 8,15 |          |      | calc                    | 4,50 |          |      | calc                    | 0,44 |

Tabela 5.6 – Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Parcelas (com valores CN médios).

| PARCELA 1 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 2 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 3 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 4 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        |                                 |      |      |                        |        |
|---------------------------------|------|------|------------------------|---------------------------------|------|------|------------------------|---------------------------------|------|------|------------------------|---------------------------------|------|------|------------------------|---------------------------------|------|------|------------------------|--------|
| ANO                             | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 |      |      |                        |        |
| 1982                            | 0,40 | 3,00 | obs                    | 0,017                           | 0,20 | 2,00 | obs                    | 0,0057                          | 0,40 | 4,00 | obs                    | 0,0157                          | 0,40 | 4,00 | obs                    | 0,0165                          |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,016                           |      |      | cal                    | 0,0070                          |      |      | cal                    | 0,0140                          |      |      | cal                    | 0,016                           |      |      |                        |        |
| 1983                            | 0,70 | 2,00 | obs                    | 0,020                           | 0,01 | 4,00 | obs                    | 0,0001                          | 0,15 | 4,00 | obs                    | 0,0027                          | 0,50 | 4,00 | obs                    | 0,0141                          |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,019                           |      |      | cal                    | 0,0002                          |      |      | cal                    | 0,003                           |      |      | cal                    | 0,0120                          |      |      |                        |        |
| 1984                            | 0,90 | 1,00 | obs                    | 0,0657                          | 0,75 | 1,00 | obs                    | 0,0425                          | 0,80 | 4,00 | obs                    | 0,031                           | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0628                          |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,046                           |      |      | cal                    | 0,038                           |      |      | cal                    | 0,036                           |      |      | cal                    | 0,0490                          |      |      |                        |        |
| 1985                            | 0,65 | 2,00 | obs                    | 0,0608                          | 0,90 | 1,00 | obs                    | 0,0928                          | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,1065                          | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,1026                          |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,057                           |      |      | cal                    | 0,0810                          |      |      | cal                    | 0,091                           |      |      | cal                    | 0,0910                          |      |      |                        |        |
| 1986                            | 0,70 | 4,00 | obs                    | 0,0499                          | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,089                           | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0926                          | 0,85 | 1,00 | obs                    | 0,0603                          |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,050                           |      |      | cal                    | 0,065                           |      |      | cal                    | 0,0660                          |      |      | cal                    | 0,0620                          |      |      |                        |        |
| 1987                            | 0,85 | 1,00 | obs                    | 0,030                           | 0,01 | 3,00 | obs                    | 0,0001                          | 0,01 | 5,00 | obs                    | 0,00                            | 0,70 | 4,00 | obs                    | 0,0210                          |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,027                           |      |      | cal                    | 0,0003                          |      |      | cal                    | 0,0003                          |      |      | cal                    | 0,0240                          |      |      |                        |        |
| 1988                            | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0519                          | 0,07 | 4,00 | obs                    | 0,0029                          | 0,05 | 4,00 | obs                    | 0,0019                          | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0484                          |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,039                           |      |      | cal                    | 0,0027                          |      |      | cal                    | 0,0020                          |      |      | cal                    | 0,0420                          |      |      |                        |        |
| PARCELA 5 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 6 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 7 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 8 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 9 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        |        |
| ANO                             | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |        |
| 1982                            | 0,05 | 4,00 | obs                    | 0,0019                          | 0,01 | 6,00 | obs                    | 0,00                            | 0,01 | 9,50 | obs                    | 0,00                            |      |      | obs                    | 0,00                            |      |      | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0017                          |      |      | cal                    | 0,04                            |      |      | cal                    | 0,001                           |      |      | cal                    |                                 |      |      | cal                    |        |
| 1983                            | 0,01 | 4,00 | obs                    | 0,0002                          | 0,05 | 4,00 | obs                    | 0,009                           | 0,01 | 9,50 | obs                    | 0,0002                          |      |      | obs                    | 0,00                            |      |      | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0002                          |      |      | cal                    | 0,010                           |      |      | cal                    | 0,0002                          |      |      | cal                    |                                 |      |      | cal                    |        |
| 1984                            | 0,15 | 4,00 | obs                    | 0,0058                          | 0,85 | 4,00 | obs                    | 0,0413                          | 0,70 | 4,50 | obs                    | 0,0319                          |      |      | obs                    | 0,00                            |      |      | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0070                          |      |      | cal                    | 0,0390                          |      |      | cal                    | 0,0310                          |      |      | cal                    |                                 |      |      | cal                    |        |
| 1985                            | 0,75 | 3,00 | obs                    | 0,0675                          | 0,95 | 3,00 | obs                    | 0,1065                          | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,1065                          |      |      | obs                    | 0,00                            |      |      | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0670                          |      |      | cal                    | 0,0900                          |      |      | cal                    | 0,0910                          |      |      | cal                    |                                 |      |      | cal                    |        |
| 1986                            | 0,65 | 4,00 | obs                    | 0,0431                          | 0,75 | 4,00 | obs                    | 0,0538                          | 0,85 | 4,00 | obs                    | 0,0638                          | 0,55 | 4,00 | obs                    | 0,0406                          | 0,30 | 4,00 | obs                    | 0,0202 |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0440                          |      |      | cal                    | 0,0540                          |      |      | cal                    | 0,0600                          |      |      | cal                    | 0,0390                          |      |      | cal                    | 0,0200 |
| 1987                            | 0,01 | 4,00 | obs                    | 0,0001                          | 0,75 | 4,00 | obs                    | 0,0256                          | 0,85 | 4,00 | obs                    | 0,0284                          | 0,55 | 4,00 | obs                    | 0,0181                          | 0,01 | 6,00 | obs                    | 0,0002 |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0003                          |      |      | cal                    | 0,0250                          |      |      | cal                    | 0,0280                          |      |      | cal                    | 0,0180                          |      |      | cal                    | 0,0003 |
| 1988                            | 0,01 | 3,00 | obs                    | 0,0007                          | 0,95 | 3,00 | obs                    | 0,0408                          | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0501                          | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0564                          | 0,10 | 4,00 | obs                    | 0,0034 |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0004                          |      |      | cal                    | 0,0400                          |      |      | cal                    | 0,0410                          |      |      | cal                    | 0,0410                          |      |      | cal                    | 0,0040 |

Tabela 5.7 – Volumes Simulados e Observados – Parcelas (com valores CN médios).

| PARCELA 1 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                      | PARCELA 2 (100 m <sup>2</sup> ) |      |                      |      | PARCELA 3 (100 m <sup>2</sup> ) |                      |      |     | PARCELA 4 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                      |                                 |      |                      |     |      |
|---------------------------------|------|------|----------------------|---------------------------------|------|----------------------|------|---------------------------------|----------------------|------|-----|---------------------------------|------|------|----------------------|---------------------------------|------|----------------------|-----|------|
| ANO                             | ALFA | EET  | VOL(m <sup>3</sup> ) | ALFA                            | EET  | VOL(m <sup>3</sup> ) | ALFA | EET                             | VOL(m <sup>3</sup> ) | ALFA | EET | VOL(m <sup>3</sup> )            | ALFA | EET  | VOL(m <sup>3</sup> ) |                                 |      |                      |     |      |
| 1982                            | 0,01 | 3,00 | obs                  | 1,52                            | 0,05 | 2,00                 | obs  | 0,51                            | 0,15                 | 4,00 | obs | 1,62                            | 0,01 | 4,00 | obs                  | 1,46                            |      |                      |     |      |
|                                 |      |      | cal                  | 33,88                           |      |                      | cal  | 0,60                            |                      |      | cal | 1,90                            |      |      | cal                  | 3,95                            |      |                      |     |      |
| 1983                            | 0,40 | 2,00 | obs                  | 2,60                            | 0,01 | 4,00                 | obs  | 0,02                            | 0,15                 | 4,00 | obs | 0,50                            | 0,50 | 4,00 | obs                  | 2,46                            |      |                      |     |      |
|                                 |      |      | cal                  | 3,00                            |      |                      | cal  | 0,04                            |                      |      | cal | 0,69                            |      |      | cal                  | 2,93                            |      |                      |     |      |
| 1984                            | 0,90 | 1,00 | obs                  | 20,07                           | 0,20 | 4,00                 | obs  | 4,47                            | 0,35                 | 4,00 | obs | 7,87                            | 0,40 | 1,00 | obs                  | 22,10                           |      |                      |     |      |
|                                 |      |      | cal                  | 17,80                           |      |                      | cal  | 3,86                            |                      |      | cal | 7,60                            |      |      | cal                  | 21,25                           |      |                      |     |      |
| 1985                            | 0,01 | 2,00 | obs                  | 54,70                           | 0,20 | 4,00                 | obs  | 33,34                           | 0,10                 | 4,00 | obs | 25,71                           | 0,10 | 3,00 | obs                  | 62,35                           |      |                      |     |      |
|                                 |      |      | cal                  | 65,40                           |      |                      | cal  | 29,2                            |                      |      | cal | 31,40                           |      |      | cal                  | 57,03                           |      |                      |     |      |
| 1986                            | 0,20 | 4,00 | obs                  | 20,70                           | 0,20 | 4,00                 | obs  | 11,64                           | 0,10                 | 3,00 | obs | 10,80                           | 0,20 | 1,00 | obs                  | 31,10                           |      |                      |     |      |
|                                 |      |      | cal                  | 23,30                           |      |                      | cal  | 10,20                           |                      |      | cal | 10,03                           |      |      | cal                  | 40,00                           |      |                      |     |      |
| 1987                            | 0,40 | 1,00 | obs                  | 8,70                            | 0,01 | 3,00                 | obs  | 0,02                            | 0,01                 | 5,00 | obs | 0,003                           | 0,35 | 4,00 | obs                  | 7,62                            |      |                      |     |      |
|                                 |      |      | cal                  | 9,00                            |      |                      | cal  | 0,10                            |                      |      | cal | 0,13                            |      |      | cal                  | 6,50                            |      |                      |     |      |
| 1988                            | 0,50 | 1,00 | obs                  | 33,78                           | 0,02 | 4,00                 | obs  | 0,61                            | 0,01                 | 4,00 | obs | 0,33                            | 0,30 | 1,00 | obs                  | 27,57                           |      |                      |     |      |
|                                 |      |      | cal                  | 31,50                           |      |                      | cal  | 0,587                           |                      |      | cal | 0,334                           |      |      | cal                  | 26,21                           |      |                      |     |      |
| PARCELA 5 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                      | PARCELA 6 (100 m <sup>2</sup> ) |      |                      |      | PARCELA 7 (100 m <sup>2</sup> ) |                      |      |     | PARCELA 8 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                      | PARCELA 9 (100 m <sup>2</sup> ) |      |                      |     |      |
| ANO                             | ALFA | EET  | VOL(m <sup>3</sup> ) | ALFA                            | EET  | VOL(m <sup>3</sup> ) | ALFA | EET                             | VOL(m <sup>3</sup> ) | ALFA | EET | VOL(m <sup>3</sup> )            | ALFA | EET  | VOL(m <sup>3</sup> ) | ALFA                            | EET  | VOL(m <sup>3</sup> ) |     |      |
| 1982                            | 0,02 | 4,00 | obs                  | 0,17                            | 0,01 | 6,00                 | obs  | 0,00                            | 0,01                 | 9,50 | obs | 0,00                            |      |      | obs                  | 0,00                            |      |                      | obs | 0,00 |
|                                 |      |      | cal                  | 0,20                            |      |                      | cal  | 2,90                            |                      |      | cal | 0,69                            |      |      | cal                  |                                 |      |                      | cal |      |
| 1983                            | 0,01 | 4,00 | obs                  | 0,02                            | 0,02 | 4,00                 | obs  | 0,16                            | 0,01                 | 9,50 | obs | 0,05                            |      |      | obs                  | 0,00                            |      |                      | obs | 0,00 |
|                                 |      |      | cal                  | 0,04                            |      |                      | cal  | 0,11                            |                      |      | cal | 0,04                            |      |      | cal                  |                                 |      |                      | cal |      |
| 1984                            | 0,02 | 4,00 | obs                  | 0,55                            | 0,30 | 4,00                 | obs  | 9,67                            | 0,25                 | 4,50 | obs | 4,13                            |      |      | obs                  | 0,00                            |      |                      | obs | 0,00 |
|                                 |      |      | cal                  | 0,38                            |      |                      | cal  | 10,20                           |                      |      | cal | 6,10                            |      |      | cal                  |                                 |      |                      | cal |      |
| 1985                            | 0,01 | 4,00 | obs                  | 13,65                           | 0,10 | 3,00                 | obs  | 56,23                           | 0,10                 | 3,00 | obs | 48,27                           |      |      | obs                  | 0,00                            |      |                      | obs | 0,00 |
|                                 |      |      | cal                  | 18,38                           |      |                      | cal  | 54,97                           |                      |      | cal | 48,66                           |      |      | cal                  |                                 |      |                      | cal |      |
| 1986                            | 0,05 | 4,00 | obs                  | 3,90                            | 0,10 | 4,00                 | obs  | 24,55                           | 0,30                 | 4,00 | obs | 21,70                           | 0,10 | 3,00 | obs                  | 15,23                           | 0,10 | 4,00                 | obs | 4,62 |
|                                 |      |      | cal                  | 3,59                            |      |                      | cal  | 21,25                           |                      |      | cal | 21,26                           |      |      | cal                  | 16,50                           |      |                      | cal | 4,17 |
| 1987                            | 0,01 | 4,00 | obs                  | 0,009                           | 0,50 | 4,00                 | obs  | 9,72                            | 0,30                 | 4,00 | obs | 4,48                            | 0,15 | 1,00 | obs                  | 4,78                            | 0,01 | 6,00                 | obs | 0,03 |
|                                 |      |      | cal                  | 0,12                            |      |                      | cal  | 8,65                            |                      |      | cal | 4,79                            |      |      | cal                  | 3,60                            |      |                      | cal | 0,09 |
| 1988                            | 0,01 | 4,00 | obs                  | 0,14                            | 0,60 | 3,00                 | obs  | 31,56                           | 0,60                 | 3,00 | obs | 25,25                           | 0,60 | 1,00 | obs                  | 30,99                           | 0,02 | 4,00                 | obs | 0,72 |
|                                 |      |      | cal                  | 0,29                            |      |                      | cal  | 26,29                           |                      |      | cal | 24,25                           |      |      | cal                  | 28,88                           |      |                      | cal | 0,50 |

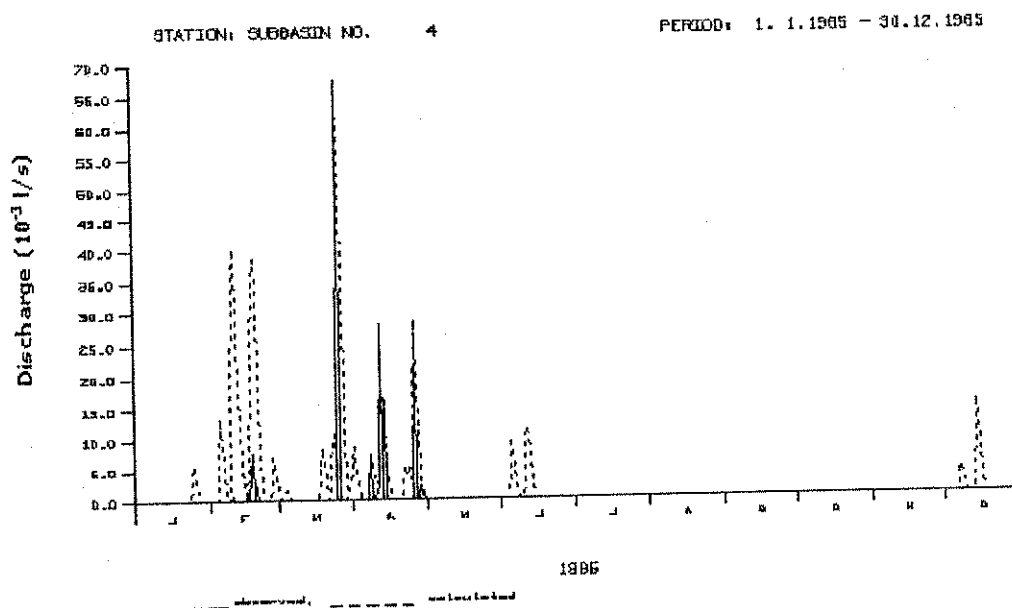


Figura 5.5 – Hidrogramas observado e simulado com valor CN médios na parcela 5, vegetada com caatinga, no ano de 1985 (— observado, - - - - - simulado).

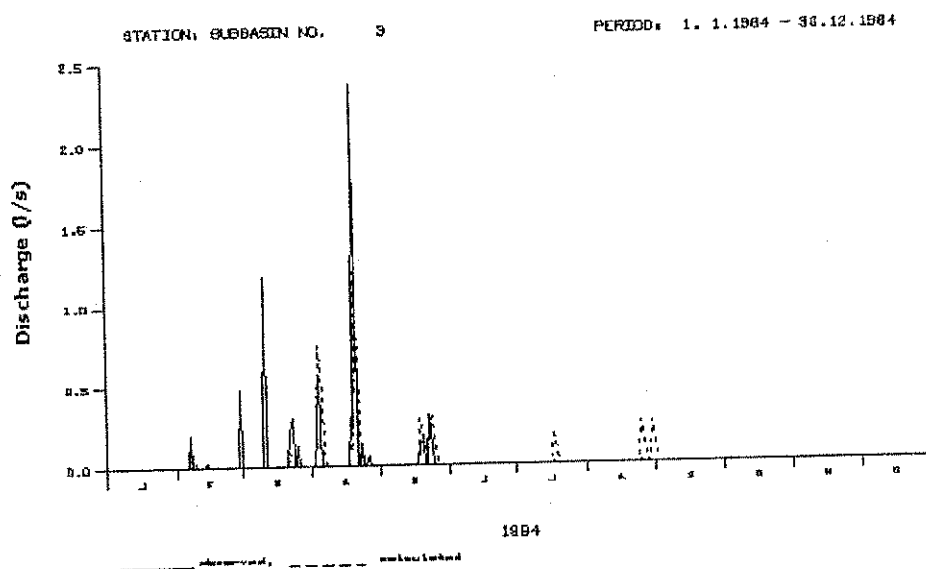


Figura 5.6 – Hidrogramas observado e simulado com valor CN médio na microbacia 3, desmatada, no ano de 1984 (— observado, - - - - - simulado).

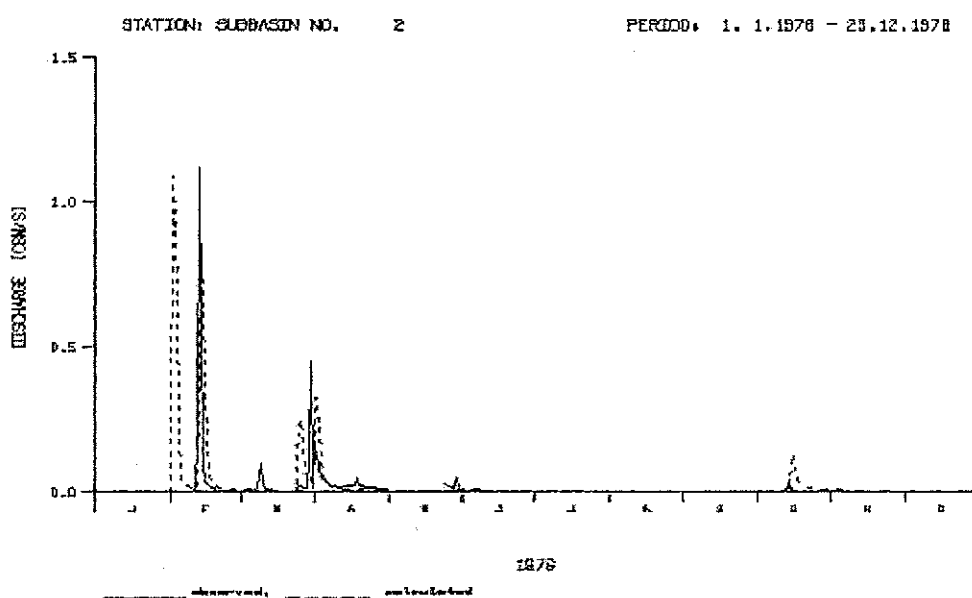


Figura 5.7 – Hidrogramas observado e simulado com valor CN médio na sub - bacia de Jatobá, no ano de 1976(— observado, - - - - - simulado).

Outras simulações foram realizadas, no intuito de verificar o impacto causado no escoamento devido às condições antecedentes de umidade do solo. Para tanto efetuou-se a substituição dos valores CN médios, na condição normal, pelos valores CN de acordo com as condições antecedentes de umidade do solo. Nestas novas simulações do escoamento considerou – se também a condição de chuva de cada ano, ou seja, os anos foram classificados em anos secos ( $P < 400 \text{ mm/ano}$ ), normais ( $600 \text{ mm/ ano} < P < 800 \text{ mm/ano}$ ) e úmidos ( $P > 800 \text{ mm/ano}$ ).

Portanto, para aqueles anos considerados secos (1980, 1982, 1983, 1987) foram utilizados os valores CN na condição seca ( $CN_I$ ), para os anos úmidos (1977, 1978, 1985, 1986) utilizou – se os valores CN na condição úmida ( $CN_{III}$ ) e nos anos normais (1976, 1977, 1984, 1988) os valores CN na condição normal ( $CN_{II}$ ), de acordo com a Tabela 4.3. As Tabelas 5.8 a 5.13 mostram os valores ajustados de ALFA e EET, de acordo com as vazões máximas e volumes, considerando os valores CN de acordo com a condição antecedente de umidade do solo. As Figuras 5.8 a 5.10 mostram a comparação entre os hidrogramas observados e simulados conforme condição antecedente.

Tabela 5.8 – Volumes Simulados e Observados - Micro Bacias (com valores CN conforme condição antecedente).

| MICRO BACIA 1 (0,62 ha) |      |      |             | MICRO BACIA 2 (1,07 ha) |      |              |      | MICRO BACIA 3 (0,52 ha) |              |      |      | MICRO BACIA 4 (0,48ha) |  |  |  |
|-------------------------|------|------|-------------|-------------------------|------|--------------|------|-------------------------|--------------|------|------|------------------------|--|--|--|
| ANO                     | ALFA | EET  | VOL (m3)    | ALFA                    | EET  | VOL (m3)     | ALFA | EET                     | VOL (m3)     | ALFA | EET  | VOL (m3)               |  |  |  |
| 1982                    | 0,01 | 5,00 | obs 0,39    | 0,01                    | 5,00 | obs 0,24     | 0,01 | 5,00                    | obs 35,67    | 0,20 | 4,00 | obs 137,71             |  |  |  |
|                         |      |      | calc 5,07   |                         |      | calc 8,93    |      |                         | calc 66,94   |      |      | calc 132,08            |  |  |  |
| 1983                    |      |      | obs 0,00    | 0,01                    | 5,00 | obs 0,10     | 0,04 | 5,00                    | obs 11,06    | 0,25 | 2,00 | obs 84,96              |  |  |  |
|                         |      |      | calc        |                         |      | calc 2,19    |      |                         | calc 10,63   |      |      | calc 84,03             |  |  |  |
| 1984                    | 0,03 | 5,00 | obs 31,76   | 0,08                    | 4,00 | obs 194,97   | 0,40 | 4,00                    | obs 635,77   | 0,60 | 5,00 | obs 593,02             |  |  |  |
|                         |      |      | calc 33,48  |                         |      | calc 183,00  |      |                         | calc 671,80  |      |      | calc 564,70            |  |  |  |
| 1985                    | 0,01 | 3,00 | obs 410,46  | 0,01                    | 5,00 | obs 1.877,72 | 0,01 | 5,00                    | obs 2.396,70 | 0,05 | 5,00 | obs 1.991,29           |  |  |  |
|                         |      |      | calc 3217,5 |                         |      | calc 5453,60 |      |                         | calc 3893,80 |      |      | calc 2083,10           |  |  |  |
| 1986                    | 0,01 | 2,50 | obs 186,03  | 0,01                    | 5,00 | obs 628,94   | 0,01 | 4,00                    | obs 1.501,20 | 0,50 | 5,00 | obs 1.469,51           |  |  |  |
|                         |      |      | calc 1411,3 |                         |      | calc 2921,70 |      |                         | calc 2317,3  |      |      | calc 1479,90           |  |  |  |
| 1987                    | 0,01 | 5,00 | obs 0,22    | 0,01                    | 5,00 | obs 0,51     | 0,40 | 3,00                    | obs 367,73   | 0,35 | 3,00 | obs 298,91             |  |  |  |
|                         |      |      | calc 3,80   |                         |      | calc 6,71    |      |                         | calc 360,9   |      |      | calc 284,15            |  |  |  |
| 1988                    | 0,01 | 5,00 | obs 17,04   | 0,01                    | 5,00 | obs 22,25    | 0,60 | 5,00                    | obs 1.268,72 | 0,65 | 5,00 | obs 1.110,59           |  |  |  |
|                         |      |      | calc 18,09  |                         |      | calc 33,29   |      |                         | calc 1241,30 |      |      | calc 1059,60           |  |  |  |

Tabela 5.9 – Volumes Simulados e Observados - Bacia Representativa (com valores CN conforme condição antecedente).

| SAIDA          | ANO 1976 |      |                          | ANO 1977 |      |                          | ANO 1978 |      |                          | ANO 1979 |      |                          | ANO 1980 |      |                          |
|----------------|----------|------|--------------------------|----------|------|--------------------------|----------|------|--------------------------|----------|------|--------------------------|----------|------|--------------------------|
|                | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) | ALFA     | EET  | VOL( 10 <sup>3</sup> m3) |
| 2<br>Jatobá    | 0,03     | 2,00 | obs 601,00               | 0,01     | 4,00 | obs 600,00               | 0,01     | 3,00 | obs 1930,00              | 0,07     | 4,00 | obs 350,00               | 0,30     | 2,00 | obs 313,00               |
|                |          |      | calc 597,5               |          |      | calc 2578,10             |          |      | calc 3569,70             |          |      | calc 243,00              |          |      | calc 125,20              |
| 7<br>Umbura    | 0,04     | 2,00 | obs 1066,00              | 0,02     | 4,00 | obs 1070,00              | 0,03     | 3,00 | obs 600,00               | 0,01     | 4,00 | obs 30,00                |          |      | obs                      |
|                |          |      | calc 182,00              |          |      | calc 1233,70             |          |      | calc 672,50              |          |      | calc 45,50               |          |      | calc                     |
| 10<br>Gangorra | 0,01     | 4,00 | obs 1292,00              | 0,01     | 4,00 | obs 9440,00              | 0,01     | 4,00 | obs 4800,00              | 0,01     | 4,00 | obs 370,00               | 0,01     | 6,00 | obs 25,7                 |
|                |          |      | calc 1735,5              |          |      | calc 17093,0             |          |      | calc 10024,0             |          |      | calc 552,40              |          |      | calc 181,40              |

Tabela 5.10 – Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Micro Bacias (com valores CN conforme condição antecedente)

| MICRO BACIA 1 (0,62 ha) |      |      |                        | MICRO BACIA 2 (1,07 ha) |      |                        |      | MICRO BACIA 3 (0,52 ha) |                        |      |      | MICRO BACIA 4 (0,48ha) |      |      |                        |
|-------------------------|------|------|------------------------|-------------------------|------|------------------------|------|-------------------------|------------------------|------|------|------------------------|------|------|------------------------|
| ANO                     | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA                    | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA | EET                     | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |
| 1982                    | 0,01 | 5,00 | obs 0,0045             | 0,01                    | 5,00 | obs 0,0021             | 0,01 | 5,00                    | obs 0,40               | 0,25 | 4,00 | obs 0,45               | 0,25 | 4,00 | obs 0,45               |
|                         |      |      | calc 0,02              |                         |      | calc 0,03              |      |                         | calc 0,10              |      |      | calc 0,46              |      |      |                        |
| 1983                    |      |      | obs 0,00               | 0,01                    | 5,00 | obs 0,0011             | 0,02 | 5,00                    | obs 0,01               | 0,25 | 2,00 | obs 0,33               | 0,25 | 2,00 | obs 0,33               |
|                         |      |      | calc                   |                         |      | calc 0,01              |      |                         | calc 0,02              |      |      | calc 0,33              |      |      |                        |
| 1984                    | 0,15 | 5,00 | obs 0,3401             | 0,50                    | 4,00 | obs 2,22               | 0,90 | 4,00                    | obs 2,50               | 0,75 | 5,00 | obs 1,67               | 0,75 | 5,00 | obs 1,67               |
|                         |      |      | calc 0,39              |                         |      | calc 2,42              |      |                         | calc 2,16              |      |      | calc 1,60              |      |      |                        |
| 1985                    | 0,50 | 3,00 | obs 3,00               | 0,30                    | 5,00 | obs 3,50               | 0,85 | 5,00                    | obs 5,10               | 0,90 | 5,00 | obs 5,50               | 0,90 | 5,00 | obs 5,50               |
|                         |      |      | calc 2,91              |                         |      | calc 3,31              |      |                         | calc 4,18              |      |      | calc 4,18              |      |      |                        |
| 1986                    | 0,40 | 2,50 | obs 1,82               | 0,70                    | 5,00 | obs 6,40               | 0,90 | 4,00                    | obs 5,60               | 0,90 | 5,00 | obs 4,20               | 0,90 | 5,00 | obs 4,20               |
|                         |      |      | calc 1,79              |                         |      | calc 5,48              |      |                         | calc 3,45              |      |      | calc 3,24              |      |      |                        |
| 1987                    | 0,01 | 5,00 | obs 0,0019             | 0,01                    | 5,00 | obs 0,03               | 0,80 | 3,00                    | obs 1,60               | 0,65 | 3,00 | obs 1,06               | 0,65 | 3,00 | obs 1,06               |
|                         |      |      | calc 0,01              |                         |      | calc 0,02              |      |                         | calc 1,37              |      |      | calc 1,05              |      |      |                        |
| 1988                    | 0,01 | 5,00 | obs 0,02               | 0,01                    | 5,00 | obs 0,02               | 0,90 | 5,00                    | obs 2,01               | 0,85 | 4,00 | obs 1,84               | 0,85 | 4,00 | obs 1,84               |
|                         |      |      | calc 0,02              |                         |      | calc 0,04              |      |                         | calc 1,93              |      |      | calc 1,69              |      |      |                        |

Tabela 5.11 – Vazões Simuladas e Observadas - Bacia Representativa (com valores CN conforme condição antecedente).

| SAIDA          | ANO 1976 |      |                         | ANO 1977 |      |                         | ANO 1978 |      |                         | ANO 1979 |      |                         | ANO 1980 |      |                         |
|----------------|----------|------|-------------------------|----------|------|-------------------------|----------|------|-------------------------|----------|------|-------------------------|----------|------|-------------------------|
|                | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) | ALFA     | EET  | Q <sub>máx</sub> (m3/s) |
| 2<br>Jatobá    | 0,10     | 4,00 | obs 1,12                | 0,10     | 4,00 | obs 1,52                | 0,10     | 4,00 | obs 1,55                | 0,17     | 3,50 | obs 2,50                | 0,25     | 2,00 | obs 0,90                |
|                |          |      | calc 1,14               |          |      | calc 2,84               |          |      | calc 1,88               |          |      | calc 1,36               |          |      | calc 0,22               |
| 7<br>Umburan   | 0,30     | 3,00 | obs 1,20                | 0,60     | 1,00 | obs 9,50                | 0,30     | 4,00 | obs 1,60                | 0,15     | 3,00 | obs 0,30                |          |      | obs                     |
|                |          |      | calc 0,94               |          |      | calc 2,59               |          |      | calc 0,80               |          |      | calc 0,29               |          |      | calc                    |
| 10<br>Gangorra | 0,01     | 4,00 | obs 7,20                | 0,10     | 3,00 | obs 35,00               | 0,01     | 4,50 | obs 5,00                | 0,01     | 4,00 | obs 2,30                | 0,01     | 4,00 | obs 0,06                |
|                |          |      | calc 8,02               |          |      | calc 28,58              |          |      | calc 8,33               |          |      | calc 4,33               |          |      | calc 0,13               |

Tabela 5.12 – Volumes Simulados e Observados – Parcelas (com valores CN conforme condição antecedente).

| PARCELA 1 (100 m2) |      |      |         | PARCELA 2 (100 m2) |      |         |      | PARCELA 3 (100 m2) |         |       |      | PARCELA 4 (100 m2) |      |       |         |                    |      |         |     |
|--------------------|------|------|---------|--------------------|------|---------|------|--------------------|---------|-------|------|--------------------|------|-------|---------|--------------------|------|---------|-----|
| ANO                | ALFA | EET  | VOL(m3) | ALFA               | EET  | VOL(m3) | ALFA | EET                | VOL(m3) | ALFA  | EET  | VOL(m3)            | ALFA | EET   | VOL(m3) |                    |      |         |     |
| 1982               | 0,01 | 3,00 | obs     | 1,52               | 0,05 | 2,00    | 0,15 | 4,00               | obs     | 0,51  | 0,15 | 4,00               | obs  | 1,62  | 0,01    | 4,00               | obs  | 1,46    |     |
|                    |      |      | cal     | 2,19               |      |         |      |                    | cal     | 0,49  |      |                    | cal  | 1,66  |         |                    | cal  | 2,37    |     |
| 1983               | 0,40 | 2,00 | obs     | 2,60               | 0,01 | 4,00    | 0,15 | 4,00               | obs     | 0,02  | 0,15 | 4,00               | obs  | 0,50  | 0,50    | 4,00               | obs  | 2,46    |     |
|                    |      |      | cal     | 2,81               |      |         |      |                    | cal     | 0,023 |      |                    | cal  | 0,53  |         |                    | cal  | 2,77    |     |
| 1984               | 0,15 | 1,00 | obs     | 20,07              | 0,20 | 4,00    | 0,35 | 4,00               | obs     | 4,47  | 0,35 | 4,00               | obs  | 7,87  | 0,20    | 1,00               | obs  | 22,10   |     |
|                    |      |      | cal     | 23,28              |      |         |      |                    | cal     | 4,73  |      |                    | cal  | 8,15  |         |                    | cal  | 23,10   |     |
| 1985               | 0,01 | 2,00 | obs     | 54,70              | 0,01 | 4,00    | 0,01 | 4,00               | obs     | 33,34 | 0,01 | 4,00               | obs  | 25,71 | 0,01    | 3,00               | obs  | 62,35   |     |
|                    |      |      | cal     | 98,01              |      |         |      |                    | cal     | 58,19 |      |                    | cal  | 58,44 |         |                    | cal  | 85,05   |     |
| 1986               | 0,01 | 4,00 | obs     | 20,70              | 0,01 | 4,00    | 0,01 | 3,00               | obs     | 11,64 | 0,01 | 3,00               | obs  | 10,80 | 0,01    | 1,00               | obs  | 31,10   |     |
|                    |      |      | cal     | 48,16              |      |         |      |                    | cal     | 30,97 |      |                    | cal  | 33,46 |         |                    | cal  | 55,38   |     |
| 1987               | 0,45 | 1,00 | obs     | 8,70               | 0,01 | 3,00    | 0,01 | 5,00               | obs     | 0,02  | 0,01 | 5,00               | obs  | 0,003 | 0,45    | 4,00               | obs  | 7,62    |     |
|                    |      |      | cal     | 8,12               |      |         |      |                    | cal     | 0,07  |      |                    | cal  | 0,10  |         |                    | cal  | 7,66    |     |
| 1988               | 0,40 | 1,00 | obs     | 33,78              | 0,01 | 4,00    | 0,01 | 4,00               | obs     | 0,61  | 0,01 | 4,00               | obs  | 0,33  | 0,01    | 1,00               | obs  | 27,57   |     |
|                    |      |      | cal     | 34,92              |      |         |      |                    | cal     | 2,27  |      |                    | cal  | 1,94  |         |                    | cal  | 29,76   |     |
| PARCELA 5 (100 m2) |      |      |         | PARCELA 6 (100 m2) |      |         |      | PARCELA 7 (100 m2) |         |       |      | PARCELA 8 (100 m2) |      |       |         | PARCELA 9 (100 m2) |      |         |     |
| ANO                | ALFA | EET  | VOL(m3) | ALFA               | EET  | VOL(m3) | ALFA | EET                | VOL(m3) | ALFA  | EET  | VOL(m3)            | ALFA | EET   | VOL(m3) | ALFA               | EET  | VOL(m3) |     |
| 1982               | 0,02 | 4,00 | obs     | 0,17               | 0,01 | 6,00    | 0,01 | 9,50               | obs     | 0,00  | 0,01 | 9,50               | obs  | 0,00  | 0,01    | 9,50               | obs  | 0,00    |     |
|                    |      |      | cal     | 0,18               |      |         |      |                    | cal     | 1,17  |      |                    | cal  | 1,75  |         |                    | cal  | 0,00    | cal |
| 1983               | 0,01 | 4,00 | obs     | 0,02               | 0,02 | 4,00    | 0,01 | 9,50               | obs     | 0,16  | 0,01 | 9,50               | obs  | 0,05  | 0,01    | 9,50               | obs  | 0,00    |     |
|                    |      |      | cal     | 0,02               |      |         |      |                    | cal     | 0,10  |      |                    | cal  | 0,04  |         |                    | cal  | 0,00    | cal |
| 1984               | 0,02 | 4,00 | obs     | 0,55               | 0,10 | 4,00    | 0,01 | 4,50               | obs     | 9,67  | 0,01 | 4,50               | obs  | 4,13  | 0,01    | 4,50               | obs  | 0,00    |     |
|                    |      |      | cal     | 0,42               |      |         |      |                    | cal     | 10,28 |      |                    | cal  | 10,93 |         |                    | cal  | 0,00    | cal |
| 1985               | 0,01 | 4,00 | obs     | 13,65              | 0,01 | 3,00    | 0,01 | 3,00               | obs     | 56,23 | 0,01 | 3,00               | obs  | 48,27 | 0,01    | 3,00               | obs  | 0,00    |     |
|                    |      |      | cal     | 48,20              |      |         |      |                    | cal     | 84,83 |      |                    | cal  | 84,83 |         |                    | cal  | 0,00    | cal |
| 1986               | 0,01 | 4,00 | obs     | 3,90               | 0,01 | 4,00    | 0,01 | 4,00               | obs     | 24,55 | 0,01 | 4,00               | obs  | 21,70 | 0,01    | 4,00               | obs  | 15,23   |     |
|                    |      |      | cal     | 21,87              |      |         |      |                    | cal     | 44,42 |      |                    | cal  | 44,42 |         |                    | 0,01 | 3,00    | cal |
| 1987               | 0,01 | 4,00 | obs     | 0,009              | 0,60 | 4,00    | 0,35 | 4,00               | obs     | 9,72  | 0,35 | 4,00               | obs  | 4,48  | 0,65    | 1,00               | obs  | 4,78    |     |
|                    |      |      | cal     | 0,07               |      |         |      |                    | cal     | 9,45  |      |                    | cal  | 5,00  |         |                    | cal  | 4,68    | cal |
| 1988               | 0,01 | 4,00 | obs     | 0,14               | 0,70 | 3,00    | 0,35 | 3,00               | obs     | 31,56 | 0,35 | 3,00               | obs  | 25,25 | 0,70    | 1,00               | obs  | 30,99   |     |
|                    |      |      | cal     | 0,32               |      |         |      |                    | cal     | 31,74 |      |                    | cal  | 24,23 |         |                    | cal  | 30,29   | cal |



Tabela 5.13 – Vazões Máximas Simuladas e Observadas – Parcelas (com valores CN conforme condição antecedente).

| PARCELA 1 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 2 (100 m <sup>2</sup> ) |      |                        |      | PARCELA 3 (100 m <sup>2</sup> ) |                        |        |      | PARCELA 4 (100 m <sup>2</sup> ) |      |        |                        |                                 |     |                        |      |      |                        |        |
|---------------------------------|------|------|------------------------|---------------------------------|------|------------------------|------|---------------------------------|------------------------|--------|------|---------------------------------|------|--------|------------------------|---------------------------------|-----|------------------------|------|------|------------------------|--------|
| ANO                             | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA                            | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA | EET                             | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA   | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s)          | ALFA | EET    | Q <sub>máx</sub> (l/s) |                                 |     |                        |      |      |                        |        |
| 1982                            | 0,40 | 3,00 | obs                    | 0,017                           | 0,20 | 2,00                   | 0,40 | 4,00                            | obs                    | 0,0057 | 0,40 | 4,00                            | obs  | 0,0157 | 0,40                   | 4,00                            | obs | 0,0165                 |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,015                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,006  |      |                                 | cal  | 0,013  |                        |                                 | cal | 0,015                  |      |      |                        |        |
| 1983                            | 0,70 | 2,00 | obs                    | 0,020                           | 0,01 | 4,00                   | 0,15 | 4,00                            | obs                    | 0,0001 | 0,15 | 4,00                            | obs  | 0,0027 | 0,50                   | 4,00                            | obs | 0,0141                 |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,019                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,0001 |      |                                 | cal  | 0,003  |                        |                                 | cal | 0,011                  |      |      |                        |        |
| 1984                            | 0,90 | 1,00 | obs                    | 0,0657                          | 0,75 | 1,00                   | 0,80 | 4,00                            | obs                    | 0,0425 | 0,80 | 4,00                            | obs  | 0,031  | 0,95                   | 1,00                            | obs | 0,0628                 |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,047                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,038  |      |                                 | cal  | 0,036  |                        |                                 | cal | 0,049                  |      |      |                        |        |
| 1985                            | 0,65 | 2,00 | obs                    | 0,0608                          | 0,90 | 1,00                   | 0,95 | 1,00                            | obs                    | 0,0928 | 0,95 | 1,00                            | obs  | 0,1065 | 0,95                   | 1,00                            | obs | 0,1026                 |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,059                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,086  |      |                                 | cal  | 0,091  |                        |                                 | cal | 0,091                  |      |      |                        |        |
| 1986                            | 0,70 | 4,00 | obs                    | 0,0499                          | 0,95 | 1,00                   | 0,95 | 1,00                            | obs                    | 0,089  | 0,95 | 1,00                            | obs  | 0,0926 | 0,85                   | 1,00                            | obs | 0,0603                 |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,052                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,069  |      |                                 | cal  | 0,070  |                        |                                 | cal | 0,063                  |      |      |                        |        |
| 1987                            | 0,85 | 1,00 | obs                    | 0,030                           | 0,01 | 3,00                   | 0,01 | 5,00                            | obs                    | 0,0001 | 0,01 | 5,00                            | obs  | 0,00   | 0,70                   | 4,00                            | obs | 0,0210                 |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,026                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,002  |      |                                 | cal  | 0,0003 |                        |                                 | cal | 0,023                  |      |      |                        |        |
| 1988                            | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0519                          | 0,07 | 4,00                   | 0,05 | 4,00                            | obs                    | 0,0029 | 0,05 | 4,00                            | obs  | 0,0019 | 0,95                   | 1,00                            | obs | 0,0484                 |      |      |                        |        |
|                                 |      |      | cal                    | 0,040                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,004  |      |                                 | cal  | 0,003  |                        |                                 | cal | 0,042                  |      |      |                        |        |
| PARCELA 5 (100 m <sup>2</sup> ) |      |      |                        | PARCELA 6 (100 m <sup>2</sup> ) |      |                        |      | PARCELA 7 (100 m <sup>2</sup> ) |                        |        |      | PARCELA 8 (100 m <sup>2</sup> ) |      |        |                        | PARCELA 9 (100 m <sup>2</sup> ) |     |                        |      |      |                        |        |
| ANO                             | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA                            | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA | EET                             | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA   | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s)          | ALFA | EET    | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA                            | EET | Q <sub>máx</sub> (l/s) | ALFA | EET  | Q <sub>máx</sub> (l/s) |        |
| 1982                            | 0,05 | 4,00 | obs                    | 0,0019                          | 0,01 | 6,00                   | 0,01 | 9,50                            | obs                    | 0,00   | 0,01 | 9,50                            | obs  | 0,00   | 0,01                   | 9,50                            | obs | 0,00                   | 0,01 | 9,50 | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,001                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,01   |      |                                 | cal  | 0,003  |                        |                                 | cal | 0,00                   |      |      | cal                    | 0,00   |
| 1983                            | 0,01 | 4,00 | obs                    | 0,0002                          | 0,05 | 4,00                   | 0,01 | 9,50                            | obs                    | 0,009  | 0,01 | 9,50                            | obs  | 0,0002 | 0,01                   | 9,50                            | obs | 0,00                   | 0,01 | 9,50 | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0001                          |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,01   |      |                                 | cal  | 0,0002 |                        |                                 | cal | 0,00                   |      |      | cal                    | 0,00   |
| 1984                            | 0,15 | 4,00 | obs                    | 0,0058                          | 0,85 | 4,00                   | 0,70 | 4,50                            | obs                    | 0,0413 | 0,70 | 4,50                            | obs  | 0,0319 | 0,70                   | 4,50                            | obs | 0,00                   | 0,70 | 4,50 | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,007                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,039  |      |                                 | cal  | 0,032  |                        |                                 | cal | 0,00                   |      |      | cal                    | 0,00   |
| 1985                            | 0,75 | 3,00 | obs                    | 0,0675                          | 0,95 | 3,00                   | 0,95 | 1,00                            | obs                    | 0,1065 | 0,95 | 1,00                            | obs  | 0,1065 | 0,95                   | 1,00                            | obs | 0,00                   | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,00   |
|                                 |      |      | cal                    | 0,071                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,091  |      |                                 | cal  | 0,091  |                        |                                 | cal | 0,00                   |      |      | cal                    | 0,00   |
| 1986                            | 0,65 | 4,00 | obs                    | 0,0431                          | 0,75 | 4,00                   | 0,85 | 4,00                            | obs                    | 0,0538 | 0,85 | 4,00                            | obs  | 0,0638 | 0,55                   | 4,00                            | obs | 0,0406                 | 0,55 | 4,00 | obs                    | 0,0202 |
|                                 |      |      | cal                    | 0,047                           |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,55   |      |                                 | cal  | 0,063  |                        |                                 | cal | 0,040                  |      |      | cal                    | 0,040  |
| 1987                            | 0,01 | 4,00 | obs                    | 0,0001                          | 0,75 | 4,00                   | 0,85 | 4,00                            | obs                    | 0,0256 | 0,85 | 4,00                            | obs  | 0,0284 | 0,55                   | 4,00                            | obs | 0,0181                 | 0,55 | 4,00 | obs                    | 0,0002 |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0002                          |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,024  |      |                                 | cal  | 0,028  |                        |                                 | cal | 0,012                  |      |      | cal                    | 0,012  |
| 1988                            | 0,01 | 3,00 | obs                    | 0,0007                          | 0,95 | 3,00                   | 0,95 | 1,00                            | obs                    | 0,0408 | 0,95 | 1,00                            | obs  | 0,0501 | 0,95                   | 1,00                            | obs | 0,0564                 | 0,95 | 1,00 | obs                    | 0,0034 |
|                                 |      |      | cal                    | 0,0004                          |      |                        |      |                                 | cal                    | 0,040  |      |                                 | cal  | 0,042  |                        |                                 | cal | 0,039                  |      |      | cal                    | 0,039  |

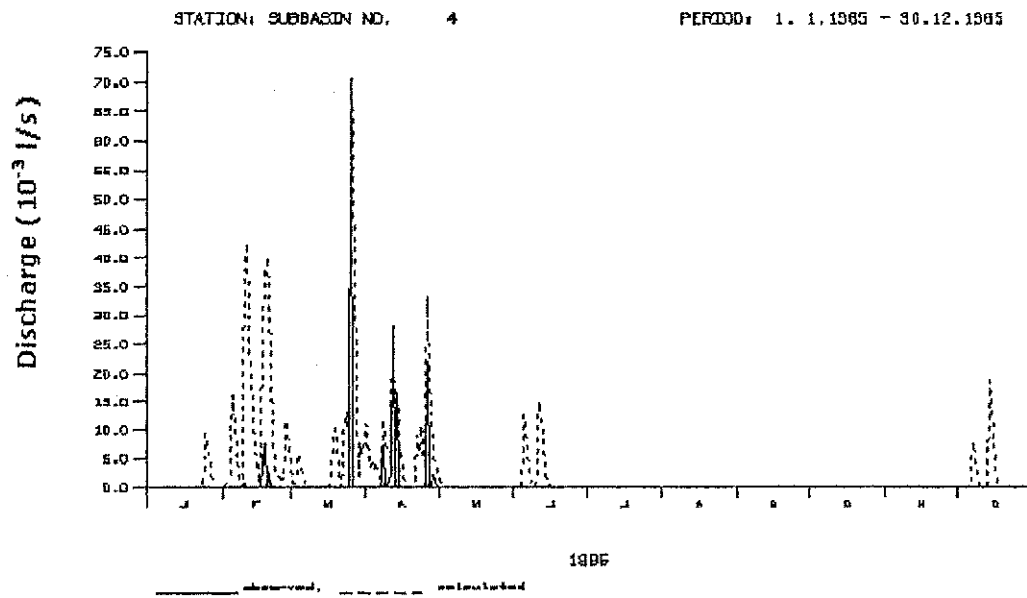


Figura 5.8 – Hidrogramas observado e simulado com valor CN conforme condição antecedente, na parcela 5 (caatinga), no ano de 1985 (— observado, - - - - - simulado).

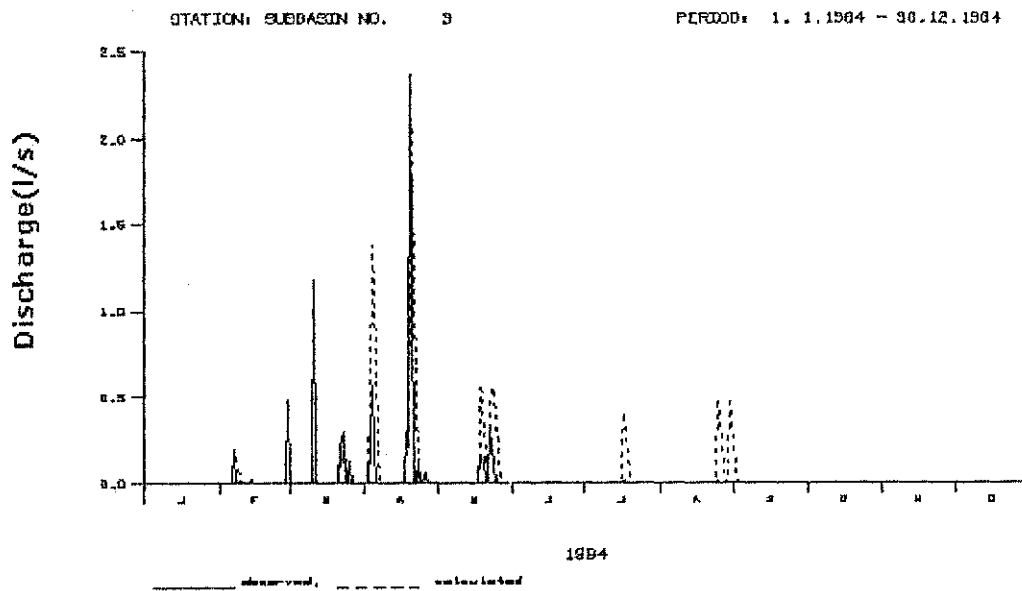


Figura 5.9 – Hidrogramas observado e simulado, com valor CN conforme condição antecedente, na microbacia 3 (desmatada), no ano de 1984 (— observado, - - - - - simulado).

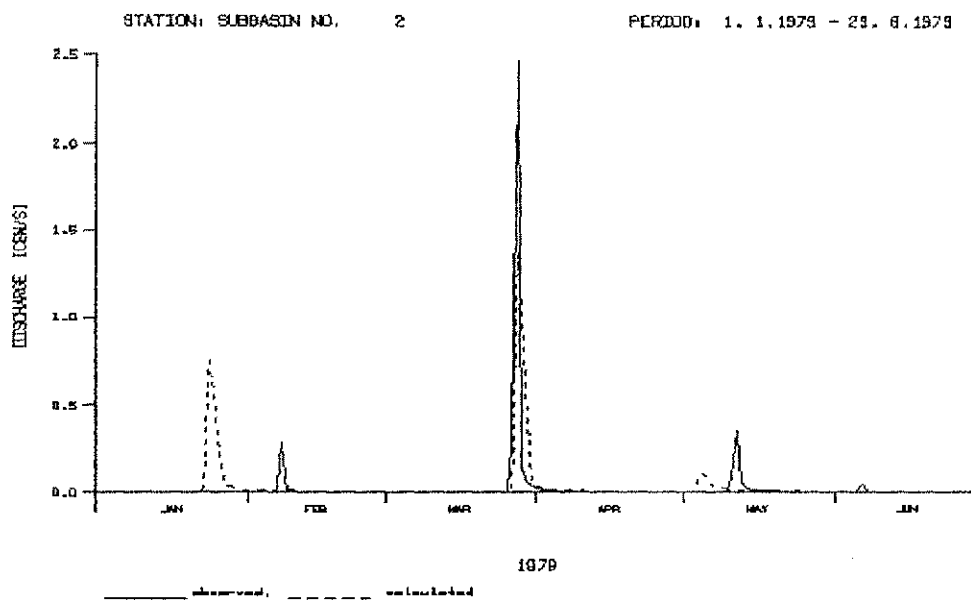


Figura 5.10 – Hidrogramas observado e simulado com valor CN conforme condição antecedente, na sub - bacia de Jatobá, no ano de 1979 (— observado, - - - - - simulado).

### 5.5.2 Análise dos Resultados.

De acordo com os valores das vazões máximas e volumes anuais obtidos nas simulações com o modelo NAVMO foi feita também uma análise dessas variáveis simuladas através do emprego de valores CN médios e valores CN conforme condição antecedente de umidade (seco, normal e úmido).

Com os valores CN médios foram obtidos os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) correlacionando -se os valores observados e calculados (Tabela 5.14), para verificar se os resultados apresentados pelo modelo eram consistentes, ou seja, foi realizada uma investigação da capacidade do modelo de simular o escoamento (volume e vazões máximas) nas diferentes escalas da BRS. Analisando os resultados gráficos (Figuras 5.11 e 5.12) percebe-se que nas áreas maiores (Jatobá, Umburana e Gangorra) o modelo superestima os volumes e subestima as vazões máximas anuais. No entanto nas microbacias os valores das vazões máximas e dos volumes anuais simulados, na maioria das vezes, são menores que os observados. Já nas parcelas ( $100 \text{ m}^2$ ) o modelo também subestimou as vazões máximas e superestimou os volumes anuais. A Figura 5.11 mostra a relação entre as vazões e volumes simulados em duas parcelas desmatadas (P1 e P4).

Os resultados apresentados tanto no caso das vazões máximas quanto no caso dos volumes anuais são bastante expressivos, pois em ambos os casos estes resultados apresentaram boa correlação entre os resultados do modelo (volumes e vazões máximas) e os dados observados, na maior parte das áreas da BRS, conforme mostra a Tabela 5.14.

Tabela 5.14.– Coeficientes de Determinação Calculados

| Bacia Representativa           |                                |      |                             |                                  |                             |      |                                   |      |      |
|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------|-----------------------------------|------|------|
|                                | Jatobá (26,8 Km <sup>2</sup> ) |      |                             | Umburana (10,7 Km <sup>2</sup> ) |                             |      | Gangorra (137,4 Km <sup>2</sup> ) |      |      |
| Q máx                          | 0,43                           |      |                             | 0,98                             |                             |      | 0,99                              |      |      |
| Volume                         | 0,93                           |      |                             | 0,57                             |                             |      | 0,81                              |      |      |
| Microbacias                    |                                |      |                             |                                  |                             |      |                                   |      |      |
|                                | Micro <sub>1</sub> (0,62ha)    |      | Micro <sub>2</sub> (1,07ha) |                                  | Micro <sub>3</sub> (0,52ha) |      | Micro <sub>4</sub> (0,48ha)       |      |      |
| Qmáx                           | 0,84                           |      | 0,82                        |                                  | 0,78                        |      | 0,74                              |      |      |
| Volume                         | 0,92                           |      | 0,98                        |                                  | 0,98                        |      | 0,97                              |      |      |
| Parcelas (100 m <sup>2</sup> ) |                                |      |                             |                                  |                             |      |                                   |      |      |
|                                | p1                             | p2   | p3                          | p4                               | p5                          | p6   | p7                                | p8   | p9   |
| Qmáx                           | 0,84                           | 0,98 | 0,97                        | 0,97                             | 0,99                        | 0,78 | 0,99                              | 0,88 | 0,99 |
| Volume                         | 0,97                           | 1,00 | 0,98                        | 0,95                             | 0,99                        | 0,98 | 0,99                              | 0,98 | 0,99 |

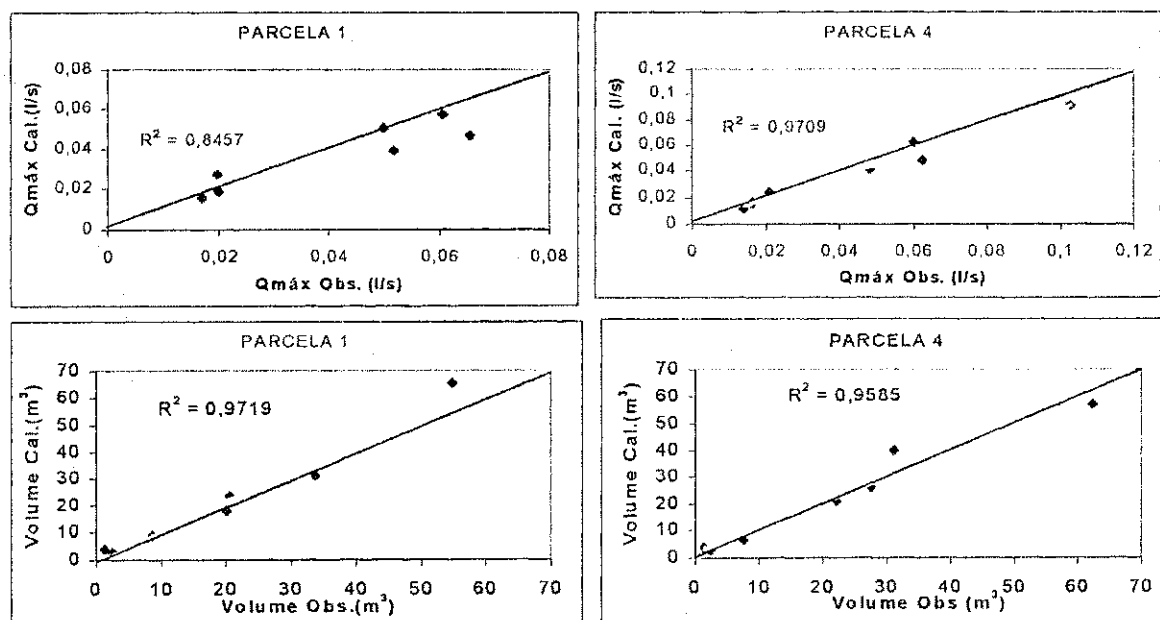


Figura 5.11 – Relação entre o escoamento observado e simulado com valor CN médio nas parcelas 1 e 4.

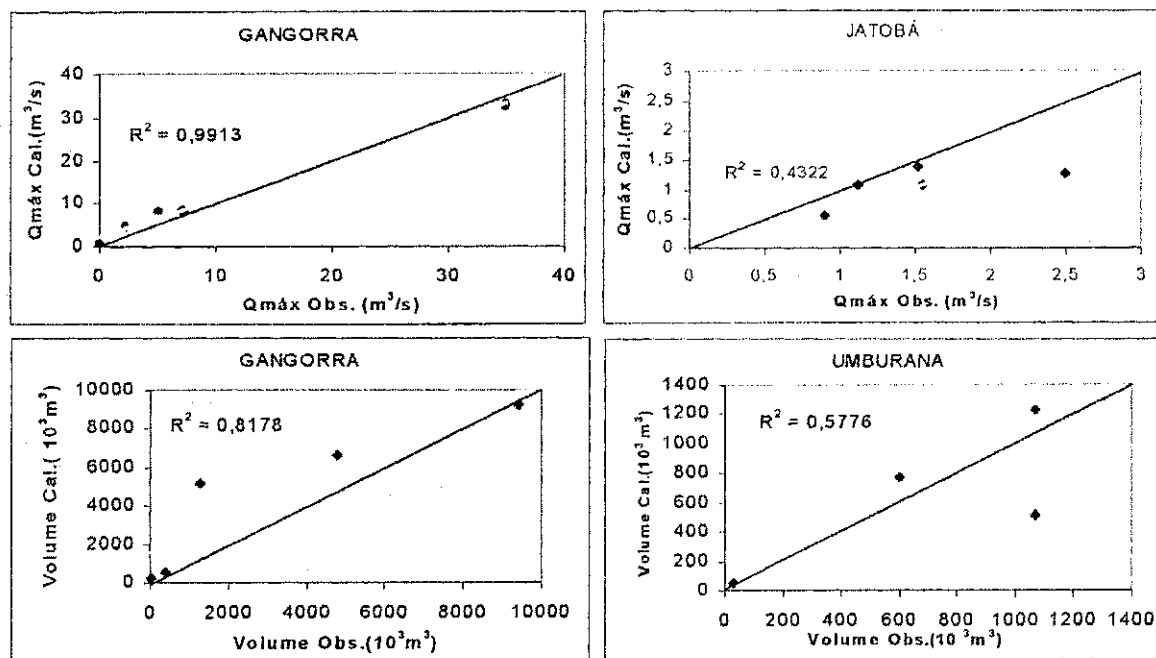


Figura 5.12 – Relação entre o escoamento observado e simulado, com valor CN médio nas sub- bacias BRS.

Analisando os volumes e as vazões máximas gerados pelo modelo NAVMO com o emprego de valores CN, conforme a umidade antecedente do solo e pluviometria anual (Figura 5.13) verifica –se que o modelo nas sub – bacias (Jatobá, Umburana e Gangorra) e microbacias subestimou as vazões máximas e superestimou os volumes anuais, porém nas parcelas o mesmo modelo superestimou os volumes e vazões máximas anuais. Observa –se também que existe uma boa correlação entre os resultados das simulações e o dados observados, conforme os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Coeficientes de Determinação Calculados, de acordo com as condições Antecedentes de Umidade.

| Bacia Representativa           |                    |      |                    |          |                    |      |                    |      |      |
|--------------------------------|--------------------|------|--------------------|----------|--------------------|------|--------------------|------|------|
|                                | Jatobá             |      |                    | Umburana |                    |      | Gangorra           |      |      |
| Q máx                          | 0,84               |      |                    | 0,96     |                    |      | 0,97               |      |      |
| Volume                         | 0,71               |      |                    | 0,30     |                    |      | 0,99               |      |      |
| Microbacias                    |                    |      |                    |          |                    |      |                    |      |      |
|                                | Micro <sub>1</sub> |      | Micro <sub>2</sub> |          | Micro <sub>3</sub> |      | Micro <sub>4</sub> |      |      |
| Qmáx                           | 0,99               |      | 0,99               |          | 0,93               |      | 0,99               |      |      |
| Volume                         | 0,99               |      | 0,95               |          | 0,95               |      | 0,99               |      |      |
| Parcelas (100 m <sup>2</sup> ) |                    |      |                    |          |                    |      |                    |      |      |
|                                | p1                 | p2   | p3                 | p4       | p5                 | p6   | p7                 | p8   | p9   |
| Qmáx                           | 0,84               | 0,98 | 0,98               | 0,96     | 0,99               | 0,98 | 0,98               | 0,80 | 0,99 |
| Volume                         | 0,88               | 0,96 | 0,94               | 0,95     | 0,97               | 0,94 | 0,91               | 0,84 | 0,98 |

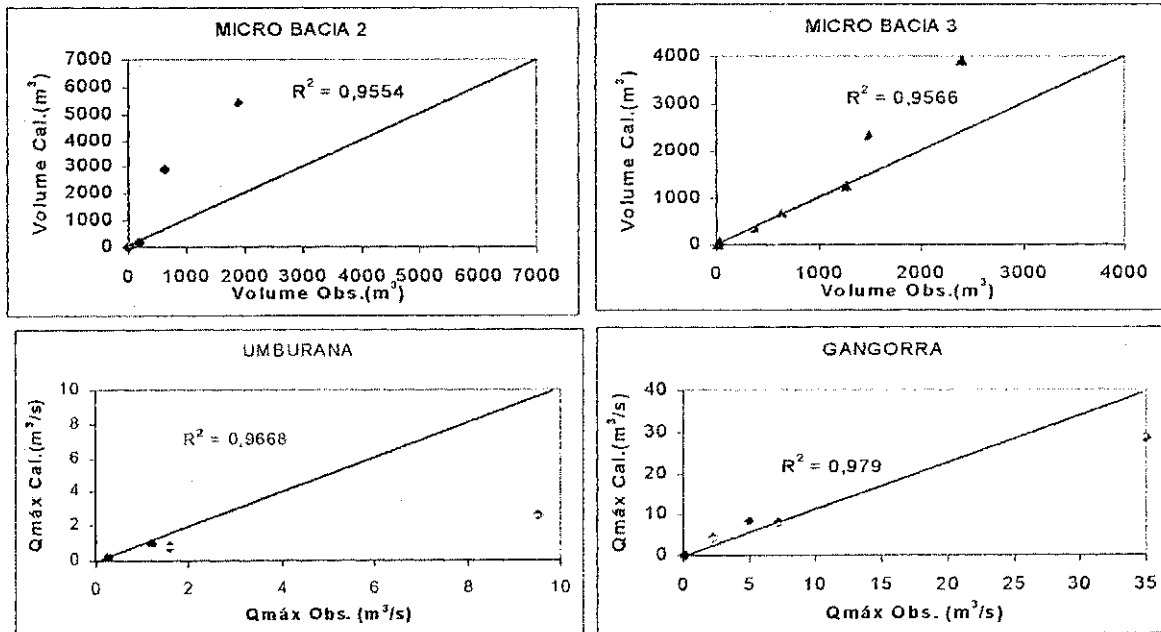


Figura 5.13 - Relação entre o escoamento observado e simulado com valor CN conforme condição antecedente nas microbacias 3 e 4.

No anexo A encontram-se alguns de hidrogramas observados e simulados.

### 5.5.3 Comentários Finais

De acordo com os resultados obtidos pode – se observar que a substituição do valor CN médio pelos valores CN<sub>I</sub>, CN<sub>II</sub> ou CN<sub>III</sub> provoca modificações nas vazões máximas e volumes e no hidrograma de um modo geral, ou seja, nos anos úmidos esta substituição causa um aumento tanto dos picos quanto dos volumes e nos anos secos ocorre à redução das vazões máximas e dos volumes. Estes resultados devem – se ao fato da precipitação ter forte influência nas condições de umidade solo e conseqüentemente, nos valores dos parâmetros. Já os anos normais não apresentaram nenhuma tendência quanto ao comportamento do escoamento. Estes resultados foram obtidos através do ajuste dos parâmetros ALFA e EET, pela comparação entre hidrogramas, volumes e vazões máximas simulados e observadas.

## **6 EFEITOS DE ESCALA E DE USO DO SOLO.**

O escoamento pode ser considerado como o resultado da interação entre a precipitação e a bacia hidrográfica. Os efeitos provocados pelas alterações nas condições de uso do solo e escala, sobre os parâmetros, que governam os processos de infiltração e escoamento superficial, foram investigados neste estudo, bem como o comportamento do escoamento (volumes e vazões máximas).

A caracterização da variabilidade dos parâmetros físicos CN e n de Manning, com a área e as condições de uso do solo foi apresentada no capítulo 4, demonstrando que os valores destes parâmetros variam conforme a escala e as condições da superfície da bacia hidrográfica. A utilização dos valores estimados na simulação com o modelo distribuído NAVMO foi feita conforme a escala e as condições de uso do solo. Em consequência, outros parâmetros do modelo, ligados ao escoamento, e que não podem ser estimados por outros meios, tiveram que ser calibrados. Sendo assim, pode - se avaliar também o efeito de escala e uso do solo sobre os outros parâmetros sensíveis do modelo (ALFA e EET) através da comparação, em diferentes escalas e condições de superfície, dos resultados do modelo (vazões e volumes) com os dados observados. Ademais, uma análise dos efeitos de escala e uso do solo sobre o escoamento pode também ser feita.

### **6.1 Efeito de Escala.**

#### **6.1.1 Efeito de Escala sobre os Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Médio.**

Foram empregados nas simulações com o modelo NAVMO, valores CN médios dos resultados obtidos na condição normal. De acordo com os resultados apresentados no capítulo 5, pode - se avaliar o comportamento dos parâmetros de



escoamento superficial (ALFA) e de evaporação (EET) em diferentes escalas (parcelas, microbacias e sub - bacias da BRS), tanto na fase de ajuste por volumes, quanto no ajuste por vazões máximas.

Após a determinação dos valores dos parâmetros EET e ALFA, através dos ajustes das vazões máximas e dos volumes anuais, em diferentes áreas da Bacia Representativa de Sumé, foi determinado o valor médio de cada parâmetro para cada uma das escalas adotadas na BRS, conforme indicado na Tabela 6.1. A Tabela 6.2 mostra os valores médios considerando os dois critérios de ajuste.

Tabela 6.1 – Valores Médios de ALFA e EET, de acordo com o os ajustes.

| Ajuste por vazões máximas |                         |      |      |
|---------------------------|-------------------------|------|------|
| Local                     | Área (Km <sup>2</sup> ) | EET  | ALFA |
| Parcelas                  | 0,0001                  | 3,30 | 0,53 |
| Microbacias               | 0,006725                | 4,30 | 0,20 |
| Umburana                  | 10,7                    | 2,75 | 0,44 |
| Jatobá                    | 26,8                    | 3,50 | 0,17 |
| Gangorra                  | 137,4                   | 3,90 | 0,05 |
| Ajuste por volumes        |                         |      |      |
| Local                     | Área (Km <sup>2</sup> ) | EET  | ALFA |
| Parcelas                  | 0,0001                  | 3,35 | 0,17 |
| Microbacias               | 0,006725                | 4,37 | 0,20 |
| Umburana                  | 10,7                    | 3,25 | 0,10 |
| Jatobá                    | 26,8                    | 3,00 | 0,11 |
| Gangorra                  | 137,4                   | 4,50 | 0,01 |

Tabela 6.2 – Valores Médios de ALFA e EET.

| Local       | Área (Km <sup>2</sup> ) | EET  | ALFA |
|-------------|-------------------------|------|------|
| Parcelas    | 0,0001                  | 3,33 | 0,35 |
| Microbacias | 0,006725                | 4,34 | 0,20 |
| Umburana    | 10,7                    | 3,00 | 0,27 |
| Jatobá      | 26,8                    | 3,25 | 0,14 |
| Gangorra    | 137,4                   | 4,20 | 0,03 |

A variação dos parâmetros ALFA e EET, com a escala da bacia, pode ser visto graficamente através das Figuras 6.1 e 6.2. De acordo com os resultados apresentados, observa - se que o parâmetro de evaporação (EET) não varia muito à medida que a escala aumenta. O valor médio de EET encontrado foi igual a 3,62. No entanto, os valores de ALFA diminuem com o aumento da escala da bacia, ou seja, o valor médio de ALFA na escala maior (137,4 Km<sup>2</sup>) é aproximadamente doze vezes menor do que o valor apresentado para a escala menor (0,0001 Km<sup>2</sup>).

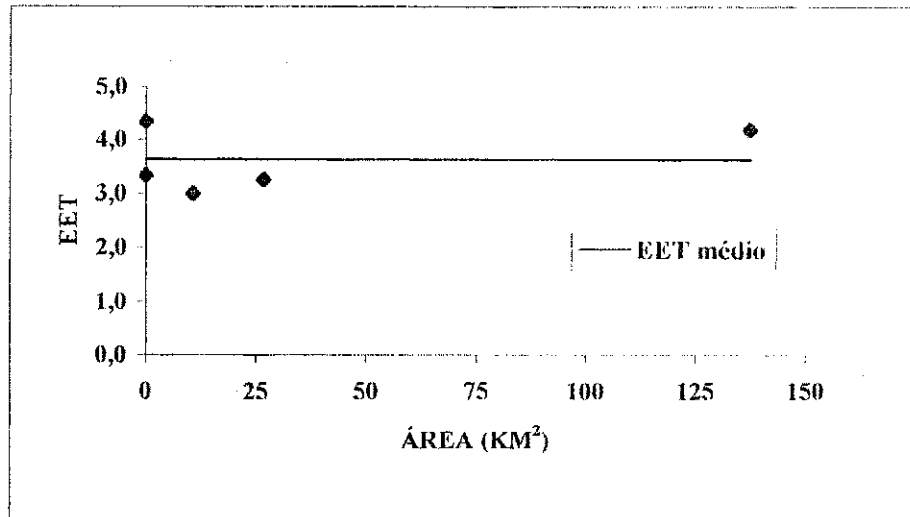


Figura 6.1 – Variação de EET com a escala da Bacia, com valores CN médios.

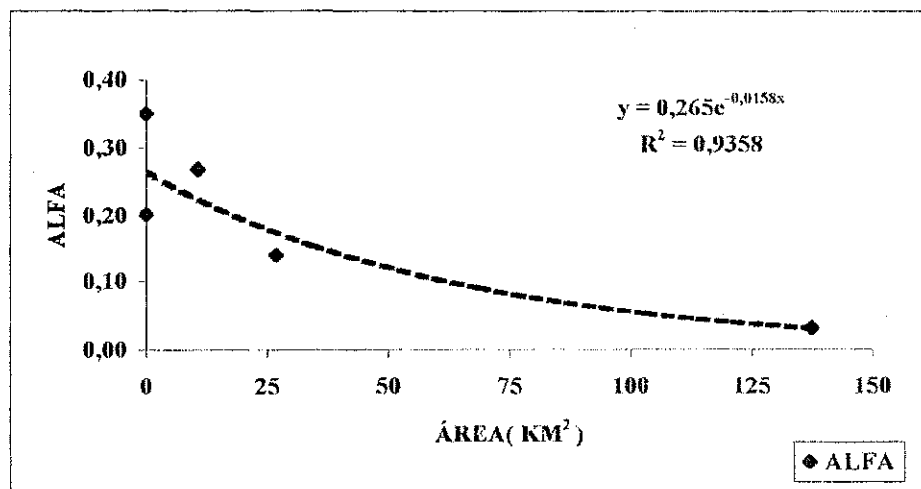


Figura 6.2 – Variação de ALFA com a escala da Bacia com valores CN médios

### 6.1.2 Efeito de Escala Sobre o Escoamento com Valor CN Médio.

De acordo com os valores das vazões máximas e volumes anuais obtidos anteriormente foi feita também uma análise do efeito de escala sobre o escoamento simulado considerando os valores CN médios. As Figuras 6.3a e 6.4a mostram o comportamento dos volumes e vazões máximas médios com a escala da bacia. As Figuras 6.3b e 6.4b mostram os volumes e vazões máximas específicas.

Pode – se observar que as vazões máximas e os volumes calculados variam com a área considerada segundo as funções potenciais indicadas nas Figuras 6.3ab e 6.4ab, as quais indicam que existe boa correlação entre os resultados simulados e as áreas da bacia, conforme os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) apresentados, embora com poucos pares de valores, o que pode limitar os resultados.

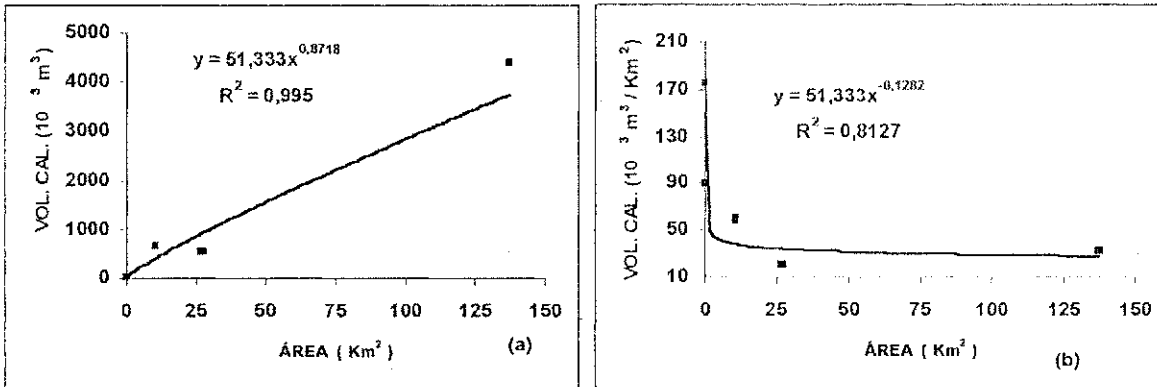


Figura 6.3– Variação do Volumes Médios com Escala da Bacia com Valores CN Médios

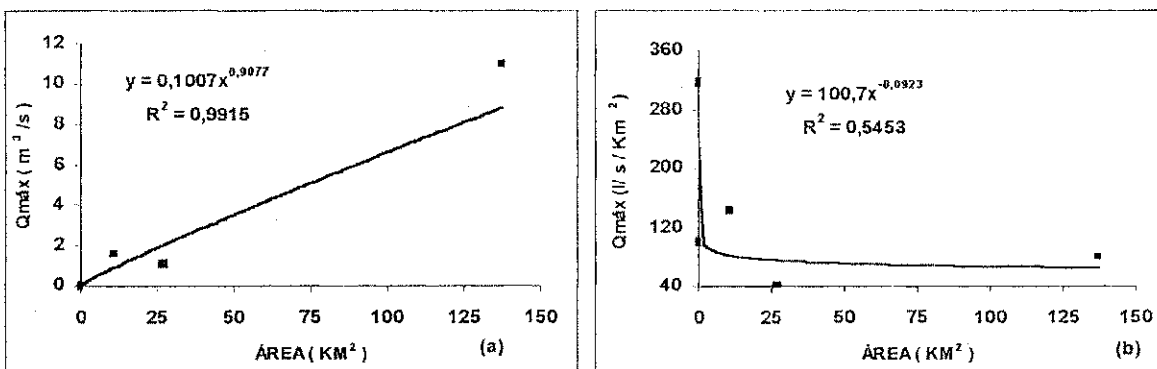


Figura 6.4 – Variação das Vazões Máximas Médias com Escala da Bacia com Valores CN Médios.

### 6.1.3 Efeito de Escala sobre os Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Conforme Condição Antecedente.

Com o objetivo de avaliar o efeito das de escala sobre os parâmetros do modelo NAVMO, os valores de ALFA e EET foram calibrados com os valores CN definidos segundo as condições antecedentes de umidade do solo (CN<sub>I</sub>, CN<sub>II</sub>, CN<sub>III</sub>) e pluviometria anual. Portanto, nos anos secos ( $P < 400$  mm) foram empregados os valores CN<sub>I</sub> no cálculo do escoamento, enquanto nos anos normais ( $600 \text{ mm} < P < 800$  mm) e úmidos ( $P > 800$  mm) foram utilizados os valores CN<sub>II</sub> e CN<sub>III</sub>. A Tabela 6.3 mostra os valores de ALFA e EET obtidos no ajuste das vazões máximas e volumes anuais nas várias

áreas. A Tabela 6.4 mostra os valores médios de ALFA e EET obtidos considerando - se os dois critérios de ajustamento.

Tabela 6.3 – Valores Médios de ALFA e EET de Acordo com os Ajustes, conforme condição antecedente.

| Ajuste por vazões máximas |                         |      |      |
|---------------------------|-------------------------|------|------|
| Local                     | Área (Km <sup>2</sup> ) | EET  | ALFA |
| Parcelas                  | 0,0001                  | 3,30 | 0,53 |
| Microbacias               | 0,006725                | 4,38 | 0,41 |
| Umburana                  | 10,7                    | 2,75 | 0,34 |
| Jatobá                    | 26,8                    | 3,50 | 0,14 |
| Gangorra                  | 137,4                   | 3,90 | 0,03 |
| Ajuste por volumes        |                         |      |      |
| Local                     | Área (Km <sup>2</sup> ) | EET  | ALFA |
| Parcelas                  | 0,0001                  | 3,35 | 0,11 |
| Microbacias               | 0,006725                | 4,38 | 0,15 |
| Umburana                  | 10,7                    | 3,25 | 0,03 |
| Jatobá                    | 26,8                    | 3,00 | 0,03 |
| Gangorra                  | 137,4                   | 4,40 | 0,01 |

Tabela 6.4 – Valores Médios de ALFA e EET conforme condição antecedente

| Local       | Área (Km <sup>2</sup> ) | EET  | ALFA |
|-------------|-------------------------|------|------|
| Parcelas    | 0,0001                  | 3,33 | 0,32 |
| Microbacias | 0,006725                | 4,38 | 0,29 |
| Umburana    | 10,7                    | 3,00 | 0,18 |
| Jatobá      | 26,8                    | 3,25 | 0,09 |
| Gangorra    | 137,4                   | 4,15 | 0,02 |

De acordo com os resultados obtidos foram construídos gráficos (Figuras 6.5 e 6.6), que mostram o comportamento de EET e ALFA com a escala da bacia.

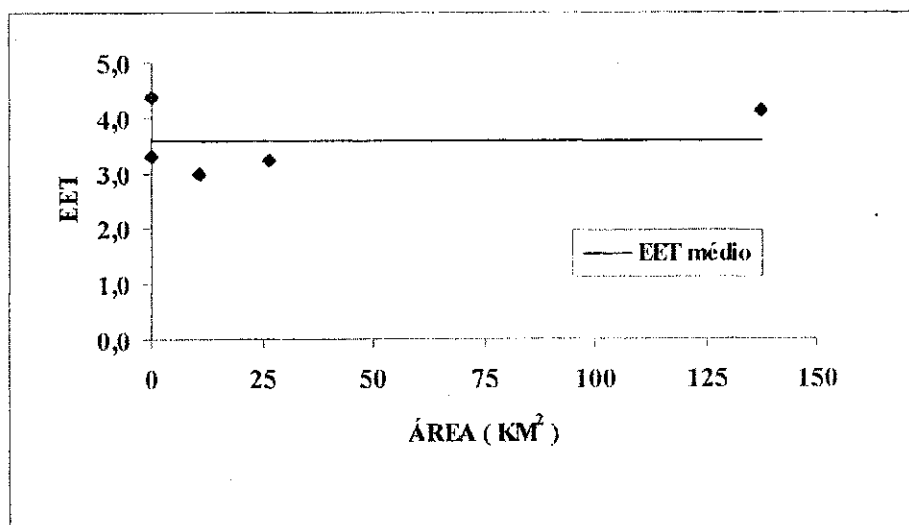


Figura 6.5 – Variação de EET com a Escala da Bacia com Valores CN Conforme Condição Antecedente.

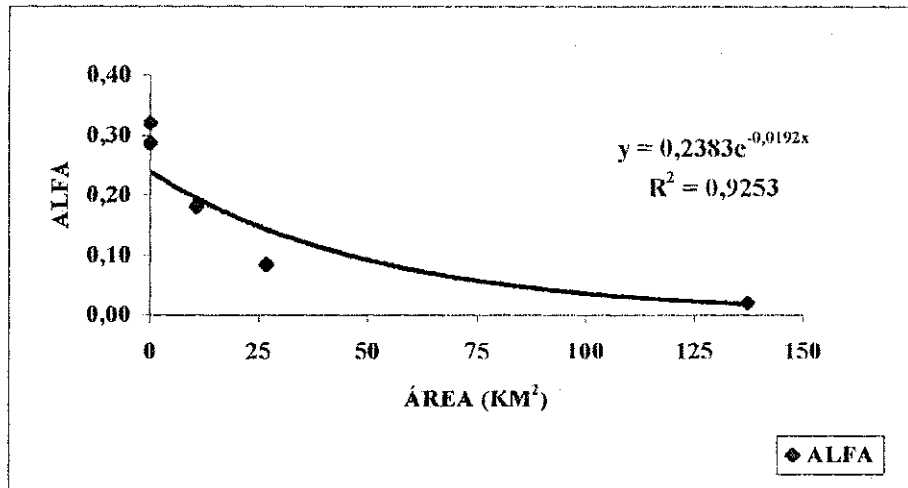


Figura 6.6 – Variação de ALFA com a Escala da Bacia com Valores CN Conforme Condição Antecedente.

Analisando os gráficos pode – se perceber que ocorre uma variação muito pequena do parâmetro EET (Figura 6.5) com resultados semelhantes aos da Figura 6.1. Em relação aos valores de ALFA observa – se que os mesmos tendem a diminuir à medida que a escala da bacia hidrográfica aumenta. O valor médio de ALFA na escala maior (sub - bacia de Gangorra) é aproximadamente dezesseis vezes menor que o valor apresentado para a parcela (escala menor).

Analisando – se os resultados nas tabelas 6.3 e 6.4 pode –se perceber que os valores de ALFA são menores quando comparados com os valores das Tabelas 6.1 e 6.2, que foram obtidos com valores CN médios, demonstrando a influência das condições antecedentes de umidade. O gráfico da Figura 6.7 mostra uma comparação do comportamento de ALFA nas duas condições analisadas: (a) com valores CN médios e (b) com valores CN segundo a condição antecedente.

Percebe –se que a substituição do valor CN médio pelos valores CN<sub>I</sub>, CN<sub>II</sub>, CN<sub>III</sub> não modifica a variação do parâmetro com a escala da bacia, embora os valores de ALFA sejam menores (Figura 6.7). Os valores de ALFA, em ambos os casos, seguem o comportamento do tipo potencial. Podendo ser bastante significativos, pois apresentam boa correlação, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,90.

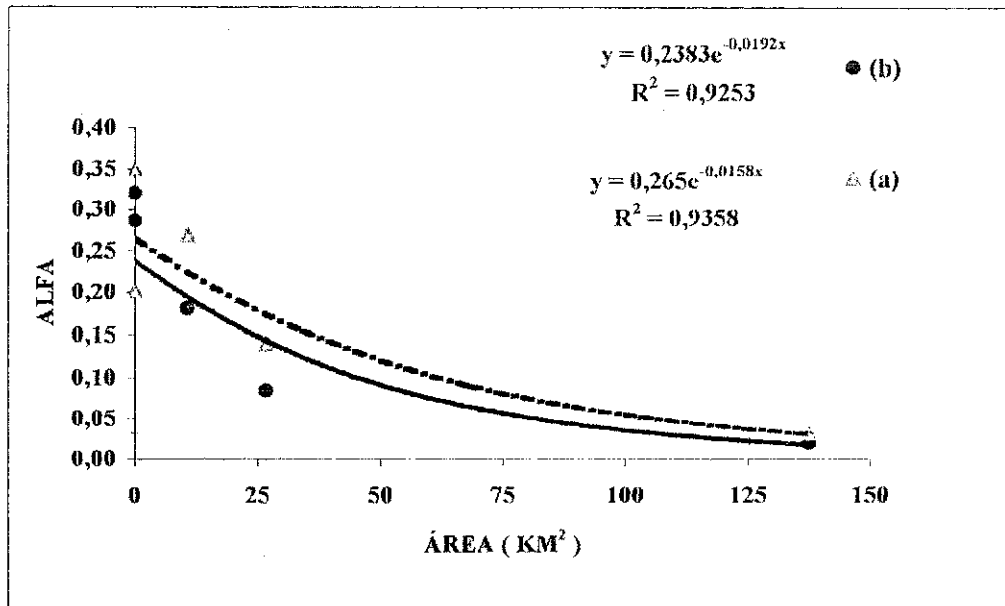


Figura 6.7–Variação de ALFA com a escala da Bacia, de acordo com os critérios (a) e (b).

Outra investigação, utilizando os valores de ALFA obtidos a partir de simulações do escoamento com parâmetros  $CN_I$ ,  $CN_{II}$  e  $CN_{III}$ , foi realizada com a finalidade de analisar o comportamento deste parâmetro em diferentes faixas de pluviometria anual.

Para tanto, os valores médios de ALFA foram separados de acordo com a pluviometria em anos: secos, úmidos e normais e relacionados com as diferentes áreas da BRS (Figura 6.8). De acordo com os resultados encontrados verifica-se que os anos úmidos apresentaram valores de ALFA maiores do que os anos normais, sendo estes maiores que os valores de ALFA nos anos secos. Os resultados mostram que os valores de ALFA tanto nos anos secos quanto nos anos normais e úmidos apresentaram – se de forma consistente, pois a correlação entre os valores de ALFA e a área bacia foi superior a 0,7 nos três casos. A Tabela 6.5 mostra as funções de regressão entre ALFA e a área da bacia e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para os anos classificados como seco, normal e úmido.

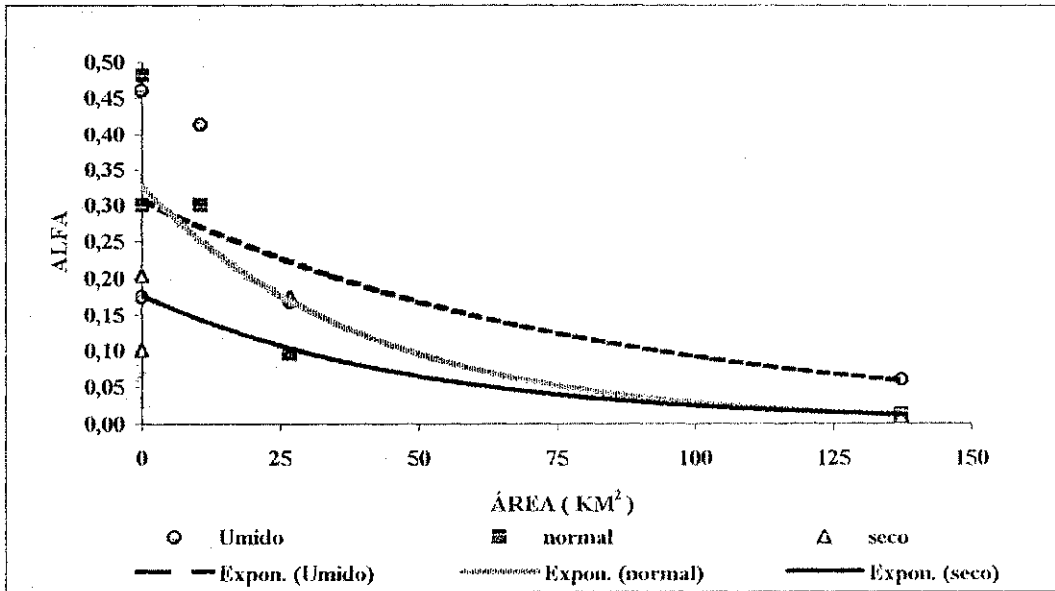


Figura 6.8–Variação de ALFA com a escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria Anual.

Tabela 6.5 – Funções de Regressão entre ALFA e a Área da Bacia

| Conforme pluviometria anual |                          |                         |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| seco                        | normal                   | úmido                   |
| $y = 0,1774e^{-0,0202x}$    | $y = 0,3265e^{-0,0245x}$ | $y = 0,3071e^{-0,012x}$ |
| $R^2 = 0,8942$              | $R^2 = 0,938$            | $R^2 = 0,7264$          |

6.1.4 Efeito de Escala sobre o Escoamento com Valor CN Conforme Condição Antecedente.

Os gráficos das Figuras 6.9a e 6.10a mostram a variação dos volumes e das vazões máximas anuais. Conforme se observa, o comportamento segue as funções potências com boa correlação ( $R^2 > 0,99$  para os volumes e vazões máximas). As Figuras 6.9b e 6.10b mostram os volumes e vazões máximas específicas, cujo comportamento também segue a funções do tipo potencial.

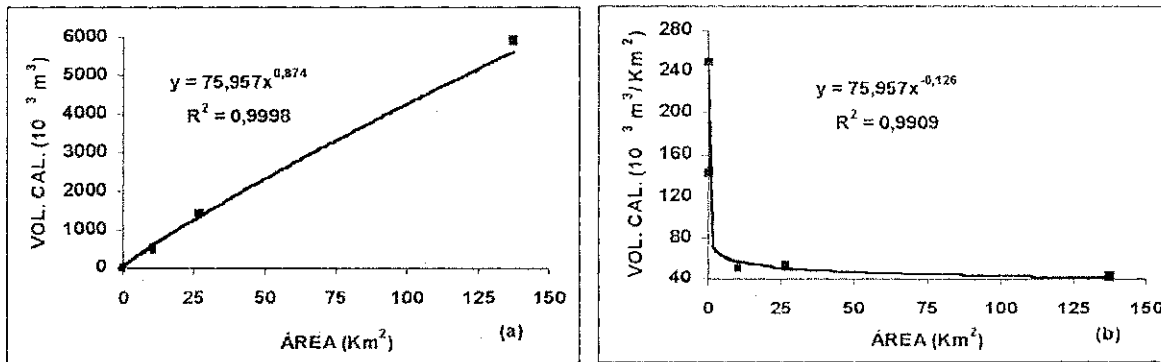


Figura 6.9 – Variação do Volumes Médios com Escala da Bacia com valores CN Conforme Condição Antecedente.

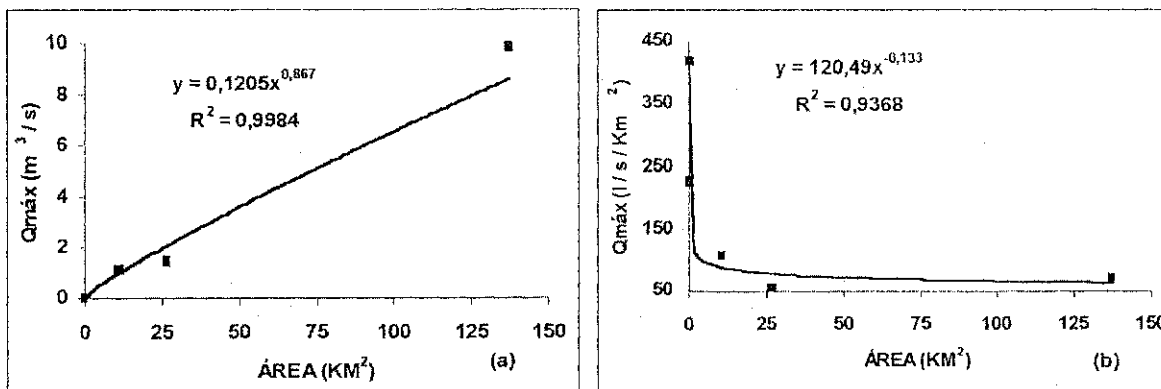


Figura 6.10 – Variação das Vazões Máximas com Escala da Bacia com valores CN Conforme Condição Antecedente.

O mesmo procedimento adotado para verificar o comportamento do parâmetro ALFA, de acordo com a pluviometria anual (anos secos, normais e úmidos) e através da utilização de valores CN<sub>I</sub>, CN<sub>II</sub> e CN<sub>III</sub> para simular o escoamento, foi utilizado na verificação do comportamento do escoamento através da variação das vazões máximas e volumes anuais em cada escala considerada neste estudo (Figuras 6.11 e 6.12).

Observa – se que os anos de alta pluviometria (úmidos) apresentam vazões e volumes médios maiores que os apresentados nos anos normais, sendo que estes são maiores que os apresentados nos anos secos. Os resultados obtidos tanto para anos secos, quanto para anos normais e úmidos mostram, através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que os resultados obtidos são bastante expressivos. As funções potencias bem como os coeficientes de determinação  $R^2$  estão indicados nas Figuras 6.11 e 6.12



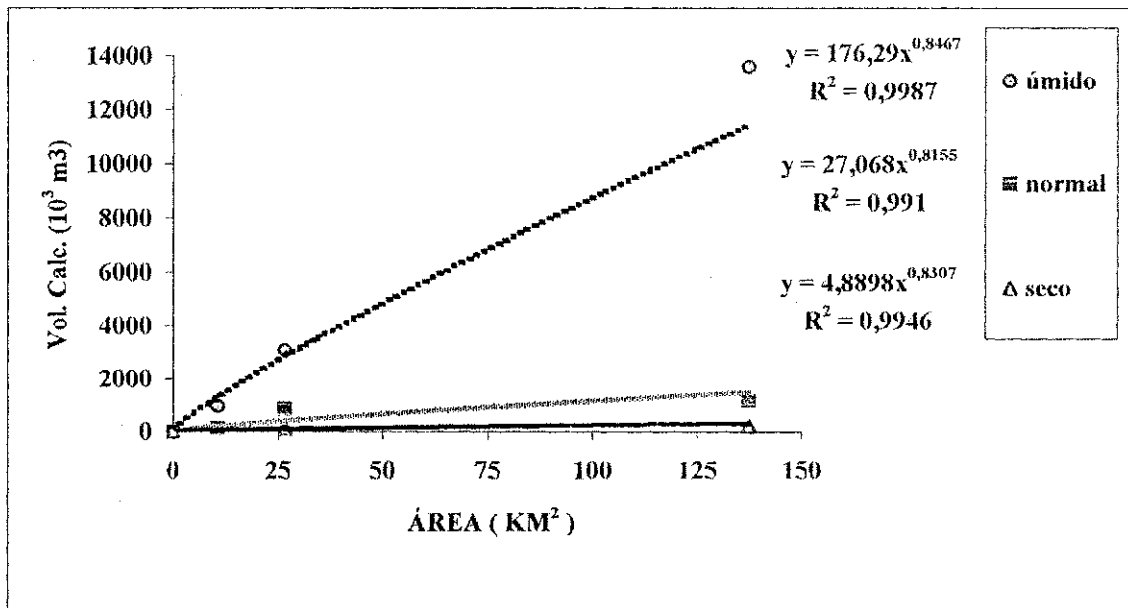


Figura 6.11–Variação dos Volumes Médios com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria Anual.

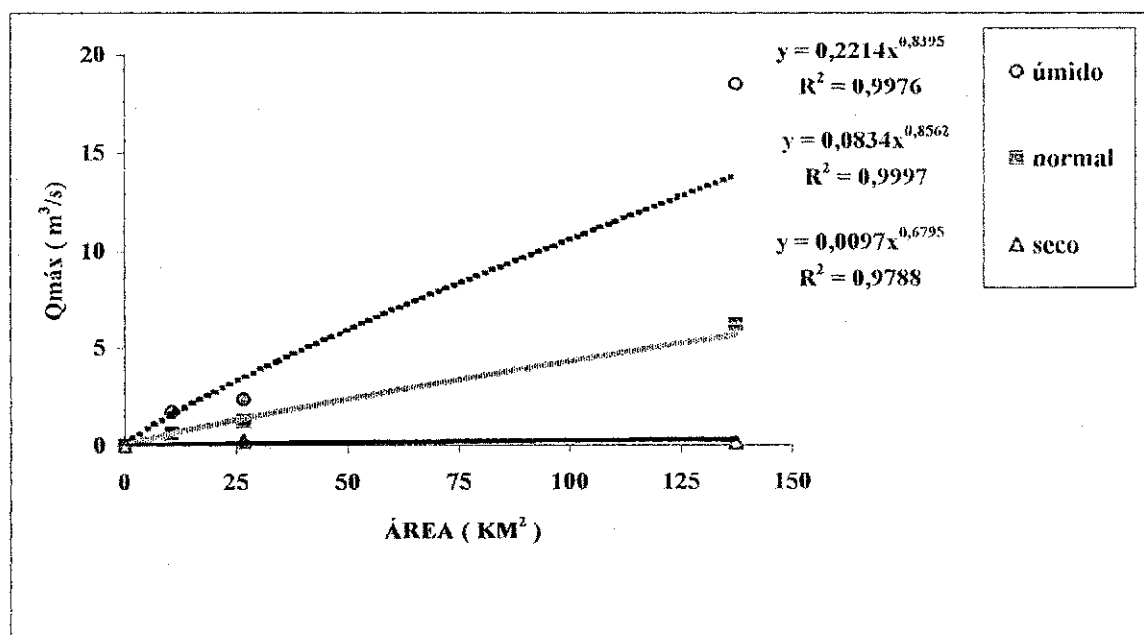


Figura 6.12 – Variação das Vazões Máximas Médias com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria Anual.

## 6.2 Efeito de Uso do Solo

A análise dos efeitos de uso solo sobre os parâmetros do modelo NAVMO e sobre o comportamento do escoamento (vazões máximas e volumes) só é possível nas escalas menores (parcelas e microbacias), pois estas áreas encontram – se em condições homogêneas de cobertura vegetal, o que não ocorre nas áreas maiores (Umburana, Jatobá e Gangorra) onde são verificados vários tipos de solo e usos.

### 6.2.1 Efeito do Uso do Solo Sobre os Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Médio.

Para a análise do efeito do uso do solo sobre os parâmetros do modelo NAVMO (ALFA e EET) foram obtidos os valores médios destes parâmetros entre as áreas com as mesmas condições de uso do solo (ex. P1 com P4, P5 com P9, P2 com P3, P6 com P7, M1 com M2, M3 com M4). A Tabela 6.6 mostra os valores médios de ALFA e EET de acordo com as condições de uso do solo.

Tabela 6.6 - Valores Médios de ALFA e EET conforme o tipo de uso do solo

| Local    | Área (Km <sup>2</sup> ) | Condição               | EET  | ALFA |
|----------|-------------------------|------------------------|------|------|
| P1P4     | 0,0001                  | Desmatada              | 2,21 | 0,52 |
| P5P9     | 0,0001                  | Vegetada               | 4,26 | 0,10 |
| P2P3     | 0,0001                  | Tratamento superficial | 3,28 | 0,27 |
| P6P7     | 0,0001                  | Tratamento agrícola    | 4,53 | 0,42 |
| M1M2     | 0,0085                  | Vegetada               | 4,54 | 0,07 |
| M3M4     | 0,0050                  | Desmatada              | 4,14 | 0,33 |
| Umburana | 10,7                    | Vários Usos            | 3,00 | 0,27 |
| Jatobá   | 26,8                    | Vários Usos            | 3,25 | 0,14 |
| Gangorra | 137,4                   | Vários Usos            | 4,20 | 0,03 |

Através da análise dos resultados dos valores de ALFA e EET, obtidos através de simulações com valor CN médios, observa-se que o valor médio do parâmetro EET entre as áreas vegetadas (M1M2 e P5P9) é 40% maior que o valor médio apresentado nas áreas desmatadas (P1P4 e M3M2). No entanto os valores de ALFA se comportaram de maneira oposta aos valores de EET, ou seja, nas áreas vegetadas o valor médio de ALFA é cinco vezes menor que o valor médio encontrado nas áreas desmatadas. Estes resultados

podem ser considerados consistentes, haja vista que o escoamento é maior em áreas sem cobertura vegetal, enquanto que a evapotranspiração diminui pela retirada da vegetação.

### 6.2.2 Efeito do Uso do Solo Sobre os Parâmetros do Modelo NAVMO com Valor CN Conforme Condição Antecedente

Após as simulações com valores CN de acordo com as condições de umidade antecedente do solo, foram obtidos novos valores de ALFA e EET devido ao ajuste tanto das vazões máximas, quanto dos volumes anuais. Sendo assim outros valores médios foram obtidos de acordo com homogeneidade das condições de uso do solo das áreas. A Tabela 6.7 mostra os valores de ALFA e EET obtidos a partir de simulações com valores CN<sub>I</sub>, CN<sub>II</sub> e CN<sub>III</sub>.

Tabela 6.7 - Valores Médios de ALFA e EET conforme o tipo de uso do solo e condição de umidade antecedente do solo.

| Local    | Área (Km <sup>2</sup> ) | Condição               | EET  | ALFA |
|----------|-------------------------|------------------------|------|------|
| PIP4     | 0,0001                  | Desmatada              | 2,21 | 0,75 |
| P5P9     | 0,0001                  | Vegetada               | 3,93 | 0,21 |
| P2P3     | 0,0001                  | Tratamento superficial | 3,29 | 0,44 |
| P6P7     | 0,0001                  | Tratamento agrícola    | 4,54 | 0,62 |
| M1M2     | 0,0085                  | Vegetada               | 4,55 | 0,11 |
| M3M4     | 0,0050                  | Desmatada              | 4,21 | 0,46 |
| Umburana | 10,7                    | Vários Usos            | 3,00 | 0,18 |
| Jatobá   | 26,8                    | Vários Usos            | 3,25 | 0,09 |
| Gangorra | 137,4                   | Vários Usos            | 4,15 | 0,02 |

Pode –se observar que o comportamento dos parâmetros (ALFA e EET) é semelhante ao da simulação com os parâmetros médios, ou seja, o valor médio de EET nas áreas vegetadas (P5P9 e M1M2) é maior, porém em menor proporção, relativamente. Sendo 20% maior que o valor médio nas áreas desmatadas (PIP4 e M3 M4). Porém no caso do parâmetro ALFA, o valor médio nas áreas vegetadas é quatro vezes menor que o valor médio das áreas desmatadas.

### 6.2.3 Efeito do Tipo do Uso do Solo Sobre o Escoamento com Valor CN Médio

Da mesma forma que os parâmetros, também foram analisados os escoamentos gerados nas diversas áreas da BRS. No entanto, foram analisados inicialmente as vazões máximas e volumes obtidos de simulações com valores CN médios.

Analisando os valores da Tabela 6.8 percebe-se que, nas áreas desmatadas (P1P4 e M3M4) tanto os valores médios dos volumes quanto das vazões são maiores que os valores médios obtidos nas áreas vegetadas (P5P9 e M1M2). O valor médio das vazões máximas nas áreas desmatadas é aproximadamente 127% maior que o valor das áreas vegetadas. No caso dos volumes, o valor médio é cerca de 170% maior nas áreas sem vegetação do que o valor médio nas áreas vegetadas (P5P9 e M1M2).

Tabela 6.8 - Volumes e Vazões Médios de acordo com as condições de uso do solo

| Local    | Área (Km <sup>2</sup> ) | Condição               | Vazão (m <sup>3</sup> /s) | Volume (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) |
|----------|-------------------------|------------------------|---------------------------|--|
| P1P4     | 0,0001                  | Desmatada              | 0,000039                  | 0,0220                                   |
| P5P9     | 0,0001                  | Vegetada               | 0,000010                  | 0,0056                                   |
| P2P3     | 0,0001                  | Tratamento superficial | 0,000030                  | 0,0069                                   |
| P6P7     | 0,0001                  | Tratamento agrícola    | 0,000040                  | 0,0164                                   |
| M1M2     | 0,0085                  | Vegetada               | 0,000429                  | 0,3280                                   |
| M3M4     | 0,0050                  | Desmatada              | 0,000918                  | 0,8727                                   |
| Umburana | 10,7                    | Vários Usos            | 1,52                      | 639,20                                   |
| Jatobá   | 26,8                    | Vários Usos            | 1,08                      | 513,20                                   |
| Gangorra | 137,4                   | Vários Usos            | 10,90                     | 4.372,78                                 |

6.2.4 Efeito do uso do solo sobre o escoamento com valor CN conforme condição antecedente.

A partir da simulação das vazões e volumes com o emprego de diferentes valores CN (CN<sub>I</sub>, CN<sub>II</sub> e CN<sub>III</sub>) foram determinados os volumes e vazões máximas anuais médias associadas às condições de uso (Tabela 6.9)

Analisando os resultados obtidos constata - se que as vazões máximas médias, nas áreas desmatadas, é aproximadamente 54% maior do que o valor médio das áreas vegetadas. Porém os volumes médios nas áreas vegetadas (P5P9 e M1M2) e desmatadas (P1P4 e M3M4) são praticamente iguais.

Tabela 6.9- Volumes e Vazões Médias de acordo com as condições de uso do solo, com valores CN conforme condição Antecedente.

| Local    | Área<br>(Km <sup>2</sup> ) | Condição               | Vazão<br>(m <sup>3</sup> /s) | Volume<br>(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) |
|----------|----------------------------|------------------------|------------------------------|---|
| P1P4     | 0,0001                     | Desmatada              | 0,00006                      | 0,03025                                     |
| P5P9     | 0,0001                     | Vegetada               | 0,00001                      | 0,01039                                     |
| P2P3     | 0,0001                     | Tratamento superficial | 0,00003                      | 0,03578                                     |
| P6P7     | 0,0001                     | Tratamento agrícola    | 0,00007                      | 0,02522                                     |
| M1M2     | 0,0085                     | Vegetada               | 0,00123                      | 0,9498                                      |
| M3M4     | 0,0050                     | Desmatada              | 0,00184                      | 0,9596                                      |
| Umburana | 10,7                       | Vários Usos            | 1,155                        | 533,43                                      |
| Jatobá   | 26,8                       | Vários Usos            | 1,488                        | 1422,70                                     |
| Gangorra | 137,4                      | Vários Usos            | 9,878                        | 5.917,20                                    |

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

A avaliação dos impactos causados pelo uso do solo bem como a compreensão do comportamento dos processos hidrológicos, devido à mudança de escala, é fundamental em regiões semi-áridas, como o Cariri Paraibano, que apresentam distribuição irregular das precipitações e elevado índice de degradação dos seus recursos naturais.

A variabilidade do escoamento frente a esses fatores ainda é pouco estudado no semi-árido nordestino. Esta pesquisa procurou avaliar os efeitos causados pela variabilidade da escala da bacia hidrográfica e pelas condições de uso do solo sobre os parâmetros do modelo NAVMO, os quais estão associados aos processos de infiltração e escoamento, que foi usado na simulação do escoamento em bacias do Cariri paraibano, a Bacia Representativa de Sumé com suas sub-bacias e áreas experimentais. O estudo focalizou nos valores CN (curva número), no coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) e nos fatores ALFA, do escoamento superficial, e EET da evaporação.

Foi feita inicialmente a estimativa, com base em uma série de dados observados, dos parâmetros CN e  $n$  de Manning que estão relacionados com as características físicas da bacia hidrográfica, para posteriormente efetuar a validação dos valores obtidos através da aplicação do modelo NAVMO na simulação do escoamento.

A estimativa do valor dos parâmetros físicos foi baseada na metodologia do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos SCS, (McCuen, 1982) para o cálculo do valor da curva número (CN), e na equação de Manning para o cálculo do seu

coeficiente rugosidade ( $n$ ) em diferentes escalas e condições de uso do solo da Bacia Representativa de Sumé.

Para o parâmetro CN foram obtidos também valores considerando as condições de umidade antecedente do solo (úmido normal e seco). De acordo com os resultados obtidos pode – se concluir que o valor da curva número diminui com a vegetação e com aumento da escala qualquer que seja a condição antecedente de umidade do solo, devido tanto a heterogeneidade do clima e do solo, quanto ao efeito das perdas na propagação do escoamento em escalas maiores.

No caso dos valores do coeficiente de rugosidade ( $n$ ) verificou-se que os mesmos variam com o tipo de uso solo, ou seja, com a retirada da vegetação ocorre uma diminuição do coeficiente de rugosidade, enquanto que o aumento da escala também provoca o aumento do seu valor. Estes efeitos devem-se principalmente as heterogeneidades como: irregularidades de tamanho e forma, obstruções, topografia, vegetação, etc., conforme discutido por Chow (1959).

A validação destes parâmetros através do modelo NAVMO mostrou que o modelo foi capaz de representar o escoamento da região tanto no critério de volume e vazões máximas, apresentando uma correlação muito boa entre os valores observados e simulados ( $R^2$  médio = 0,90 para os volumes e  $R^2 = 0,91$  para as vazões máximas), quanto na comparação gráfica entre vazões simuladas e observadas.

Em relação à segunda etapa desta pesquisa, que foi a avaliação do comportamento do escoamento (vazões máximas e volumes anuais) e de outros parâmetros do modelo NAVMO frente aos efeitos e condições do uso do solo, pode – se concluir que o parâmetro de evaporação (EET) variou pouco entre as escalas da bacia, sugerindo que não existe efeito significativo, provavelmente devido à estabilidade climática (temperatura) da região.

Em relação ao parâmetro ALFA pode –se concluir que o mesmo varia inversamente com a escala da bacia, tanto no ajuste dos volumes, quanto no ajuste das vazões máximas. Na escala menor (parcelas) o valor médio de ALFA ficou em torno de 0,33 sendo que na escala maior (bacia de Gangorra) este valor foi de aproximadamente 0,03. O escoamento superficial nas escalas maiores sofre um maior amortecimento em relação às escalas menores.

Os valores de ALFA são bastante sensíveis às condições de umidade antecedente do solo. De acordo com os resultados apresentados pode – se concluir que os

valores de ALFA obtidos para os anos úmidos, são maiores que nos anos normais, que, por sua vez, apresentaram valores de ALFA maiores que nos anos secos.

No entanto, o comportamento do escoamento é diretamente proporcional ao aumento da escala, ou seja, tanto as vazões máximas quanto os volumes são proporcionais à área de contribuição. Pode –se concluir também, através da análise gráfica, que tanto as vazões máximas quanto os volumes gerados nos anos de alta pluviometria apresentaram valores maiores que nos anos normais e secos.

Quanto aos efeitos provocados pelo o tipo de uso do solo sobre os parâmetros do modelo NAVMO, constata – se que o valor médio do parâmetro de evapotranspiração (EET) é menor (30%) nas áreas desmatadas do que nas áreas vegetadas. Este comportamento deve-se à redução da evapotranspiração provocada pela ausência da vegetação. Já com o parâmetro do escoamento superficial, o comportamento é inverso, ou seja, nas áreas sem vegetação o valor médio de ALFA foi cerca de 4,5 vezes maior que o valor médio apresentado nas áreas vegetadas, devido à diminuição da capacidade de infiltração da água no solo com a retirada da vegetação.

O efeito do uso do solo sobre o escoamento (vazão máxima e volume), na Bacia Representativa de Sumé, pode ser percebido através dos valores médios das vazões máximas e dos volumes gerados nas áreas desmatadas e vegetadas da bacia. Através da análise dos resultados obtidos pode –se concluir que a retirada da vegetação provoca um aumento considerável (90%), no valor médio das vazões máximas. Os volumes nas áreas desmatadas apresentaram uma elevação ainda maior de 170% , quando considerados valores CN médios no processo de simulação do escoamento.

## 7.2 Recomendações

Sugere - se, para os trabalhos futuros, que seja feita a aplicação do modelo NAVMO, com os mesmos parâmetros físicos obtidos neste estudo, em escalas maiores, como as bacias hidrográficas do açude de Sumé (748, 6 Km<sup>2</sup>) e Boqueirão (~14.000 Km<sup>2</sup>), com o objetivo de melhor caracterizar os efeitos da escala e do tipo de uso do solo sobre o escoamento da região. Recomenda –se também uma análise dos efeitos de escala e uso através da utilização de modelos de simulação em escala de tempo menor (eventual).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M.B.; Bathurst, J.C.; O'Connell, J.A.; Rasmussen, J.(1986). An Introduction to European Hydrological System – Système Hydrologique Européen. SHE, 2 Structures of a physically – based distributed modelling system, *J. Hydrology*, 87, 61 – 77.
- Aragão, R. (2000). Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com os Dados da Bacia Experimental de Sumé - PB. Tese de mestrado, DEC/CCT/UFPB.
- ATECEL (1993). Estudo Técnico Integrado sobre o Uso Múltiplo dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sucurú. Relatório. Campina Grande, Pb.
- Bathurst, J. C. and Purnama, A. (1991) Design and Application of a Sediment and Contaminant Transport Modelling System. IAHS, Proceedings of the Vienna Symposium, *PLlu*, 203, 305 – 313.
- Bathurst, J.C.; Wicks, J. M & O'Connell, P. E (1995) The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In: Singh, V.P (editor) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch, p.1130.
- Bathurst, J. C., Kilsby, C., White, S. (1996). Modelling the Impacts of Climate and Land-Use Change on Basin Hydrology and Soil Erosion in Mediterranean Europe. In: Brandt, C. J., Thornes, J. B. Mediterranean Desertification and Land Use. John Wiley & Sons, Ltd. P. 355-387.
- Beasley, D.B.; Huggins, L.F.(1981). Answers: User's Manual Chicago: U.S. Environmental Protection Agency 54p.
- Blöschl, G.; Sivapalan, M. (1995) Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review, *Hydrol. Process*, 9, p. 251- 90
- Bosh, J.M.; Hewlett, J.D., (1982). A review of catchment experiments to determine the effect to vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 2 – 23.
- Braga (2001) A. C, P.L. (1994).Efeitos de Fatores Climáticos e Uso do Solo sobre o Escoamento em uma Região Semi – Árida da Paraíba. Campina grande. Tese (Mestre em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.
- Bruijnzeel, L.A, 1990. Hydrology of Moist Tropical Forest and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review.IHP. IAHS. UNESCO. 224p.
- Bruijnzeel, L.A, 1996. Predicting the hydrological impacts of tropical Forest conversion: The need for integrated research. Capítulo 2 de “Amazonian Deforestation and Climate” Eds: Gash J H C, Nobre C A, Roberts J M e Victoria R L John Wiley & Co: Chichester, Inglaterra.

- Burch, G. J.; Bath, R. K.; Moore, I. D. e O'Loughlin E. M. (1987). Comparative hydrological behaviour of forest and cleared catchments in southeastern Australia. *J. Hydrology* 90 19-42.
- Burman, R. D., and Black, R. D. (1970), "The Inference of Intake and Hydraulic Roughness Parameters from Plot Runoff Using Kinematic Wave Theory,". *Transactions, ASAE*, Vol. 13, nº 4, 1970 pp.479 – 481.
- Cardier, E. e Freitas, B.J. (1982). Bacia Representativa de Sumé - Primeira Estimativa dos Recursos de Água. Série Hidrologia número 14, SUDENE, Recife - Pe.
- Cardier, E., Freitas, B.J. e Leprun, J.C (1983). Bacia Experimental de Sumé – Instalação e Primeiros Resultados. Série Hidrologia número 16, SUDENE, Recife-Pe.
- Carvalho (1973), O. de - Plano Integrado para o Combate Preventivo aos Efeitos das Secas no Nordeste, MINTER, Série Desenvolvimento Regional, ndeg. 1, Brasília-DF, abril/ 1973.
- Célia, M., Rajaram,H., Ferrand L. (1993). A multi – scale computational model for multiphase flow in porous medis. *Adv. Water Res. Amsterdam*, V.16.p81 – 92. Jan.
- Chiew, F. H. S., Whetton, P. H., McMahon, T. A., Pittock, A. B. (1995). Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*. N. 167, p. 121-147.
- Chow, V. T. (1959) *Open channel hydraulics*. International Student Edition. McGraw-Hill International Book Company.
- Chow, V. T., Maidment. D. R., Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions Civil Engineers Series. Singapore.
- Collishonn e Tucci (2001). Simulação Hidrógica de Grandes Bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 6. n.1.p-95-118.
- Engman, E.T. (1986). Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol.112, Nº1. p- 39-53.
- Ewen, J., Parkin, G. (1996). Validation of Catchment Models for Predicting Land Use and Climate Change Impacts – 1. Method. *Journal of Hydrology*, v. 175, p. 583-594.
- Figueiredo, E.E. (1998). Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-Arid Region of Brazil. PhD Thesis. Universidade de Newcastle upon Tyne, England.
- Figueiredo, E. E., Overland,H. e Kleeber,H.B. (1991). O Modelo NAVMO de Simulação do Escoamento Superficial. IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p-337-346. Rio de Janeiro.
- Figueiredo, E.E., Overland, H. e Kleeber, H.B. (1991). O Modelo NAVMO de Simulação do Escoamento Superficial. IX Simpósio Bras. de Rec. Hídricos, pp 337-346, Rio de Janeiro.

- Figueiredo, E.E., Srinivasan, V.S., Barros, M.G. (1993). Análise do Problema de Enchimento do Açude Público Sumé através do modelo NAVMO. X Simpósio Bras. de Rec. Hídricos, pp 226-235, Gramado.
- Figueiredo, E. E. e Srinivasan, V. S. (1999). Avaliação dos Impactos do uso do solo e da Influência dos Açudes sobre o Escoamento para o açude Sumé - PB. CD-ROM, Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte - MG.
- Figueiredo, E.E., Lopes, P.L., Srinivasan, V.S. (1999). Calibração e Validação de um Modelo Distribuído para a Bacia do Rio Piancó – PB. CD-ROM, Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte.
- Foster, G. R., Huggins, L. F., and Meyer, L. D.(1980), "Simulation of Overland Flow on Short Field Plots,". Water Resources Research, Vol. 4, N° 4, N°6, 1968, pp 1179 – 1187.
- Fread, D. L. (1985). Channel Routing. In: *Hydrological Forecasting*. Anderson, M. G., Burts, T. P. (editors). John Willey & Sons. Londres. U. K.
- Hermann (1983), R. M. Curso de Engenharia Hidrológica, Vol.I. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Hsia e Koh (1983). Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan. In; *Hydrology of humid Tropical Regions*, Keller, R. (ed.) IAHS publication n. 140, p215 – 220.
- Huggins, L. F., and Monke, E. J.(1966), "The Mathematical Simulation of the Hydrology of small Watersheds," Technical Report N° 1, Purdue University Water Resources Research Center, West Lafayette, IN, 1966, 130 pp.
- <http://www.desert.org.br> (Julho/2001). Índice de aridez. Disponível on-line.
- <http://www.ibge.gov.br> . (Janeiro/2002). Contagem Populacional de 1996.
- <http://www.nmnh.si.edu/> .(Outubro/2001). Limite da Caatinga. Disponível on-line.
- <http://www.sudene.gov.br> (Junho/2001). Caracterização do Semi-árido. Disponível on-line.
- <http://www.wwf.org.br> (Outubro/2001). Caracterização dos Biomas. Disponível on-line.
- IGPB (1993), (International Geosphere – Biosphere Programme) 1993. A study of global change. In International Council of Scientific Unions, 1993. Report n. 27 Stockolm. 54p.
- Kleeberg, H. B., Overland, H., Paus, B. (1989). NAVMO, *Version 1.1, Niederschlag - Abfluss - Verdunstung Modell*. Documentation Universität der Bundeswehr München, Alemanha.
- Lal , R., (1981) Deforestation of tropical rainforest and hydrological problems. In: *Tropical Agricultural Hydrology*, R. Lal e E. W. Russell (eds.) J. Wiley, New York, 131 – 140

- Lopes, P.L. (1994). Avaliação do Escoamento Superficial da Bacia do Rio Piancó Utilizando o Modelo NAVMO. Campina grande. Tese (Mestre em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994.
- Lopes, J.E.G.; Braga Jr, B.P. & Canejo, J. G.L. (1982): SMAP. A Simplified Hydrologic Model. International Symposium on Rainfall – Runoff Modeling, Missipi. Missipi State University.
- Lencastre, A. e Franco, F.M (1984). Lições de Hidrologia. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, Portugal.
- McCuen, R.H. (1982). A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods, Univ. of Maryland, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- McCuen, R. H. (1982). A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods. University of Maryland, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. USA.
- McCulloch, J. S. G., Robinson, M. (1993). History of Forest Hydrology. *Journal of Hydrology*. v. 150. p. 189-216.
- Mediondo, W, Tucci E.M.(1997). Escalas Hidrológicas I: Conceitos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 2. n.1.p-59 – 79.
- MMA (2001), Ministério do Meio Ambiente: Água, Meio Ambiente e Vida, edição 2001 Disponível em CD ROM – Distribuição de Água Doce no Planeta.
- Neto, A. F. Da silva, Barbosa. M. P., Santos. M. J. (1996). Avaliação Do Desmatamento Na Bacia Do Alto Rio Sucuru, Com Base Em Imagens TM/LANDSAT-5. Engenharia Agrícola, v.16, n.1, p.01-07, 1996.
- Pickels(1931) G. W.; Run – off Investigation in Central Illionois, University of Illionois Engineering Experiment Station, Bulletin 232, Vol.32, nº3.Sentember (1931).
- Porto, R.P., Zahed K. (1986). Apostila de Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico – Disponível on – line.
- Pritchett (1979), W. L. Properties and Management of Forest Soils. John Wiley, New York, 500p.
- Rebouças, (1999). Aldo. Potencialidade de água subterrânea no semi-árido brasileiro. IX Conferência Internacional de Captação de Água de chuva. Petrolina – PE
- Ree, W. O., Wimberley, F. L., and Crow, F. R., (1977). “Manning’s n and the Overland Flow Equation, “Transactions, ASAE, Voll. 20, N° 1, 1997, pp. 89 – 95
- Russo(1981), D.; E.Bresler.Soil Hydraulic Properties As Stochastic Process, 1. An Analysys of Filed Spatial Variability. Soil Sci. Soc.Am. J., Vol. 48: 708 – 716.

- Shih, S. F., and Rahi, G. S (1982). Seasonal Variations of Mannig's Roughness Coefficient in a Subtropical Marsh. Transactions of the ASAE, pp. 116 – 119.
- Silveira, A. L. L. (1993). Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica. In: Tucci, *Hidrologia -- Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade. p. 253-277.
- Simanton, J. R., Hawkins, R. H., Saravi, M. M e Renard, K. G (1996). Runoff Curve Number Variation with Drainage Area, Walnut Gulch, Arizona. Transactions of the ASAE, Vol 39(4):1391-1394.
- Singh, V.P. (editor) (1995). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States.
- Srinivasan, V. S., Gomes, H.P., Leprun, J. C. and Silva, I. G. (1988). Erosion Studies in Sumé, a Semiarid Region in the Northeast of Brazil. IAHS, Proc. of the Porto Alegre Symposium, Publ. No. 174, 307-314.
- Srinivasan, V.S. and Galvão, C.O. (1993). Erosion and Runoff Monitoring and Modelling in a Semiarid Region of Brazil. IAHS, Proc. of the Yokohama Symposium, Publ. 217, 167-173.
- SUDENE - ORSTOM. 1990. Dimensionamento de pequenas barragens no Nordeste semi-árido. Versão provisória, 68 p. + anexos.
- Tucci, C. E. M. (1993). Ciclo Hidrológico. In: *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Tucci, C. E. M. (editor) Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.p-35-40.
- Tucci, C. E. M. e Clarke R.T.(1997). Impacto da Mudança da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão.
- Tucci, C. E. M. (1998): Modelos Hidrológicos. Tucci, C. E. M. (editor) Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 669p.
- Villela, S. e Mattos A. Mattos (1975). Bacia Hidrográfica In: *Hidrologia Aplicada*. Ed. McGraw - Hill do Brasil, Ltda. São Paulo.p-6-28.
- Williams, J. R. (1969). Flood Routing with Variable Travel Time on Variable Storage Coefficients. *Transactions of the ASAE*. Vol. 12, p. 100-103.
- Woolhiser, D. A., "Simulation of Unsteady Overland Flow," Ch. 12, Unsteady Flow in Open Channels, Vol. II, K. Mahmood and V. Yevjevich, Eds., Ater Resources Publication, Fort Collins, CO, 1975.

## **ANEXOS**

A.1 : Hidrogramas da Validação dos Parâmetros para as Diversas Bacias da BRS

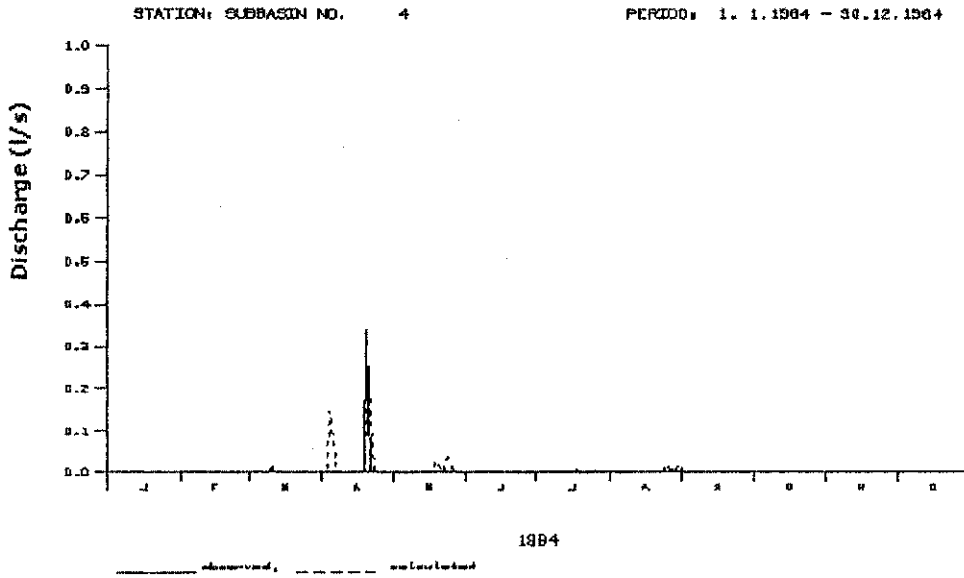


Figura. A.1 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 1, vegetada com caatinga, no ano de 1984 (— observado, - - - - simulado).

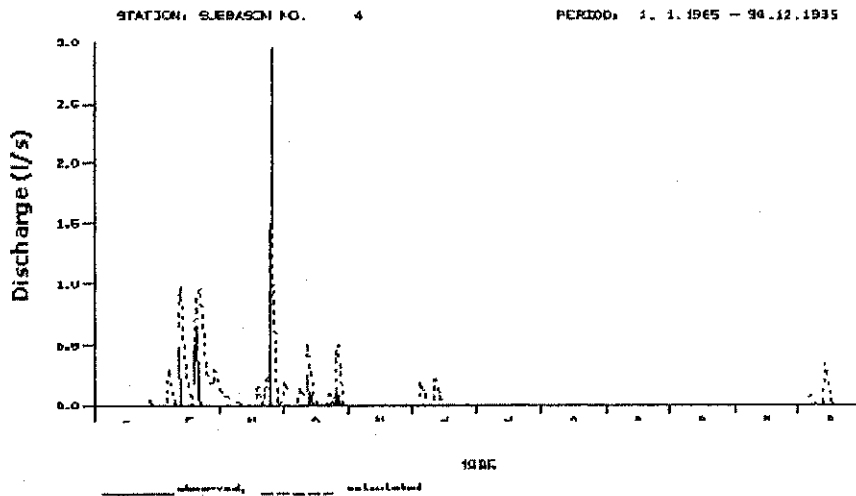


Figura. A.2 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 1, vegetada com caatinga, no ano de 1985 (— observado, - - - - simulado).

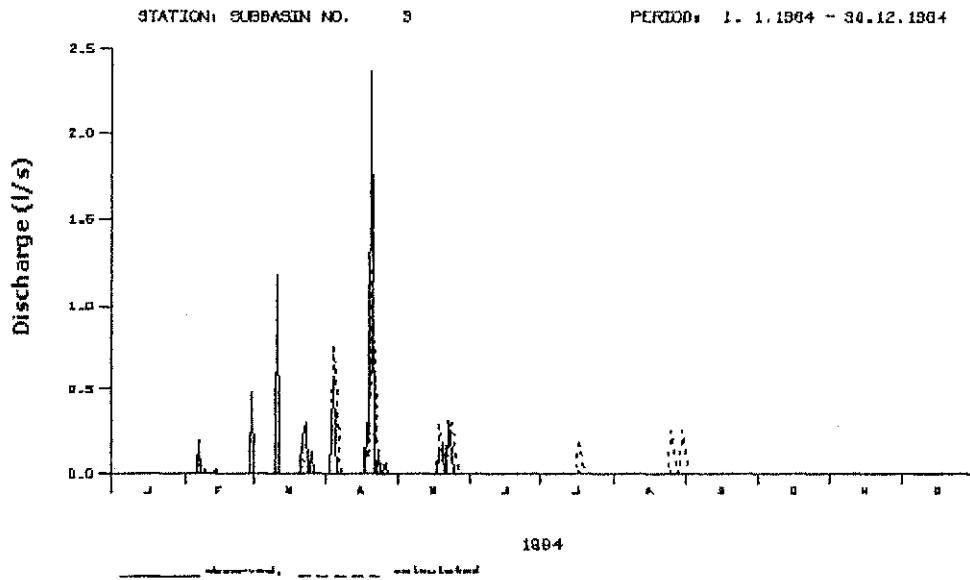


Figura. A.3 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 3, desmatada, no ano de 1984 (— observado, - - - - - simulado)

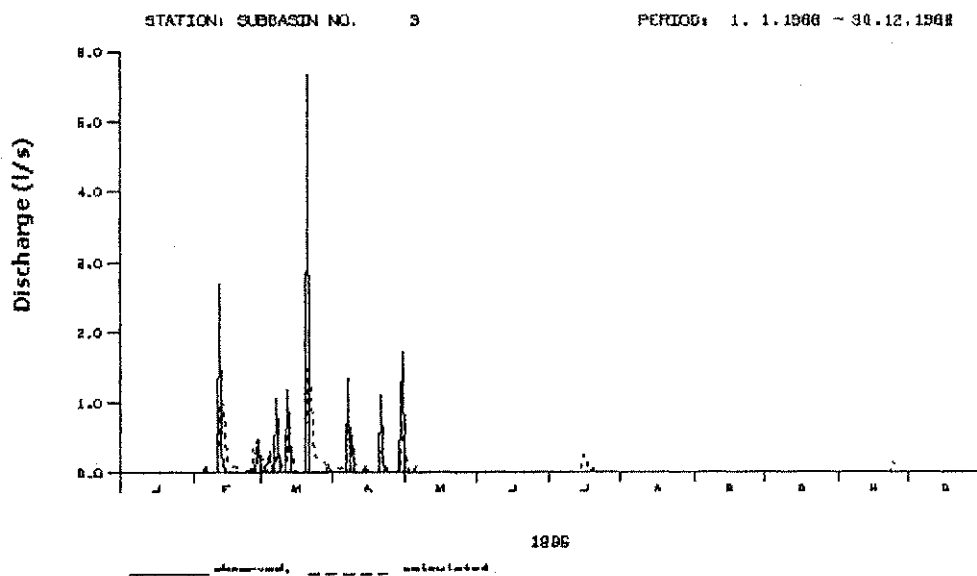


Figura. A.4 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 3, desmatada, no ano de 1986 (— observado, - - - - - simulado)



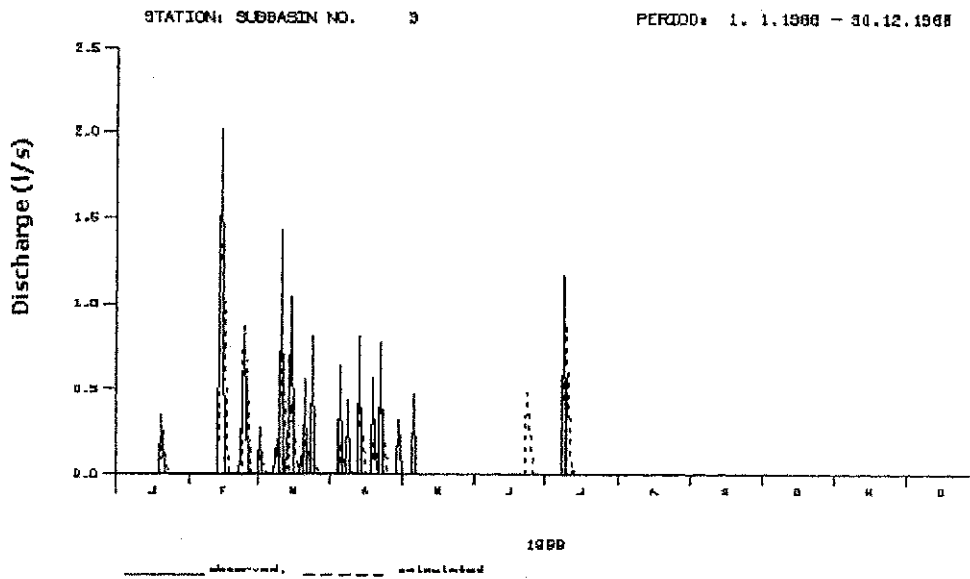


Figura. A.5 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 3, desmatada, no ano de 1988 (— observado, - - - - - simulado)

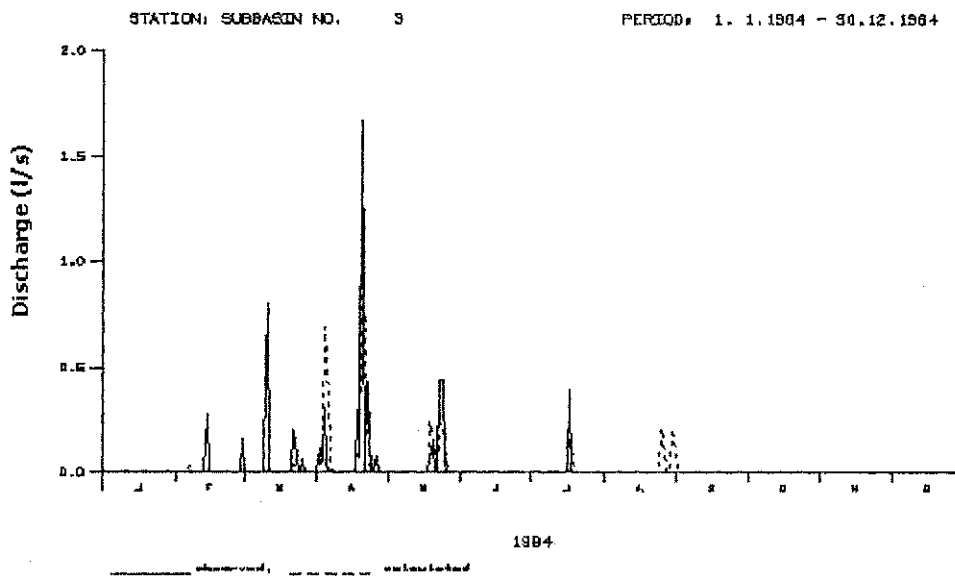


Figura. A.6 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 4, desmatada, no ano de 1984 (— observado, - - - - - simulado)

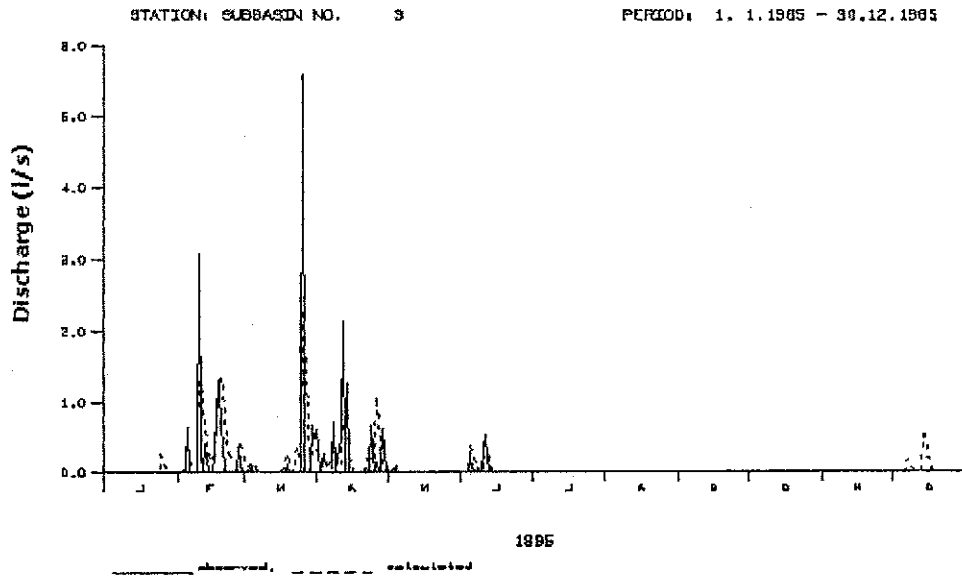


Figura. A.7 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 4, desmatada, no ano de 1985 (— observado, - - - - - simulado)

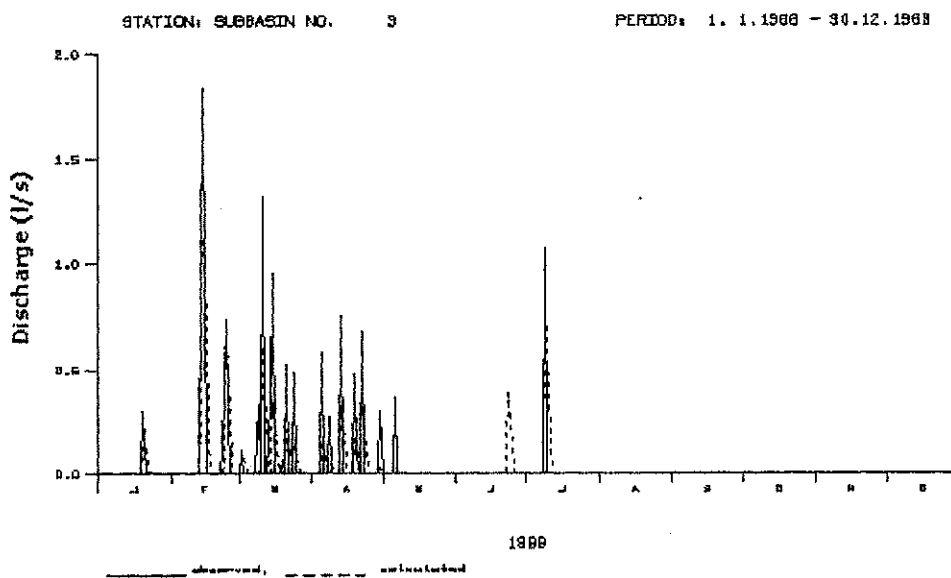


Figura. A.8 – Hidrogramas simulado e observado na microbacia 4, desmatada, no ano de 1988 (— observado, - - - - - simulado)

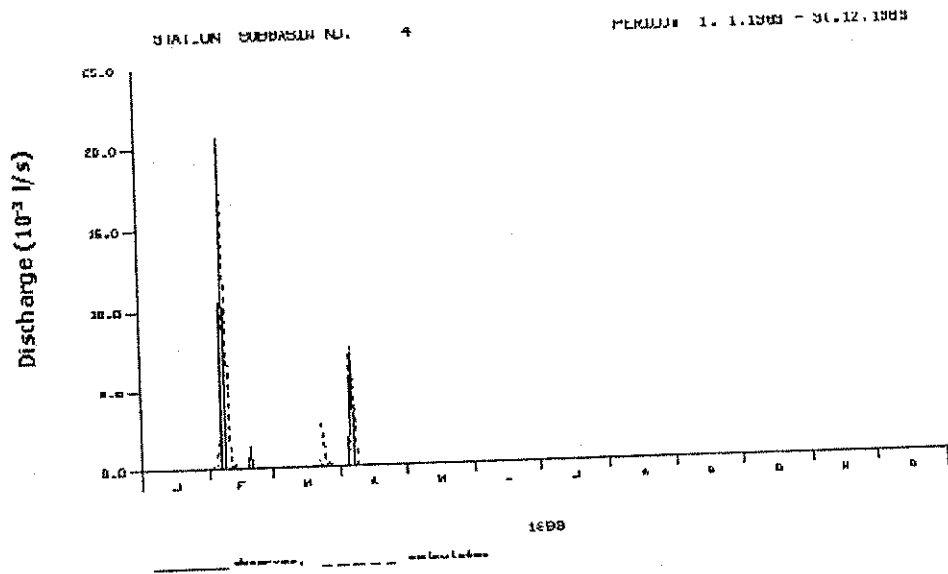


Figura. A.9 - Hidrogramas simulado e observado na parcela1, desmatada, no ano de 1983 (— observado, - - - - - simulado)

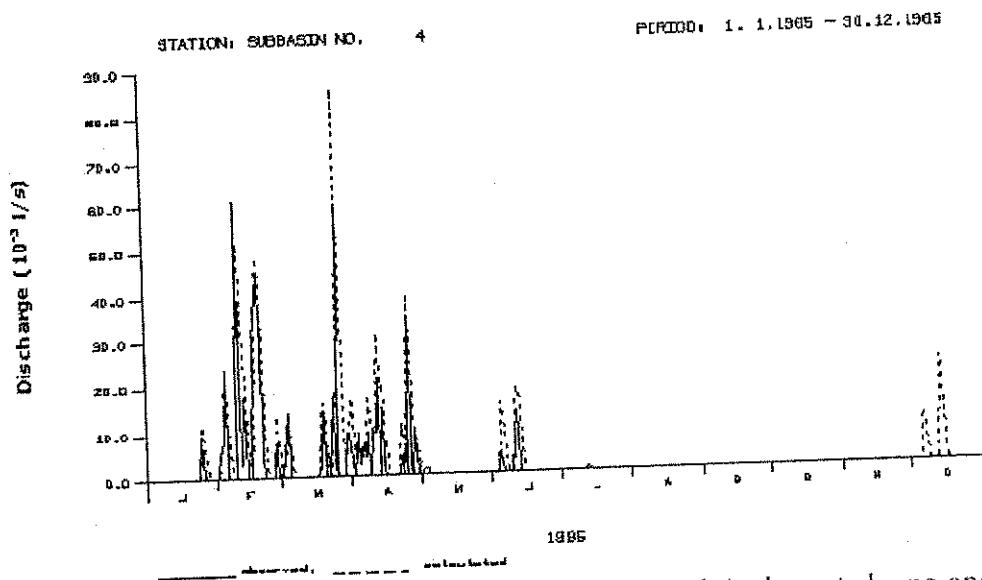


Figura. A.10 - Hidrogramas simulado e observado na parcela1, desmatada, no ano de 1985 (— observado, - - - - - simulado)

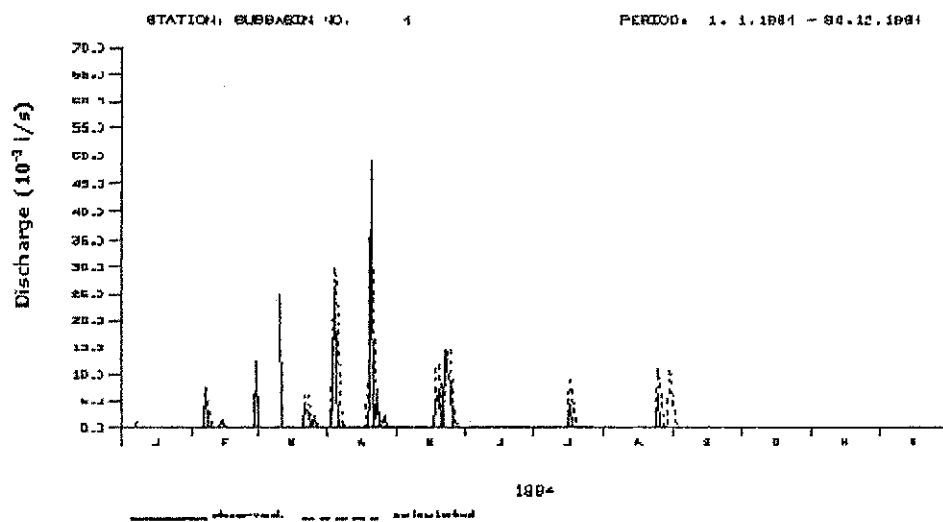


Figura. A.11 – Hidrogramas simulado e observado na parcela 1, desmatada, no ano de 1984 (— observado, - - - - - simulado).

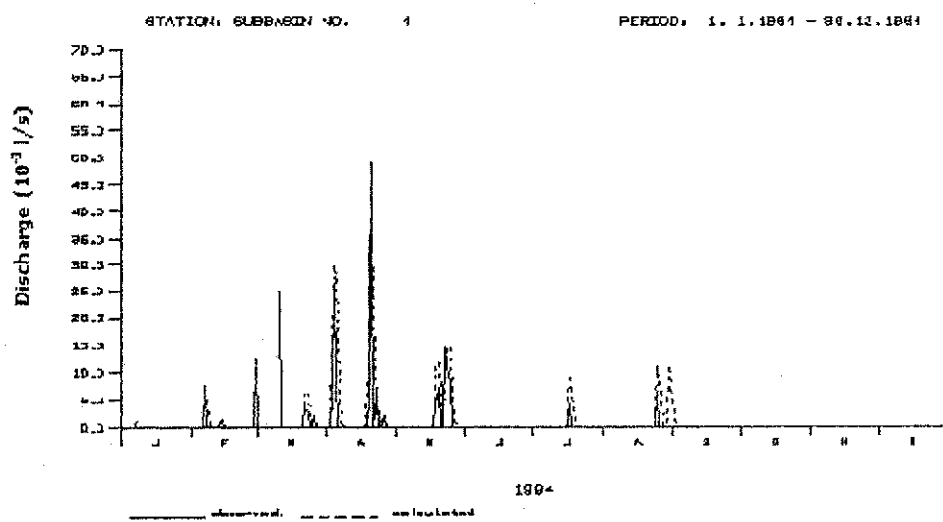


Figura. A.12 – Hidrogramas simulado e observado na parcela 5, vegetada, no ano de 1984 (— observado, - - - - - simulado).

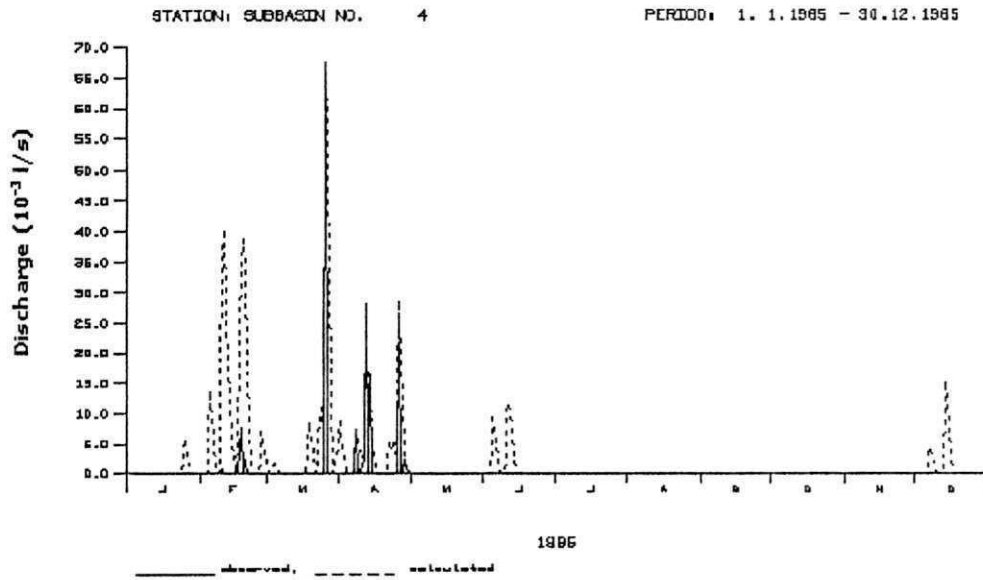


Figura. A.13 – Hidrogramas simulado e observado na parcela 5, vegetada, no ano de 1985 (— observado, - - - - - simulado).

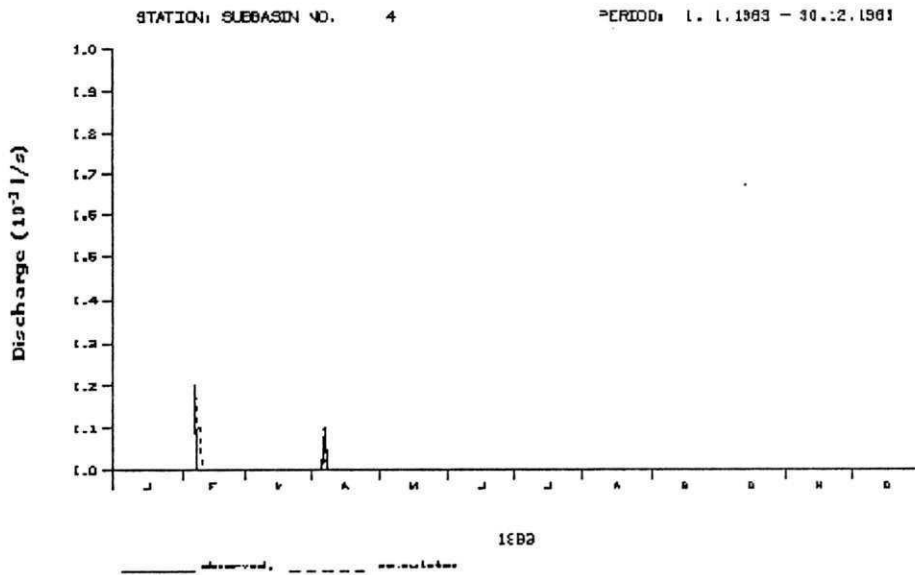


Figura. A.14 – Hidrogramas simulado e observado na parcela 5, vegetada, no ano de 1983 (— observado, - - - - - simulado).

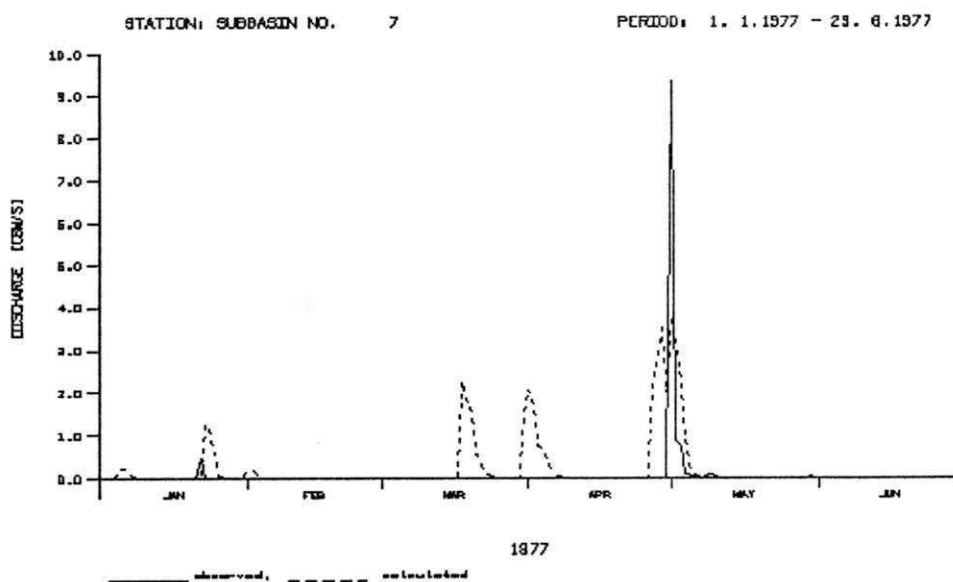


Figura. A.15 – Hidrogramas simulado e observado na sub – bacia de Umburana no ano de 1977 (—— observado, - - - - - simulado).

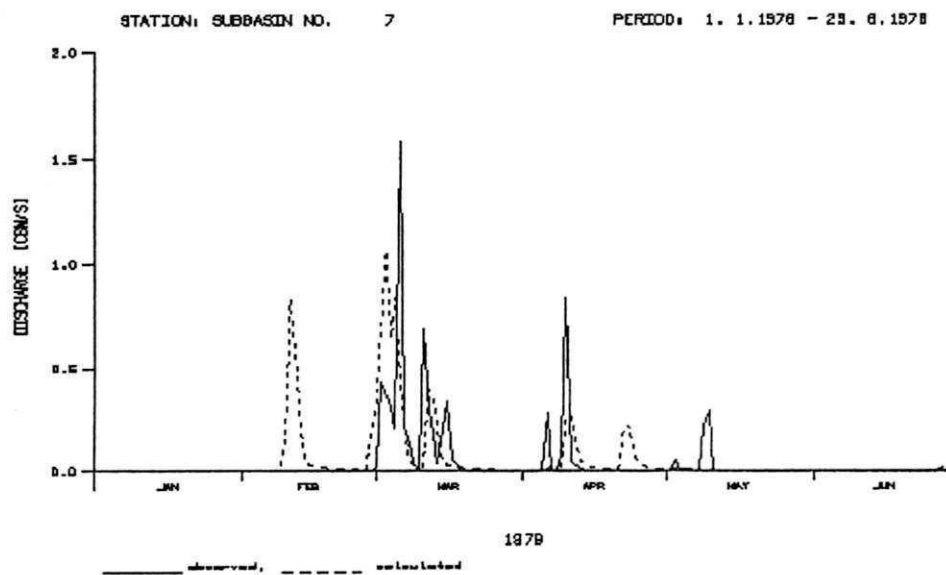


Figura. A.16 – Hidrogramas simulado e observado na sub – bacia de Umburana no ano de 1978 (—— observado, - - - - - simulado).

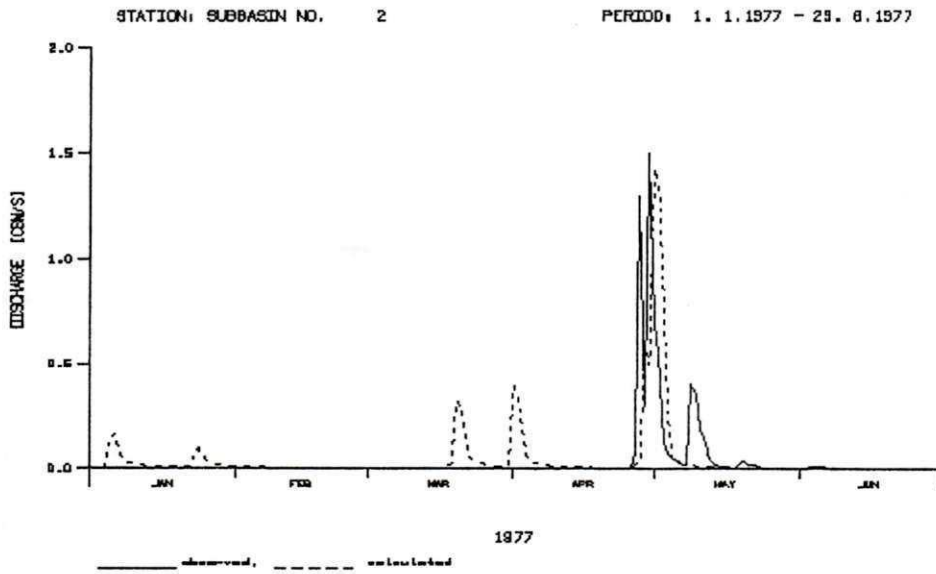


Figura. A.17 – Hidrogramas simulado e observado na sub – bacia de Jatobá no ano de 1977 (— observado, - - - - - simulado).

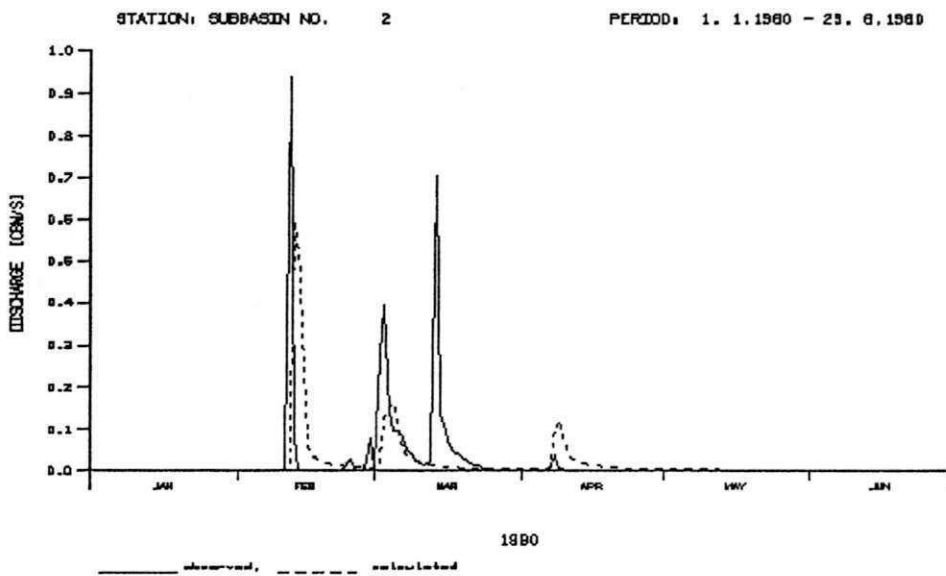


Figura. A.18 – Hidrogramas simulado e observado na sub – bacia de Jatobá no ano de 1980 (— observado, - - - - - simulado).

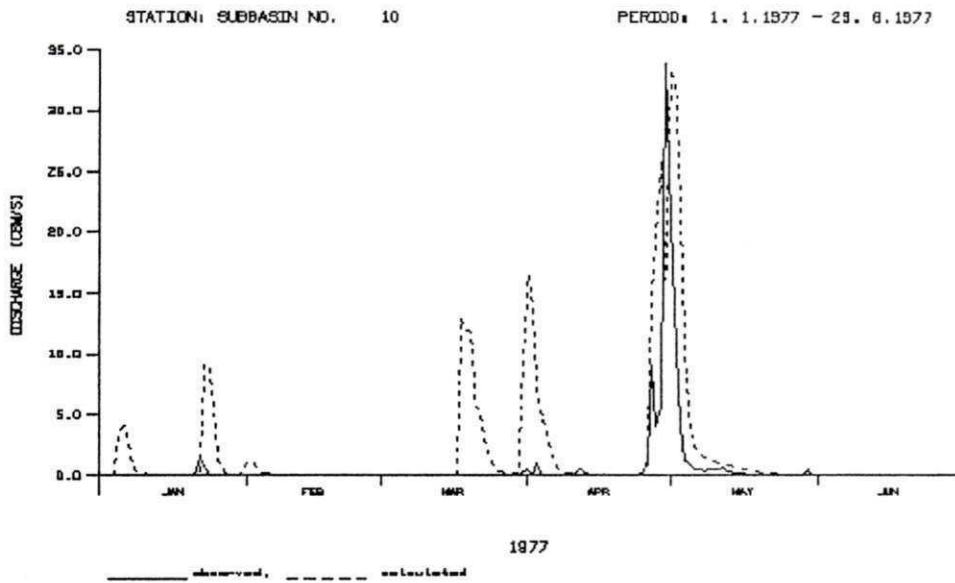


Figura. A.19 – Hidrogramas simulado e observado na sub – bacia de Gangorra no ano de 1977 (— observado, - - - - simulado)