

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

**EFEITOS DE FATORES CLIMÁTICOS E USO DO SOLO SOBRE O
ESCOAMENTO EM UMA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DA PARAÍBA**

ANA CLÁUDIA FERNANDES MEDEIROS BRAGA

CAMPINA GRANDE – PB

2001

CGBC_DIS

ANA CLÁUDIA FERNANDES MEDEIROS BRAGA

**EFEITOS DE FATORES CLIMÁTICOS E USO DO SOLO SOBRE O
ESCOAMENTO EM UMA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DA PARAÍBA**

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

AGOSTO – 2001



B813e Braga, Ana Cláudia Fernandes Medeiros.
Efeitos de fatores climáticos e uso do solo sobre o escoamento em uma região semi-árida da Paraíba / Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga. - Campina Grande, 2001. 152 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2001.
Orientação: "Prof. Dr. Eduardo Eneas de Figueiredo".
Referências.

1. Escoamento - Bacias Hidrográficas - Engenharia Civil. 2. Escoamento - Semi-árido - Paraíba. 3. Escoamento - Fatores Climáticos e Uso do Solo. 4. Recursos Hídricos. 5. 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)

ANA CLÁUDIA FERNANDES MEDEIROS BRAGA

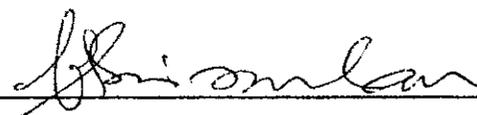
**EFEITOS DE FATORES CLIMÁTICOS E DO USO DO SOLO SOBRE O
ESCOAMENTO EM UMA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DA PARAÍBA**

Aprovado em 24 de Agosto de 2001.

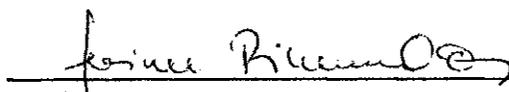
COMISSÃO EXAMINADORA



**EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO - PhD
Presidente – Orientador (CCT/UFPB)**



**VAJPEYAM S. SRINIVASAN - PhD
Examinador Interno (CCT/UFPB)**



**LUCIENE PIMENTEL DA SILVA - PhD
Examinadora Externa (COPPE/UFRJ)**

A meus pais,
Armando (*in memoriam*) e Elba

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para este trabalho. Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e saúde.

Ao meu orientador, Eduardo Eneas de Figueiredo, pela disponibilidade, paciência e apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores da Área de Recursos Hídricos pelos conhecimentos adquiridos e pelo esforço de fornecer uma boa formação e ao professor Carlos Galvão pelos materiais fornecidos ao desenvolvimento da pesquisa.

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

Aos colegas, em especial, Ana Emilia, Andréa, Cybelle, Dayse, Juliana e Márcia, pelo companheirismo e união em todo o período do curso.

A CAPES pelo suporte financeiro, através de bolsa de estudos, para a realização deste trabalho.

A minha família que foi apoio constante e incondicional, Sávio, minha mãe Elba e meus irmãos Luiz Armando, Carlos Eduardo e José Maurício e ainda a meu pai Armando que mesmo sem sua presença física, sempre foi fonte de inspiração.

RESUMO

O estudo da variabilidade de fatores climáticos e do uso do solo, e os possíveis impactos por eles causados no Nordeste semi-árido do Brasil, é de grande importância já que afetam diretamente a formação do escoamento nas bacias hidrográficas da região. Os recursos naturais das zonas semi-áridas, os quais são altamente sensíveis a variação do clima, tendem a ser escassos e são afetados tanto pela ação do homem (uso do solo) quanto pelas alterações nos padrões de evaporação e precipitação, com ocorrência frequente de secas e conseqüente redução do aporte de água. Nesta pesquisa, os efeitos da variabilidade da precipitação, evaporação e do uso do solo são estudados, tanto isoladamente quanto em conjunto, sobre o escoamento simulado de várias bacias hidrográficas inseridas na região do Alto Piranhas-PB. O estudo tem por base a aplicação do modelo distribuído NAVMO, o qual foi primeiramente validado para toda a região do estudo e, em seguida, utilizado para a simulação de diferentes cenários. Os resultados mostram que o modelo simula razoavelmente o escoamento (r^2 médio $\sim 0,7$) sendo este afetado, principalmente, pela variabilidade conjunta da precipitação, evaporação e uso do solo. Isoladamente, o que mais afeta o escoamento é a precipitação com variação média (volumes e picos em relação aos valores médios) entre 0,21 e 2,34 (volumes) e 0,3 e 1,83 (picos), e o uso do solo, com variação média entre 0,4 e 2,24 (volumes) e 0,58 e 1,44 (picos). A evaporação isoladamente afeta pouco o escoamento com variação média entre 0,92 e 1,11 (volumes) e 0,97 e 1,05 (picos). O efeito conjunto desses fatores torna o escoamento mais sensível, com variação média entre 0,25 e 3,4 (volumes) e 0,33 e 2,44 (picos).

ABSTRACT

The study of the variability of climatic factors and land use, and the possible impacts caused by them in the semi-arid region of the Northeast of Brazil, are of great importance since they directly affect the formation and generation of the runoff in the catchments of the region. The natural resources of the semi-arid zones, which are highly vulnerable to the variation of climate, tend to be scarce and are easily damaged by human action (land use) and also by the alterations in the evaporation and precipitation standards, with frequent occurrence of droughts and, as a result, reduction of water supply. In this research, the effects of the variability of the precipitation, evaporation and land use on the simulated water discharge of several catchments in the region of Alto Piranhas/PB are studied. The study is based on the application of the distributed model NAVMO, which was first validated for the region of the study and, after that, used to simulate different scenarios. The results show that, the model simulates the water flow reasonably well ($r^2 \sim 0.7$ on average) which is mainly affected by the joint variability of precipitation, evaporation and land use. Separately, the precipitation has great effects on discharge, with mean variation (volumes and peaks in relation to the mean values) between 0.21 and 2.34 (volumes) and 0.3 and 1.83 (peaks), and the land use change with mean variation between 0.4 and 2.24 (volumes) and 0.58 and 1.44 (peaks). The evaporation has the least effects on the flow with mean variation between 0.92 and 1.11 (volumes) and 0.97 and 1.05 (peaks). Combining these factors, the effects on discharge are even greater with mean variation between 0.25 and 3.4 (volumes) and 0.33 and 2.44 (peaks).

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. O Ciclo Hidrológico	4
2.2. Modelos Hidrológicos	5
2.3. Estudos Sobre Impactos do Clima e Uso do Solo na Hidrologia	8
2.3.1. Impactos do Clima.....	8
2.3.2. Impactos do Uso do Solo.....	14
2.3.3. Impactos Conjuntos de Clima e Uso do Solo.....	17
2.3.4. Comentários Finais.....	18
3. O MODELO NAVMO	20
3.1. Características Gerais	20
3.2. Cálculo das Lâminas dos Escoamentos nas Sub-Bacias	21
3.3. Cálculo da Precipitação Média nas Sub-Bacias	24
3.4. Balanço Hídrico dos Reservatórios	25
3.5. Capacidades dos Reservatórios	27
3.6. Transformação das Vazões nas Sub-Bacias	28
3.6.1. Escoamento Superficial (QD1).....	28
3.6.2. Escoamento sub-superficial (QD2).....	28
3.6.3. Escoamento Subterrâneo (QGW).....	29
3.6.4. Escoamento Total (QGES).....	29
3.7. Propagação do Escoamento nos Canais	30
3.8. Parâmetros Calibráveis do Modelo NAVMO	31
3.9. Resultados Gerados pelo Modelo	32

4. ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS.....	33
4.1. Área de Estudo.....	33
4.1.1. Generalidades.....	33
4.1.2. Características Gerais da Região.....	35
4.1.3. Características Climatológicas.....	35
4.2. Base de Dados.....	39
4.2.1. Dados Requeridos pelo Modelo.....	39
4.2.2. Dados Hidroclimatológicos.....	39
4.2.3. Dados Fisiográficos.....	41
5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	45
5.1. Introdução.....	45
5.2. Calibração.....	45
5.2.1. Tipos de Calibração.....	46
5.2.2. Precisão das Calibrações.....	47
5.2.3. Calibração do Modelo NAVMO.....	47
5.3. Validação.....	49
5.3.1. Tipos de Validação.....	49
5.3.2. Alguns Estudos Sobre Validação.....	50
5.3.3. Validação do Modelo NAVMO.....	51
5.4. Análise de Resultados e Discussão.....	55
5.4.1. Bacia de Piancó – 4.550 km ² (1964 a 1983).....	56
5.4.2. Bacia de Emas – 530 km ² (1964 a 1972).....	60
5.4.3. Bacia de Pau Ferrado – 8.050 km ² (1967, 1968, 1971, 1973 a 1975)... ..	62
5.4.4. Bacia de Aguiar – 495 km ² (1969 e 1970).....	66
5.4.5. Bacia de Antenor Navarro – 1.580 km ² (1964 a 1972).....	67
5.4.6. Bacia de Sítio Vassouras – 14.850 km ² (1963 a 1985).....	69
5.4.7. Posto Fluviométrico de Boqueirão de Mãe-d'água – 1.063,5 km ² (1923 a 1946).....	72
5.4.8. Bacia de Santa Rita do Curema – 6.868,68 km ² (1913, 1914, 1921 a 1941).....	75
5.4.9. Bacia de São José de Piranhas – 475 km ² (1912 a 1915 e 1921 a 1935).....	77
5.4.10. Comentários Finais.....	79
6. CENÁRIOS DE CLIMA E USO DO SOLO.....	81
6.1. Introdução.....	81
6.2. Seleção dos Cenários.....	82

6.2.1. Cenários Isolados.....	83
6.2.1.1. Cenários isolados de precipitação.....	83
6.2.1.2. Cenários isolados de evaporação.....	84
6.2.1.3. Cenários isolados de uso do solo.....	90
6.2.2. Cenários Conjuntos.....	91
6.2.2.1. Cenários de Clima.....	91
6.2.2.2. Cenários Conjuntos de Clima e Uso do Solo.....	93
6.3. Análise de Resultados e Discussão.....	94
6.3.1. Cenários Isolados de Precipitação.....	95
6.3.2. Cenários Isolados de Evaporação.....	97
6.3.3. Cenários Isolados de Uso do Solo.....	99
6.3.4. Cenários Conjuntos de Clima.....	101
6.3.5. Cenários Conjuntos de Clima e Uso do Solo.....	104
6.4. Resultados Regionais.....	107
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	111
7.1. Conclusões.....	111
7.2. Recomendações.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
ANEXOS.....	121
Anexo A: Esquema linear do Rio Piancó/Piranhas no modelo NAVMO para 55 sub-bacias.....	122
Anexo B: Arquivo <i>are</i> de entrada no modelo NAVMO para simulação com 55 sub-bacias.....	124
Anexo C: Hidrogramas da validação para diversas bacias para a discretização de 55 sub-bacias.....	128
Anexo D: Tabelas utilizadas no cálculo da evapotranspiração.....	142
Anexo E: Gráficos de volumes anuais e vazões máximas anuais nos cenários isolados e conjuntos para diversas bacias.....	143

LISTA DE TABELAS NOS CAPÍTULOS

Capítulo 1		
1.1	Classificações climáticas de terras áridas (% da área mundial) (Hearthcote, 1983, apud Agnew e Anderson, 1992)	2
Capítulo 2		
2.1	Classificação sobre a mudança e uso do solo (Tucci e Clark, 1997)	15
Capítulo 3		
3.1	Parâmetros calibráveis do modelo NAVMO e seus significados	31
Capítulo 4		
4.1	Dados climatológicos	37
4.2	Evaporação média mensal do tanque classe A do posto de São Gonçalo (1963-1967)	37
4.3	Postos fluviométricos	40
4.4	Postos pluviométricos selecionados	40
4.5	Sub-bacias onde existem postos fluviométricos para as duas discretizações	43
4.6	Classificação dos solos em função dos respectivos valores mínimos de capacidade de infiltração (Lencastre e Franco, 1984)	44
Capítulo 5		
5.1	Grupos de parâmetros do modelo NAVMO para a região de Piancó	48
5.2	Índices anuais de umidade	53
5.3	Totais anuais das precipitações e índices	54
5.4	Grupos de Parâmetros por faixas	55
5.5	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Piancó, usando diversas discretizações	58
5.6	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Emas	61
5.7	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Pau Ferrado	64
5.8	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Antenor Navarro	68
5.9	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Sítio Vassouras	70
5.10	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água	73
5.11	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Santa Rita do Curema	76
5.12	Coefficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de São José de Piranhas	79
Capítulo 6		
6.1	Altura de rugosidade para diferentes condições de superfície	86
6.2	Coefficientes de determinação entre a rugosidade e a precipitação	86

	simulada com diferentes métodos	
6.3	Evapotranspirações (mm/dia) calculada com base na variação da temperatura	90
6.4	Mudanças percentuais nos cenários isolados de uso do solo	91
6.5	Mudanças percentuais nos fatores climáticos para os cenários de clima	92
6.6	Valores CN para os cenários conjuntos de clima e uso do solo	93
6.7	Proporções dos tipos de uso aplicadas nas sub-bacias	94
6.8	Razão V/Vn^* para os cenários de precipitação	95
6.9	Razão Q/Qn^* para os cenários de precipitação	96
6.10	Razão V/Vn^* para os cenários de evaporação	98
6.11	Razão Q/Qn^* para os cenários de evaporação	99
6.12	Razão V/Vn^* para os cenários de uso do solo	99
6.13	Razão Q/Qn^* para os cenários de uso do solo	99
6.14	Comparação entre resultados de regiões do Estado da Paraíba	100
6.15	Razão V/Vn^* para os cenários de clima	102
6.16	Razão Q/Qn^* para os cenários de clima	102
6.17	Comparação de cenários isolados e de clima	103
6.18	Mudanças percentuais no escoamento em duas regiões	103
6.19	Razão V/Vn^* para os cenários conjuntos	105
6.20	Razão Q/Qn^* para os cenários conjuntos	105
ANEXOS		
D.1	Fator de correção F_c da fórmula de Thorntwaite (Tucci, 1998)	142
D.2	Proporção média diária (p) de horas luz para diferentes latitudes (Tucci, 1998)	142

LISTA DE FIGURAS NOS CAPÍTULOS

Capítulo 1		
1.1	Variações nas chuvas anuais (Agnew e Anderson 1992)	2
Capítulo 2		
2.1	Ciclo hidrológico (Silveira, 1993)	5
2.2	Efeito da variabilidade do clima para vários cenários em uma bacia do Sahel (Adaptado de Vieux et al., 1998)	9
2.3	Mudança no escoamento no Rio Nzoia, Kenya, resultante da precipitação e evapotranspiração (Adaptado de Kite e Waititu, 1981, apud Kite, 1993)	10
Capítulo 3		
3.1	Fluxograma do modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)	22
3.2	Representação do processo de precipitação-vazão-evaporação no modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)	23
3.3	Seção transversal do rio (Kleeberg et al., 1989)	30
Capítulo 4		
4.1	Bacia Hidrográfica do Alto Piranhas (Figueiredo et al., 1999).	34
4.2	Precipitação média mensal na região do Alto Piranhas	36
4.3	Evaporação média mensal do posto de São Gonçalo (1963-1967)	38
4.4	Temperatura média mensal em São Gonçalo (1963-1967)	38
4.5	Umidade relativa do ar em São Gonçalo (1911-1980)	38
4.6	Esquema linear do Rio Piancó /Piranhas para 33 sub-bacias	42
Capítulo 5		
5.1	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Piancó: (a) Volumes anuais com parâmetros médios (b) Vazões máximas anuais com parâmetros médios (c) Vazões máximas anuais com parâmetros anuais	57
5.2	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Piancó subdividida em 26 sub-bacias no ano de 1971	59
5.3	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Piancó subdividida em 7 sub-bacias no ano de 1971	59
5.4	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Emas: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	61
5.5	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Emas no ano de 1964	62
5.6	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Pau Ferrado: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	64
5.7	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 44 sub-bacias no ano de 1968	65
5.8	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 22 sub-bacias no ano de 1968	65
5.9	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Aguiar: (a)1969 e (b)1970	66

5.10	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Antenor Navarro: (a) volumes anuais (b) vazões máximas- anuais	67
5.11	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Antenor Navarro no ano de 1967	68
5.12	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Sítio Vassouras: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	70
5.13	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 55 sub-bacias no ano de 1967	71
5.14	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 33 sub-bacias no ano de 1967	71
5.15	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	73
5.16	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água subdividida em 42 sub-bacias no ano de 1939	74
5.17	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água subdividida em 20 sub-bacias no ano de 1939	74
5.18	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Santa Rita do Curema (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	76
5.19	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 36 sub-bacias no ano de 1923	77
5.20	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 15 sub-bacias no ano de 1923	77
5.21	Comparação entre valores simulados e observados na bacia de São José de Piranhas (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	78
5.22	Hidrogramas simulado e observado na bacia de São José de Piranhas no ano de 1936	79
 Capítulo 6		
6.1	Esquema para avaliação de impactos de fatores de clima e uso do solo sobre recursos hídricos (Arnell, 1996 apud Azevedo, 1999)	83
6.2	Correlação entre radiação líquida e temperatura	89
6.3	Evapotranspiração calculada pelos diferentes métodos	89
6.4	Correlação entre precipitação e evaporação	91
6.5	Correlação entre evaporação e precipitação (artifício técnico)	92
6.6	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de precipitação para a bacia de Piancó: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	96
6.7	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de evaporação para a bacia de Santa Rita do Curema (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	98
6.8	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de uso do solo para a bacia de Pau Ferrado (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	101
6.9	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima para a bacia de Emas (a) volumes anuais (b)	104

	vazões máximas anuais	
6.10	Hidrogramas observado e simulado do cenário 1 (conjuntos de clima e uso do solo T-1,0°C, E-9%, P+73% e CN-25%) na bacia de Emas em 1965	106
6.11	Hidrogramas observado e simulado do cenário 6 (conjuntos de de clima e uso do solo T+1,0°C, E+9%E, P-45% e CN+23%) na bacia de Emas em 1965	106
6.12	Relação entre V/V_n médio regional e os cenários isolados de precipitação	107
6.13	Relação entre Q/Q_n médio regional e os cenários isolados de precipitação	108
6.14	Relação entre V/V_n médio regional e os cenários isolados de evaporação	108
6.15	Relação entre Q/Q_n médio regional e os cenários isolados de evaporação	108
6.16	Relação entre V/V_n médio regional e os cenários isolados de uso do solo	109
6.17	Relação entre Q/Q_n médio regional e os cenários isolados de uso do solo	109
6.18	Relação entre V/V_n médio regional e os cenários conjuntos de clima	109
6.19	Relação entre Q/Q_n médio regional e os cenários conjuntos de clima	110
6.20	Relação entre V/V_n médio regional e os cenários conjuntos de clima e uso do solo	110
6.21	Relação entre Q/Q_n médio regional e os cenários conjuntos de clima e uso do solo	110

ANEXOS

A.1	Esquema linear do rio Piancó/Piranhas com 55 Sub-bacias	122
B.1	Arquivo <i>are</i> do modelo NAVMO	124
C.1	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Piancó subdividida em 26 sub-bacias (a) 1964, (b) 1967e (c) 1968	128
C.2	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Piancó subdividida em 26 sub-bacias (a) 1973, (b) 1977e (c) 1979	129
C.3	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Emas (a)1965, (b) 1967e (c)1968	130
C.4	Hidrogramas simulado e observado na bacia de Emas (a)1969, (b) 1970 e (c)1971	131
C.5	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 44 sub-bacias (a)1967, (b) 1971 e (c)1973	132
C.6	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 44 sub-bacias (a)1974 e (b) 1975	133
C.7	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 55 sub-bacias (a)1963, (b) 1964 e (c)1968	134
C.8	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 55 sub-bacias (a)1971, (b) 1975 e (c)1978	135
C.9	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Boqueirão de	136

	Mãe-d'água subdividida em 42 sub-bacias: (a) 1934, (b)1935 e (c)1937	
C.10	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água subdividida em 42 sub-bacias: (a) 1940, (b)1945 e (c)1946	137
C.11	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 36 sub-bacias: (a)1922, (b) 1923e (c)1926	138
C.12	Hidrogramas observado e simulado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 36 sub-bacias: (a)1929, (b) 1934e (c)1938	139
C.13	Hidrogramas simulado e observado na bacia de São José de Piranhas (a)1922, (b) 1924 e (c)1926	140
C.14	Hidrogramas simulado e observado na bacia São José de Piranhas (a)1929, (b) 1934 e (c)1935	141
E.1	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de precipitação para a bacia de Boqueirão de Mãe-d'água: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	143
E.2	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de precipitação para a bacia de São José de Piranhas: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	144
E.3	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de evaporação para a bacia de Piancó: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	145
E.4	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de evaporação para a bacia de Boqueirão de Mãe-d'água: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	146
E.5	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de uso do solo para a bacia de Santa Rita do Curema: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	147
E.6	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de uso do solo para a bacia de Sítio Vassouras (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	148
E.7	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima para a bacia de Boqueirão de Mãe-d'água (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	149
E.8	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima para a bacia de Pau Ferrado (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	150
E.9	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima e uso do solo para a bacia de São José de Piranhas (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	151
E.10	Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima e uso do solo para a bacia de Sítio Vassouras (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais	152

1 INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil e diversas outras localidades do mundo encontram-se num grupo de regiões que possuem profundos problemas relativos à água. São regiões conhecidas pela semi-aridez, pela degradação do solo e marcadas pela grande variabilidade de fatores climáticos, com regime pluviométrico geralmente concentrado (3 a 4 meses) e mal distribuído no espaço. Essas características da distribuição espacial e temporal das chuvas são típicas das regiões semi-áridas do planeta.

A aridez é caracterizada pelo baixo teor de umidade dos solos, decorrente de baixos índices pluviométricos, alta evaporação, por uma cobertura vegetal pobre e por solos rasos geralmente sujeitos à erosão e salinização (Agnew e Anderson, 1992). A escassez de chuvas e sua variabilidade no espaço, associadas a uma grande taxa de evaporação, faz surgir a grande problemática dessas regiões, a seca, que aflige grandes áreas no mundo (Tabela 1.1).

As maiores variabilidades na precipitação encontram-se nas regiões semi-áridas (Figura 1.1) que representam entre 13 e 16% da superfície da Terra e são ocupadas por 10% da população mundial (Ribot et al., 1996). Atingem diversas nações e seus efeitos se agravam nos países menos desenvolvidos, onde as populações atingidas sofrem em decorrência das freqüentes secas que reduzem o aporte de água aos mananciais.

Os recursos naturais das zonas semi-áridas, como solos, vegetação e vida animal, tendem a ser escassos e são facilmente prejudicados pelas modificações nos padrões das precipitações e pela ação humana (Ribot et al., 1996). São regiões altamente vulneráveis às variabilidades climáticas e à degradação do solo. Ressalta-se portanto, a importância de estudos que avaliem os efeitos de fatores climáticos e do uso do solo que auxiliem na previsão e manejo dos recursos de água e solo, voltados para a minimização das conseqüências causadas. Mudanças climáticas de longo prazo, referentes às tendências seculares (Williams e Balling, 1996), também afetam regiões vulneráveis. No entanto, as

variabilidades climáticas de curto prazo, interanuais (Galvão, 1999) resultam em modificações imediatas no escoamento produzido nas bacias hidrográficas. Em geral, a influência observada no escoamento é decorrente das variações na evapotranspiração, na precipitação e do uso do solo.

Tabela 1.1 – Classificações climáticas de terras áridas (% da área mundial)

	Köppen	Thornthwaite	Meigs (1953)	UNESCO (1977)
Hiper-árida	12.0	15.33	20.5	19.5
Semi-árida	14.3	15.24	15.8	13.3
Total	26.3	30.57	36.3	32.8

Fonte: Heathcote, 1983, apud Agnew e Anderson, 1992.

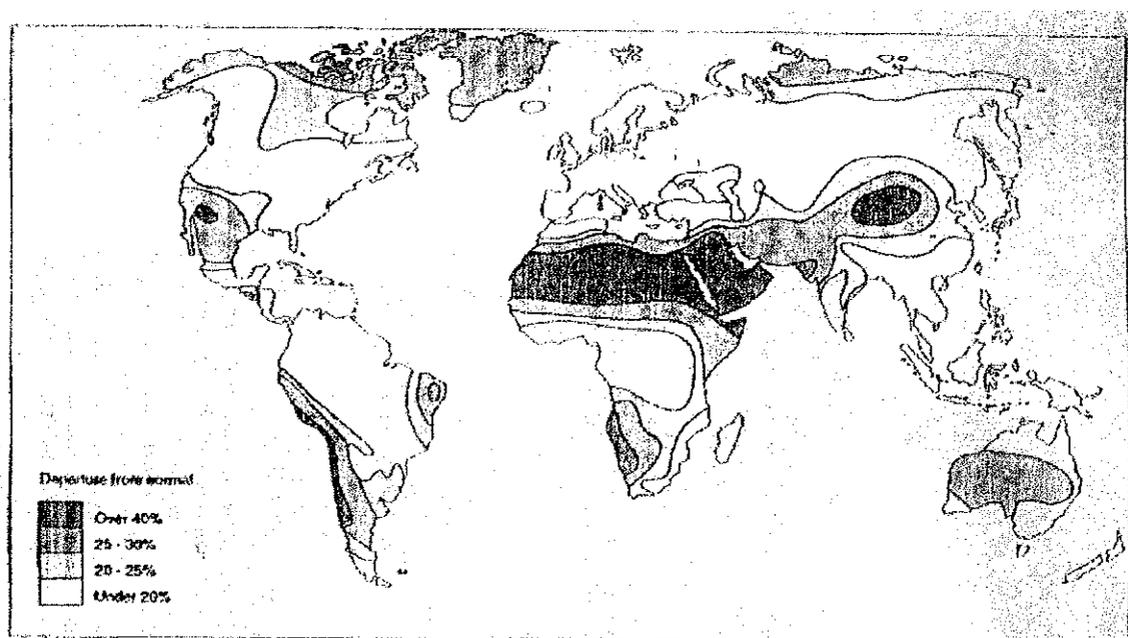


Figura 1.1 – Variações nas chuvas anuais (Agnew e Anderson, 1992)

Estudos de estimativa do escoamento em bacias hidrográficas, usando modelos matemáticos empíricos, conceituais e, em alguns casos, distribuídos, têm sido realizados em várias regiões semi-áridas (Medeiros, 1994; Bathurst et al., 1996; Vieux et al., 1998). No entanto, a maioria dos estudos ou são limitados a análises de efeitos de fatores isolados ou as metodologias empregadas não são adequadas para uma análise. Uma avaliação mais abrangente, que considere as variabilidades climáticas e as condições do uso do solo, em conjunto, é de grande utilidade. Com base na aplicação de um modelo detalhado pode-se fazer uma avaliação dos efeitos da variabilidade da precipitação,

evaporação e uso do solo sobre o escoamento. Para tanto, é necessário que o modelo hidrológico seja calibrado e validado de modo abrangente para que se possa simular os efeitos causados pelas variáveis envolvidas.

Neste estudo, foi escolhida uma região semi-árida do Estado da Paraíba para uma avaliação dos efeitos de fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento, através da aplicação do modelo distribuído NAVMO (Kleeberg et al., 1989), que permite considerar as variabilidades da evaporação, da precipitação e do sistema da bacia (como o uso do solo). O modelo foi inicialmente testado e validado por Lopes (1994) para a bacia do Rio Piancó, limitada pela estação Piancó (4.550 km²) e é a base para o presente estudo. Nesta pesquisa o modelo foi validado para a região do Alto Piranhas, com grande destaque econômico e político no Estado, abrangendo uma área de 14.850 km² e várias bacias de importância, servindo de base para a avaliação dos efeitos de fatores climáticos e do uso do solo, tanto isoladamente quanto em conjunto, sobre o escoamento simulado nas bacias da região.

Apresenta-se nessa dissertação uma revisão de literatura no capítulo 2, a descrição do modelo no capítulo 3, a área de estudo e a base de dados no capítulo 4 e a validação do modelo para a região do estudo como também suas análises no capítulo 5. Os efeitos da variabilidade da precipitação, evaporação e do uso do solo são analisados no capítulo 6 através da aplicação do modelo validado para cenários tanto de fatores isolados quanto em conjunto. As conclusões e recomendações são apresentadas no capítulo 7.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Ciclo Hidrológico

Ao fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionada fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre, dá-se o nome de ciclo hidrológico (Silveira, 1993). O ciclo hidrológico (Figura 2.1) é a razão de estudo da Hidrologia e o início da compreensão de todos os fenômenos ligados a água que ocorrem na Terra como também seus resultados. Embora o conceito de ciclo hidrológico seja simples, o fenômeno é muito complexo. É composto de muitos ciclos interrelacionados de extensão continental, regional e local (Chow et al., 1988).

O ar, o solo e água fazem parte do meio ambiente como um todo e são vitais para a vida humana, são interligados por processos interativos e efeitos sobre qualquer um deles se propaga pelos outros, sendo alguns dos efeitos desconhecidos e outros inquantificáveis (Singh, 1995). A interferência nestes elementos é sentida diretamente no ciclo hidrológico. Qualquer tipo de mudança que interfira no ciclo hidrológico deve ser estudada, pois afeta a circulação da água no sistema atmosfera-terra e, assim, a quantidade de água que, em algumas regiões, vem diminuindo bastante devido tanto a fatores naturais quanto antropogênicos, resultando na escassez de água.

O ciclo hidrológico pode ser entendido como um sistema, sendo um sistema um conjunto de partes conectadas de um todo (Chow et al., 1988), que são os processos hidrológicos (precipitação, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração e escoamento). No sentido atmosfera-terra ocorre a precipitação, que é a entrada de água no sistema terrestre, e a interceptação vegetal. No sentido terra-atmosfera ocorrem a evaporação e transpiração. Durante a circulação da água na Terra, ocorrem a infiltração, o escoamento superficial, o escoamento subsuperficial e o escoamento de base.

O escoamento é o resultado da interação dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica e pode ser considerado como um produto do ciclo hidrológico. É influenciado por dois grupos de fatores principais: fatores climáticos, que incluem a precipitação e a evaporação e fatores fisiográficos, como o solo e seu uso (Chow, 1964). O homem procura, então, ferramentas que lhe permitam quantificar ou simular este sistema para que possa entender e/ou manipular situações e assim executar obras ou fazer previsões, no intuito de definir um manejo adequado dos recursos hídricos. Para tanto, usa ferramentas poderosas que são os modelos hidrológicos de transformação da chuva em escoamento, no qual o sistema de estudo é a bacia hidrográfica delimitada por divisores topográficos e com seção de saída definida.

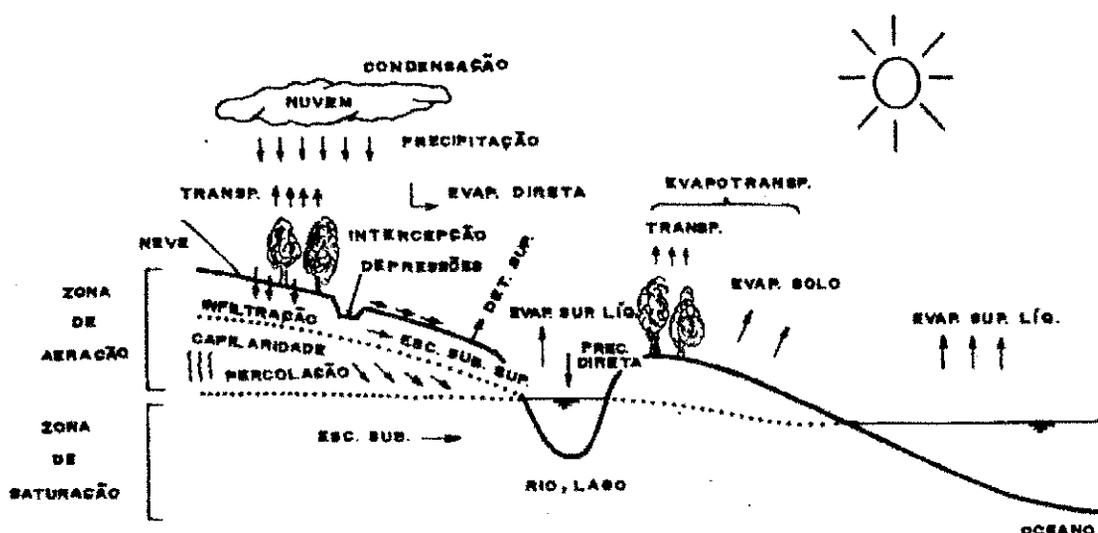


Figura 2.1 – Ciclo hidrológico (Silveira, 1993)

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). Através de um modelo pode-se simular situações que ainda não aconteceram na bacia como o aumento ou diminuição de precipitação e modificação no uso do solo, entre outros, permitindo uma avaliação do comportamento da bacia hidrográfica frente às modificações no meio ambiente.

Um modelo pode ser físico ou matemático. O modelo físico representa o sistema por um protótipo em menor escala, que pode ser uma barragem em escala

reduzida. Modelo matemático é aquele que representa o sistema por um conjunto de equações matemáticas e argumentos lógicos. Isto permite uma grande facilidade na modificação destes argumentos para se obter diferentes respostas para diferentes condições climáticas ou do sistema da bacia. Programas computacionais são codificados conforme a concepção do modelo, permitindo obter uma saída a partir de dados de entrada.

Com base em modificações de fatores climáticos ou da bacia, pode-se avaliar como os processos inerentes ao sistema interagem e qual o efeito produzido no escoamento. Alguns modelos matemáticos são bastante simples e desconsideram o que realmente ocorre dentro do sistema, enquanto outros consideram os diversos subprocessos presentes. Podemos classificar estes modelos de acordo com o esquema abaixo:

a) Modelos Determinísticos - aqueles que utilizam equações para representar os processos hidrológicos. Segundo Silva e Ewen (2000) estes tipos de modelo são ferramentas valiosas na simulação do escoamento para análise dos possíveis efeitos causados por alterações climáticas a nível de bacia hidrográfica, pela forma sistematizada e explícita com a qual representam o ciclo hidrológico.

a.1) Empíricos - usam uma função matemática com base na entrada e saída sem se preocupar com os processos internos, chamados “modelos caixas-pretas”;

a.1.1) Empíricos hidrológicos – usam uma função linear que associa a vazão à precipitação;

a.2) Conceituais – usam o princípio da conservação da massa aplicado à reservatórios do solo que representam o sistema da bacia.

a.3) Concentrados – consideram condições médias (parâmetros e variáveis) sobre toda a bacia.

a.4) Distribuídos – podem considerar as variabilidades espaciais dos processos, aspectos importantes na geração do escoamento, representando melhor o sistema da bacia através da captação das heterogeneidades da mesma. Singh (1995) destaca a utilização de modelos distribuídos, em vez de modelos concentrados, já que os concentrados desconsideram a variabilidade espacial dos processos. Como um dos elementos principais nas bacias hidrográficas é a heterogeneidade das suas características como, por exemplo, as manchas de solo na sua extensão, deve-se buscar um modelo que capte estas características. O autor afirma ainda que principais fontes que traçam a heterogeneidade são o tempo, o clima, a topografia, os solos e a geologia;

a.5) Distribuídos de base física – consideram equações diferenciais parciais da conservação da massa, energia e momento que representam os processos hidrológicos fisicamente. Os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da realidade física da bacia hidrográfica (Tucci, 1998). Silva e Ewen (2000) apontam que embora as parametrizações físicas sejam mais realísticas, são de aplicação mais complexa e computacionalmente mais onerosas que as parametrizações conceituais.

b) Modelos Estatísticos – são considerados também como empíricos, porém usam uma abordagem estatística; podem ser de correlação e regressão, probabilísticos e estocásticos.

O modelo deve ser selecionado de acordo com o tipo de estudo a ser realizado e suas qualificações devem interagir com a necessidade do modelador. O importante é que bons resultados sejam encontrados para a região estudada. Por isso, na aplicação do modelo devem ser seguidas certas etapas como calibração e verificação do mesmo para que seja comprovada sua representatividade. Estas etapas serão descritas detalhadamente no capítulo 5.

No presente trabalho será utilizado, para a simulação do escoamento, um modelo de precipitação-vazão-evaporação, o NAVMO (Kleeberg et al., 1989), que é um modelo diário, conceitual, determinístico que simula o comportamento hidrológico de uma bacia a longo termo (Lopes, 1994). É um modelo distribuído, podendo a região estudada ser dividida em sub-bacias. A importância deste tipo de modelo é que ele melhor representa as variabilidades da bacia, por ser distribuído, o que permite a análise do escoamento e dos efeitos de fatores climáticos e uso do solo.

Aplicações do modelo encontram-se na literatura. Lopes (1994), calibrou e validou o modelo para avaliação do escoamento na bacia do rio Piancó no sudoeste do estado da Paraíba, encontrando bons resultados. Em 1999, Figueiredo et al. avaliaram a influência da discretização da bacia no escoamento simulado pelo modelo na mesma região (bacia do rio Piancó), concluindo que a discretização não afeta as características do hidrograma. O modelo também foi utilizado para avaliação dos impactos do uso do solo e da influência dos açudes sobre o escoamento para o açude Sumé (Figueiredo e Srinivasan, 1999).

2.3 Estudos Sobre Impactos do Clima e Uso do Solo na Hidrologia

Diversos estudos já foram realizados incluindo cenários de mudança climática e de uso do solo. Muitos dentre estes buscam discernir a influência destas mudanças sobre o escoamento, para se avaliar a quantidade de água disponível na bacia depois de ocorridas tais mudanças. Segundo Askew (1987) alguns dos mais importantes, provavelmente o mais importante impacto, são as variações no clima e as mudanças decorrentes no ciclo hidrológico, influenciando diretamente na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica.

Para tais avaliações de impactos, alguns estudos buscam apenas correlacionar as mudanças no escoamento com as variabilidades climáticas (Sichingabula, 1998, Moreda e Bauwens, 1998), outros são mais profundos e analisam as mudanças, sejam elas naturais ou antropogênicas, através de um modelo hidrológico de simulação. Aqui serão comentados alguns destes estudos existentes na literatura.

2.3.1 Impactos do Clima

Na escala da bacia hidrográfica, onde os efeitos de variações climáticas são sentidos na produção do escoamento, pode-se utilizar modelos que considerem a variabilidade climática e da bacia na simulação do escoamento. Segundo Viner e Hulme (1997) para avaliar os impactos das mudanças climáticas, existe uma necessidade clara para representações consistentes de futuras mudanças no clima chamados de “cenários de mudanças climáticas”. É através destes cenários que podem ser feitas as análises sobre os sistemas envolvidos, seja em nível global ou na escala da bacia.

Em zonas semi-áridas estudos envolvendo cenários futuros são de grande importância devido à possibilidade de inserir as variabilidades dos fatores climáticos como a evaporação e precipitação e também a degradação, devido a ação humana, como formas de obtenção de previsão através destes cenários. Pois é sob a conjuntura de variabilidade climática e mau uso da terra que o subdesenvolvimento e a calamidade social são mais comuns de acontecer (Ribot et al., 1996), resultando no flagelo devido à redução da oferta de água.

Um país que sofre com escassez de água nas regiões semi-áridas presentes em sua extensão, é a África. Aí já foram realizados diversos estudos, alguns mostrando os impactos sobre os recursos hídricos no passado (Grasse, 1998) ou comprovando a

variabilidade interanual e interdecadal da precipitação (Micholson, 1998). Outro artigo, de Sichingabula (1998) traz uma análise estatística associando a diminuição de precipitação na Zâmbia, depois de 1975, com aquecimento global acelerado relacionado com atividades antropogênicas (Munn e Machta, 1978; Strong, 1989; apud Sichingabula, 1998).

Vieux et al. (1998) pesquisando impactos hidrológicos na Nigéria, causados pela variabilidade do clima, utilizaram um modelo físico distribuído para avaliar a sensibilidade de um sistema hidrológico a extremos climáticos representados por quatro cenários de chuvas das estações chuvosas do período 1992 a 1995, para os quais foi estimada a redução do escoamento em função da redução da precipitação. O período analisado (1992-1995) está inserido em uma época seca no Sahel, tendo os resultados mostrado grande sensibilidade à redução no nível de precipitação (Figura 2.2). Segundo os autores, os resultados evidenciam a variabilidade da resposta hidrológica em face às variabilidades climáticas regionais e à importância de uma caracterização detalhada do processo hidrológico transformando chuva em escoamento na escala da bacia.

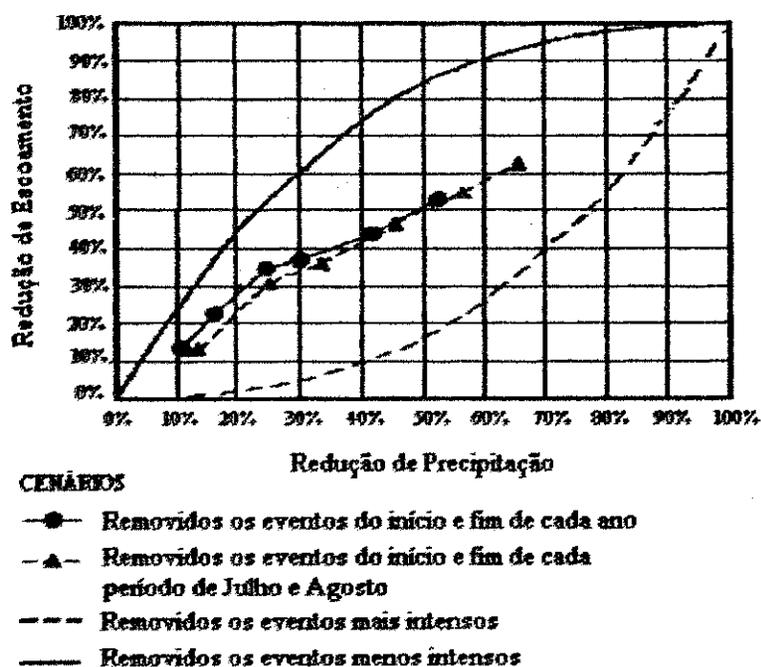


Figura 2.2 – Efeito da variabilidade do clima para vários cenários em uma bacia do Sahel (Adaptado de Vieux et al, 1998)

Um estudo semelhante, conduzido por Kite e Waititu (1981), apud Kite, 1993), evidencia os efeitos da redução no nível de precipitação sobre o escoamento (Figura

2.3). Embora os cenários gerados conforme esta figura mostrem situações não reais como, por exemplo, para o aumento da precipitação um aumento na evaporação, os resultados evidenciam o efeito da variabilidade do clima sobre o escoamento conforme mostrado na Figura 2.3. Deve-se, contudo, buscar a máxima semelhança com a realidade através, por exemplo, do efeito conjunto do aumento da precipitação e redução da evaporação e sua associação com o uso do solo.

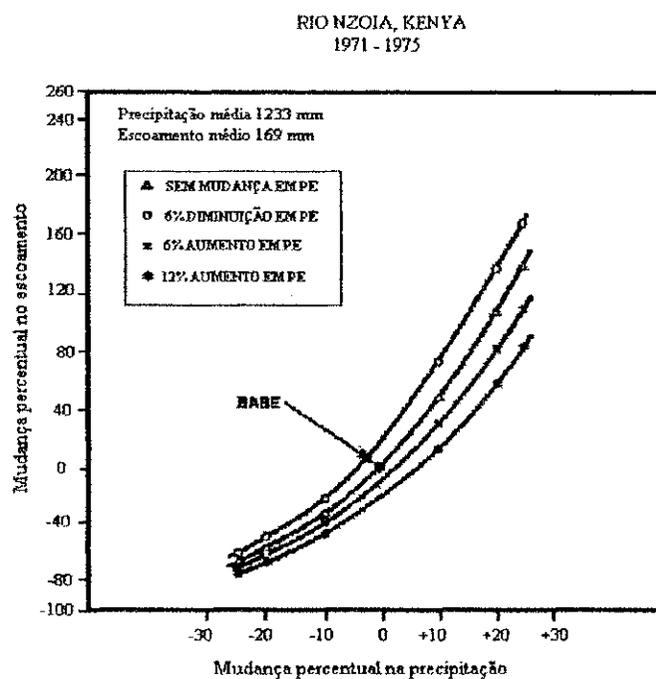


Figura 2.3 - Mudança no escoamento no Rio Nzoia, Kenya, resultante da precipitação e evapotranspiração (Adaptado de Kite e Waititu, 1981 apud Kite, 1993)

Na Austrália, Chiew et al. (1995), avaliaram impactos de mudanças do clima no escoamento em 28 bacias, simulando o escoamento através de um modelo hidrológico diário de chuva-vazão. Usou dois métodos diferentes os cenários de mudança de clima: o primeiro, aplicou mudanças arbitrárias na temperatura (aumentada de 0°C, 2°C e 4°C) e na precipitação (escalonada por 0%, ±10%, ±20%, ±30%, e ±40%), num total de 27 combinações para cada sub-bacia, para estudar a sensibilidade do escoamento e umidade do solo a mudanças potenciais no clima e o segundo, analisou os resultados de experimentos de efeito estufa de 5 modelos de circulação global (MCGs) para estimar um intervalo de mudanças plausíveis no escoamento e na umidade do solo nos anos de 2030 e 2070. Concluíram que as mudanças na precipitação são acentuadas no escoamento para bacias mais secas e que teve pouco efeito na umidade do solo de bacias úmidas. Ainda,

comparada à precipitação, a temperatura sozinha teve impactos pequenos nos fatores analisados. Enfatizam duas limitações principais no estudo: uma que a abordagem ignora as mudanças na distribuição e frequência dos eventos, e outra, que o uso dos mesmos parâmetros otimizados adaptados aos dados históricos assumem que sob novos cenários as bacias continuarão a se comportar como elas são no presente. A problemática gerada pela aplicação de cenários arbitrários que relacionam precipitação e temperatura, é que, alguns destes cenários (como os que estão dentro das 27 combinações determinadas por Chiew et al., 1995) podem não representar a realidade da natureza existente.

Medeiros (1994) avaliou os impactos de mudança climática em uma bacia do semi-árido nordestino, localizada no estado da Bahia, a bacia do rio Paraguaçu, mas não utilizou valores arbitrários. Para tanto, ela usou informações oriundas de dois MCGs como entrada de um modelo hidrológico de chuva-vazão. Sua metodologia pode ser dividida em três passos básicos: 1. Escolher precipitações e modelos de chuva-vazão que possam descrever os principais regimes hidrológicos de uma bacia; 2. Construção de cenários da potencial mudança na evapotranspiração e na precipitação, combinando previsões de longa duração de MCGs com regimes hidrológicos locais; 3. Analisar a sensibilidade dos recursos hídricos a potencial mudança climática usando modelos do passo 1.

O estudo englobou dois MCGs cujos resultados foram divididos em dois períodos de dez anos, o de controle de $1xCO_2$ de nível de concentração atmosférica (323 ppm) e o perturbado de $2xCO_2$ (646 ppm). Os cenários de mudança climática foram definidos combinando as saídas destes MCGs (temperatura e precipitação) com a temperatura local e variabilidade da precipitação. As temperaturas foram aumentadas em uma quantidade igual a diferença entre a simulação para $2xCO_2$ e a correspondente temperatura média mensal para a condição corrente, em um mesmo modelo de circulação global (MGC). A precipitação foi ajustada por um fator igual a razão entre a média mensal de um MCG para $2xCO_2$ e a correspondente média mensal para o mesmo MCG para condições correntes. A autora encontrou que os resultados das simulações para a bacia mostraram que uma redução na precipitação associada com aumento de temperatura pode ter um impacto significativo no balanço hídrico. Nos dois cenários reduções significativas no escoamento e na umidade do solo foram observadas especialmente no inverno e na primavera e que a temperatura sozinha pode não influenciar significativamente o balanço hídrico.

Azevedo (1999), também no Nordeste do Brasil, em uma sub-bacia do rio São Francisco aplicou um modelo hidrológico empírico-estatístico, especificamente desenvolvido para a bacia, relacionando vazão mensal com temperatura e precipitação. O autor selecionou três seqüências de dados com extensão de trinta anos, cada, para representar os cenários de mudança climática. A primeira seqüência de Maio de 1952 a Abril de 1982, representando o clima atual e as outras duas, de Maio de 2002 a Abril de 2032 e de Maio de 2052 a Abril de 2082, representando os cenários futuros. As variações de temperatura e de precipitação foram simuladas por um MCG que, no entanto, não indicou uma tendência única de variação de precipitação dentro da bacia do Rio São Francisco. Encontraram-se variações de temperatura de 0% a +5% e de precipitação de -20% a +20% (Azevedo, 1999). Estes valores foram posteriormente aplicados em fórmulas para a geração de séries sintéticas mensais, que finalmente foram aplicadas no modelo. As simulações indicaram uma diminuição de até 44% na vazão média anual, dependendo do aumento de temperatura aplicada.

Seguindo esta mesma linha, Tucci e Damiani (1994) realizaram um estudo na bacia do Rio Uruguai utilizando as previsões de três MCGs juntamente com um modelo hidrológico de precipitação x vazão. Eles geraram dois cenários típicos e estimaram os principais impactos sobre os usos da água no Rio Uruguai. Os MCGs aplicados geraram resultados contraditórios quanto à precipitação. Dependendo do modelo, redução de 2 a 17% e aumento de 4 a 19% na precipitação; já quanto a temperatura os MCGs apresentaram aumentos de 3,6 a 6° C. Foi admitido que a distribuição temporal dos dias chuvosos é mantida numa proporção linear com as ocorrências do passado, sendo esta condição possivelmente irreal, entretanto, os autores afirmam que estes erros podem ser filtrados a nível anual ou mensal. As precipitações previstas e a evapotranspiração potencial calculada com base na temperatura estimada, foram utilizadas como entrada no modelo hidrológico utilizado. Os resultados das vazões simuladas se mostraram conflitantes de tendências quanto ao impacto, existindo aumentos de 4,8 a 32,5% e reduções da ordem de 2,4 a 14,14% no escoamento. Os autores afirmam ainda que fatores que interagem com o clima e com sua previsão como a cobertura da bacia, solo e balanço de temperatura, foram levados em conta de maneira simplificada pelos MCGs e em uma discretização global. Desta maneira, características importantes para o sistema da bacia hidrográfica, foram consideradas de maneira simplista influenciando diretamente o escoamento simulado.

Muitos estudos têm sido realizados no sentido de analisar os efeitos do clima utilizando MCGs (Kite, 1993; Bogardi et al., 1994; Bathurst et al., 1996; Conway et al., 1996; Bardorssy e Mierlo, 2000) para simular cenários da atmosfera os quais servem como dados de entrada de modelos de simulação do escoamento na escala da bacia. São estudos que, em geral, fazem previsões de alterações no escoamento de longo prazo de acordo com as mudanças climáticas neles inserida (também de longo prazo), não avaliando impactos causados pelas variabilidades interanuais nos escoamentos das bacias hidrográficas. Outra limitação destes estudos reside no fato da pouca resolução dos MCGs na escala da bacia e que muitas vezes o MCG não concorda na direção da mudança da variação da precipitação afetando os cenários gerados (Chiew et al., 1995, Azevedo, 1999). Existem estudos que simulam estes efeitos interanuais, no entanto, alteram simplesmente os níveis de variáveis climáticas como a temperatura, evapotranspiração e precipitação (Kite e Waititu, 1981 e Némec e Schaake, 1982, apud Kite, 1993 e Vieux et al, 1998), enquanto que deveriam inserir alterações ligadas com a realidade física da bacia.

Analisando dados do Oeste da África entre 1901 e 1985, Ojo (1987) diz que nenhum padrão regular pôde ser observado nas tendências, periodicidades e persistências das conseqüências hidrológicas das variações das chuvas para permitir a predicabilidade dessas conseqüências. Afirma ainda que para alguns cientistas as secas do Sahel são parte do clima normal, ou da variabilidade interanual, mais do que indicadores de mudanças climáticas de longo prazo.

Para uma dada variabilidade na precipitação, a variabilidade no escoamento é bem marcante, em qualquer região e clima, mesmo em áreas com características climáticas homogêneas como nas zonas úmidas. Nas regiões semi-áridas, o principal fator determinante desta variabilidade no escoamento é a variabilidade na precipitação que, em geral, apresenta alta intensidade, juntamente com a alta taxa de demanda evaporativa (McMahon et al., 1987).

Askew (1987) fez colocações do impacto do clima em contextos mais amplos, envolvendo a hidrologia, sistemas de recursos hídricos e sociedade. Segundo o autor, o ciclo hidrológico é parte integral do sistema climático e os sistemas de recursos hídricos representam a intervenção do homem e o uso do solo na bacia hidrográfica. Ele enfatiza, concluindo, em se pensar sempre em termos da previsão da variabilidade climática sobre esses componentes.

Enriquecimento seria dado a estes cenários se neles fossem incluídas alterações de uso do solo, devido também às mesmas alterações antrópicas que causaram o aumento da temperatura.

2.3.2 Impactos do Uso do Solo

O desenvolvimento humano, criando áreas para culturas, pastagens e açudes, faz com que a vegetação nativa venha sendo destruída e o solo empobrecido devido às grandes e intensificadas atividades nas terras. Estas atividades trazem um outro tipo de impacto que afetam o ciclo hidrológico. Em 1977, Bruce e Clark enumeraram algumas influências causadas pela mudança na vegetação no ciclo hidrológico: na interceptação da precipitação, na transpiração da água do solo, nos padrões de infiltração pelas aberturas de canais no solo originadas do desenvolvimento das raízes e efeitos nas características hidráulicas no escoamento subsuperficial e escoamento de superfície.

Assim, o homem interfere no meio em que vive procurando as melhores condições para o seu sustento modificando, entretanto, as condições do ambiente em sua volta e criando a necessidade da avaliação da sua própria interferência. Quantificar a influência sobre o escoamento é de interesse geral visto que a mudança no uso do solo é uma constante em nossos dias e, em terras áridas, onde a água é um recurso escasso, o antropismo é presente e aumenta a cada dia, piorando a situação para o armazenamento da água. Para isso, existem estudos que consideram as mudanças do uso do solo isoladamente de outros fatores, utilizando dados reais de mudanças de uso do solo, ou ainda utilizando cenários hipotéticos ou arbitrários.

Uma das atividades de maior importância na região semi-árida é a agricultura que pressupõe a retirada da vegetação e sua substituição por cultivos que podem facilitar ou dificultar o processo de infiltração nestas áreas. Estas alterações feitas pelo homem possuem fins específicos e por isso podem ser classificadas de acordo com a Tabela 2.1. O método empregado para a retirada da vegetação influencia as condições de escoamento futuro na bacia (Tucci e Clarke, 1997), devido, por exemplo ao grau de compactação do solo através de um desmatamento mecanizado. Entretanto, a maioria dos estudos hidrológicos não busca esta correlação, mas sim a quantificação do principal recurso de interesse humano, que é a água.

Para avaliar estes impactos, existem estudos que englobam uma só bacia, mudando suas condições de cobertura vegetal, e estudos em bacias semelhantes, com

características similares, mas com coberturas diferentes permitindo a análise da influência sobre o escoamento (McCulloch e Robinson, 1993, Tucci e Clarke, 1997). Calder et al. (1995), investigaram os impactos da mudança de floresta natural para terra agricultável, na África, em apenas uma bacia. Para tanto, analisaram os níveis de um lago da região. De posse de dados observados em períodos diferentes, inseriram no modelo a cobertura vegetal prevista, e, em certo período encontraram que a mudança encontrada no escoamento era realmente compatível com a mudança da cobertura vegetal prevista.

Já Lørup et al. (1998), em região semi-árida, avaliaram efeitos de uso do solo pela combinação de testes estatísticos e por modelagem hidrológica. Buscaram distinguir efeitos de variabilidade climática e efeitos de mudança de uso do solo através de metodologia empregada por Refsgaard et al. (1989) apud Lørup et al. (1998). De posse dos resultados concluíram que a maioria dos efeitos de uso do solo sobre o escoamento está ligada a um aumento na densidade populacional da bacia, comprovando que as alterações do escoamento estão realmente ligadas à mudança no uso do solo já que o crescimento populacional gerou uma intensificação das atividades nas terras, existindo influência discernível do uso do solo independentemente da variabilidade climática.

Tabela 2.1 - Classificação sobre a mudança e uso do solo

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

Fonte: Tucci e Clark, 1997

Oliveira e Medeiros (1999) utilizaram cenários construídos a partir de dados reais para avaliar as alterações no uso do solo e suas implicações na quantidade de água

produzida e nas características hidrossedimentológicas de uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. A ferramenta utilizada foi um modelo físico, do tipo distribuído, no qual a operação de propagação de vazão líquida no canal é realizada com um passo de tempo diário e não requer cálculos iterativos. Seis cenários foram desenvolvidos, assim descritos: uso do solo na bacia antes da colonização considerando a vegetação nativa (Mata Atlântica), uso do solo em um ano específico (1983), uso do solo em um ano posterior a esse primeiro (1996), uso do solo neste mesmo ano (1996) com a interferência de uma represa, em seguida, com interferência de duas represas e, por último, com influência de cinco represas. Seus resultados indicaram que com a perda da vegetação original, com urbanização e exploração de materiais, houve perda significativa de solo da ordem de 17% e que a construção das cinco represas diminuiu as vazões líquidas em cerca de 18% e as vazões sólidas em cerca de 47% à jusante das represas.

Figueiredo e Srinivasan (1999) avaliaram os impactos do uso do solo e a influência de açudes sobre o escoamento para o Açude Sumé, localizado na Paraíba, Nordeste do Brasil. Esta região é bastante assolada por problemas de secas, existindo armazenamento de água através de açudes, e processo de desmatamento. Para a análise das vazões foi utilizado o modelo NAVMO de precipitação, vazão, evaporação, o mesmo aplicado nesta dissertação. A acumulação de água nos açudes foi considerada através de uma lei de liberação de água até se alcançar suas capacidades e os diferentes usos do solo foram representados por três diferentes cenários, de modo que um representasse um reflorestamento (ou ressurgimento da vegetação nativa) e outros dois que representassem um desmatamento acentuado. Isso foi feito reduzindo-se em 40% os valores CN, para o primeiro cenário, e aumentando-os em 40% e 80% nos outros cenários de desmatamento acelerado. Concluiu-se que o volume e o pico do escoamento anual podem ser aumentados em 120% e 80% respectivamente, dependendo da área afetada.

Para analisar os efeitos das mudanças de uso do solo sobre o escoamento, são utilizados modelos que captem estas características. Também nesta linha, Hugues e Smakhtin (1998) testaram dois modelos de precipitação-vazão, usando bacias onde mudanças no uso do solo foram bem documentadas. Em geral os modelos responderam satisfatoriamente bem e seus parâmetros correspondiam às mudanças inseridas.

Brenner et al. (1999), sugerem um modelo que permita a integração entre modelagem atmosférica e hidrológica. O modelo apresentado é uma adaptação da metodologia da curva número (CN). Os autores afirmam que mudanças no solo estão

sendo acompanhadas por mudanças no clima. Entretanto, dos três cenários gerados (um passado, um presente e um futuro) apenas um mostra a simulação futura com aumento das áreas urbanas em 40% (para o ano de 2020) mas sem nenhuma alteração dos fatores climáticos. Os resultados mostraram diferenças insignificantes nos escoamentos presente e futuro; ênfase é dada nos altos níveis de poluição difusa encontrados para os cenários presente e futuro.

Estudos desta natureza são necessários em regiões semi-áridas onde as terras são altamente propensas a degradação e às mudanças para fins de agricultura. Deve-se, entretanto, buscar também situações onde os efeitos do uso do solo sejam avaliados conjuntamente com a variabilidade dos fatores climáticos, já que são fatores que influenciam diretamente o ciclo hidrológico e o escoamento, sendo isto feito através de cenários que reflitam, ao máximo, a realidade para que possam ser utilizados em avaliações futuras para um melhor manejo das bacias hidrográficas.

2.3.3 Impactos Conjuntos de Clima e Uso do Solo

Considerar as mudanças do uso do solo, associadas às mudanças no clima, é de extrema importância uma vez que afetam diretamente a formação e produção do escoamento nas bacias hidrográficas. Modelos hidrológicos que considerem essas características são importantes na simulação de mudanças do uso do solo (Figureiredo e Srinivasan, 1999) e cenários climáticos.

Kite (1993) seguiu esta linha, usando dados de saída de um MCG como entrada de um modelo hidrológico, considerando também as mudanças no uso do solo associadas com cenários resultantes do efeito estufa. Os resultados desse estudo mostram que o escoamento aumenta sensivelmente com o aumento da precipitação e com a redução da evapotranspiração devido à mudança do uso do solo. Kite (1993) concluiu que o uso do solo associado à mudança climática aumentou o número de picos embora não tenha ocorrido grande mudança nos valores máximos.

Um estudo envolvendo clima e uso do solo foi realizado em bacias em Portugal e na Espanha, desenvolvido por Bathurst et al. (1996), considerando um modelo hidrológico e de transporte de sedimentos. O modelo foi calibrado para uma bacia em cada país. Os cenários de clima foram derivados de um MCG para o clima corrente ($1xCO_2$) e para o futuro ($2xCO_2$). Foi incluída uma análise dos dados de saída do MGC e uma desagregação temporal dos mesmos, que foram passados para nível horário. Os cenários de

uso do solo foram simulados para a bacia de Portugal, no período úmido, onde foram construídos dois cenários: um onde a plantação de trigo foi abandonada e cresceu um pouco da vegetação nativa e outro onde a vegetação nativa retornou a sua situação de equilíbrio. No entanto, este estudo não considerou em nenhum cenário os dois fatores em conjunto, ou seja, o uso do solo e a mudança climática ao mesmo tempo. Os autores, contudo, enfatizam em suas conclusões que a diminuição no escoamento e no transporte de sedimentos encontradas são mudanças plausíveis que se encontram dentro da variabilidade corrente inter-anual.

Além do fato de modelos de circulação global, ou MCGs, fornecerem mudanças de longo prazo, são modelos utilizados para a modelagem atmosférica, geralmente visando mudanças climáticas oriundas de influências antropogênicas (efeito estufa) que resultaram em aumento de temperatura. Este aumento de temperatura influencia a evaporação e a precipitação. Modelar mudanças climáticas é muito difícil, envolve simular o comportamento intrínseco complexo de processos oceânicos e atmosféricos, alguns dos quais não são completamente entendidos (Ribot et al., 1996), existindo assim, uma gama de incertezas envolvidas.

O ideal na construção de cenários é que possam prever situações reais e imediatas, com um maior número de variáveis que influenciem o escoamento sendo consideradas, como por exemplo, um cenário que considere a variabilidade dos fatores climáticos (precipitação e evaporação) e as mudanças de uso do solo, que acontecem constantemente, devido tanto ao clima quanto a grande influência humana pela busca de áreas para cultivo e criação de rebanho, principalmente em regiões semi-áridas.

2.3.4 Comentários finais

As pesquisas avançam e vêm ajudando a compreender melhor os mecanismos que regem os fenômenos. Sabe-se, por exemplo, que o comportamento da temperatura em resposta à indução humana pode implicar na mudança nos níveis das variáveis hidrológicas (escoamento, disponibilidade da água) e na qualidade da água (Gleick, 1987). Mas, ainda se faz necessário avaliar o comportamento do escoamento frente às mudanças nos níveis de evaporação, precipitação e uso do solo através do uso de modelos matemáticos robustos. Este trabalho, que ainda não foi realizado na região semi-árida do Nordeste do Brasil, faz-se urgente.

A variabilidade do clima e do uso do solo são características marcantes nas regiões semi-áridas em geral. O estudo dos efeitos que estes fatores podem causar sobre o escoamento e sobre os sistemas de recursos hídricos é de fundamental importância, já que podem comprometer significativamente a oferta, tornando os sistemas ainda mais vulneráveis e susceptíveis ao colapso. A literatura vem mostrando a importância da realização de estudos de avaliação nesse sentido, de modo a se quantificar os impactos tanto do uso do solo quanto do clima sobre o escoamento. No semi-árido do Nordeste do Brasil, ainda faz-se necessário estudos dessa natureza. O número de estudos nesta região é pequeno e não avalia o efeito conjunto de fatores climáticos e uso do solo sobre o escoamento. Estudos desta natureza são úteis para um melhor manejo dos recursos hídricos e do solo.

3 O MODELO NAVMO

3.1 Características Gerais

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.

É um modelo diário, determinístico, conceitual e distribuído, que nos permite considerar as variabilidades tanto de fatores climáticos (evaporação e precipitação) quanto do sistema da bacia. O modelo NAVMO simula o comportamento da bacia a longo termo (Lopes, 1994), sendo a região estudada dividida em sub-bacias.

Possui algoritmos alternativos para a solução dos seguintes processos hidrológicos:

- Precipitação nas sub-bacias;
- Escoamento nas sub-bacias;
- Propagação do escoamento nos trechos de rios;
- Amortecimento do escoamento por reservatórios.

Possui, na sua concepção, dois sistemas de reservatórios: um superficial e outro sub-superficial que controlam o escoamento. O escoamento total gerado é a soma dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo. Para avaliar o armazenamento de água nos reservatórios do sistema, o qual é associado às condições do solo e do seu uso, é utilizado o método da curva número (CN) desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos – SCS (McCuen, 1982). O método CN é associado ao uso do solo e pode ser mudado para avaliações de cenários (Lopes, 1994).

Cada sub-bacia requer um valor da curva número (CN), definido pelo tipo e usos do solo na mesma. Estes valores atribuídos são ponderados em relação à área de cada tipo de uso do solo. Pode-se, assim, considerar alterações naturais ou antropogênicas, para a avaliação das suas influências sobre o escoamento simulado na bacia hidrográfica.

O modelo NAVMO oferece dois métodos para o cálculo da precipitação média. São versões modificadas do método de Thiessen e do método do Ponto Reticular ou método das Quadrículas. O método do Ponto Reticular (usado nesta pesquisa) calcula a precipitação média para cada sub-bacia, num intervalo de tempo t , com as quatro estações pluviométricas mais próximas do centro da área da sub-bacia sendo cada estação localizada em um quadrante relativo ao centro da área. Vários métodos alternativos de cálculo da propagação do escoamento na calha do rio são possíveis como o método de Williams, 1969, o método de Kalinin-Miljukov, 1958, segundo Fread, 1985 e o método da Velocidade de Fluxo, assim como critérios alternativos para investigação da qualidade dos resultados como desvio médio, desvio hidrológico, centróides dos hidrogramas, volumes e picos (Figueiredo et al., 1999). O hidrograma de uma sub-bacia é a entrada de um trecho de rio subsequente (Kleeberg et al., 1989).

A divisão das sub-bacias, a seqüência de geração dos escoamentos nas sub-bacias, os trechos de rios onde as vazões são propagadas e as características físicas das sub-bacias são requerimentos para a aplicação do modelo NAVMO (Lopes, 1994). São dados de entrada a precipitação, evaporação, vazões observadas das estações fluviométricas consideradas e as características físicas das sub-bacias. O fluxograma do modelo NAVMO está apresentado na Figura 3.1.

3.2 Cálculo das Lâminas dos Escoamentos nas Sub-Bacias

Para cada sub-bacia é considerado um sistema de reservatórios verticais hipotéticos, como apresentado na Figura 3.2 e aí estão também as diversas etapas dos processos do modelo, considerados para o cálculo da vazão total. Cada reservatório possui a função de controlar os componentes do fluxo total (Lopes, 1994).

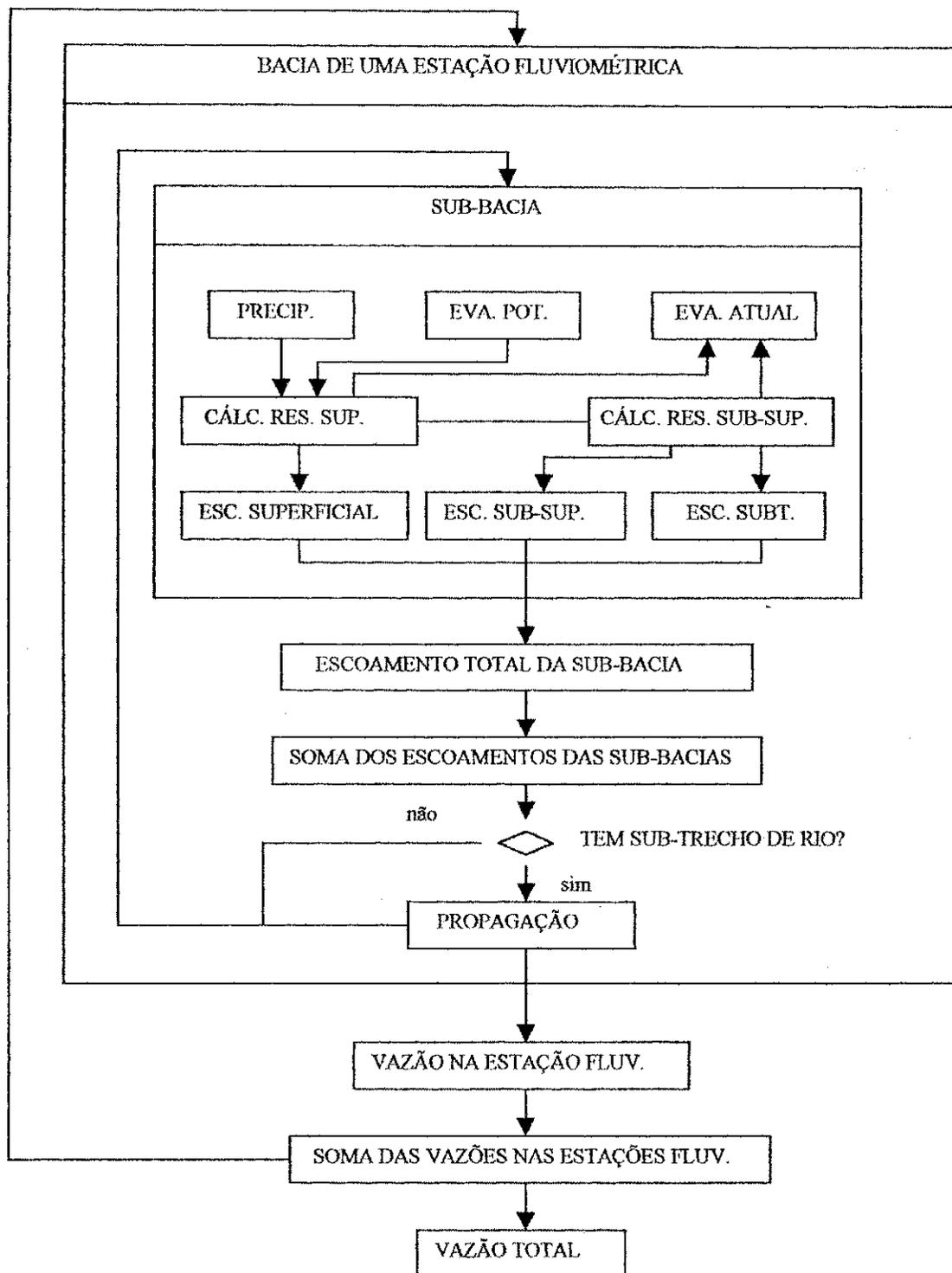
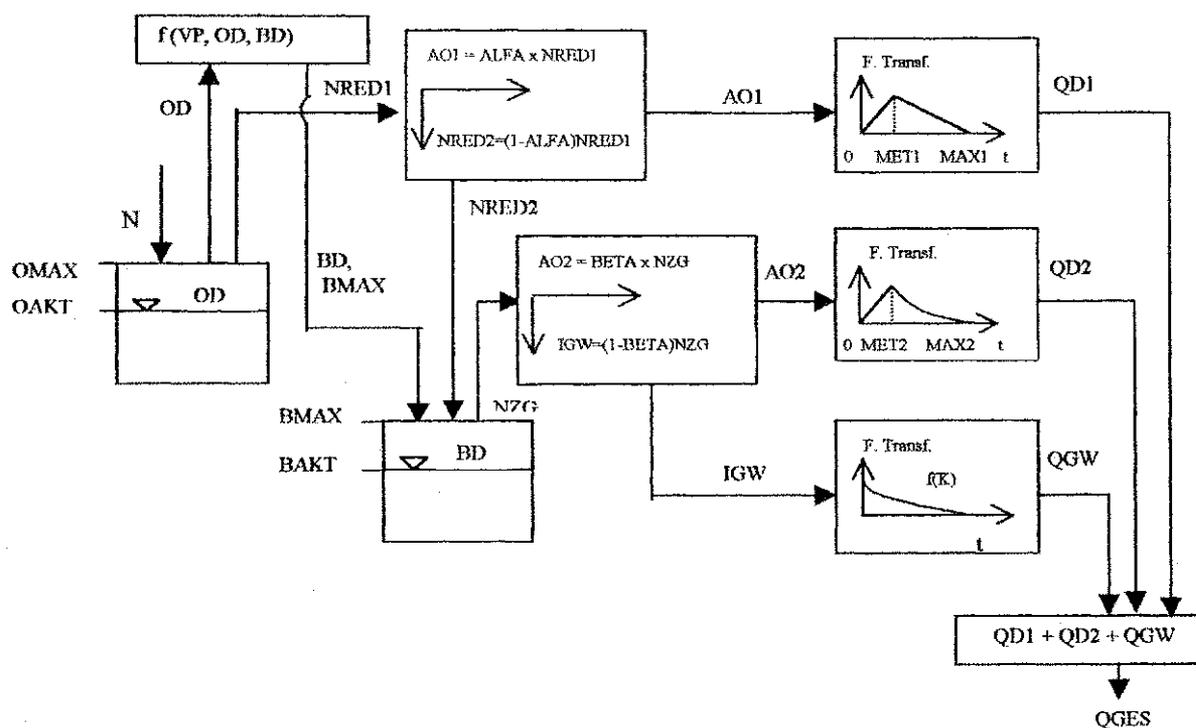


Figura 3.1 – Fluxograma do modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)



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 3.2 – Representação do processo de precipitação-vazão-evaporação no modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)

O primeiro reservatório é abastecido pela precipitação e nele age a evaporação. A partir do transbordamento deste reservatório, uma parte vai suprir o subsolo e outra vai constituir a precipitação efetiva, que através de uma função de transformação, calcula-se o hidrograma do escoamento direto. O reservatório sub-superficial, também é sujeito a evaporação e, a partir do seu transbordamento, criam-se duas lâminas efetivas: uma para o escoamento sub-superficial e outra para o escoamento subterrâneo. E da mesma forma, através de duas funções de transformação, são calculados os hidrogramas dos escoamentos sub-superficial e subterrâneo. A soma destes três escoamentos resulta na descarga total.

3.3 Cálculo da Precipitação Média nas Sub-Bacias

Como dito anteriormente, o cálculo da precipitação média em uma sub-bacia pode ser feito por versões modificadas dos métodos de Thiessen e do Ponto Reticular.

Aqui será aplicado o método do Ponto Reticular modificado ou Método modificado das quadrículas. Este método calcula a precipitação utilizando os quatro postos mais próximos do centro das sub-bacias, com relação a cada quadrante. Para tanto, é utilizada a equação (3.1) apresentada abaixo:

$$N_{I,t} = \frac{\sum_{s=1}^4 N_{n,s,t} / D_s^{\text{RAST}}}{\sum_{s=1}^4 1 / D_s^{\text{RAST}}} \quad (\text{mm}) \quad (3.1)$$

sendo:

$N_{I,t}$ – precipitação calculada para a sub-bacia I no intervalo de tempo t;

$N_{n,s,t}$ – precipitação na estação pluviométrica n, mais próxima do centro da sub-bacia I dentro do quadrante s, no intervalo de tempo t;

RAST – fator de correção dependente da distância do posto.

3.4 Balanço Hídrico dos Reservatórios

O balanço hídrico dos reservatórios superficial e sub-superficial é a base para o cálculo das lâminas dos escoamentos superficial e sub-superficial. As condições são mostradas a seguir (Kleeberg et al., 1989):

Para o reservatório superficial:

$$N(t) - VA(t) - OD(t - 1) > 0 \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.2)$$

Para o reservatório subterrâneo:

$$N(t) - VA(t) - OD(t - 1) - AOI(t) - BD(t - 1) > 0 \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.3)$$

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

AOI – Lâmina do escoamento superficial direto

Os déficits de umidade são:

$$\text{Na superfície: } OD(t) = OMAX - OAKT \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.4)$$

$$\text{No solo: } BD(t) = BMAX - BAKT \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.5)$$

Assim, $OAKT$ e $BAKT$ são estados atuais de umidade no início do evento de precipitação, na superfície e na zona sub-superficial, respectivamente; $OMAX$ é a capacidade máxima do reservatório superficial e $BMAX$, a capacidade máxima do reservatório sub-superficial.

Se as condições acima citadas não forem satisfeitas, nenhuma vazão ocorrerá nos reservatórios hipotéticos. A água ficará retida para encher os reservatórios e estará exposta à evaporação depois da chuva cessada.

Caso não haja precipitação $N(t) = 0$, a evaporação toma sua forma potencial até que a superfície esteja completamente seca e o déficit de umidade do reservatório superficial (OD) atinja a capacidade máxima do reservatório superficial ($OMAX$), ou seja:

$$VA = VP \quad (\text{mm/dia}) \quad \text{enquanto } OD < OMAX \quad (3.6)$$

Depois que o reservatório de superfície secar, dá-se então o início da evaporação no sub-solo, aumentando seu déficit de umidade (BD). A evaporação atual do solo é calculada multiplicando-se a evaporação potencial (VP) pelo fator EET de calibração do modelo. Assim:

Para $OD \geq OMAX$:

$$VA(t) = EET \cdot (VP) \cdot ((BMAX - BD(t-1)) / BMAX) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.7)$$

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

$$\text{Para } VA(t) < BAKT(t-1) \text{ e } OD(t) \geq OMAX \Rightarrow BD(t) = BD(t-1) + VA(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.8)$$

$$\text{Para } VA(t) > BAKT(t-1) \text{ e } OD(t) \geq OMAX \Rightarrow BD(t) = BMAX \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.9)$$

$$\text{Para } VA(t) = VP \text{ e } OD(t) < OMAX \Rightarrow BD(t) = BD(t-1) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.10)$$

O déficit do reservatório superficial é dado por:

$$OD(t) = OD(t-1) + VA(t) - N(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.11)$$

Caso durante a precipitação o reservatório superficial encher completamente, ou seja, $OD(t) = 0$, haverá, então, escoamento efetivo. O transbordamento (NRED1) será dado por:

$$NRED1(t) = N(t) - OD(t-1) - VA(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.12)$$

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:

$$AO1 = ALFA \times NRED1(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.13)$$

$$NRED2(t) = (1 - ALFA) \times NRED1 \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.14)$$

onde ALFA é um parâmetro calibrável do modelo. O novo déficit de umidade do sub-solo será:

$$BD(t) = BD(t-1) - NRED2(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.15)$$

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

$$NZG(t) = NRED2(t) - BD(t-1) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.16)$$

Esta umidade excedente é dividida na lâmina do escoamento sub-superficial $AO2(t)$ e na lâmina que vai alimentar o lençol subterrâneo calculados por:

$$AO2(t) = BETA \times NZG(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.17)$$

$$IGW(t) = (1-BETA) \times NZG(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (3.18)$$

onde BETA é também um parâmetro calibrável do modelo.

Dispondo-se, desta maneira, das lâminas do escoamento superficial ($AO1$), do escoamento sub-superficial ($AO2$) e do escoamento subterrâneo (IGW).

3.5 Capacidades dos Reservatórios

Os parâmetros OMAX e BMAX são dependentes das propriedades das bacias como solos, cobertura vegetal e relevo (Lopes, 1994). São espacialmente dependentes e não mudam com o evento de precipitação. São determinados considerando-se a capacidade de armazenamento S do solo calculada seguindo o método CN (curva-número) do SCS (McCuen, 1982), pela equação:

$$S = 25,4 \times [(1000/CN) - 10] \quad (\text{mm}) \quad (3.19)$$

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 B_{MAX} (do reservatório do solo) = S . O parâmetro O_{MAX} (do reservatório superficial) é uma fração de S e considera também em seu cálculo, a declividade média da bacia ($GEBGEF$). É calculado pela função:

$$O_{MAX} = 0,1 \times S \times e^{-4 \times GEBGEF} \quad (\text{mm}) \quad (3.20)$$

3.6 Transformação das Vazões nas Sub-Bacias

O hidrograma do escoamento total é dado pela soma dos hidrogramas dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo.

3.6.1 Escoamento Superficial (QD1)

A transformação da lâmina do escoamento superficial ($AO1$) em hidrograma é feita para a subida do hidrograma e para a recessão, através das seguintes funções lineares:

Para a subida:

$$QD1(t + J) = \frac{2 \times J \times AO1(t) \times AE}{MET1 \times MAX1} \quad (\text{m}^3/\text{dia}) \quad (3.21)$$

Para a recessão:

$$QD1(t + J) = \frac{2 \times (MAX1 - J) \times AO1(t) \times AE}{MET1 \times (MAX1 - MET1)} \quad (\text{m}^3/\text{dia}) \quad (3.22)$$

onde:

AE = área da sub-bacia

$QD1(t+J)$ = escoamento direto num intervalo de tempo $t+J$

$MET1$ = Tempo para atingir o pico do escoamento superficial

$MAX1$ = Tempo de base do escoamento superficial.

3.6.2 Escoamento sub-superficial (QD2)

A transformação da lâmina do escoamento sub-superficial em hidrograma é feita por uma função linear na subida e por uma função exponencial na recessão, dadas por:

Para a subida:

$$QD2(t + J) = \frac{QM(t) \times J}{MET2} \quad (m^3/dia) \quad (3.23)$$

Para a recessão:

$$QD2(t + J) = QM(t) \times \left[1,1 \times e^{\frac{\ln 0,1}{1,1} \times \frac{J - MET2}{MAX2 - MET2}} - 0,1 \right] \quad (m^3/dia) \quad (3.24)$$

onde: $QM(t) = \frac{AO2(t) \times AE}{(MAX2 - MET2) \times (1 / \ln 1,1 - 0,1) + MET2 \times 0,5} \quad (m^3/dia) \quad (3.25)$

sendo:

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

MAX 2 = Tempo de base do escoamento sub-superficial

3.6.3 Escoamento Subterrâneo (QGW)

O escoamento subterrâneo é calculado pela função:

$$QGW(t) = AGW(t) \cdot AE \quad (3.26)$$

onde AGW (t) é dado por:

$$AGW(t) = \frac{AGW(t-1)}{1 + 1/K} + \frac{IGW(t)}{1 + K} \quad (mm/dia) \quad (3.27)$$

sendo:

K = constante do reservatório a ser calibrada

IGW (t) = infiltração no lençol subterrâneo.

AE = área da sub-bacia

3.6.4 Escoamento Total (QGES)

A soma dos três componentes de vazão fornece o escoamento total diário:

$$QGES(t) = \frac{QD1(t) + QD2(t) + QGW(t)}{86400} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.28)$$

3.7 Propagação do Escoamento nos Canais

O hidrograma de uma sub-bacia serve como hidrograma de entrada do trecho de rio da bacia subsequente. A propagação de escoamento nos trechos de rios pode ser feita pelas seguintes metodologias:

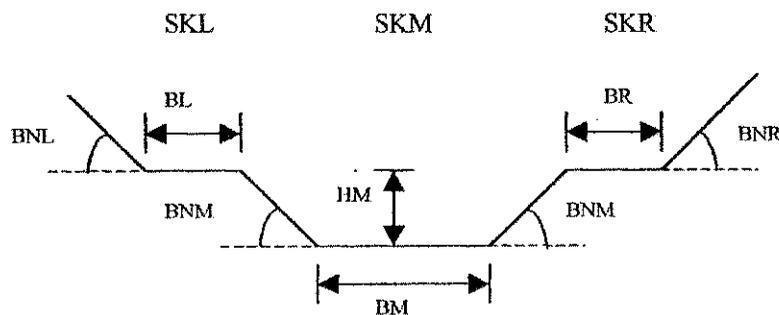
Método da velocidade de fluxo

Método de Williams (1969)

Método de Kalinin-Miljukov (1958, segundo Fread, 1985)

Todos os métodos são hidrológicos e fundamentados no método de Munkingum.

Aqui será aplicado o método de Williams, onde a retenção no trecho de rio é descrita por reservatórios cujas constantes dependem tanto da vazão na entrada quanto da vazão na saída do trecho de rio. O modelo considera uma seção transversal trapezoidal nas seções dos rios, com uma calha principal e dois planos laterais de inundação como na Figura 3.3:



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 – inverso do coeficiente de Manning para a calha principal

SKL - inverso do coeficiente de Manning para a o plano de inundação da margem esquerda

SKR - inverso do coeficiente de Manning para a o plano de inundação da margem direita.

Figura 3.3 – Seção transversal do rio (Kleeberg et al., 1989)

O modelo NAVMO utiliza a equação de Manning para o cálculo da velocidade de escoamento na calha principal e nos planos de inundação. Para tanto, são utilizados três coeficientes de ajuste: EKM, para obter a velocidade no canal principal e EKL e EKR, para as velocidades nos planos de inundação esquerdo e direito, respectivamente.

3.8 Parâmetros Calibráveis do Modelo NAVMO

Os parâmetros calibráveis do modelo NAVMO e o que significam encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – 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 ($m^3/seg/Km^2$)

3.9 Resultados Gerados pelo Modelo

O modelo, após as simulações, gera como resultados os hidrogramas de cada ano, a nível diário, os volumes anuais e vazões máximas anuais, além de algumas funções que permitem a verificação do ajuste do modelo como desvio, desvio hidrológico e diferença de picos de vazão. Entretanto, estas funções não serão utilizadas nesta pesquisa. Mais detalhes sobre a calibração e validação do modelo serão dados no capítulo 5.

4 ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS

4.1 Área de Estudo

4.1.1 Generalidades

O modelo NAVMO foi selecionado para simular vazões em uma área localizada no oeste do estado da Paraíba, conhecida como Alto Piranhas (Figura 4.1).

A região é de grande importância política e econômica no Estado, estando aí inseridos projetos de perímetros irrigados para o desenvolvimento do semi-árido paraibano e os maiores reservatórios de armazenamento de água do Estado, com finalidades de abastecimento, irrigação e geração de energia. O Coremas-Mãe d'água é um deles, que inclusive fornece uma vazão constante regularizada que deságua no Açude Armando Ribeiro Gonçalves no Rio Grande do Norte e fornece água para o canal da Redenção que irá irrigar 5 mil hectares de várzeas férteis na região polarizada por Sousa-PB - obra orçada pelo Governo Federal na ordem de 58 milhões de reais (www.pbnet.com.br/openline/ebsfilho). Com base nestas características, sobressai-se no contexto estadual captando a atenção de estudiosos para que sejam fornecidos os melhores subsídios para o gerenciamento dos seus recursos hídricos.

No entanto, o desenvolvimento da região pode ser bastante afetado pelas variabilidades do clima da região e, por outro lado, também podem trazer graves conseqüências, pois a urbanização e a mudança no uso do solo afetam a vazão afluente que chega aos açudes, podendo comprometer a disponibilidade de água e, portanto, tudo que depende diretamente destes mananciais. Insere-se também neste contexto, o problema da interferência humana no uso do solo já que existe indiscutivelmente um alto fator de antropismo de acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba – PDRH (Paraíba, 1997) através de desmatamentos na região.

4.1.2 Características Gerais da Região

A região do Alto Piranhas engloba uma área de 14.850 km², limitada pelo posto fluviométrico de Sítio Vassouras (lat. 6°43' e long. 37°48'), e inclui diversas sub-bacias: Piancó, São José de Piranhas, Emas, Aguiar, Antenor Navarro, Pau Ferrado, Santa Rita do Curema e Boqueirão de Mãe-d'água (Figura 4.1). Aí se localizam municípios importantes do Estado como Sousa, Cajazeiras, Piancó, Coremas, Antenor Navarro e Pombal.

Entre os principais rios da região estão o Piancó e o rio do Peixe que são afluentes do rio Piranhas, encontrando-se a jusante do açude de Coremas Mãe-d'água. O rio Piranhas aflui na bacia do Médio Piranhas e corre para o Rio Grande do Norte onde deságua no açude Armando Ribeiro Gonçalves. Os rios da região possuem como característica marcante a intermitência, resultante do regime pluviométrico irregular e das características da região.

Os solos predominantes na bacia são: Litólito Eutrófico, Bruno Não-Cálcico e Podzólico Vermelho-Amarelo-Eutrófico, ocorrendo Vertissolos e Solonetz Solodizados, em menor escala, ao norte. A vegetação predominante é a caatinga, do tipo arbórea aberta, com existência de agricultura de cultura cíclica concentrada ao norte, porém com presenças esparsas ao sul da região (Brasil, 1981). Atualmente, a bacia apresenta alto índice de degradação por interferência humana (agricultura e pastagens) atingindo um nível de intervenção antrópica de aproximadamente 80% da área total (Paraíba, 1997).

Ao norte a geologia da bacia é marcada por rochas cristalofinianas do Complexo Gnáissico Migmatítico e rochas de seqüência sedimentar, que chegam a provocar afloramentos na região. Em sua parte central, existem formações de Quartizitos, Gnaisses do Proterozóico e rochas vulcânicas, como granitos. No centro-sul, predominância do complexo cristalino sobre terrenos sedimentares e ocorrências de rochas vulcânicas e plutônicas de idades diversas.

4.1.3 Características Climatológicas

Segundo PDRH (Paraíba, 1997), em termos de clima, existem três caracterizações principais de acordo com a classificação de Köeppen. Ao norte, o tipo Bsw h'g, que significa clima tipo seco (xerófito) de tipo estepe, com temperatura média mensal superior a 18°C. Ao sul, tipo BSwh', com temperatura média anual superior a 24°C

e amplitude térmica anual menor que 4°C, e com temperaturas mais elevadas nos meses mais secos. Na maior parte da bacia, o clima classifica-se como Awig que é um clima tropical úmido com inverno seco, ou seja, quente com chuvas no verão e pequenas variações de temperaturas médias mensais, sendo o mês mais quente o anterior ao solstício de verão.

A pluviometria média anual é aproximadamente 870 mm (calculada com dados de postos da região entre 1911 e 1990). Entretanto, a distribuição desta precipitação no tempo e no espaço é bastante irregular, com chuvas concentradas em 4 meses (Figura 4.2) e sujeitas a períodos de escassez de água, que levam às tão sofridas secas.

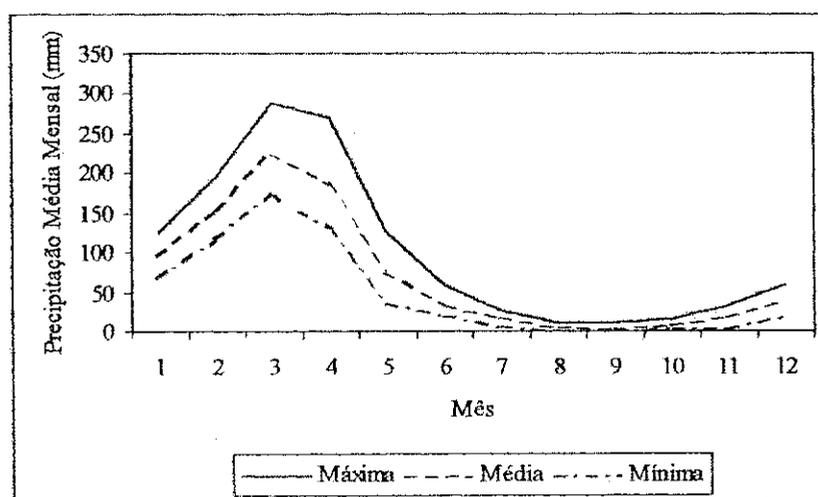


Figura 4.2 – Precipitação média mensal na região do Alto Piranhas

Os dados de temperatura, velocidade de vento, umidade relativa do ar e evaporação foram obtidos do Posto de São Gonçalo, considerado representativo da região. Já os dados de insolação global foram obtidos do posto de Cajazeiras com valor médio de 482,5 cal/cm²/dia. Um resumo com os dados de clima da região encontra-se na Tabela 4.1.

A taxa de evaporação potencial assume valor de 1554,4 mm por ano (tomando como base o posto de São Gonçalo) e considerado para o cálculo da evaporação potencial, um coeficiente do tanque igual a 0,75. Os dados do tanque Classe A, encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Dados climatológicos

Dados	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	26,9	26,1	26,2	25,6	25,5	24,9	25,0	25,7	26,7	27,3	27,5	27,1
Um. Relativa* (%)	60,3	67,7	72,1	71,4	68,4	64,6	60,3	55,8	54,0	53,3	54,8	56,0
Vel. vento (m/s)	1,33	1,04	1,05	1,07	1,29	1,73	1,75	2,14	2,04	2,11	1,73	1,44
Irradiação Global (cal/cm ² /dia)	488	499	482	464	424	399	410	501	527	553	537	506

* Média da umidade relativa nos três horários

Fonte: www.dca.ufpb.br

Tabela 4.2 - Evaporação média mensal do tanque classe A do posto de São Gonçalo (1963-1967)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evaporação (mm)	173,9	119,6	123,0	104,2	152,1	145,9	175,6	212,5	218,8	226,4	213,8	206,7

A temperatura média mensal é da ordem de 26,3°C, entre 1963 e 1967. Para estes anos a temperatura máxima foi 28°C e a mínima 24,4°C. As variações mensais da temperatura não são grandes se comparadas à ordem de variabilidade da precipitação. Entretanto esta variação na temperatura provoca mudanças nas variáveis climáticas, principalmente a evaporação (Figura 4.3). Os meses mais quentes vão de setembro a janeiro (Figura 4.4), que inclusive possuem menores umidades relativas do ar e menor precipitação (Figura 4.2).

A umidade relativa do ar possui uma média mensal de 60,1%, com maiores valores entre os meses de fevereiro a maio e menores valores de setembro a janeiro (Figura 4.5), acompanhando os meses de maiores e menores precipitações.

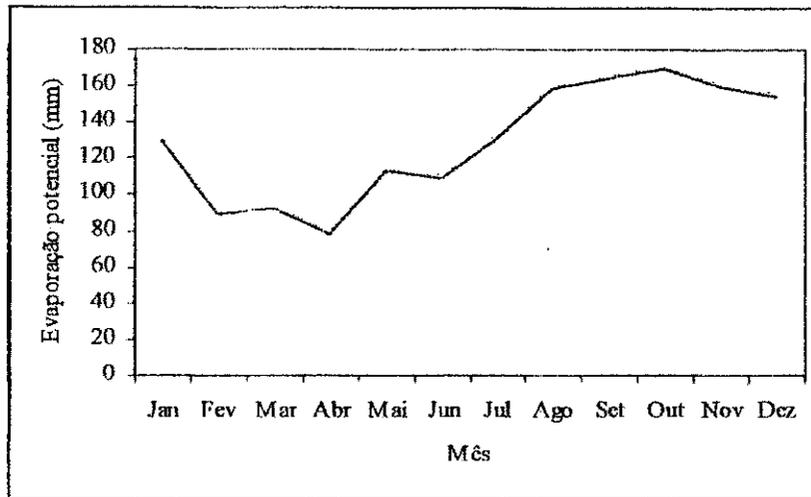


Figura 4.3 – Evaporação média mensal do posto de São Gonçalo (1963-1967)

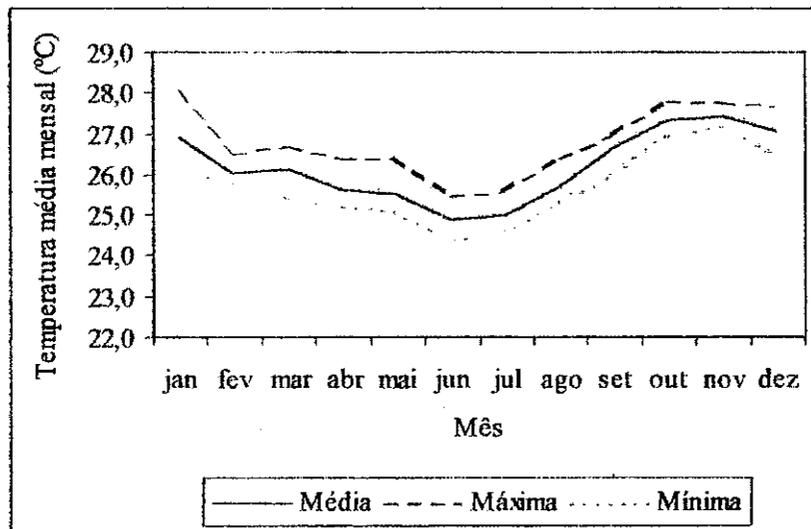


Figura 4.4 – Temperatura média mensal em São Gonçalo (1963-1967)

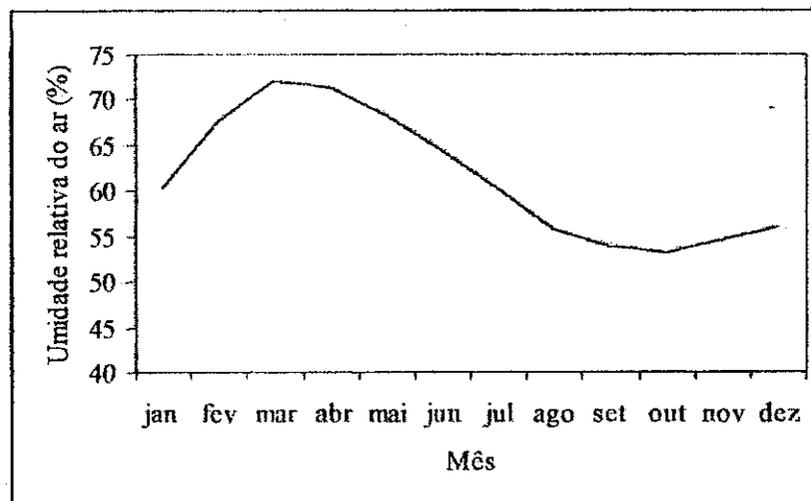


Figura 4.5 – Umidade relativa do ar em São Gonçalo (1911-1980)

4.2 Base de Dados

4.2.1 Dados Requeridos pelo Modelo

O modelo requer dados diários de precipitação e vazão e dados médios diários de evaporação. A nível de sub-bacias exige área, declividade média das mesmas, valor CN e coordenadas cartesianas dos centros das sub-bacias; para sub-bacias onde ocorre propagação do escoamento exige ainda: declividade dos trechos de rios, características das calhas do rio e coeficiente de Manning-Strickler (inverso do coeficiente de rugosidade de Manning).

4.2.2 Dados Hidroclimatológicos

A partir da área delimitada, selecionou-se os postos fluviométricos e pluviométricos de acordo com mapas da região e com o banco de dados da SUDENE (Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste).

Os postos fluviométricos e seus respectivos períodos encontram-se na Tabela 4.3, num total de 7 postos com dados de vazão e um com dados de régua limimétrica. Estes postos delimitam as principais sub-bacias da região. Ressalta-se que nesta seleção foi descartado o posto de Várzea Grande que apresentou dados duvidosos, com hidrogramas anuais inconsistentes.

O posto de Aguiar exigiu a transformação dos dados limimétricos, o que foi feito através de uma curva chave, obtida pelo programa MSDHD – Microsistema de Dados Hidrometeorológicos (DNAEE, 1987/1993), na forma: $Q = 5,361 \cdot H^{2,52}$.

Deve-se salientar que os dados dos postos de Boqueirão de Mãe-d'água e Santa Rita do Curema nunca foram testados. É de fundamental importância a utilização destas séries para sua verificação, adicionando-se assim, possivelmente dois novos postos validados para a região, com a possibilidade de estudos mais abrangentes. Os diferentes postos e seus diferentes períodos são de fundamental importância para a validação do modelo hidrológico neste estudo, incluindo testes tradicionais de validação como os propostos por Klemeš (1986) que serão discutidos no capítulo 5.

Tabela 4.3 - Postos fluviométricos

Código	Nome da Estação	Estado	Área (km ²)
37200000	S. José de Piranhas (1912 a 1915; 1921 a 1935)	PB	475,0
37260000	Antenor Navarro (1964 a 1972)	PB	1.580,0
37340000	Piancó (1964 a 1983)	PB	4.550,0
37360000	Emas (1964 a 1972)	PB	530,0
37363000	Aguiar (1969 e 1970)	PB	495,0
37380000	Pau Ferrado (1967, 1968, 1971, 1973 a 1975)	PB	8.050,0
37410000	Sítio Vassouras (1963 a 1985)	PB	14.850,0
37366000	Boqueirão de Mãe d'água (1923 a 1946)	PB	1.063,5
37368500	Sta. Rita de Curema (1913, 1914; 1921 a 1941)	PB	6.868,8

Os postos pluviométricos foram selecionados buscando uma distribuição homogênea dentro dos 14.850 km² da área, num total de 40 postos, dos quais 34 são na Paraíba, 2 no Rio Grande do Norte, 2 no Ceará e 2 em Pernambuco, com dados entre 1911 e 1990. Em um segundo momento, foram incluídos mais dois postos localizados no Ceará. Esta inserção se deve ao fato que poucos postos pluviométricos possuem dados com períodos antigos compatíveis com dados fluviométricos antigos, como no caso dos dados de vazão do posto de São José de Piranhas, que estão entre 1912 e 1935. A Tabela 4.4 mostra os postos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 4.4 - Postos pluviométricos selecionados

Código	Nome da Estação	Estado	Código	Nome da Estação	Estado
3843166	Aguiar	PB	3823822	Luiz Gomes	RN
3842574	Anauá	CE	3853467	Manaira	PB
3832809	Aurora*	CE	3842612	Milagres*	CE
3833413	Antenor Navarro	PB	3833835	Nazarezinho	PB
3833588	Aparecida	PB	3843992	Nova Olinda	PB
3842185	Sítio Arapuá	PB	3844448	Olho d'água	PB
3832956	Balanças	PB	3844313	Piancó	PB
3832089	Barra de Juá	PB	3834538	Pombal	PB
3843727	Bom Jesus	PB	3853499	Princesa Isabel	PB
3842698	Bonito de Sta Fé	PB	3854428	Quixaba	PE
3832789	Cajazeiras	PB	3843857	São Boa Ventura	PB
3844279	Catingueira	PB	3833285	São Francisco	PB
3852197	Conceição	PB	3833639	São Gonçalo	PB
3834877	Condado	PB	3833869	S. J. Lagoa Tapada	PB
3844008	Açude Coremas	PB	3843202	São José de Piranhas	PB
3842254	Cuncas	CE	3833235	Sítio São Vicente	PB
3833908	Açude Eng. Ávidos	PB	3843537	Serra Grande	PB
3844703	Garrotes	PB	3833554	Sousa	PB
3843919	Ibiara	PB	3853679	Triunfo	PE
3843667	Itaporanga	PB	3823965	Tte. Ananias Gomes	RN
3854036	Juru	PB	3833018	Uiraúna	PB

* postos inseridos em um segundo momento

4.2.3 Dados Fisiográficos

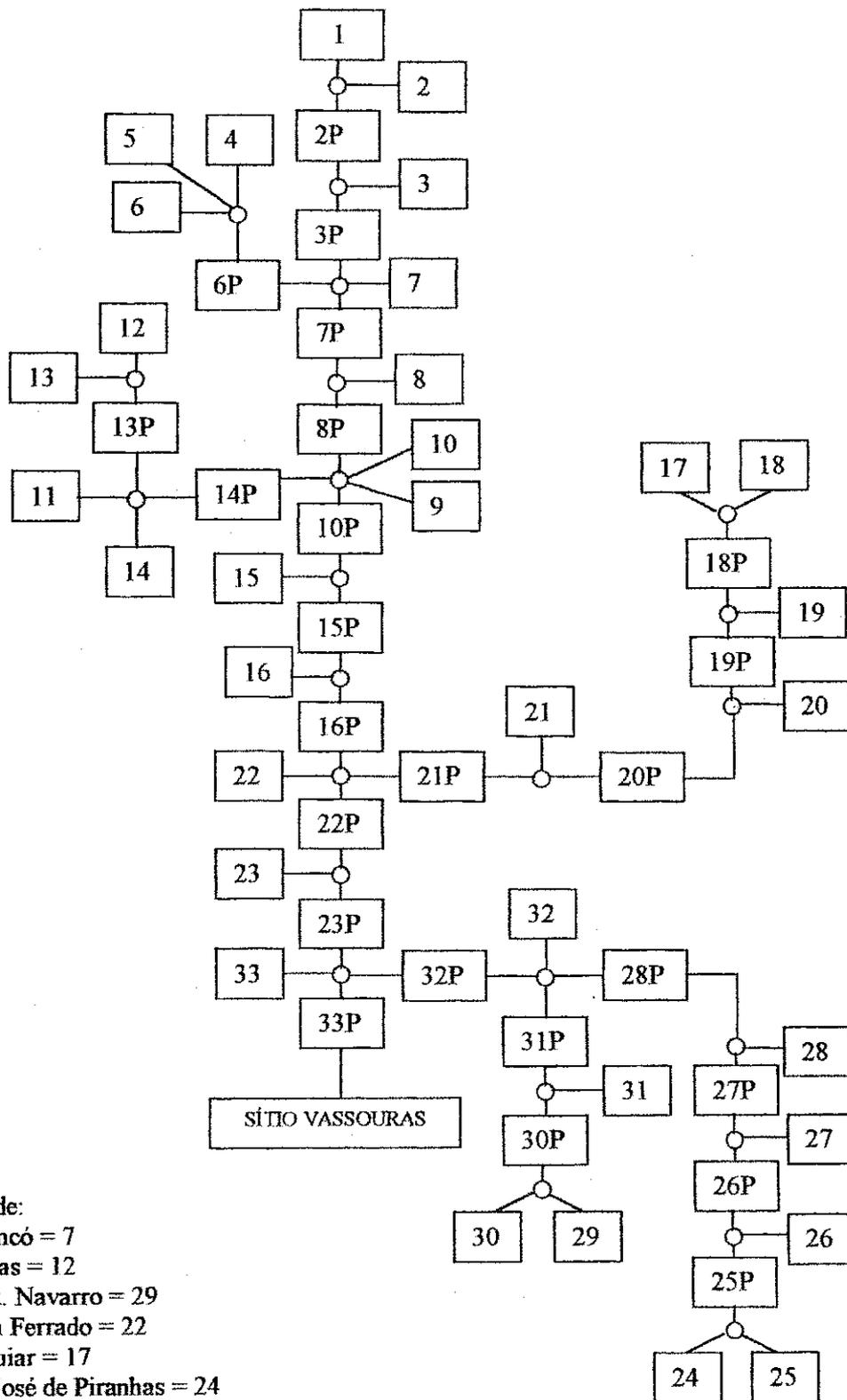
De posse de mapas da SUDENE na escala de 1:100.000, a região limitada pela estação de Sítio Vassouras foi dividida em sub-bacias, sendo respeitados os divisores topográficos e buscando-se coincidir os postos fluviométricos nas saídas das sub-bacias. Foram escolhidas duas discretizações: uma com 55 e outra com 33 sub-bacias, permitindo, assim, uma análise quanto ao processo de subdivisão da bacia estudada.

A Figura 4.6 mostra o esquema linear da subdivisão para a discretização em 33 sub-bacias, explicitando a formação do processo (o esquema linear do modelo na discretização de 55 sub-bacias encontra-se no anexo A). Gera-se o fluxo obedecendo a ordem da sub-bacia. Os fluxos das sub-bacias somam-se nos elementos circulares (confluências) sendo propagado para jusante. A numeração indica a seqüência de cálculo do modelo. As sub-bacias onde existem postos fluviométricos estão na Tabela 4.5.

Os dados das áreas das sub-bacias, coordenadas cartesianas dos seus centróides, cotas e comprimentos de trechos de rios, foram retirados dos mapas da SUDENE na escala 1:100.000 e são apresentados no Anexo B, que é um dos arquivos de entrada do modelo NAVMO.

O método de Williams é utilizado para a propagação do fluxo nos canais, sendo os dados da seção do rio requeridos (Figura 3.3). Até o posto de Piancó, estes já haviam sido definidos (Lopes, 1994), e, com base em dados topográficos da seção de Estevam Marinho, estimou-se as características das seções para o restante dos trechos de rio com propagação. O coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi admitido, com base na literatura (Chow, 1959), igual a 0,025 ($1/n=40$) para o leito principal e 0,2 ($1/n=5$) para os planos laterais de inundação. Estes valores e o valor CN, que caracteriza as condições do solo e seu uso, foram aplicados uniformemente sobre toda a bacia, com a finalidade de se investigar suas influências sobre o escoamento.

O método da curva número (McCuen, 1982), calcula a infiltração potencial em função de condições de chuvas antecedentes, tipo de solo e condições de uso do solo. O fator CN, presente na fórmula de infiltração potencial (Equação 3.19), varia até um limite máximo de 100, que corresponde a uma cobertura completamente impermeável. Neste trabalho o valor de CN foi determinado com base nos valores avaliados por Lopes (1994) para Piancó.



Onde:
 Piancó = 7
 Emas = 12
 Ant. Navarro = 29
 Pau Ferrado = 22
 Aguiar = 17
 S. José de Piranhas = 24
 Boq. de Mãe-d'água = 20
 Santa Rita do Curema = 15
 Sítio Vassouras = 33

Convenção: P = propagação; o = adição de escoamento; □ = sub-bacia

Figura 4.6 - Esquema linear do Rio Piancó /Piranhas para 33 sub-bacias

Tabela 4.5 - Sub-bacias onde existem postos fluviométricos para as duas discretizações.

Postos Fluviométricos	Em 33 sub-bacias	Em 55 sub-bacias
Piancó	7	26
Emas	12	33
Santa Rita do Curema	15	36
Aguiar	17	39
Boqueirão de Mãe-d'água	20	42
Pau Ferrado	22	44
São José de Piranhas	24	46
Antenor Navarro	29	51
Sítio Vassouras	33	55

A determinação do valor CN é feita de acordo com o grupo de solo e seu uso. As condições de infiltração determinam o grupo de solo: A, B, C ou D (Tabela 4.6). A partir desta classificação, e em função da cobertura vegetal, existe um valor CN correspondente ao uso do solo. Com base em ponderações dos diversos usos nas sub-bacias Lopes (1994) encontrou um valor médio de 56, que corresponderia a uma aproximação de 60% de caatinga e 40% de área com culturas.

Existe uma grande incerteza na determinação dos valores CN haja vista a dificuldade de associação com as condições para as quais os valores CN foram determinados pelo SCS e, por outro lado, pelas informações disponíveis sobre usos, na região do estudo. Não existe, por exemplo, um valor CN associado à caatinga, que foi considerado 49 (Lopes, 1994), sendo um tipo de dado ainda impreciso. O anexo B mostra os dados sobre a bacia, sobre os trechos de rios e valores CN. Aqui foi realizada uma investigação sobre a aplicação de um valor médio para todas as sub-bacias, ou seja, até que ponto a não aplicação da distribuição usada por Lopes (1994) influencia a resposta da bacia, comparando-se os resultados por ele admitidos com as respostas obtidas neste trabalho. Através da modificação do valor CN foi investigada a influência da mudança no uso do solo sobre o escoamento na bacia hidrográfica.

Tabela 4.6 - Classificação dos solos em função dos respectivos valores mínimos de capacidade de infiltração.

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)

5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

5.1 Introdução

Os modelos hidrológicos buscam representar o sistema da bacia hidrográfica de modo que se possa prever seu comportamento mediante distintas situações, que podem ser diferenciadas modificando-se as condições que definem o comportamento da bacia dentro do modelo. Para se processar estas informações o modelador realiza simulações que geram as respostas dos modelos e obtém as previsões, sendo estas importantes para análises dos sistemas de recursos hídricos.

Um modelo só é confiável quando suas suposições, entradas e parâmetros, estimam (Sorooshian e Gupta, 1995) os melhores resultados. Para isso, existe um caminho seguido tradicionalmente que se constitui pela escolha do modelo a ser utilizado, seleção e análise dos dados, calibração dos parâmetros do modelo e validação. Após a validação o modelo está apto a ser aplicado com maior confiabilidade.

5.2 Calibração

O processo de calibração envolve a seleção dos valores dos parâmetros do modelo tal que simule, o mais próximo possível, o comportamento do hidrograma observado na região de estudo (Sorooshian e Gupta, 1995), isto é, a busca de um grupo de parâmetros que, inseridos no modelo, gerem resultados próximos aos reais. Parâmetros são valores que podem ser modificados para se obter a melhor estimativa do escoamento. Variam conforme as características da região. Regiões diferentes possuirão grupos de parâmetros diferentes. A calibração é, portanto, um processo de ajuste onde se busca igualar os hidrogramas simulados

dos observados, uma fase que contribui significativamente para a precisão dos modelos hidrológicos (Diniz, 1994).

Existem parâmetros que representam a realidade física da bacia e outros onde não existe esta relação direta, sendo determinados por calibração através de métodos como tentativa e erro ou por técnicas de otimização (Silva e Ewen, 2000). Esta diferença nos tipos de parâmetros depende do tipo de modelo aplicado e da disponibilidade dos dados na região.

5.2.1 Tipos de Calibração

Alguns autores (Diniz, 1994, Sorooshian e Gupta, 1995) distinguem dois tipos principais de calibração: um manual e outro automático. A calibração manual pode utilizar o processo de tentativa e erro, aquele que o modelador manipula os parâmetros até encontrar as melhores respostas, obtendo-se uma grande sensibilidade sobre o sistema; entretanto, este tipo de calibração, para um modelador inexperiente, pode ser um trabalho exaustivo. Na calibração automática, perde-se um pouco desta sensibilidade, mas ganha-se na rapidez da obtenção dos resultados já que ela é realizada por funções ou algoritmos pré-definidos que agilizam a busca das repostas.

Tucci (1998) apresenta classificações mais detalhadas de tipos de calibração e as coloca como métodos tradicionais de determinação de parâmetros. São elas:

- Medida direta – como o próprio nome diz, envolve a obtenção dos valores diretamente em campo, mapas, etc.;
- Amostragem – quando o valor é uma amostra representativa e é aplicada sobre todo o sistema;
- Ajuste por tentativa e erro – de posse das variáveis de entrada e saída (como a vazão), busca-se um melhor ajuste dos hidrogramas, a partir dos parâmetros;
- Ajuste por otimização – quando se busca o melhor grupo de parâmetros através de funções objetivos que, por métodos matemáticos, automaticamente busca a menor diferença entre dados observados e gerados.

A medida direta, a amostragem e o ajuste por tentativa e erro são processos manuais e o ajuste por otimização um processo automático, sendo as classificações apresentadas, entrelaçadas.

Tucci (1998) ainda afirma que os modelos hidrológicos com estrutura conceitual/física buscaram introduzir a estimativa dos parâmetros com base em dados de campo, dispensando a existência de registros históricos. De acordo com Silva e Ewen (2000) um dos problemas associados a este tipo de abordagem é o problema da escala, já que em sua maior parte as medições são feitas em escala pontual e são expandidas para a área de estudo, resultando em perda de precisão na descrição dos processos.

5.2.2 Precisão das Calibrações

Depois do processo de calibração estar realizado, muitas vezes, usam-se funções matemáticas para comprovar a qualidade do ajuste obtido, pois intrinseco a todo o processo existem as incertezas, sejam elas relativas às variáveis de entrada, à estrutura do modelo ou então na definição dos parâmetros, o que pode se refletir nos resultados obtidos.

Diniz (1994) desenvolveu um trabalho de calibração automática de modelos chuva-vazão usando algoritmos genéticos. Para comprovar os resultados obtidos usou análise visual (hidrogramas das vazões observadas e simuladas), índices estatísticos como a raiz quadrada média diária das diferenças entre os valores das vazões observadas e simuladas (um menor valor deste índice indica uma boa aproximação das vazões simuladas e observadas) e ainda funções objetivo mais simples como o critério dos mínimos quadrados. Outros autores como Lopes (1994) usam funções já fornecidas pelo modelo hidrológico aplicado para comprovar o ajuste e a verificação. Este autor usou como indicadores: desvio, desvio hidrológico e diferença de picos de vazão.

5.2.3 Calibração do Modelo NAVMO

O modelo NAVMO foi calibrado por Lopes (1994) em uma bacia localizada no sudoeste do estado da Paraíba, a bacia do rio Piancó (4.550 km²), delimitada pelo posto fluviométrico de mesmo nome (lat. 7°12' e long. 37° 56'), para avaliação do escoamento na bacia. O autor trabalhou a nível diário com uma série de dados fluviométricos de 1964 a 1983

e dados de 16 postos pluviométricos. A calibração foi feita anualmente por tentativa e erro, observando-se os picos, a forma do hidrograma como também o volume total do fluxo, encontrando bons resultados, com exceção dos anos de 1966, 1969, 1970 e 1976, que não foram calibrados. O autor aponta como causa principal problema nos dados, resultando assim, em 16 grupos de parâmetros que são apresentados na Tabela 5.1. Lopes (1994) também tentou calibrar o modelo usando todos os dados de uma só vez, sem êxito.

Tabela 5.1 - Grupos de parâmetros do modelo NAVMO para a região de Piancó.

Ano	MET1	MET2	MAX1	MAX2	KG	EET	EKM	EKL	EKR	ALFA	BETA	BFD	QBSP
1964	0,4	1,0	2,0	7,0	250	3,8	60	60	60	0,44	0,10	95	0,0
1965	0,4	1,0	2,0	7,0	250	7,5	60	60	60	0,20	0,10	95	0,0
1967	0,4	1,0	2,0	7,0	250	5,3	60	60	60	0,44	0,10	95	0,0
1968	0,5	1,0	2,0	7,0	250	6,2	60	60	60	0,36	0,10	95	0,0
1971	0,4	1,0	2,0	7,0	250	6,8	60	60	60	0,28	0,10	95	0,0
1972	0,5	1,0	2,0	7,0	250	6,8	60	60	60	0,37	0,10	95	0,0
1973	0,4	1,0	2,0	7,0	250	4,0	60	60	60	0,41	0,10	95	0,0
1974	0,5	1,0	2,0	7,0	250	2,5	60	60	60	0,48	0,10	95	0,0
1975	0,5	1,0	2,0	7,0	250	4,6	60	60	60	0,35	0,10	95	0,0
1977	0,5	1,0	2,0	7,0	250	2,5	60	60	60	0,46	0,10	95	0,0
1978	0,4	1,0	2,0	7,0	250	3,5	60	60	60	0,29	0,10	95	0,0
1979	0,4	1,0	2,0	7,0	250	3,5	60	60	60	0,40	0,10	95	0,0
1980	0,5	1,0	2,0	7,0	250	6,8	60	60	60	0,42	0,10	95	0,0
1981	0,5	1,0	2,0	7,0	250	7,5	60	60	60	0,16	0,10	95	0,0
1982	0,4	1,0	2,0	7,0	250	6,6	60	60	60	0,24	0,10	95	0,0
1983	0,4	1,0	2,0	7,0	250	6,7	60	60	60	0,34	0,10	95	0,0
Média	0,44	1,0	2,0	7,0	250	5,28	60	60	60	0,35	0,10	95	0,0

Fonte: Lopes, 1994

O trabalho realizado por Lopes (1994) foi pioneiro com o uso do modelo NAVMO e deu boa contribuição, determinando os grupos de parâmetros aptos para simular o escoamento na bacia por ele estudada (bacia do rio Piancó), através da calibração e validação do modelo. Desta maneira, contribuiu também para este trabalho, pois a região do Alto Piranhas aqui selecionada, abrange a bacia do rio Piancó. Sendo o modelo hidrológico

aplicado o mesmo, o NAVMO, optou-se neste trabalho, a se dar ênfase na fase de validação, utilizando-se um valor médio do grupo de parâmetros por ele obtidos para a bacia de Piancó aplicados sobre a área do Alto Piranhas.

5.3 Validação

A validação é a etapa da simulação onde se verifica se o modelo representa bem a realidade da bacia, pode ser considerada ainda como uma fase de verificação da aplicação. Isto deve ser feito em condições diferentes daquelas usadas na calibração para a comprovação da validade do modelo. Assim, toda aplicação de um modelo hidrológico deve ser seguida de uma validação para se permitir fazer a aplicação do modelo em simulações diversas nas bacias hidrográficas.

5.3.1 Tipos de Validação

Existem diferentes métodos de validação. Ewen e Parkin (1996) fazem uma discussão sobre alguns métodos existentes, dando ênfase àqueles propostos por Klemeš (1986), dentre os quais estão:

- Teste de divisão da amostra (split sample) – o teste baseia-se na divisão da amostra disponível em duas partes: uma para calibração e outra para validação;
- Teste de divisão da amostra diferenciada (differential split sample) – neste teste os dados são divididos de acordo com a razão de alguma variável envolvida, para se fazer a validação em condição oposta aquela da calibração. Por exemplo, com a variável precipitação, pode-se calibrar para um período seco e validar-se para um período úmido;
- Teste da bacia homogênea ou vizinha (proxy-catchment) – usa dados de duas bacias, comprovando uma maior validação geral do modelo. Calibra-se com dados de uma bacia e valida-se com os dados de outra.
- Teste da bacia homogênea ou vizinha diferenciada (differential proxy-catchment) – este teste é semelhante ao teste de divisão da amostra

diferenciada, sendo que são dados de bacias diferentes. Ou seja, calibra-se com o período seco de uma bacia e valida-se com o período úmido de outra.

5.3.2 Alguns Estudos Sobre Validação

Os testes de Klemeš (1986) descritos acima podem ser ditos tradicionais na literatura de validação. Mas Ewen e Parkin (1996) afirmam que nenhum dos testes de validação existentes dão uma clara indicação de quão bom um modelo é como ferramenta para prever impactos do clima e uso do solo. Acrescentam ainda que tanto os testes das bacias homogêneas ou vizinhas (proxy-catchment) como os testes que não envolvem calibração, podem ser incorporados em um método adequado de validação de modelos que prevêem estes tipos de impactos.

Ewen e Parkin (1996) introduziram, então, um novo método de validação que pode ser aplicável a qualquer tipo de modelo para a previsão de impactos de mudança de solo e clima. Envolve um teste cego de validação (blind validation) em que não é permitido ao modelador ver os dados observados na bacia (vazão) e, conseqüentemente, não é permitida calibração. O teste consiste em simular envoltórias (máxima e mínima) com base na faixa de variação dos parâmetros do modelo. O modelo é considerado validado quando certa porcentagem dos valores medidos se encontrarem dentro destas fronteiras. Detalhes mais específicos sobre o método encontram-se na literatura (Ewen e Parkin, 1996; Parkin et al., 1996).

Figueiredo (1998) aplicou o método descrito acima na validação do modelo SHETRAN (Bathurst et al, 1996). Ele buscou avaliar as incertezas na modelação do escoamento de água e no transporte de sedimentos a nível diário, mensal e anual. O método de Ewen e Parkin (1996), entretanto, não foi aplicado “cego” já que os dados usados eram previamente conhecidos pelo modelador. Os resultados mostraram que as fronteiras simuladas foram suficientes para englobar a vazão e o transporte de sedimentos observados.

Já Azevedo (1999) desenvolveu um modelo de simulação hidrológica para avaliar impacto de mudanças climáticas na bacia do rio das Velhas, uma sub-bacia do rio São Francisco no Nordeste do Brasil. Para verificar a robustez deste modelo, utilizou um

procedimento proposto por Haan (1977), apud Azevedo (1999), onde a amostra de dados é dividida em dois conjuntos. Com uma delas calibra-se o modelo e se faz então a verificação comparando-se as previsões do modelo com os valores da amostra do segundo conjunto. Em um segundo momento, repete-se a simulação com os conjuntos de dados em ordem reversa. Este procedimento garantiu a robustez do modelo proposto.

Podem ainda ser aplicados outros tipos de teste, de acordo com a necessidade do modelador em demonstrar a validade do seu modelo e a sua aplicação. Lopes (1994), por exemplo, utilizou quatro diferentes tipos de validação do modelo NAVMO em seu trabalho. A primeira delas foi feita com os parâmetros médios dos primeiros quinze anos de séries, simulando o escoamento dos cinco anos restantes. A segunda utilizou os parâmetros médios dos 20 anos de dados e simulou-se estes mesmos anos, nos seus períodos chuvosos e durante o ano inteiro. A terceira simulação buscou considerar os efeitos da grande variabilidade pluviométrica inter-anual, considerando os anos por faixas: secos, úmidos e normais. A quarta validação consistiu em analisar a resposta do modelo ao processo de subdivisão da bacia, testando 15, 26 e 28 sub-bacias. Em todos os casos obteve-se bons resultados.

5.3.3 Validação do Modelo NAVMO

A aplicação de um mesmo grupo de parâmetros sobre uma área da extensão da região do Alto Piranhas é de grande utilidade haja vista que estende a validação realizada por Lopes (1994), pois além da ordem de grandeza da região deste estudo, suas variabilidades, existem outros postos com dados fluviométricos de períodos diferentes, enquadrando-se nos tipos de validação de Klemeš (1986). Com a finalidade de analisar a validação com grupo de parâmetros médios, dois outros critérios de validação foram também testados: com grupos de parâmetros ano a ano, quando o período de dados do posto fosse compatível com os anos calibrados para o posto de Piancó (1964 a 1983), e com grupo de parâmetros definidos por períodos úmidos, secos e normais (feito especialmente para os anos onde não era possível aplicar os parâmetros ano a ano), denominada validação por faixas, possuindo, neste caso, três grupos de parâmetros.

Ademais, existiram dois tipos de discretização da região, como dito no capítulo 4, uma com 33 sub-bacias e outra com 55 sub-bacias. Estas duas discretizações

complementaram um dos tipos de validação realizados por Lopes (1994) que analisou a resposta do modelo ao processo de divisão da bacia de Piancó, com 15, 26 e 28 sub-bacias, já que mais uma discretização foi feita em Piancó: 7 sub-bacias, inseridas na divisão de Sítio Vassouras em 33 sub-bacias (Figura 4.6). Para a divisão em 55 sub-bacias, a bacia de Piancó é dividida em 26 sub-bacias (Anexo A).

a) Validação com aplicação de grupo de parâmetros médios

A validação com os parâmetros médios significa a aplicação de um só grupo de valores para toda a área de estudo, sendo estes, a média dos parâmetros dos anos já estudados por Lopes (1994), indicados na Tabela 5.1. A aplicação dos parâmetros médios sobre a região de Piancó foi realizada por este autor sendo bem sucedida. Entretanto a nova área é aproximadamente 4 vezes maior (~ 15.000 km²). Esta validação foi feita para as duas discretizações de Sítio Vassouras (33 e 55 sub-bacias). Um estudo complementar para a bacia de Piancó foi realizado, com a utilização do grupo de parâmetros médios. Para as discretizações de 15 e 28 sub-bacias apresentadas por Lopes (1994) com parâmetros anuais, foi feita uma verificação com o grupo de parâmetros médios para comparação, além da inclusão de mais uma divisão: 7 sub-bacias (correspondente a divisão de 33 sub-bacias de Sítio Vassouras).

b) Validação com aplicação dos grupos de parâmetros ano a ano

A aplicação dos parâmetros obtidos por Lopes (1994), ano a ano, pode ser realizada apenas para bacias que possuem o mesmo período de dados fluviométricos da calibração (1964 a 1983). Neste caso, incluem-se as bacias de Piancó (mesma utilizada na calibração), Emas, Antenor Navarro, Pau Ferrado e Sítio Vassouras. Os parâmetros de cada ano foram apresentados na Tabela 5.1. Como dito anteriormente os anos de 1966, 1969, 1970 e 1976, não foram calibrados por isso não possuem grupos de parâmetros. Assim, por exemplo, a bacia de Antenor Navarro, que possui série de dados de 1964 a 1972, fica sem estes quatro anos de simulações. A simulação com parâmetros anuais foi realizada nas duas discretizações de Sítio Vassouras.

c) Validação com grupos de parâmetros por faixas

Este tipo de validação foi realizado para contemplar os anos que não possuem o mesmo período que Piancó, como Boqueirão de Mãe-d'água, Santa Rita do Curema e São José de Piranhas, e para os postos com anos não calibrados como Emas e Antenor Navarro, em 1966, 1969, 1970 e 1976. Os parâmetros foram escolhidos conforme a classificação do ano (anos seco, úmido ou normal), através de um índice pluviométrico. Para esta validação foi aplicado apenas um tipo de discretização, a de 55 sub-bacias.

A metodologia aplicada para a classificação dos anos em secos, úmidos e normais, foi a mesma utilizada por Lopes (1994), através de um índice pluviométrico I_p (Equação 5.1) que considera as condições de chuva de anos anteriores. Cada ano possui um peso atribuído que possuem soma igual a unidade. Os pesos atribuídos aos anos atual (α_i) e antecedentes (α_{i-1} , α_{i-2}) foram assim definidos: $\alpha_{i-2} = 0,3$; $\alpha_{i-1} = 0,5$ e $\alpha_i = 0,2$. As faixas de variação, determinando se o ano é seco, normal ou úmido, estão apresentadas na Tabela 5.2.

$$I_p = \frac{\alpha_{i-2}P_{i-2} + \alpha_{i-1}P_{i-1} + \alpha_i P_i}{\bar{P}} \quad (5.1)$$

onde I_p é índice pluviométrico do ano i , α_i , α_{i-1} , α_{i-2} são os pesos dos anos atual e antecedentes, P_i , P_{i-1} , P_{i-2} são as precipitações anuais dos anos atual e antecedentes e \bar{P} é a precipitação média anual.

Tabela 5.2 – Índices anuais de umidade

Faixas	Intervalo do índice	Anos
A	$I_p < 0,9$	Secos
B	$0,9 < I_p < 1,10$	Normais
C	$I_p > 1,10$	Úmidos

Fonte: Lopes, 1994.

De posse dos totais anuais e da média total, pode-se então determinar o enquadramento dos anos nas diferentes faixas. Um exemplo de cálculo encontra-se abaixo:

Precipitação anual de 1912 = 836,26

Precipitação anual de 1913 = 934,88

Precipitação anual de 1914 = 1083,6

$$\text{Índice}(I_p) = \frac{0,3.836,26 + 0,5.934,88 + 0,2.1083,6}{843,90} = 1,11$$

Assim, determinou-se os índices dos vários anos (Tabela 5.3) sendo classificados como secos, úmidos ou normais, conforme o valor de I_p . Com os anos já definidos, separou-se os grupos de parâmetros existentes (1964 a 1983) para as três diferentes faixas (Tabela 5.4) e aplicou-se os três novos grupos aos anos de acordo com as suas classificações.

Tabela 5.3 - Totais anuais das precipitações e índices

Ano	Precip. (mm)	Índice I_p	Ano	Precip. (mm)	Índice I_p
1912	836,26	*	1943	607,88	0,65
1913	934,88	*	1944	715,31	0,69
1914	1083,06	1,11	1945	915,23	0,86
1915	339,95	1,05	1946	699,86	0,96
1919	293,47	*	1962	851,4	*
1920	904,69	*	1963	961,7	*
1921	1140,49	0,91	1964	1126,5	1,14
1922	1057,00	1,25	1965	866,8	1,21
1923	710,09	1,20	1966	564,9	1,05
1924	1314,01	1,11	1967	1216,8	0,93
1925	1125,49	1,30	1968	845,2	1,12
1926	883,31	1,34	1969	756,0	1,11
1927	690,65	1,09	1970	1042,9	1,00
1928	680,13	0,88	1971	1036,6	1,13
1929	1055,58	0,90	1972	747,8	1,16

* Valor não considerado devido a dado faltoso em um dos anos anteriores ou em ambos.

Tabela 5.3 - Totais anuais das precipitações e índices (continuação)

Ano	Precip. (mm)	Índice I _p	Ano	Precip. (mm)	Índice I _p
1930	592,96	1,01	1973	890,2	1,02
1931	519	0,85	1974	1335,0	1,11
1932	367,31	0,61	1975	1036,6	1,35
1933	710,81	0,57	1976	657,8	1,24
1934	1042,20	0,80	1977	989,7	0,99
1935	1278,36	1,17	1978	676,7	0,98
1936	565,93	1,26	1979	773,5	0,94
1937	799,34	0,98	1980	699,5	0,86
1938	715,80	0,84	1981	608,5	0,83
1939	760,88	0,89	1982	449,7	0,72
1940	1317,72	1,02	1983	601,8	0,63
1941	691,42	1,22	1984	919,97	0,96
1942	437,74	0,98	1985	1816,07	1,22
Média = 843,90 mm					

* Valor não considerado devido a dado faltoso em um dos anos anteriores ou em ambos.

Tabela 5.4 - Grupos de Parâmetros por faixas

Anos	MET1	MET2	MAX1	MAX2	KG	EET	EKM	EKL	EKR	ALFA	BETA	BFD	QBSP
Secos	0,45	1,0	2,0	7,0	250	6,9	60	60	60	0,29	0,1	95	0,0
Normais	0,40	1,0	2,0	7,0	250	3,78	60	60	60	0,40	0,1	95	0,0
Úmidos	0,53	1,0	2,0	7,0	250	5,43	60	60	60	0,35	0,1	95	0,0

Fonte: Lopes, 1994

5.4 Análise de Resultados e Discussão

Os resultados serão mostrados e discutidos com relação a volumes e vazões máximas anuais, através de gráficos de dados anuais simulados x dados anuais observados, incluindo o coeficiente de determinação e mostrando pelo menos um hidrograma anual de cada bacia simulada. A organização dos resultados se dá para as nove bacias da região, englobando os três tipos de validação existentes. Salienta-se mais uma vez que, em três bacias, quais sejam: Boqueirão de Mãe d'água, Santa Rita do Curema, e São José de Piranhas, os

dados são antigos (diferentes do período 1964-1983) e não comportaram a validação com parâmetros anuais.

5.4.1 Bacia de Piancó – 4.550 km² (1964 a 1983)

Os resultados obtidos para a bacia de Piancó encontram-se na Figura 5.1 e na Tabela 5.5. O primeiro ponto importante na validação é o sucesso da aplicação do valor CN e do coeficiente de Manning-Strickler ($1/n$) médios sobre todas as sub-bacias (Figura 5.1), já que os resultados não divergiram dos encontrados por Lopes (1994), que os aplicou de maneira distribuída, sem grandes diferenças nos coeficientes de determinação (Tabela 5.5).

Os hidrogramas gerados mostram um bom comportamento em toda a série como comprovam os hidrogramas das Figuras 5.2 e 5.3, nas duas discretizações aplicadas, com exceção dos anos de 1966, 1969, 1970 e 1976 que não constam na validação já que não foram calibrados. De modo geral, a discretização não afetou diretamente os resultados, parecidos para as sub-divisões de 15 e 28 sub-bacias, e para as discretizações de 7 e 26 sub-bacias, tanto no caso dos volumes anuais quanto no das vazões máximas anuais (Figura 5.1), com exceção da discretização de 7 sub-bacias nas vazões máximas anuais, que difere ligeiramente das demais. Esta discretização é um pouco mais “grosseira” que as outras, ou seja, possui sub-bacias maiores perdendo um pouco da sensibilidade na captação das heterogeneidades da bacia. Este efeito é sentido principalmente nas vazões máximas, pois a calibração do modelo foi realizada com base nos picos. Contudo, o coeficiente de determinação obtido das vazões máximas anuais observadas x simuladas não difere tanto das demais (Tabela 5.5).

Os volumes anuais simulados com parâmetros médios apresentaram bons resultados visto que com parâmetros anuais e com parâmetros por faixas, forneceram excelentes resultados, já esperados, devido a semelhança com as condições de calibração do modelo apresentados por Lopes (1994). Os bons coeficientes de determinação são apresentados na Tabela 5.5, sendo os resultados, satisfatórios.

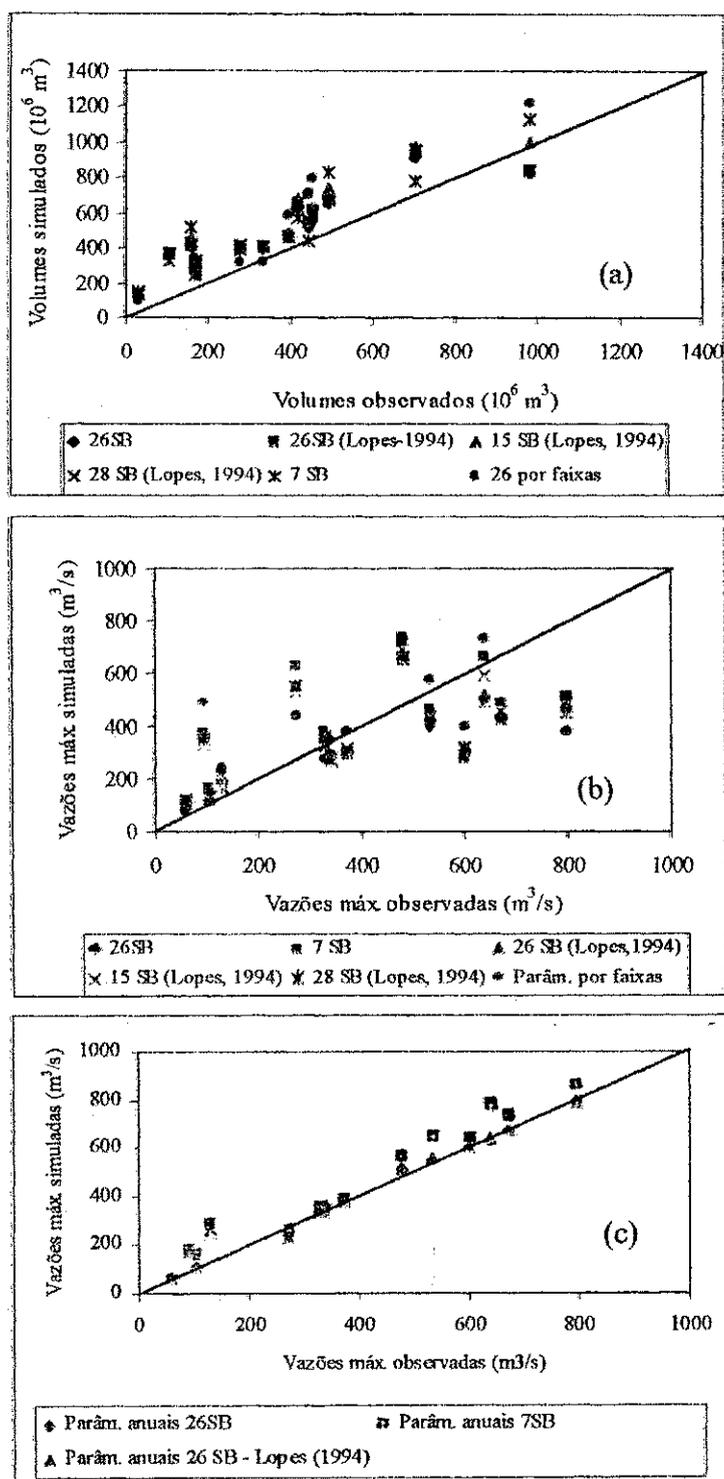


Figura 5.1 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Piancó: (a) Volumes anuais com parâmetros médios (b) Vazões máximas anuais com parâmetros médios (c) Vazões máximas anuais com parâmetros anuais

Tabela 5.5 - Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Piancó, usando diversas discretizações.

Discretização	Parâmetros Médios		Parâmetros Anuais		Parâm. por Faixas	
	Volumes**	Vazões Máximas	Volumes	Vazões Máximas	Volumes	Vazões Máximas
7 SB*	0,85	0,34	0,79	0,96	-	-
15 SB (Lopes, 1994)	0,88	0,43	-	-	-	-
26 SB	0,84	0,38	0,81	0,98	0,90	0,34
26 SB (Lopes, 1994)	0,84	0,37	0,81	0,97	-	-
28 SB (Lopes, 1994)	0,82	0,38	-	-	-	-

* sub-bacias; ** sem considerar os anos de 1968 e 1974.

Já em relação às vazões máximas anuais, houve diferenças mais notáveis. Na aplicação dos parâmetros médios, percebe-se que as vazões máximas anuais (Figura 5.1b) se dispersaram em relação à linha de iguais valores. Este efeito se desfez com a aplicação dos parâmetros anuais, com melhora significativa dos resultados (Figura 5.1c). Isto se deve ao fato da calibração do modelo (no posto de Piancó) ter sido feita principalmente aproximando-se os picos dos eventos e observando-se os hidrogramas; quando não são aplicadas as condições da calibração (com grupo de parâmetros anuais e 26 sub-bacias), como no caso dos parâmetros médios e por faixas e a discretização de 7 sub-bacias, o efeito foi sentido a priori nos picos, com a dispersão em relação a linha de iguais valores. A análise do trabalho anterior não detectou o efeito nas vazões máximas por não considerar gráficos de vazões anuais observadas x simuladas. Notou-se um efeito significativo dos anos de 1968 e 1974 sobre os resultados, os quais foram retirados da análise. Além disso, nestes anos, na aplicação em 7 sub-bacias, houve uma seleção diferenciada dos postos pluviométricos para o cálculo da precipitação média, aumentando a precipitação média nas sub-bacias. O efeito da retirada destes anos se fez sentir no coeficiente de determinação que passou de 0,51 para 0,85.

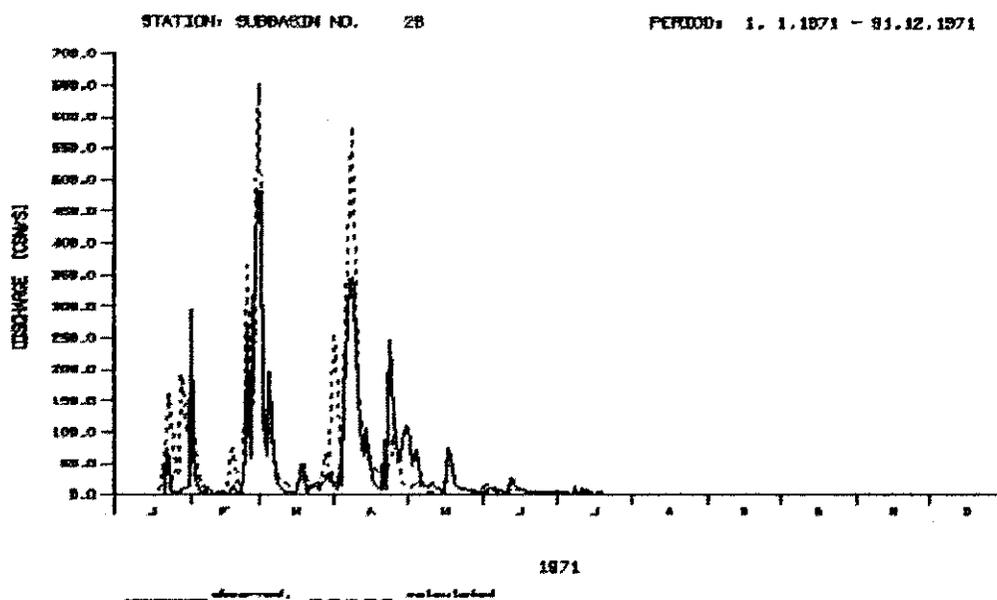


Figura 5.2 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Piancó subdividida em 26 sub-bacias no ano de 1971 (— observado, ----simulado)

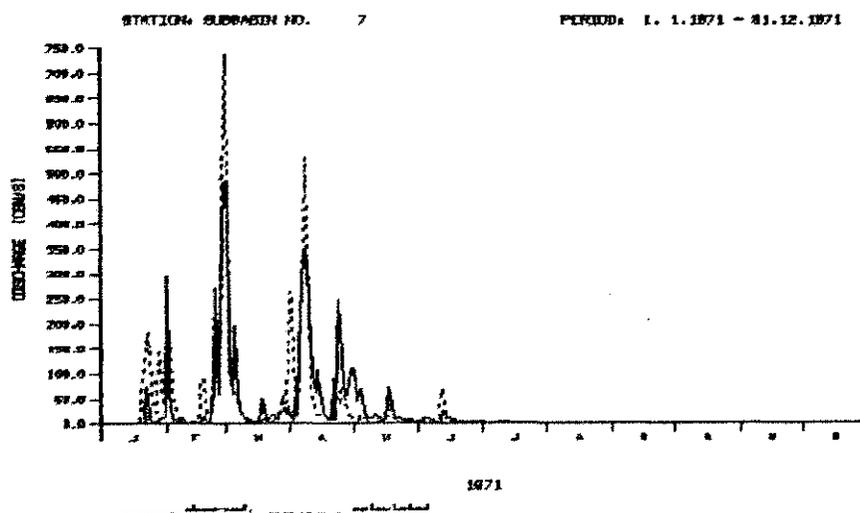


Figura 5.3 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Piancó subdividida em 7 sub-bacias no ano de 1971 (— observado, ----simulado)

5.4.2 Bacia de Emas – 530 km² (1964 a 1972)

A bacia de Emas foi simulada de maneira concentrada, dentro da bacia delimitada por Sítio Vassouras. O ano de 1966 foi excluído das simulações por possuir poucos meses de dados, impossibilitando sua validação.

Nos três tipos de validação testados os resultados para os volumes simulados anuais mostraram-se bons, embora superestimados, seguindo todos a mesma tendência (Figura 5.4a). Quanto às vazões máximas, embora possuindo baixos coeficientes de determinação (Tabela 5.6), principalmente na aplicação dos parâmetros anuais, seguiram uma mesma tendência formando uma nuvem de pontos acima da linha de iguais valores (Figura 5.4b). O baixo valor do coeficiente de determinação para aplicação dos parâmetros anuais, neste caso, pode ser devido ao fato de terem sido excluídos os anos de 1969 e 1970 (que não foram calibrados para Piancó) os quais podem ter significativa influência. Nos outros dois tipos de validação, onde a correlação foi baixa, se fossem retirados estes dois anos, não existiria correlação nenhuma. Este fato se faz sentir principalmente nas vazões máximas (nos volumes não houve este tipo de problema).

Percebe-se que mesmo com coeficientes de determinação baixos, os picos foram razoavelmente bem representados temporalmente, conforme pode ser visto no hidrograma apresentado na Figura 5.5.

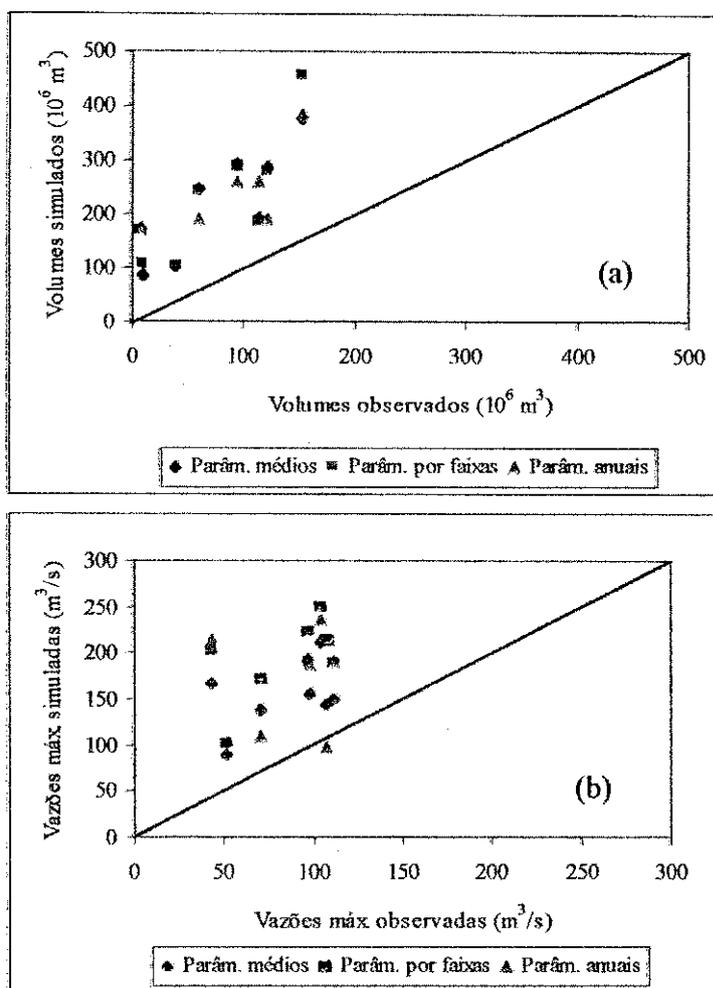


Figura 5.4 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Emas: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Tabela 5.6 – Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Emas

Validação	Volumes	Vazões Máximas
Parâmetros médios	0,69	0,21
Parâmetros anuais	0,56	0,01
Parâmetros por faixas	0,66	0,34

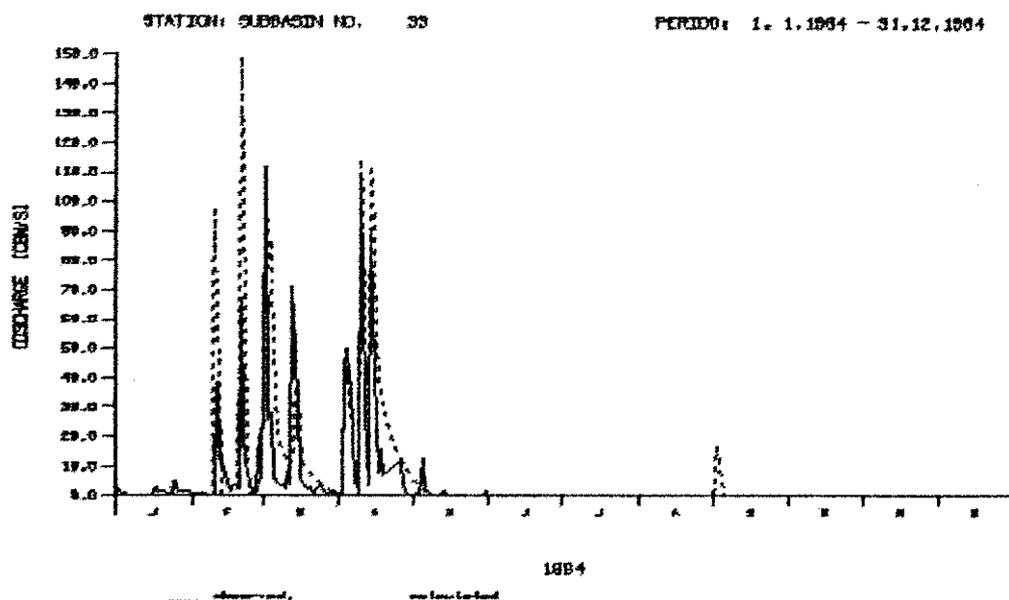


Figura 5.5 - Hidrogramas simulado e observado na bacia de Emas no ano de 1964 (— observado, ---- simulado).

5.4.3 Bacia de Pau Ferrado – 8.050 km² (1967, 1968, 1971, 1973 a 1975)

A bacia de Pau Ferrado é de extrema importância para a região. A localização do seu posto está a jusante do Açude Coremas-Mãe-d'água, podendo ser usado para avaliar os efeitos sobre a grande área que ele delimita.

Dependendo do tipo de validação aplicado, houve efeito significativo em dois anos em particular. A validação com parâmetros anuais forneceram bons resultados (Figura 5.6), com coeficientes de determinação satisfatórios (Tabela 5.7). Mas grande efeito foi sentido no ano de 1967 nos outros dois tipos de validação, que não utilizaram os parâmetros anuais. Para a validação com grupo de parâmetros médios, o coeficiente de determinação teve um crescimento médio (para as duas discretizações aplicadas) de 0,28 para 0,67, desconsiderando o ano de 1967. Efeito foi sentido também desconsiderando o ano de 1973, tanto na validação com grupo de parâmetros médios como na validação por faixas, sendo o efeito mais evidenciado nesta última, com crescimento do coeficiente de determinação de 0,18 para 0,89. No caso da validação dos parâmetros médios, o efeito causado pelos anos se deve principalmente ao fato da não aplicação do grupo de parâmetros específicos do ano. No caso

da validação por faixas, os efeitos sobre os anos se deve ao enquadramento das faixas para estes respectivos anos. Por exemplo, o ano de 1973 que foi classificado como ano normal (índice $I = 1,01$), se estivesse em outra faixa (anos úmidos $I > 1,10$) não haveria este problema e o coeficiente de determinação seria melhor. Possivelmente os pesos fornecidos aos anos podem ter afetado estes especificamente, havendo significativa influência nos resultados.

As vazões máximas anuais não forneceram resultados razoáveis e, assim como na bacia de Piancó, as respostas das simulações melhoram com a aplicação dos parâmetros anuais.

As duas discretizações (assim como nas demais bacias onde houve mais de um tipo de divisão) apresentaram resultados semelhantes, embora em ambas, tanto os volumes e as vazões máximas estejam superestimados, como mostram os hidrogramas do ano de 1968 nas duas discretizações (Figuras 5.7 e 5.8).



Figura 5.6 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Pau Ferrado: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Tabela 5.7 - Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Pau Ferrado

Validação	Discretização: 55 SB*		Discretização: 33 SB**	
	Volumes	Vazões Máximas	Volumes	Vazões Máximas
Parâmetros médios	0,76	0,13	0,57	0,06
Parâmetros anuais	0,89	0,55	0,84	0,52
Parâmetros por faixas	0,18	0,19	-	-

* saída da bacia na sub-bacia 44; ** saída da bacia na sub-bacia 22

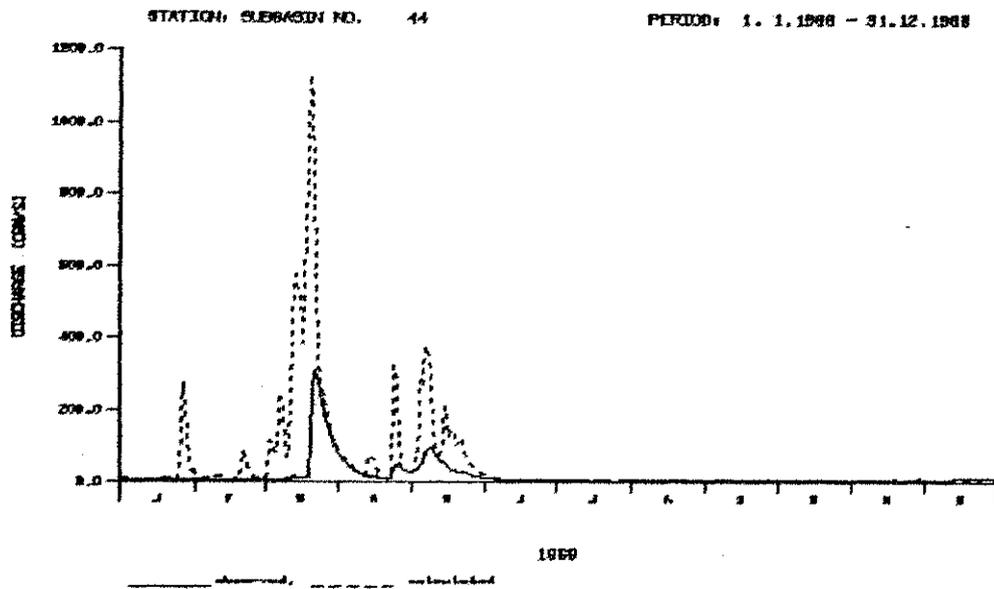


Figura 5.7 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 44 sub-bacias no ano de 1968 (— observado, ----simulado).

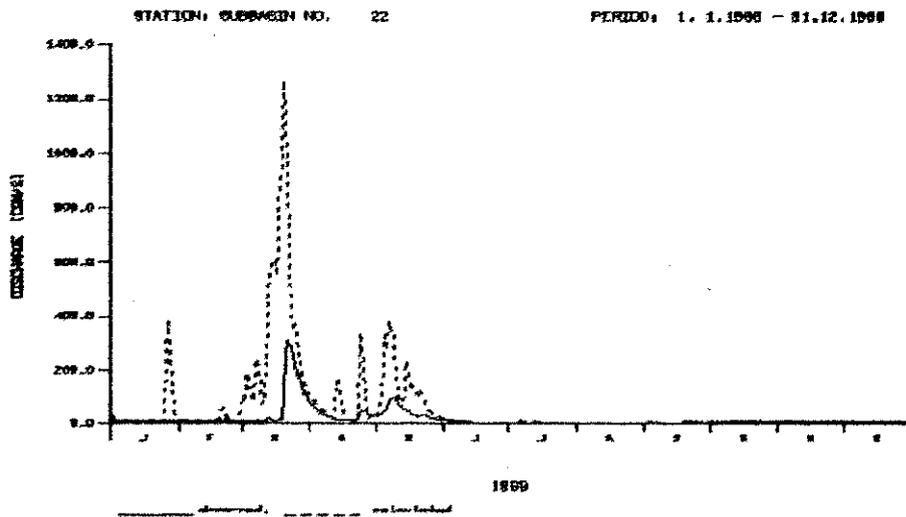


Figura 5.8 - Hidrogramas simulado e observado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 22 sub-bacias no ano de 1968 (— observado, ----simulado).

5.4.4 Bacia de Aguiar - 495 km² (1969 e 1970)

A bacia do posto fluviométrico de Aguiar possuía apenas dois anos de dados, os quais não são completos, com registros para o período entre os meses de março a maio. Foi realizada apenas a validação com parâmetros médios para se ter o sentimento da resposta do modelo nesta bacia. Os hidrogramas encontrados estão na Figura 5.9. Gráficos com dados anuais observados x dados anuais simulados não foram gerados por terem apenas dois pontos (1969 e 1970).

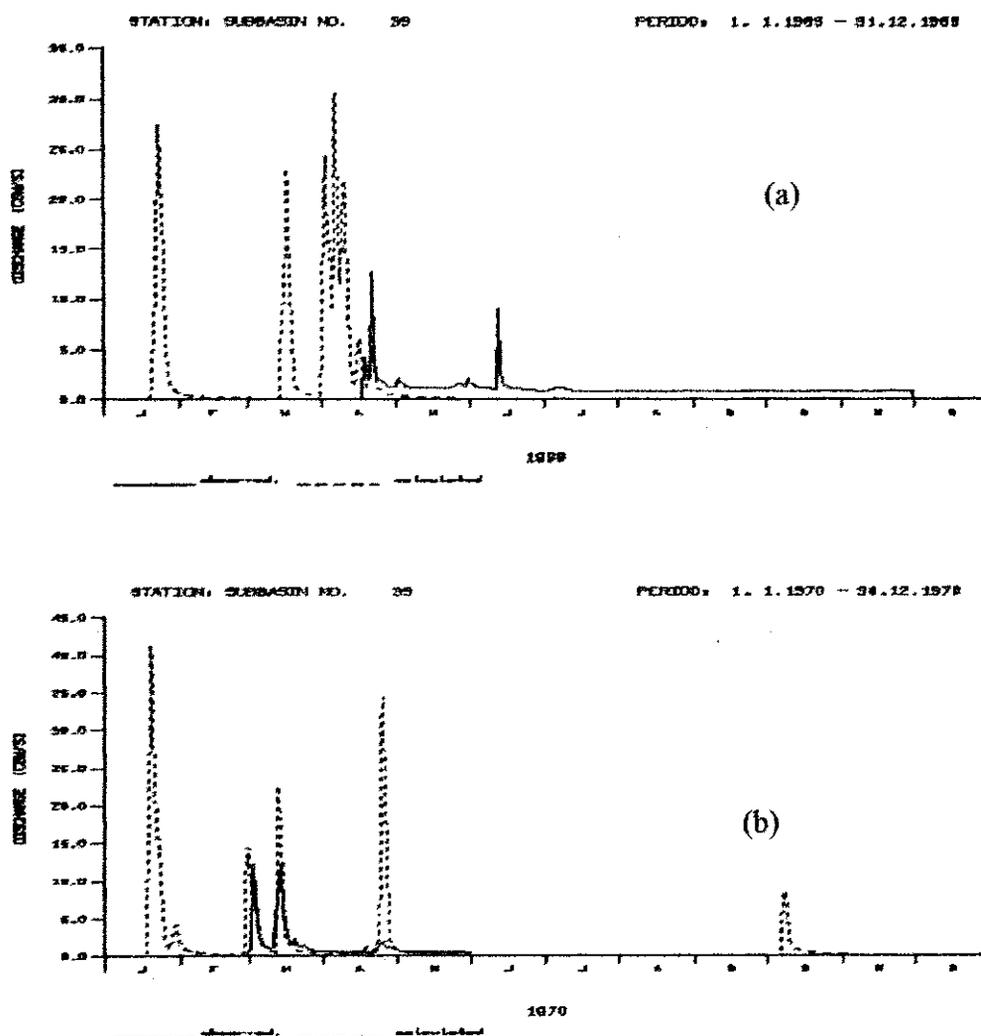


Figura 5.9 - Hidrogramas simulado e observado na bacia de Aguiar: (a)1969 e (b)1970 (— observado, ----simulado)

5.4.5 Bacia de Antenor Navarro – 1.580 km² (1964 a 1972)

Esta bacia, assim como a de Emas, foi simulada de maneira concentrada dentro da área estudada. Os resultados, tanto para vazões máximas como para volumes anuais, não foram satisfatórios nem com a aplicação dos parâmetros médios, nem com a aplicação dos parâmetros anuais (Figura 5.10). O que incitou uma investigação mais profunda, isolando a bacia da área delimitada de Sítio Vassouras, simulando-a de maneira distribuída, dividindo sua área em sete sub-bacias. Entretanto, não houve melhoria nos resultados com o uso dos parâmetros médios. Já com a aplicação da validação dos parâmetros por faixas, houve significativa melhoria nos volumes, com coeficiente de determinação passando de 0,24 para 0,61, embora as vazões máximas continuem com baixas correlações (Tabela 5.8).

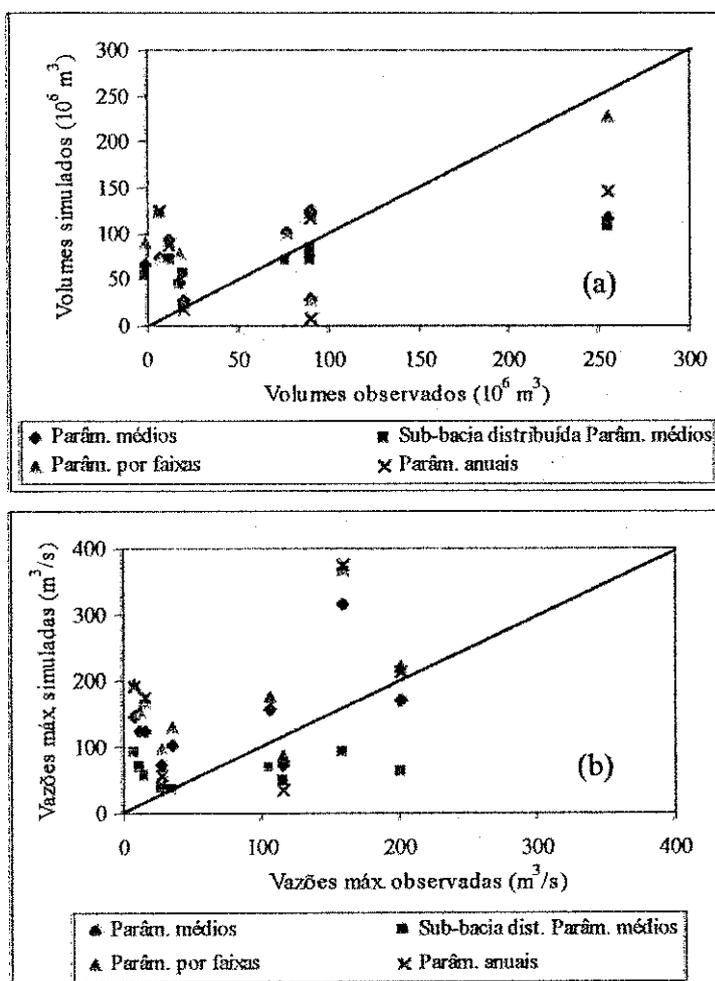


Figura 5.10 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Antenor Navarro: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Mesmo com respostas relativamente ruins com a aplicação dos parâmetros médios, os hidrogramas são razoáveis visualmente (Figura 5.11). Ademais, acredita-se que, com uma calibração os resultados melhorem significativamente. Esta dispersão nos resultados pode ser explicada pelo fato da bacia de Antenor Navarro estar isolada (no extremo noroeste) e as características nesta região diferirem muito das características da região de Piancó.

Tabela 5.8 - Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Antenor Navarro

Validação	Volumes	Vazões Máximas
Parâmetros médios	0,24	0,23
Parâmetros anuais	0,17	0,16
Parâmetros médios (bacia subdividida)	0,22	0,03
Parâmetros por faixas	0,61	0,28

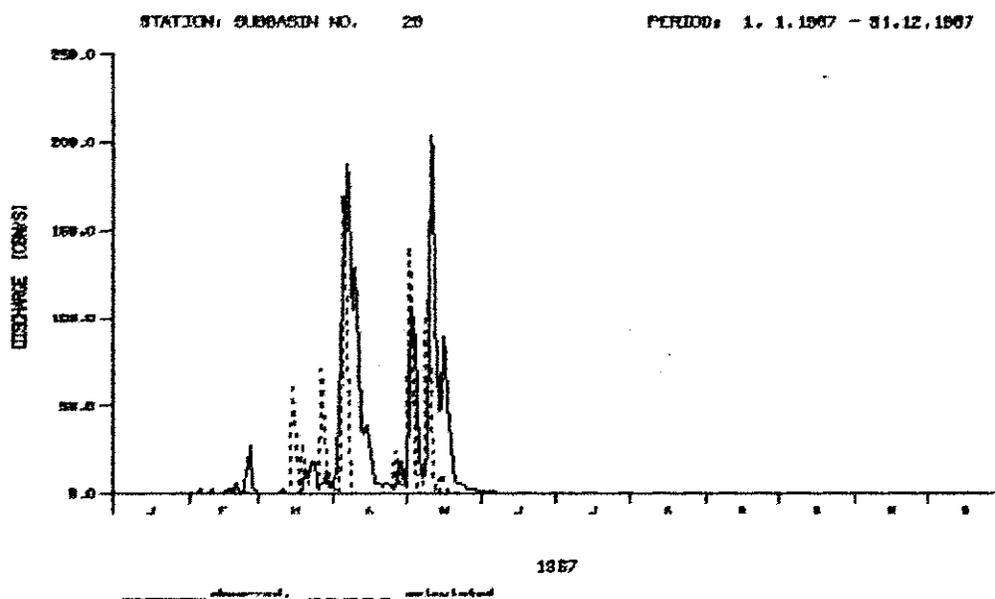


Figura 5.11 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Antenor Navarro no ano de 1967 (— observado, ----simulado)

5.4.6 Bacia de Sítio Vassouras – 14.850 km² (1963 a 1985)

Esta bacia engloba toda área de estudo neste trabalho. Foram testadas duas discretizações: 33 e 55 sub-bacias, que não diferiram nos seus resultados.

Os volumes anuais, para as três validações, seguiram uma mesma tendência (Figura 5.12a), obtendo-se boas correlações (Tabela 5.9), embora ligeiramente superestimados. Este comportamento era esperado já que os reservatórios nesta grande área com suas vazões de regularização a montante não foram considerados. Já as vazões máximas anuais não apresentaram correlações razoáveis nos três casos, mas formam uma nuvem de pontos acima da linha de iguais valores, tanto na aplicação de parâmetros médios quanto para parâmetros por faixas. O ponto importante, contudo, é o efeito nelas causado pela aplicação de parâmetros anuais que elevou o coeficiente de determinação de 0,04 para 0,36 em média (Tabela. 5.9).

Os hidrogramas das Figuras 5.13 e 5.14 mostram que mesmo os coeficientes de determinação sendo baixos para as vazões máximas, existe uma boa representação dos picos temporalmente.

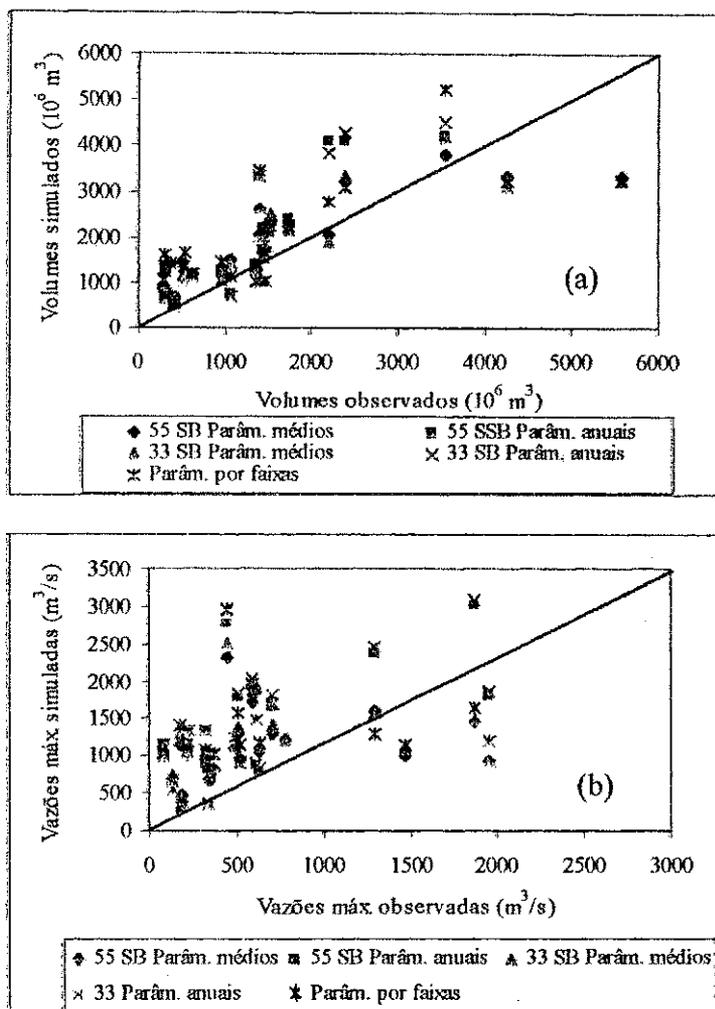


Figura 5.12 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Sítio Vassouras: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Tabela 5.9 - Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Sítio Vassouras

Validação	Discretização: 55 SB		Discretização: 33 SB	
	Volumes	Vazões Máximas	Volumes	Vazões Máximas
Parâmetros médios	0,76	0,05	0,70	0,04
Parâmetros anuais	0,87	0,36	0,87	0,38
Parâmetros por faixas	0,59	0,03	-	-

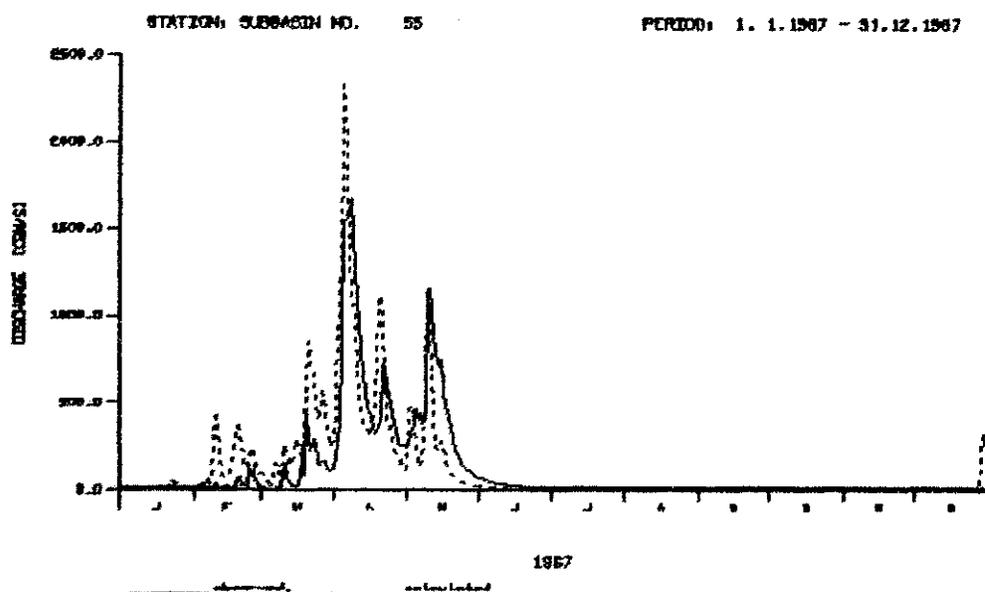


Figura 5.13 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 55 sub-bacias no ano de 1967 (— observado, ----simulado)

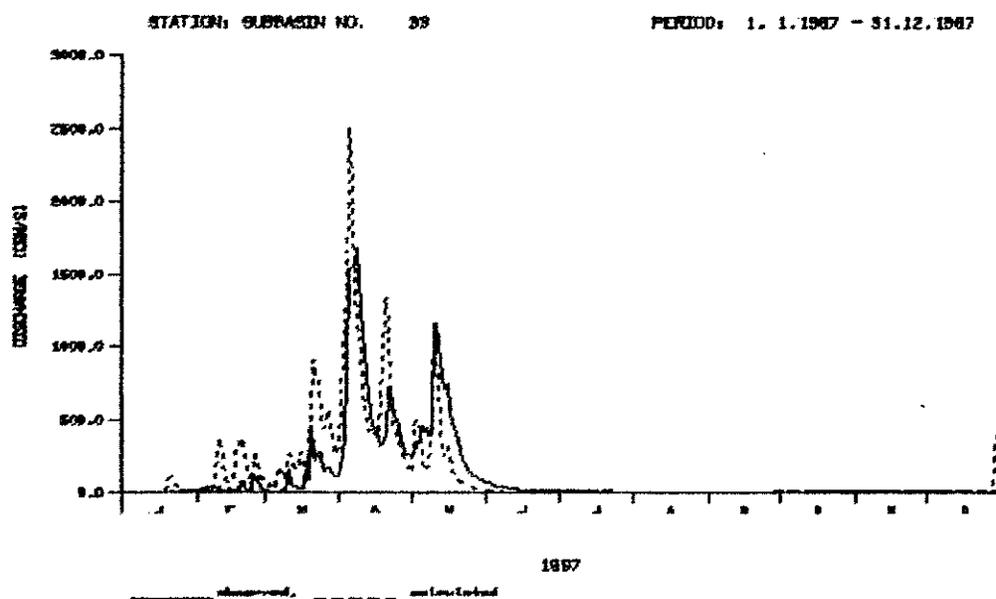


Figura 5.14 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 33 sub-bacias no ano de 1967 (— observado, ----simulado)

5.4.7 Bacia de Boqueirão de Mãe-d'água – 1.063,5 km² (1923 a 1946)

Esta é uma bacia cujos dados ainda não tinham sido testados. Além deste fato, o posto de observação era localizado onde foi construído o Açude de Mãe d'água.

Sendo os dados do posto antigos, como já comentado, a validação com parâmetros anuais não pôde ser realizada. Os resultados foram satisfatórios nos outros dois casos de validação, tanto para os volumes anuais (Figura 5.15a) como para as vazões máximas anuais (Figura 5.15b), embora em ambos os casos os valores estejam subestimados. Os coeficientes de determinação são razoáveis (Tabela 5.10) e refletem o bom desempenho do modelo.

Nas subdivisões da bacia de Sítio Vassouras, com 55 e 33 sub-bacias, as saídas para Boqueirão de Mãe'd'água correspondem às sub-bacias 42 e 20, respectivamente. Os resultados obtidos nestas sub-bacias (42 e 20), seguiram a mesma tendência que os demais, não possuindo grandes diferenças de resultados, conforme mostrado nas Figuras 5.16 e 5.17. Estas figuras também comprovam como foram bem simulados a forma e volume dos hidrogramas, além da boa representatividade dos picos no tempo.

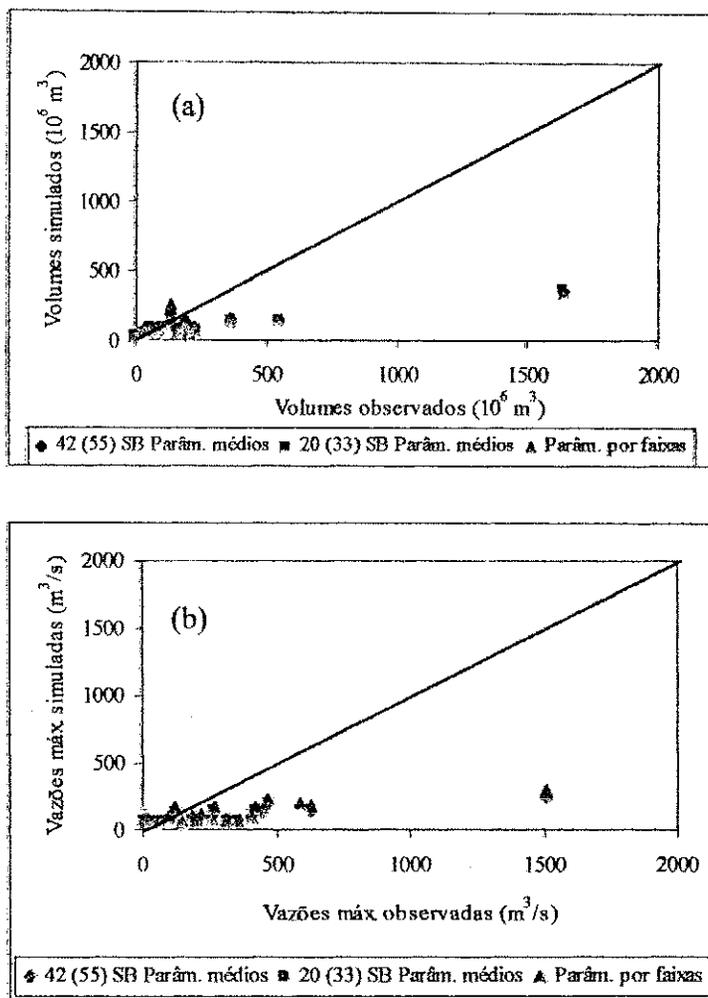


Figura 5.15 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Tabela 5.10 - Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água

Validação	Discretização: 55 SB		Discretização: 33 SB	
	Volumes	Vazões Máximas	Volumes	Vazões Máximas
Parâmetros médios	0,77	0,66	0,81	0,66
Parâmetros por faixas	0,63	0,66	-	-

* saída na sub-bacia 42; ** saída na sub-bacia 20

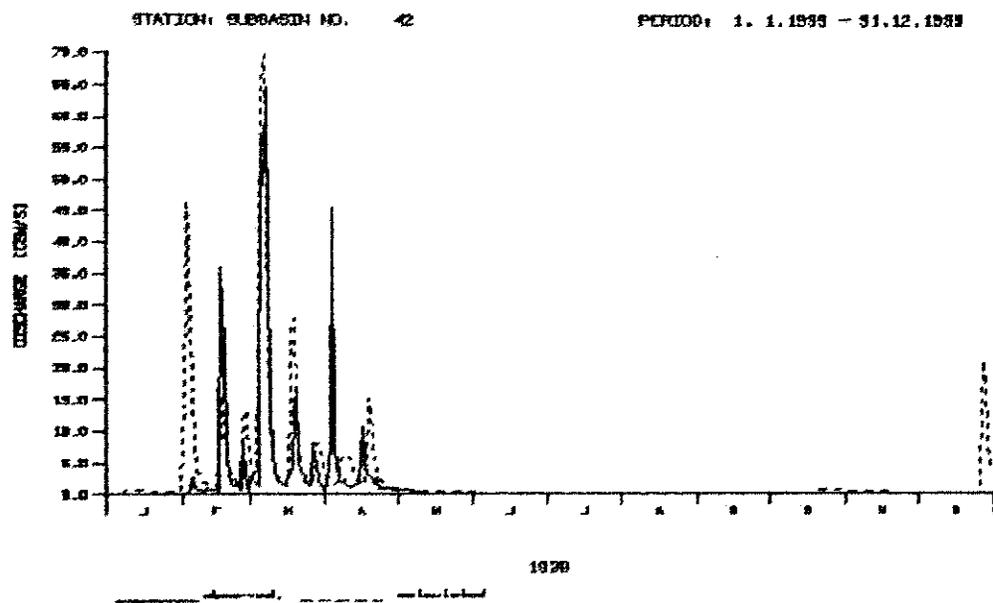


Figura 5.16 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Boqueirão de Mãe-d’água subdividida em 42 sub-bacias no ano de 1939 (— observado, ---- simulado)

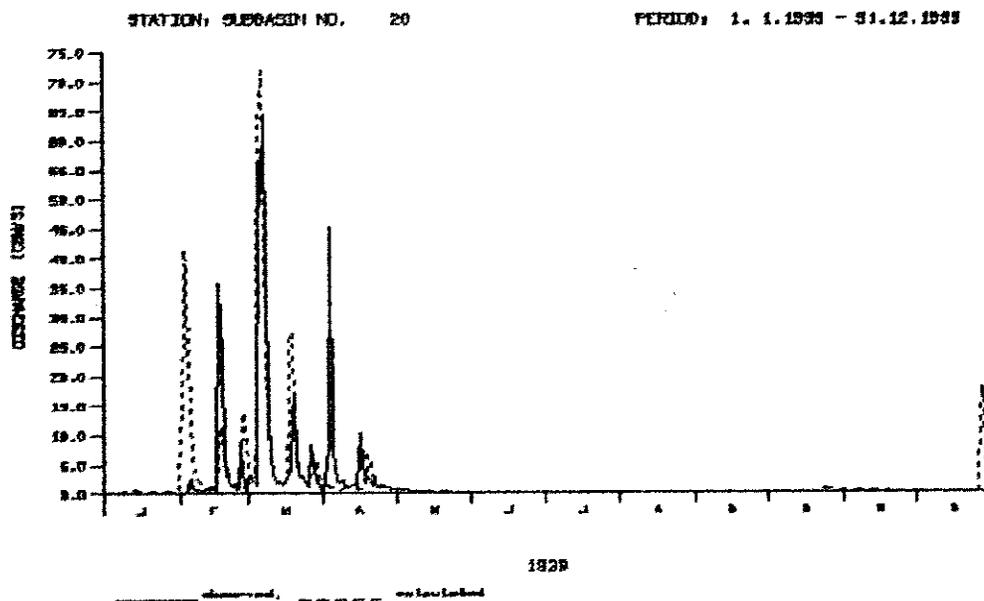


Figura 5.17 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Boqueirão de Mãe-d’água subdividida em 20 sub-bacias no ano de 1939 (— observado, ---- simulado)

5.4.8 Bacia de Santa Rita do Curema – 6.868,68 km² (1913, 1914, 1921 a 1941)

Para as duas discretizações da bacia de Sítio Vassouras, com 55 e 33 sub-bacias, as saídas da bacia de Santa Rita do Curema correspondem às sub-bacias 36 e 15, respectivamente. Os resultados obtidos nestas sub-bacias (36 e 15) nos testes de validação com parâmetros médios e por faixas (parâmetros anuais não se aplica pelo período), foram resultados satisfatórios para os volumes (Figura 5.18a), com valores seguindo a mesma tendência e com coeficientes de determinação aproximadamente igual a 0,52 (Tabela 5.11). As vazões máximas anuais, não apresentaram uma única tendência, formando uma nuvem de pontos no gráfico (Figura 5.18b) com baixos coeficientes de determinação. Entretanto, os picos foram bem representados temporalmente como mostram os hidrogramas apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20. Estas figuras, assim como os resultado em geral obtidos para esta bacia não evidenciam grandes diferenças nas duas discretizações.

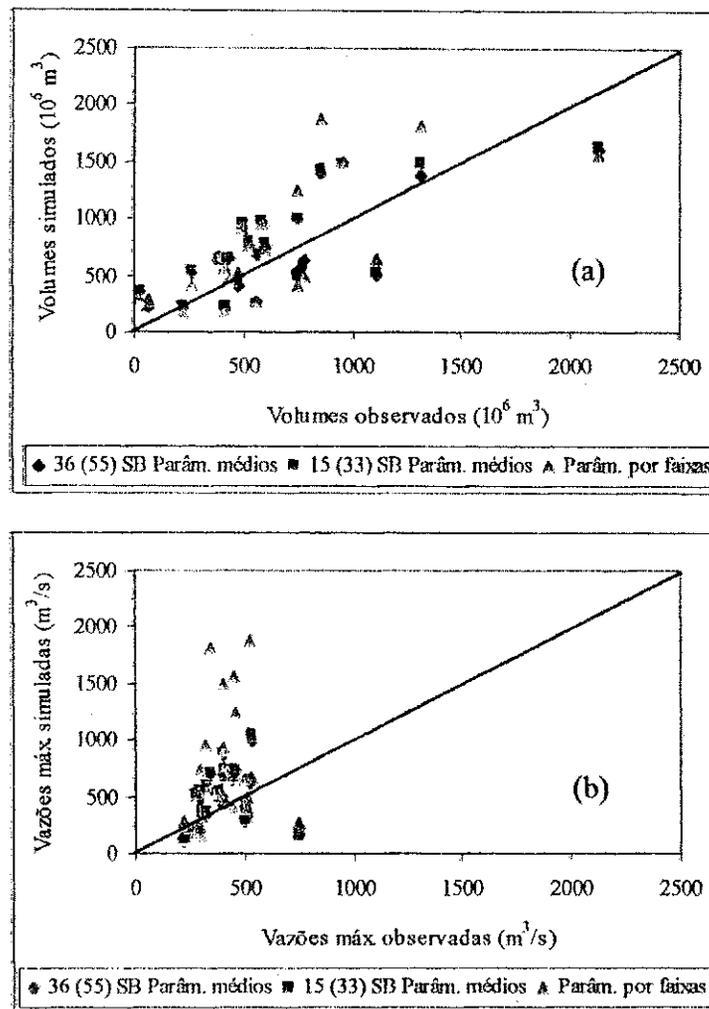


Figura 5.18 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de Santa Rita do Curema (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Tabela 5.11 - Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de Santa Rita do Curema

Validação	Discretização: 55 SB		Discretização: 33 SB	
	Volumes	Vazões Máximas	Volumes	Vazões Máximas
Parâmetros médios	0,55	0,02	0,56	0,02
Parâmetros por faixas	0,51	0,02	-	-

* saída na sub-bacia 36; ** saída na sub-bacia 15

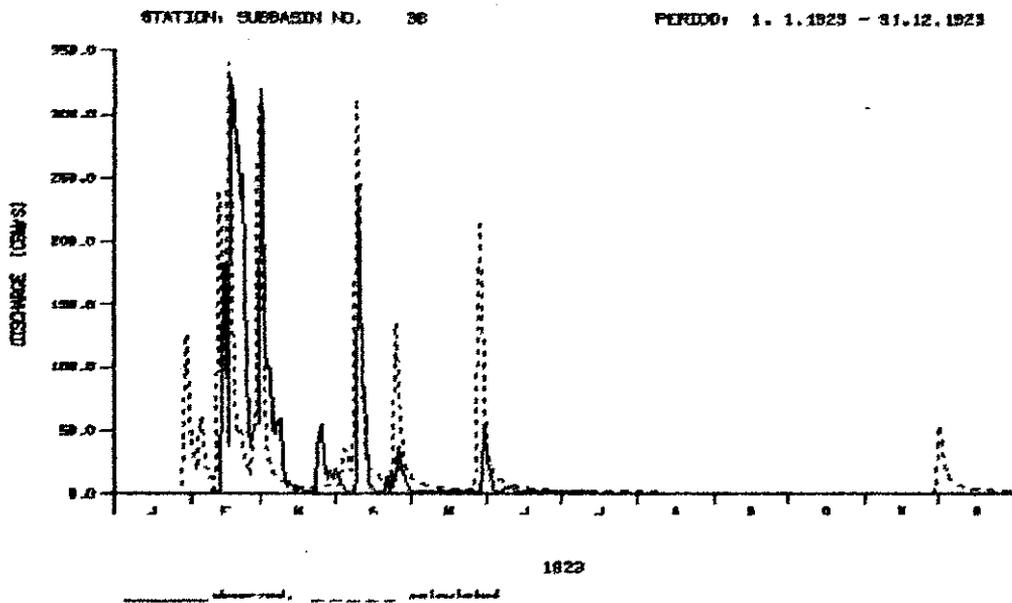


Figura 5.19 - Hidrogramas simulado e observado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 36 sub-bacias no ano de 1923 (—observado, ----simulado)

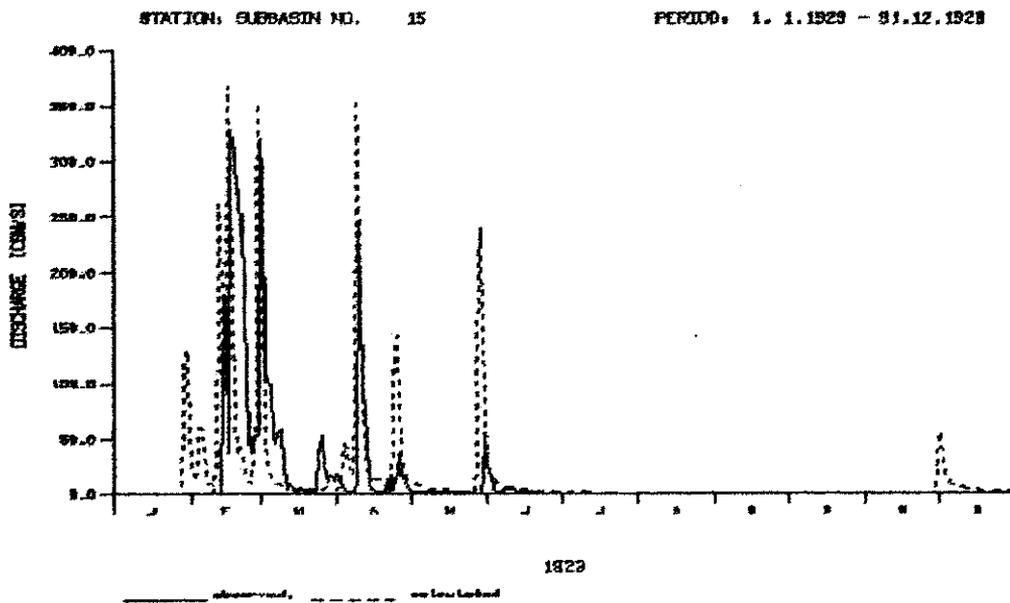


Figura 5.20 - Hidrogramas simulado e observado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 15 sub-bacias no ano de 1923 (—observado, ----simulado)

5.4.9 Bacia de São José de Piranhas – 475 km² (1912 a 1915 e 1921 a 1935)

Esta sub-bacia foi simulada de maneira concentrada, dentro da área delimitada por Sítio Vassouras. Seu comportamento é bastante semelhante ao do posto Boqueirão de

Mãe-d'água. Embora com vazões subestimadas, o comportamento da série simulada, tanto no tocante aos volumes quanto às vazões máximas anuais, possui uma tendência marcante (Figura 5.21) salientada pelos seus bons coeficientes de determinação (Tabela 5.12).

A Figura 5.22 mostra hidrogramas simulados e observados no ano de 1935 onde são visíveis a subestimação do volume e da vazão máxima. No entanto, enfatiza-se que esta última é bem representada temporalmente.

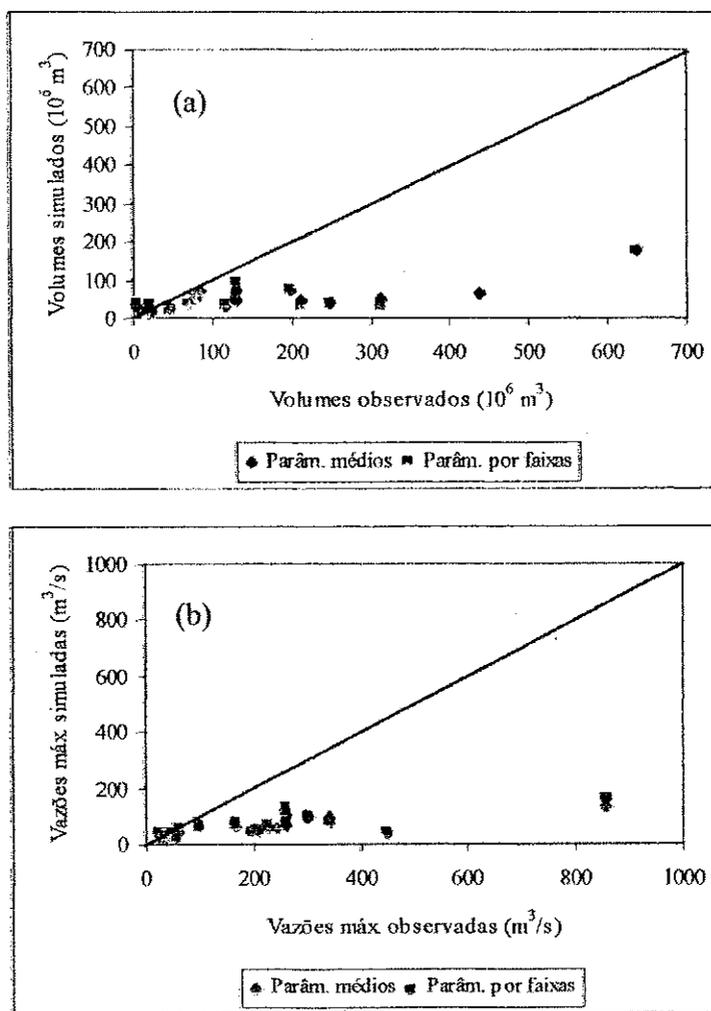


Figura 5.21 – Comparação entre valores simulados e observados na bacia de São José de Piranhas (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Tabela 5.12 - Coeficientes de determinação (r^2) obtidos a partir de valores simulados e observados na bacia de São José de Piranhas

Validação	Volumes	Vazões Máximas
Parâmetros médios	0,64	0,51
Parâmetros por faixas	0,69	0,60

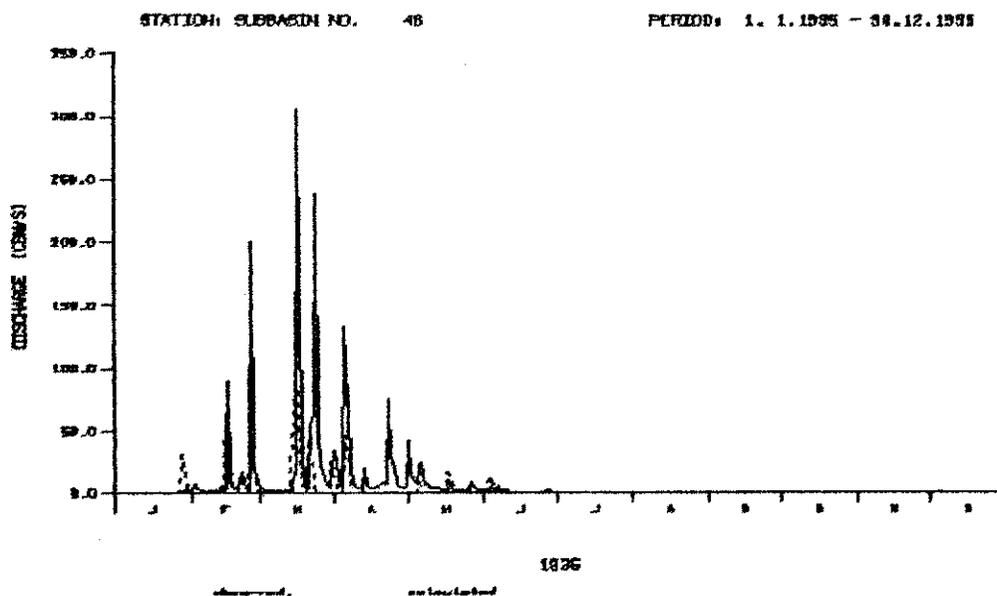


Figura 5.22 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de São José de Piranhas no ano de 1935 (— observado, ----simulado)

5.4.10 Comentários Finais

De modo geral, os volumes anuais simulados foram razoáveis nas três validações aplicadas, com exceção da bacia de Aguiar, devido aos poucos dados dos seus dois anos de série, e da bacia de Antenor Navarro, que para a validação com parâmetros médios e com parâmetros anuais não apresentou uma tendência clara. Assim, estes postos não foram validados com grupo de parâmetros médios, ficando, portanto excluídos para a simulação dos cenários (ver capítulo 6). Mais hidrogramas da validação com grupo de parâmetros médios, nas diversas bacias que foram consideradas validadas encontram-se no Anexo C.

Para as demais bacias, a aplicação do grupo de parâmetros médios obteve resultados razoáveis para volumes anuais. Entretanto, as vazões máximas anuais simuladas não foram tão boas mesmo sendo bem representadas temporalmente, com exceção dos postos

de Piancó, Boqueirão de Mãe d'água e São José de Piranhas. Na maioria dos casos, no entanto, obteve-se significativa melhora com a aplicação dos parâmetros anuais. Fato explicado pela calibração do modelo ter sido realizada com base principalmente nos picos dos hidrogramas, conforme já comentado. De acordo com os hidrogramas nas diferentes bacias, percebe-se que o modelo representou bem o comportamento das vazões temporalmente.

A validação do modelo e dos seus parâmetros, testados sob diferentes condições, pode ser considerada realizada com resultados razoavelmente satisfatórios. O teste com séries de dados ainda não usados é uma boa evidência, assim como o número de bacias envolvidas, a ordem de grandeza da região e as diferentes discretizações da escala.

6 CENÁRIOS DE CLIMA E USO DO SOLO

6.1 Introdução

A forma tradicional de avaliar os efeitos de ações naturais ou humanas no meio ambiente é pela utilização de cenários de simulação. São situações hipotéticas futuras, possíveis de ocorrer, nas quais são consideradas alterações fictícias, podendo-se analisar a resposta do meio ambiente. Nesta análise se inserem os recursos hídricos, onde a área estudada é, em geral, a bacia hidrográfica. Assim, pode-se prever através da simulação de cenários os possíveis escoamentos em áreas de interesse.

A maioria dos estudos constrói cenários para mudanças de origem antropogênica. Nesta linha, estão os que analisam as mudanças devido ao efeito estufa, que consideram cenários relacionados ao gás carbônico ($1xCO_2$) e, em um segundo momento, sua duplicação ($2xCO_2$). Isso causa efeito direto na temperatura, na evaporação e na precipitação. Seguindo esta mesma linha (alterações antrópicas) existem ainda diversos estudos englobando mudanças no uso do solo. Em algumas bacias hidrográficas existem dados reais destas alterações, permitindo analisar comparativamente os efeitos causados pelas mudanças. Caso não haja disponibilidade destes dados reais, podem ser criados cenários a partir de modificação suposta da situação presente.

A mudança no uso do solo se dá principalmente por ação do homem que desmata áreas, refloresta outras, ou ainda, gera áreas agrícolas. Já a variabilidade de fatores climáticos, pode ser tanto de origem natural como de origem antropogênica. Os principais fatores analisados neste trabalho são a variabilidade natural de fatores climáticos como a precipitação e a evaporação, e a mudança no uso do solo. Busca-se aqui, simular cenários que possam abranger aspectos práticos ou situações mais próximas possíveis da realidade.

Segundo Azevedo (1999) os cenários de mudanças climáticas podem ser construídos de três maneiras: com mudanças arbitrárias, com cenários análogos temporais

e espaciais (construídos com dados registrados que podem servir de análogos ou similares para o clima futuro da região estudada) e com simulações de modelos climáticos. Este último tipo de cenário geralmente é utilizado quando se quer avaliar a mudança climática de longo prazo oriunda do efeito estufa, através de MCG's, e se criam os já mencionados cenários 1xCO₂ e 2xCO₂. Os cenários análogos obtêm os dados registrados do passado (análogo temporal) ou então em uma bacia hidrográfica similar (análogo espacial) para comparação com uma situação semelhante no futuro. Os cenários de mudanças arbitrárias pressupõem o livre arbítrio, porém deve ser construído observando-se a realidade dos processos envolvidos.

Estudos que incluem cenários, sejam eles de origem antropogênica ou natural, são importantes pois possibilitam o homem fazer previsões e estudar possíveis soluções sem colocar em risco o meio ambiente e os recursos nele disponíveis, principalmente os recursos hídricos.

6.2 Seleção dos Cenários

A maioria das avaliações que tratam com regimes hidrológicos e com recursos hídricos assumem que o uso do solo e os sistemas de recursos hídricos são constantes no tempo e consideram nos cenários apenas mudanças causadas pelas entradas climáticas na bacia (Arnell, 1996 apud Azevedo, 1999; Bathurst et al., 1996). Isto não reflete verdadeiramente a realidade física das bacias hidrográficas, já que o uso do solo tem grande influência na geração do escoamento. Portanto, deve-se considerar os fatores climáticos e o uso do solo conjuntamente, e não apenas isoladamente, já que são fatores importantes na geração do escoamento nas bacias hidrográficas. A Figura 6.1 mostra um esquema para avaliação de impactos de fatores de clima e uso do solo sobre os recursos hídricos.

A influência do clima e do uso do solo, em conjunto, podem acentuar as possíveis mudanças no escoamento da bacia hidrográfica e formarem situações mais complexas do que a influência destes fatores isoladamente. Contudo a avaliação de um fator isolado pode ser de interesse e portanto não deve ser evitada. Assim, devem ser construídos cenários para efeito comparativo como:

- Cenários isolados de precipitação, de temperatura (evaporação) e uso do solo;
- Cenários de clima, que avaliem a influência conjunta da evaporação, da precipitação e da temperatura sobre o escoamento;
- Cenários conjuntos, aquele que engloba todos os fatores em conjunto (clima e uso do solo).

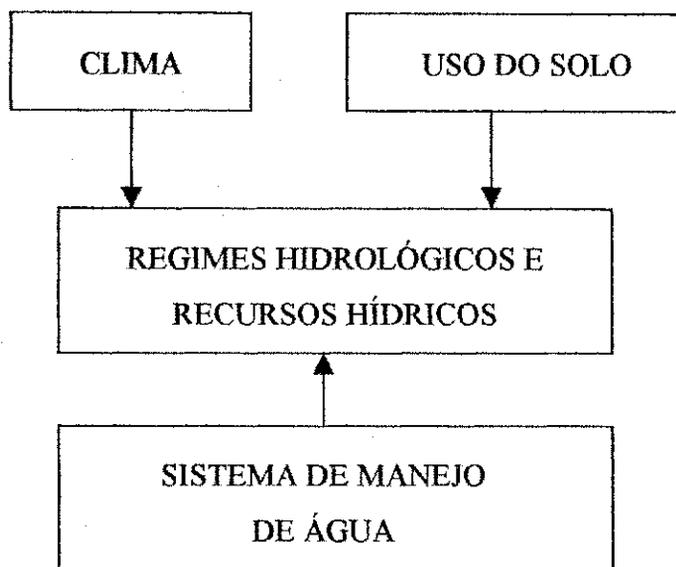


Figura 6.1 – Esquema para avaliação de impactos de fatores de clima e uso do solo sobre recursos hídricos (Arnell, 1996 apud Azevedo, 1999).

6.2.1 Cenários Isolados

Os cenários isolados são aqueles que avaliam isoladamente os efeitos dos fatores estudados sobre o escoamento. Para cada cenário existe única e exclusivamente alteração no fator considerado e os demais permanecem constantes.

6.2.1.1 Cenários isolados de precipitação

Os cenários de precipitação foram determinados a partir da variabilidade natural da série. A variabilidade mensal da precipitação, obtida a partir da média regional na área de estudo, mostra que as precipitações variam bastante em relação à média (Figura 4.2) principalmente no período chuvoso ($\pm 1,5$ o valor médio). Assim, pôde-se arbitrar aumentos e diminuições uniformes sobre os valores diários em toda a série. Foram selecionados quatro cenários: $\pm 45\%$ e $\pm 20\%$ em relação a média.

6.2.1.2 Cenários isolados de evaporação

Optou-se na seleção deste tipo de cenário que fossem determinados a partir dos dados de temperatura disponíveis, o que foi feito através de um modelo de cálculo da evaporação baseado na temperatura e outros fatores.

As temperaturas foram selecionadas a partir da série disponível (1963-1967). Como dito no capítulo 4, existiram máximas neste período de até 28°C e mínimas de 24,4°C, sendo a temperatura média, 26,3°C. Assim, a variabilidade natural é de aproximadamente $\pm 2^\circ\text{C}$ em relação à média. Quatro variações nas temperaturas mensais foram escolhidas: $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 2^\circ\text{C}$ em relação à média.

Foram testados alguns métodos de cálculo de evapotranspiração potencial, para que fosse selecionado o que melhor se ajustasse aos dados de evaporação potencial do posto de São Gonçalo. Seis métodos de cálculo da evapotranspiração foram testados: o método de Thorntwaite (1944) e o de Blaney-Cridde (1950), baseados na temperatura, o método do balanço de radiação, o método aerodinâmico, o método combinado da radiação e aerodinâmico (ou método de Penman) e o método de Priestley-Taylor (1978) (apud Chow, 1964; Chow et al., 1988). Uma breve apresentação desses métodos é dada a seguir.

a) Método de Thorntwaite (1944)

Segundo Chow (1964), o método é correlacionado a um índice de calor dependente da temperatura. O cálculo da evapotranspiração é feito pela equação abaixo:

$$ETP = k_c F_c 16 \left(10 \frac{T}{I} \right)^a \quad (6.1)$$

onde: ETP = evapotranspiração potencial para meses de 30 dias e comprimento de 12 horas diárias de luz (mm/mês); T = temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); F_c = fator de correção em função da latitude e mês do ano, tabulados no Anexo D1; k_c = fator de cultura. O índice de calor I é dado pela equação abaixo:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1,514} \quad (6.2)$$

onde

$$\alpha = 67,5 \cdot 10^{-8} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-6} I^2 + 0,01791 I + 0,492 \quad (6.3)$$

b) Blaney-Criddle (1950)

O método foi originalmente desenvolvido para estimativas do uso consuntivo em regiões semi-áridas (Tucci e Beltrame 1993; Gomes, 1999). É dado pela equação:

$$ETP = k_c (0,457T + 8,13)p \quad (6.4)$$

onde:

ETP = evapotranspiração potencial (mm/mês);

T = temperatura média mensal do ar em °C;

p = porcentagem diária de horas de luz (Anexo D2)

k_c = fator de cultura

c) Método do Balanço de Energia

De acordo com Chow et al. (1988), este método calcula a evaporação através da seguinte equação:

$$E_r = \frac{R_n}{l_v \rho_w} \quad (\text{mm/dia}) \quad (6.5)$$

onde R_n é a radiação líquida em W/m^2 , l_v é o calor latente de vaporização (J/Kg) dado por:

$$l_v = 2,501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T \quad (\text{J/kg}) \quad (6.6)$$

sendo T a temperatura do ar em °C e ρ_w , a massa específica da água ($\rho_w = 997 \text{ kg/m}^3$). Determinando o calor latente de vaporização para $T=20^\circ\text{C}$ na equação 6.6, considerado o tempo de 1 dia e o fator de cultura (k_c) a equação 6.5 pode ser reescrita e fornece a evapotranspiração na forma:

$$E_r = k_c 0,0353 R_n \quad (\text{mm/dia}) \quad (6.7)$$

d) Método Aerodinâmico

No método aerodinâmico, a evapotranspiração é calculada com base na evaporação corrigida do fator de cultura (k_c) conforme a equação:

$$E_a = k_c B (e_s - e_a) \quad (\text{mm/dia}) \quad (6.8)$$

sendo e_s e e_a , as pressões de vapor nas condições saturada e atual, respectivamente, B é dado por:

$$B = \frac{0,102 u_2}{\left[\ln \left(\frac{z_2}{z_o} \right) \right]^2} \quad (\text{mm/dia Pa}) \quad (6.9)$$

onde u_2 é a velocidade do vento na altura z_2 , sendo z_2 geralmente tomado como 2m a partir da superfície e z_o é a altura de rugosidade da superfície natural (Tabela 6.1).

A pressão de saturação de vapor pode ser calculada por (Chow et al., 1988):

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27T}{237,3 + T} \right) \quad (\text{Pa}) \quad (6.10)$$

sendo T a temperatura do ar em °C. A pressão de vapor atual é calculada em função da umidade relativa do ar pela equação:

$$e_a = R_h e_s \quad (\text{Pa}) \quad (6.11)$$

onde R_h é a umidade relativa ($0 \leq R_h \leq 1$).

Tabela 6.1 – Altura de rugosidade para diferentes condições de superfície

Tipo de Superfície	Altura de Rugosidade z_o (cm)
Gelo, lama	0,001
Água	0,01-0,06
Gramma (acima de 10 cm de altura)	0,1-2,0
Gramma (de 10 a 50 cm de altura)	2-5
Vegetação (de 1 a 2 m de altura)	20
Árvores (10-15 m de altura)	40-70

Fonte: Chow et al., 1988

e) Método Combinado ou de Penman

O método combinado ou método de Penman calcula a evaporação considerando os efeitos da radiação e do vento. Desse modo as equações 6.7 e 6.8 são combinadas, resultando na equação abaixo:

$$E = k_c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \right] \quad (\text{mm/dia}) \quad (6.12)$$

onde

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(237,3 + T)^2} \quad (\text{Pa/}^\circ\text{C}) \quad (6.13)$$

$$\text{e } \gamma = 66,8 \quad (\text{Pa/}^\circ\text{C})$$

f) Método de Priestley-Taylor (1972)

Priestley e Taylor (1972), citado por Chow et al. (1988), baseados no fato de que em grandes áreas, as considerações do balanço de energia governam a evaporação, determinaram que o segundo termo da equação 6.12 é aproximadamente 30% do primeiro e reescreveram:

$$E = k_c \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r \quad (6.14)$$

onde $\alpha = 1,3$.

Os métodos acima descritos têm por base fatores climáticos como temperatura, radiação, umidade e velocidade do vento, todos disponíveis para a região de estudo (ver item 4.1.3). Os resultados da aplicação dos seis métodos de cálculo foram comparados com a evapotranspiração de referência ET_o (Azevedo et al, 1999, Chow et al, 1988) dada por:

$$ET_o = k_t k_c E_t \quad (6.15)$$

onde k_t é o coeficiente de tanque classe A, k_c é o coeficiente de cultura e E_t é a evaporação do tanque classe A. Em todos os casos foi utilizado um coeficiente de cultivo unitário ($k_c =$

1) para o cálculo da evapotranspiração e o valor de k_t na equação 6.15 foi tomado igual a 0,75, típico para a região de estudo.

Na aplicação do método aerodinâmico, uma altura de 0,5 cm foi usada para representar a rugosidade da superfície (z_0) tendo em vista que a região é caracterizada por vegetação rasteira predominantemente, devido ao desmatamento. Para a aplicação do balanço de radiação, a radiação líquida R_n foi calculada de maneira simplificada com base nos dados disponíveis de radiação global pela equação:

$$R_n = (1-\alpha)R_g \quad (6.16)$$

onde α é o albedo e R_g a radiação global. O valor do albedo foi calibrado, buscando-se aproximar a evapotranspiração calculada da observada tomada como a evapotranspiração de referência ET_0 . O valor obtido para o albedo ficou em torno de 0,3, o qual está em acordo com os dados existentes na literatura (Tucci e Beltrame, 1993).

Como a radiação é dependente da temperatura, os resultados obtidos com a equação (6.16) foram correlacionados com os dados de temperatura. O resultado da correlação é mostrado na Figura 6.2, cujo melhor ajuste ($r^2 = 0,7946$) foi obtido com a função linear abaixo indicada:

$$R_n = 17,069T - 283,23 \quad (6.17)$$

onde T é a temperatura média mensal (°C).

A equação (6.17) permite calcular a radiação líquida a partir da temperatura. O efeito de variações ocorridas na temperatura sobre a radiação pode ser quantificada a partir desta equação.

Os resultados foram analisados graficamente (Figura 6.3) e através do coeficiente de determinação (Tabela 6.2). Os métodos que apresentaram maiores coeficientes de determinação foram o do Balanço de Energia e o de Penman. O método escolhido foi o de Penman por levar também em consideração o balanço de energia além de outros fatores relevantes no processo como o vento e a natureza da superfície.

Assim para as quatro temperaturas selecionadas foram determinados quatro grupos de evapotranspiração pelo método Combinado (Penman), listadas na Tabela 6.3, as quais serão usadas na construção de cenários. Os valores encontram-se dentro do

comportamento esperado: para diminuições na temperatura existe uma diminuição na evapotranspiração e quando há aumento na temperatura acontece o inverso.

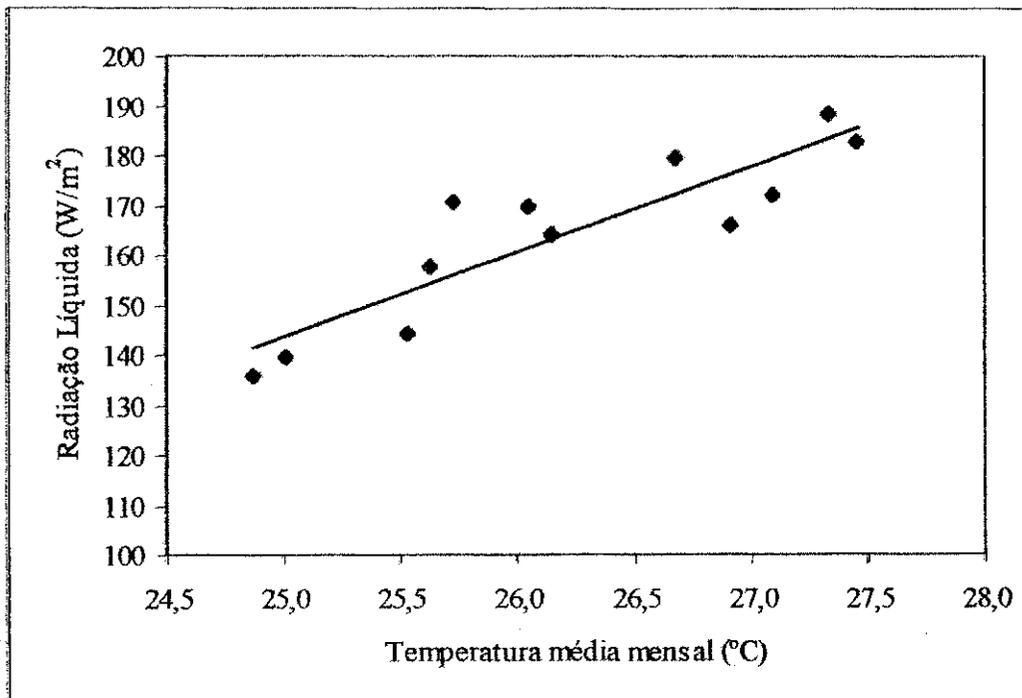


Figura 6.2 – Correlação entre radiação líquida e temperatura

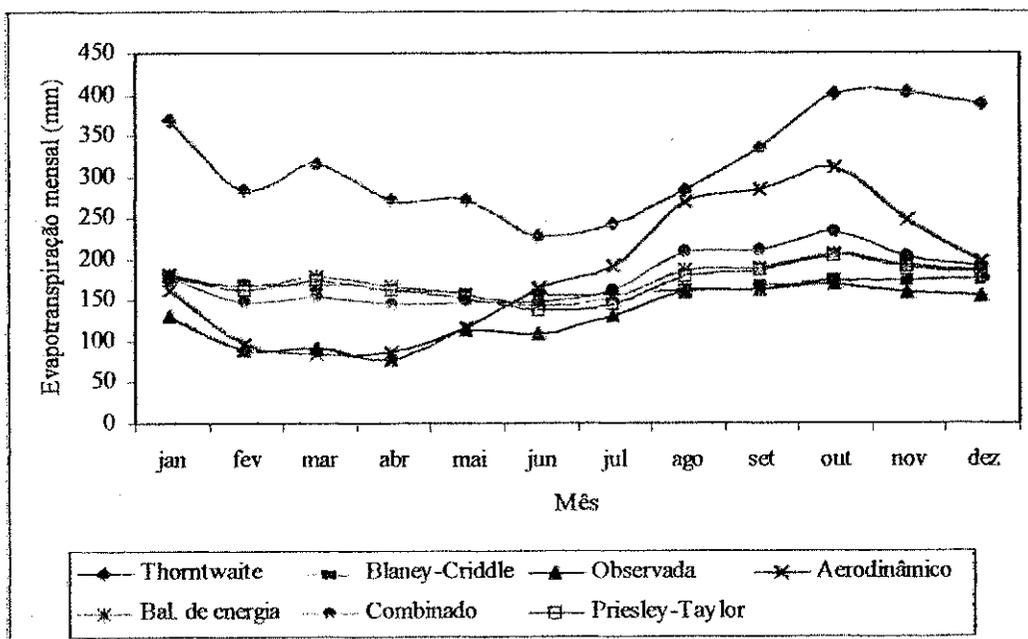


Figura 6.3 – Evapotranspiração calculada pelos diferentes métodos

Tabela 6.2 - Coeficientes de determinação entre a evapotranspiração observada e simulada com diferentes métodos

Método	Coeficiente de Determinação (r^2)
Método de Thornthwaite	0,38
Método de Blaney-Cridle	0,13
Método do Balanço de Energia	0,90
Método Aerodinâmico	0,44
Método Combinado ou de Penman	0,85
Método de Priestley-Taylor	0,44

Tabela 6.3 - Evapotranspirações (mm/dia) calculadas com base na variação da temperatura

ΔT	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$T_m - 2^\circ C$	4,95	4,05	4,01	3,79	3,97	4,08	4,36	5,28	5,78	6,26	5,82	5,28
$T_m - 1^\circ C$	5,48	4,55	4,51	4,29	4,47	4,59	4,87	5,81	6,33	6,82	6,37	5,81
0	6,01	5,07	5,03	4,80	4,99	5,11	5,40	6,36	6,88	7,38	6,92	6,36
$T_m + 1^\circ C$	6,56	5,60	5,56	5,32	5,52	5,64	5,94	6,91	7,44	7,95	7,48	6,91
$T_m + 2^\circ C$	7,11	6,14	6,09	5,86	6,05	6,18	6,48	7,48	8,01	8,53	8,05	7,47

* T_m = temperatura média

6.2.1.3 Cenários isolados de uso do solo

Os cenários isolados de uso do solo foram determinados a partir de mudanças percentuais representando desmatamento ou ressurgimento da cobertura vegetal visto que não se dispunha de dados reais neste sentido. As mudanças percentuais foram aplicadas sobre o dado que representava a cobertura vegetal para cada sub-bacia no modelo, que é o valor CN. Desta maneira foram construídos os seguintes cenários: $CN \pm 20\%$, $CN \pm 40\%$ e $CN \pm 60\%$.

Os cenários buscaram simular diferentes níveis de desmatamento ou recuperação da vegetação natural (Tabela 6.4). Busca-se simular níveis de desmatamento tendo-se como base o fato de que no semi-árido do Nordeste do Brasil existe um processo contínuo de desmatamento, seja pela influência das frequentes secas que o assolam, seja pela busca de área para cultivos ou criação de rebanhos (Figueiredo e Srinivasan, 1999). Os cenários de recuperação da vegetação natural representam um fato no semi-árido, principalmente nos anos chuvosos quando a caatinga refloresce naturalmente.

Tabela 6.4 - Mudanças percentuais nos cenários isolados de uso do solo

Cenários	Mudanças Percentuais
Cenários de desmatamento	CN+60%, CN+40% e CN+20%
Cenários de recuperação da vegetação natural	CN-60%, CN-40% e CN-20%

6.2.2 Cenários Conjuntos

6.2.2.1 Cenários de clima

Os cenários de clima são assim chamados por incluírem mudanças conjuntas de precipitação e evaporação. Estas mudanças foram inseridas nos cenários buscando-se a realidade regional, o que foi feito correlacionando-se os dados destes dois fatores na área estudada (precipitações médias mensais dos postos da região de estudo inseridos no Estado e dados mensais de evapotranspiração potencial do posto de São Gonçalo). Os resultados desta correlação encontram-se na Figura 6.4, com a precipitação como variável independente. A correlação desta figura é realista pois espera-se que com o aumento da precipitação o déficit de saturação diminua e, portanto, a evaporação.

Entretanto, como os dados iniciais são dados de temperatura, de onde são calculados os dados de evapotranspiração, para só depois serem determinados os dados de precipitação, utilizou-se a correlação entre as variáveis com a precipitação como variável dependente, mostrada na Figura 6.5. Essa correlação não deve ser esperada na realidade haja vista que não há uma relação direta entre a diminuição de precipitação e o aumento de evaporação. Outros fatores estão envolvidos na formação da chuva.

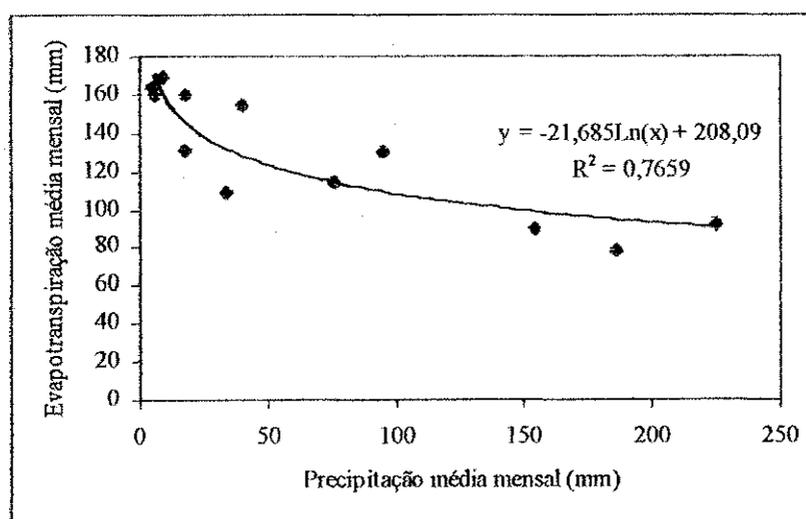


Figura 6.4 - Correlação entre precipitação e evaporação

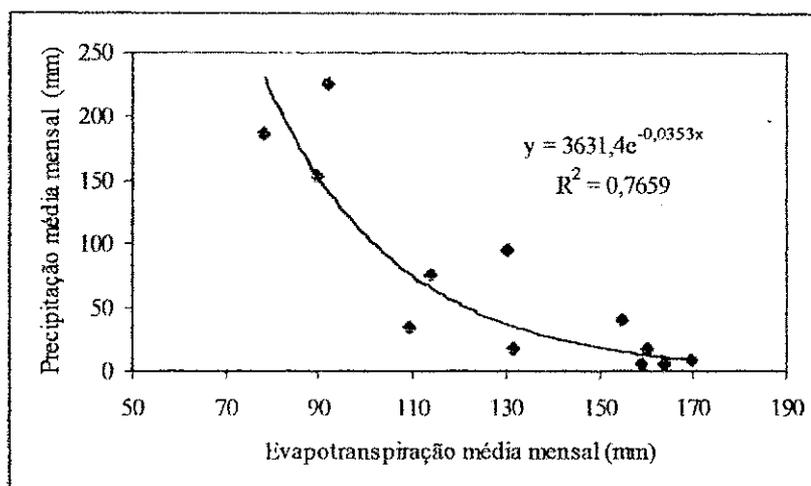


Figura 6.5 – Correlação entre evaporação e precipitação (artifício técnico)

A equação abaixo, obtida na correlação da Figura 6.5, é portanto assumida para efeito de cálculo da precipitação em função de evaporação que depende da temperatura.

$$P = 3631,4 \exp(-0,0353E) \quad (\text{mm}) \quad (6.18)$$

Nestes cenários (cenários de clima), as temperaturas consideradas foram a média $\pm 1,0^\circ\text{C}$, $\pm 0,65^\circ\text{C}$ e $\pm 0,35^\circ\text{C}$, dentro da variabilidade natural, gerando evapotranspirações que implicaram alterações na precipitação, calculadas com a equação 6.18. Os valores encontram-se na Tabela 6.5. Por estes dados percebe-se que para aumentos de temperatura existe uma maior influência na precipitação do que para diminuições na temperatura devido ao comportamento não-linear do fenômeno.

Tabela 6.5 - Mudanças percentuais nos fatores climáticos para os cenários de clima

Cenário	ΔT ($^\circ\text{C}$)	ΔE (%)	ΔP (%)
1	-1,00	-9	+73
2	-0,65	-6	+45
3	-0,35	-3	+20
4	+0,35	+3	-20
5	+0,65	+6	-30
6	+1,00	+9	-45

6.2.2.2 Cenários Conjuntos de Clima e Uso do Solo

Nestes cenários, mais próximos da realidade, são incluídas mudanças nos fatores climáticos e mudanças no uso do solo conjuntamente. Inseriu-se aos cenários de clima, as mudanças no uso do solo, utilizando-se para isso, um comportamento lógico ou esperado do sistema.

Este comportamento esperado seria, por exemplo, que para um aumento de precipitação existisse uma intensificação das atividades agrícolas, principalmente nas sub-bacias que possuem trechos de rios, como também uma acentuação na vegetação natural.

Considerou-se, nas sub-bacias, duas coberturas principais as quais serviram como base para as modificações realizadas: áreas agrícolas e vegetação nativa (caatinga). Em seguida, de acordo com a variação de temperatura, evaporação e precipitação, fez-se uma escala desde condições boas (favoráveis) até ruins (desfavoráveis) para áreas de cultivo e para a caatinga (da mesma forma como existe na seleção de valores CN). Condições favoráveis seriam aquelas com maiores precipitações fornecendo melhores condições para o desenvolvimento das plantas e suas raízes e as condições desfavoráveis seriam aquelas para quais houve diminuição da precipitação. De acordo com a Tabela 6.6 verifica-se valores para boas condições de cultivo de CN = 67 e para caatinga CN = 25, e para as piores condições de cultivo CN = 72 e para caatinga CN = 68.

Tabela 6.6 - Valores CN para os cenários conjuntos de clima e uso do solo

Cenários			Valor CN	
ΔT (°C)	ΔE (%)	ΔP (%)	Cultura	Caatinga
-1,00	-9	73	67	25
-0,65	-6	45	67	33
-0,35	-3	20	67	41
+0,35	+3	-20	68,7	55
+0,65	+6	-30	70,3	62
+1,00	+9	-45	72	68

Separou-se as sub-bacias onde existem trechos de rios (considerando a calha principal do rio), pois nelas, a proporção de áreas agrícolas é um pouco maior do que nas sub-bacias onde não existem trechos de rios, existindo aproximadamente 50% de sub-bacias com e 50% de sub-bacias sem trechos de rios (calha principal). A diferenciação nas

proporções aplicadas, para os diferentes usos, nas sub-bacias encontram-se na Tabela 6.7. Entretanto na aplicação no modelo, como metade das sub-bacias possuem trechos de rios, optou-se por aplicar um valor médio sobre todas as sub-bacias.

Tabela 6.7 - Proporções dos tipos de uso aplicadas nas sub-bacias

Cenários			Sub-bacias com TR*		Sub-bacias sem TR*	
ΔT (°C)	ΔE (%)	ΔP (%)	Proporção cultura	Proporção caatinga	Proporção cultura	Proporção caatinga
-1,00	-9	73	50	50	30	70
-0,65	-6	45	50	50	30	70
-0,35	-3	20	45	55	30	70
+0,35	+3	-20	40	60	30	70
+0,65	+6	-30	35	65	25	75
+1,00	+9	-45	30	70	20	80

* TR – trecho de rio

6.3 Análise de Resultados e Discussão

Os cenários foram gerados para as bacias onde o modelo foi considerado validado com o uso dos parâmetros médios: Piancó, Emas, Pau Ferrado, Sítio Vassouras, Boqueirão de Mãe d'água, Santa Rita do Curema e São José de Piranhas. De modo geral, todas estas bacias apresentaram o mesmo comportamento em todos os cenários, comprovando a robustez do modelo, e cada cenário gerado em cada bacia seguiu uma tendência com uma correlação. Estas tendências foram descritas por relações não-lineares (como a função exponencial, ou ainda, a função potencial) já que as relações físicas existentes nas bacias hidrográficas são relações não-lineares, como também o processo de descrição destes fenômenos no modelo hidrológico são não-lineares (como os processos de infiltração e propagação do fluxo).

Para análise dos resultados foram construídos gráficos comparativos de volumes e vazões máximas anuais nos vários cenários incluindo o cenário normal (aquele onde não houve alteração) obtido com os parâmetros médios, através dos quais as tendências puderam ser vistas, como foram também calculadas as relações de redução ou

aumento de volumes e vazões máximas anuais, expressas por V/V_n (volumes) e Q/Q_n (vazões máximas) sendo V o volume médio dos anos em determinado cenário simulado, V_n o volume médio dos anos no cenário normal, Q a média das vazões máximas nos anos para os cenários simulados e Q_n a média das vazões máximas dos anos para o cenário normal.

6.3.1 Cenários Isolados de Precipitação

Os cenários comprovaram a precipitação como fator de grande influência sobre o escoamento, possuindo relações de V/V_n entre 0,17 e 2,43 e de Q/Q_n entre 0,24 e 2,00 (Tabelas 6.8 e 6.9).

Existe maior influência no volume escoado para casos de aumentos na precipitação do que na situação inversa (diminuição da precipitação). Para um aumento de 45% na precipitação houve um aumento médio no volume escoado de 134% enquanto que para a diminuição de precipitação de 45% houve uma diminuição média de 79% (Tabela 6.8). Este efeito é comprovado pela grande influência da precipitação no cálculo do escoamento no modelo. Para maiores precipitações (com evaporação e uso do solo constantes) o déficit de umidade diminui e assim será gerada uma maior lâmina do escoamento, enquanto que para precipitações menores, o déficit de umidade no solo diminui assim como a lâmina gerada. Já para as vazões máximas, este efeito é sentido em menor escala. Para o aumento de 45% na precipitação houve um aumento médio de 83% na vazão máxima enquanto que para a diminuição de 45% houve uma diminuição de 70% na vazão máxima (Tabela 6.9).

Tabela 6.8 – Razão V/V_n * para os cenários de precipitação

Cenário	Variação Precipitação (%)	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
		PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-45	0,23	0,23	0,22	0,21	0,22	0,20	0,17	0,21
2	-20	0,59	0,55	0,56	0,57	0,59	0,57	0,56	0,57
3	20	1,52	1,52	1,57	1,56	1,52	1,55	1,50	1,53
4	45	2,34	2,23	2,41	2,43	2,33	2,41	2,24	2,34

* V =volume médio dos anos no cenário simulado e V_n o volume médio dos anos no cenário normal

A Figura 6.6 mostra uma comparação entre valores simulados em diferentes cenários para a bacia de Piancó. Pode-se notar nos resultados uma tendência que pode ser

expressa por uma relação não-linear com alto coeficiente de determinação. Este tipo de comportamento é observado pelas sete bacias simuladas.

Tabela 6.9 – Razão Q/Qn* para os cenários de precipitação

Cenário	Variação Precipitação (%)	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
		PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-45	0,28	0,46	0,31	0,24	0,25	0,24	0,33	0,30
2	-20	0,65	0,74	0,66	0,64	0,64	0,65	0,71	0,67
3	20	1,38	1,30	1,40	1,40	1,38	1,35	1,28	1,36
4	45	1,92	1,66	2,00	1,96	1,89	1,79	1,62	1,83

* Q = média das vazões máx. nos cenários simulados e Qn a média das vazões max. no cenário normal

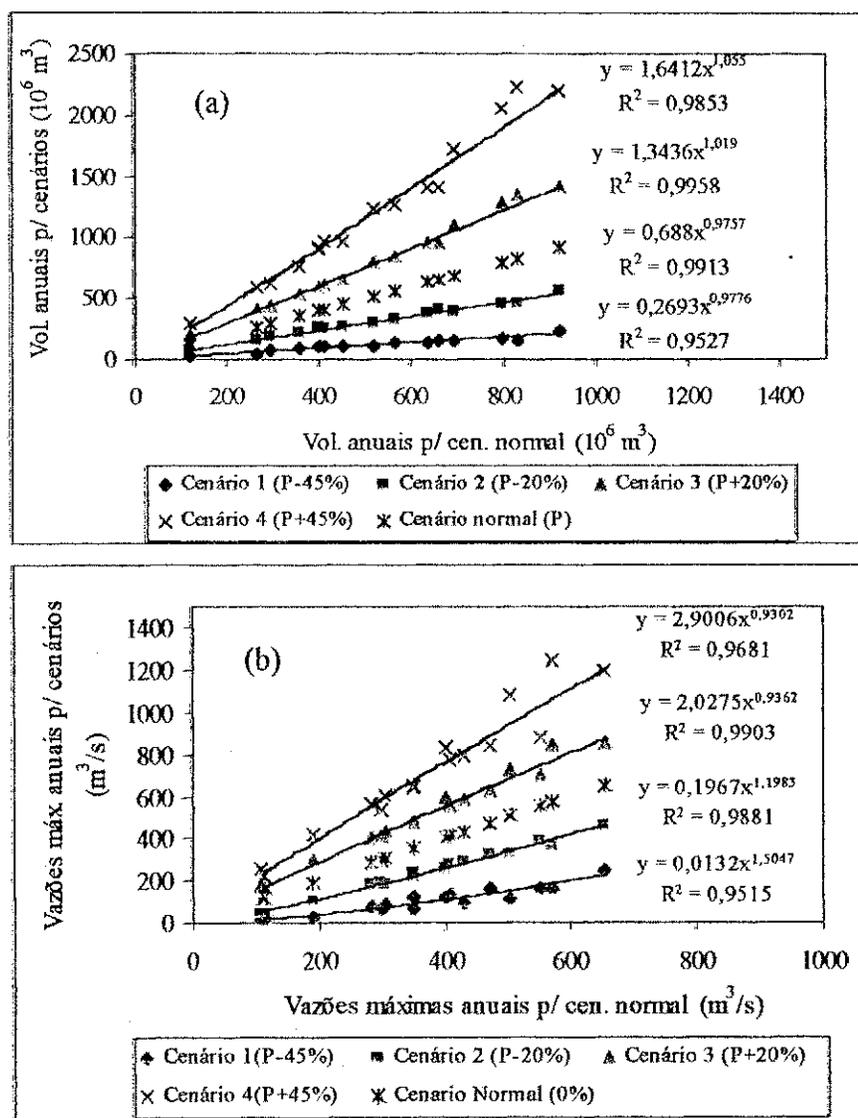


Figura 6.6 – Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de precipitação para a bacia de Piancó: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

6.3.2 Cenários Isolados de Evaporação

Os cenários de evaporação também seguiram uma tendência dentro das mudanças na temperatura como mostra a Figura 6.7, para a bacia de Santa Rita do Curema. Nota-se que as diferenças entre os cenários não são tão grandes como no caso do efeito isolado na precipitação, com os pontos nos gráficos praticamente se sobrepondo (volumes e vazões máximas anuais). A maior influência da evaporação se dá nos maiores valores de volumes e para as vazões máximas anuais. As diferenças entre os cenários são mínimas (Figura 6.7) com a quase sobreposição dos pontos.

Todos as bacias seguiram a mesma tendência como mostram as Tabelas 6.10 e 6.11, para volumes e vazões máximas. Para decréscimos na temperatura (diminuição da evaporação), existe uma maior influência no escoamento gerado do que no caso de aumentos na temperatura (aumento na evaporação). Os cenários isolados de evaporação influenciam em menor escala o escoamento do que a precipitação, isoladamente, o que é condizente com Chiew et al. (1995) que afirmam que a temperatura (evaporação, neste caso) tem influências pequenas no escoamento se comparado com a precipitação. Para este tipo de comparação, neste estudo, uma diminuição de 1°C na temperatura média resulta num aumento de +73% na precipitação e numa diminuição de 9% na evaporação (cenários conjuntos de clima).

De acordo com os resultados demonstrados nas Tabelas 6.10 e 6.11, a diminuição de 1°C na temperatura média causa um aumento médio no volume de 5% e um aumento na vazão máxima de 2%.

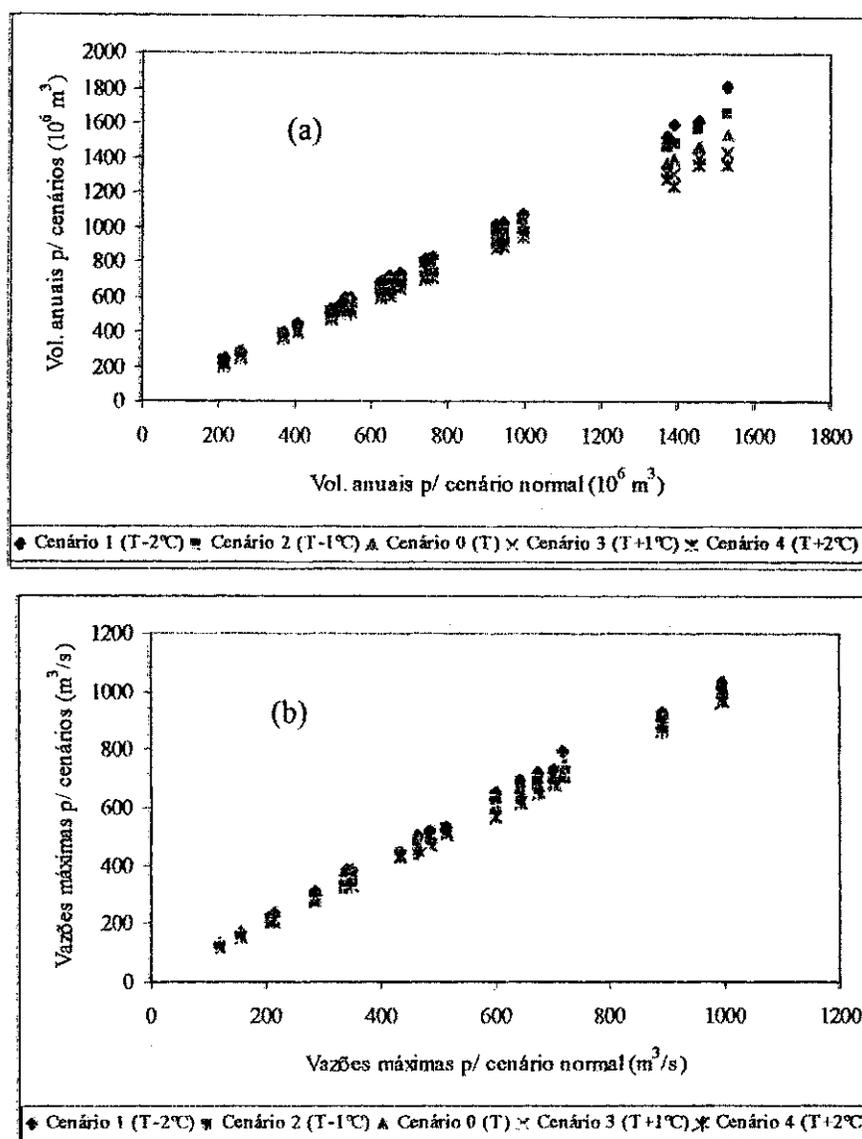


Figura 6.7 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de evaporação para a bacia de Santa Rita do Curema (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

Tabela 6.10 – Razão V/V_n para os cenários de evaporação

Cenário	Variação da temperatura (°C)	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
		PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-2	1,09	1,15	1,13	1,11	1,10	1,11	1,09	1,11
2	-1	1,04	1,07	1,06	1,05	1,05	1,05	1,04	1,05
3	1	0,97	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
4	2	0,93	0,89	0,91	0,92	0,93	0,92	0,93	0,92

* V =volume médio dos anos no cenário simulado e V_n o volume médio dos anos no cenário normal

Tabela 6.11 – Razão Q/Q_n^* para os cenários de evaporação

Cenário	Variação da temperatura (°C)	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
		PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-2	1,05	1,03	1,06	1,06	1,06	1,05	1,03	1,05
2	-1	1,02	1,02	1,03	1,03	1,02	1,03	1,02	1,02
3	1	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	1,00	0,98
4	2	0,96	0,98	0,95	0,96	0,96	0,96	0,99	0,97

* Q = média das vazões máx. nos cenários simulados e Q_n a média das vazões máx. no cenário normal

6.3.3 Cenários Isolados de Uso do Solo

Os resultados das simulações com os cenários isolados de uso do solo encontram-se nas Tabelas 6.12 e 6.13, com diminuição média regional do volume de 60% e aumento de até 124%, dependendo do grau de desmatamento, e, para as vazões máximas diminuições de 42% e aumentos médios regionais de até 44%.

Tabela 6.12 – Razão V/V_n^* para os cenários de uso do solo

Cenário	Variação Valor CN (%)	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
		PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-60	0,41	0,52	0,57	0,45	0,33	0,29	0,25	0,40
2	-40	0,64	0,63	0,73	0,65	0,56	0,53	0,48	0,60
3	-20	0,85	0,79	0,89	0,84	0,79	0,76	0,74	0,81
4	20	1,31	1,26	1,29	1,29	1,28	1,28	1,27	1,28
5	40	1,70	1,55	1,62	1,65	1,65	1,68	1,64	1,64
6	60	2,35	1,95	2,10	2,24	2,30	2,36	2,37	2,24

* V = volume médio dos anos no cenário simulado e V_n o volume médio dos anos no cenário normal

Tabela 6.13 – Razão de Q/Q_n^* para os cenários de uso do solo

Cenário	Variação Valor CN (%)	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
		PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-60	0,60	0,73	0,82	0,52	0,49	0,44	0,44	0,58
2	-40	0,80	0,85	0,93	0,74	0,73	0,70	0,75	0,79
3	-20	0,93	0,92	0,99	0,90	0,90	0,88	0,90	0,92
4	20	1,16	1,09	1,18	1,15	1,11	1,09	1,07	1,12
5	40	1,32	1,17	1,36	1,31	1,26	1,19	1,14	1,25
6	60	1,55	1,28	1,55	1,53	1,51	1,38	1,30	1,44

* Q = média das vazões máx. nos cenários simulados e Q_n a média das vazões máx. no cenário normal

Para os cenários onde houve redução do valor CN, significando ressurgimento da vegetação natural, obteve-se uma diminuição média máxima de 60% nos volumes anuais, enquanto que para as vazões máximas houve diminuição média máxima de 32%. Para os cenários de desmatamento houve um aumento médio de 124% nos

volumes anuais e de 44% nas vazões máximas anuais. Assim maiores efeitos foram sentidos com aumentos do valor CN (situações de desmatamento) do que na situação inversa principalmente para os volumes, efeito este diferente do encontrado por Figueiredo e Srinivasan (1999) e Figueiredo (1998) na região de Sumé/PB, região localizada no Cariri paraibano (com menor índice pluviométrico). Os resultados, contudo, concordam na ordem de grandeza das alterações como se pode observar na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Comparação entre resultados de regiões do Estado da Paraíba

Região →	Sumé/PB ¹	Alto Piranhas/PB ²	BRS ³
Redução no volume p/ 40% de recuperação da vegetação	70%	40%	-
Aumento no volume para 40% de desmatamento	62%	64%	45%

1 - Figueiredo e Srinivasan, 1999

2 - Presente estudo

3 - Bacia representativa de Sumé, Figueiredo, 1998

Os cenários de desmatamento com aumento no escoamento levam a situações preocupantes já que o desmatamento desprotege o solo deixando-o mais susceptível a erosão, perda de nutrientes e salinização da área. Por isso, embora estes cenários tenham aumentado o rendimento da bacia são, na realidade, danosos (Figueiredo e Srinivasan, 1999).

A Figura 6.8 mostra os cenários isolados de uso do solo para a bacia de Pau Ferrado, explicitando as correlações não-lineares existentes nos processos intrínsecos da bacia hidrográfica representados pelas tendências, seguidas pelo diversos cenários, como também explicitando os aumentos ocorridos no escoamento devido aos processos de desmatamento.

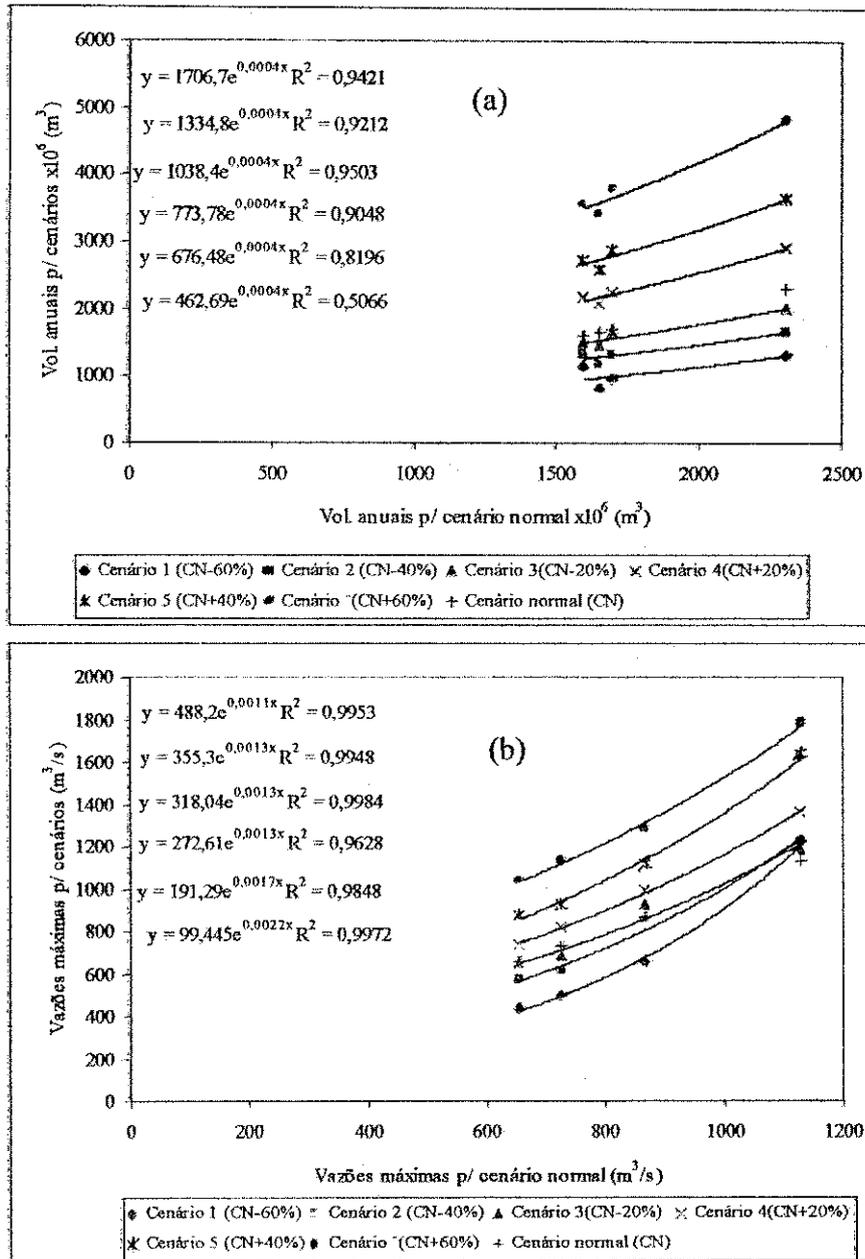


Figura 6.8 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de uso do solo para a bacia de Pau Ferrado (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

6.3.4 Cenários Conjuntos de Clima

Os cenários conjuntos de clima, assim como os demais, seguem uma tendência de comportamento não-linear. Os fatores de clima, precipitação e evaporação, em conjunto, afetaram significativamente o escoamento, comportamento este já esperado pois a precipitação, isoladamente, possui grande influência como comprovado pelos cenários isolados de precipitação.

O efeito conjunto destes fatores mostra um aumento médio máximo regional de até 261% no volume escoado e diminuição média máxima regional de 80% no volume escoado (Tabela 6.15). Para as vazões máximas nota-se um aumento médio máximo regional de até 146% e diminuição média máxima regional de 71% (Tabela 6.16). O efeito mais forte ocorre nos volumes escoados do que nas vazões máximas, seguindo o comportamento dos cenários anteriores. Para diminuição na temperatura (diminuição na evaporação) e aumento na precipitação existe um maior aumento no escoamento do que uma diminuição no volume escoado na situação inversa.

Tabela 6.15 – Razão V/V_n para os cenários de clima

Cenário	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta E(\%)$	$\Delta P(\%)$	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
				PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-1,00	-9	+73	3,63	3,27	3,66	3,79	3,62	3,80	3,46	3,61
2	-0,65	-6	+45	2,41	2,33	2,50	2,52	2,40	2,49	2,30	2,42
3	-0,35	-3	+20	1,54	1,57	1,60	1,58	1,54	1,57	1,53	1,56
4	+0,35	+3	-20	0,58	0,53	0,55	0,56	0,58	0,56	0,55	0,56
5	+0,65	+6	-30	0,42	0,38	0,39	0,40	0,41	0,38	0,38	0,39
6	+1,00	+9	-45	0,23	0,23	0,21	0,20	0,20	0,19	0,16	0,20

* V =volume médio dos anos no cenário simulado e V_n o volume médio dos anos no cenário normal

Tabela 6.16 – Razão de Q/Q_n para os cenários de clima

Cenário	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta E(\%)$	$\Delta P(\%)$	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
				PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-1,00	-9	+73	2,61	2,09	2,83	2,73	2,55	2,35	2,07	2,46
2	-0,65	-6	+45	1,95	1,68	2,06	2,00	1,90	1,81	1,64	1,86
3	-0,35	-3	+20	1,39	1,31	1,42	1,41	1,39	1,36	1,29	1,37
4	+0,35	+3	-20	0,64	0,74	0,65	0,63	0,63	0,64	0,72	0,67
5	+0,65	+6	-30	0,48	0,63	0,49	0,46	0,46	0,47	0,56	0,51
6	+1,00	+9	-45	0,27	0,46	0,30	0,23	0,23	0,22	0,32	0,29

* Q = média das vazões máx. nos cenários simulados e Q_n a média das vazões máx. no cenário normal

O efeito dos fatores de clima em conjunto é maior do que os efeitos dos fatores isolados, já que se multiplicam. A Tabela 6.17 mostra uma comparação de cenários isolados e de clima. Por exemplo no caso *b* da Tabela 6.17, ocorre um aumento médio de 134% no volume escoado devido apenas a mudança na precipitação. Com a diminuição da evaporação (caso *a*), conjuntamente com o aumento da precipitação ocorreu um aumento no volume escoado passando para 142%. No caso de aumento da evaporação e diminuição da precipitação o efeito é sentido mais brandamente como mostram os casos *c* e *d* da mesma tabela. Para uma redução de 45% na precipitação isoladamente (caso *d*), ocorreu uma diminuição no volume escoado de 79%, que se manteve aproximadamente o mesmo

com o aumento na evaporação (caso c, com 80%), demonstrando que a evaporação exerce pouco efeito, enquanto deveria haver uma maior diminuição no volume escoado. Para as vazões máximas, a diminuição, que foi (sem o efeito da evaporação) de 70% passou para apenas 71% com a inclusão da evaporação. Estas pequenas diferenças acontecem porque existe um maior efeito no volume escoado para aumentos de precipitação e para diminuição de temperatura (evaporação) do que nas situações inversas (diminuição precipitação e aumento da temperatura). De um modo geral, a inclusão do efeito da evaporação altera pouco o escoamento.

Tabela 6.17 – Comparação de cenários isolados e de clima

	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta E(\%)$	$\Delta P(\%)$	V/Vn médio	Q/Qn médio
a)	-0,65	-6	+45	2,42	1,86
b)	0	0	+45	2,34	1,83
c)	+1,0	+9	-45	0,20	0,29
d)	0	0	-45	0,21	0,30

Kite e Waititu (1981), apud Kite (1993), consideraram diversas combinações de cenários na África (ver Figura 2.3) incluindo fatores conjuntos de evaporação e precipitação. Os efeitos sobre o escoamento, por eles obtidos, são comparados com os resultados deste trabalho (Tabela 6.18). As diferenças observadas na Tabela 6.18 são diretamente relacionadas com as diferenças entre as regiões de estudo. A bacia estudada na África, por exemplo, tem índice pluviométrico anual de 1233 mm enquanto que a do Alto Piranhas é 870mm.

Tabela 6.18 – Mudanças percentuais no escoamento em duas regiões

Cenários	Mudança Percentual no Escoamento
P+20%; E-6% (Kenya)	130% *
P+20%; E-3% (Alto Piranhas)	56% **
P-20%; E+6% (Kenya)	-60% *
P-20%; E+3% (Alto Piranhas)	-44% **

* Obtidos do gráfico da Figura 2.3

** Obtidos das Tabelas 6.15 e 6.16

A Figura 6.9 mostra as tendências seguidas pelos cenários conjuntos de clima (incluem os efeitos de temperatura, evaporação e precipitação) na bacia de Emas.

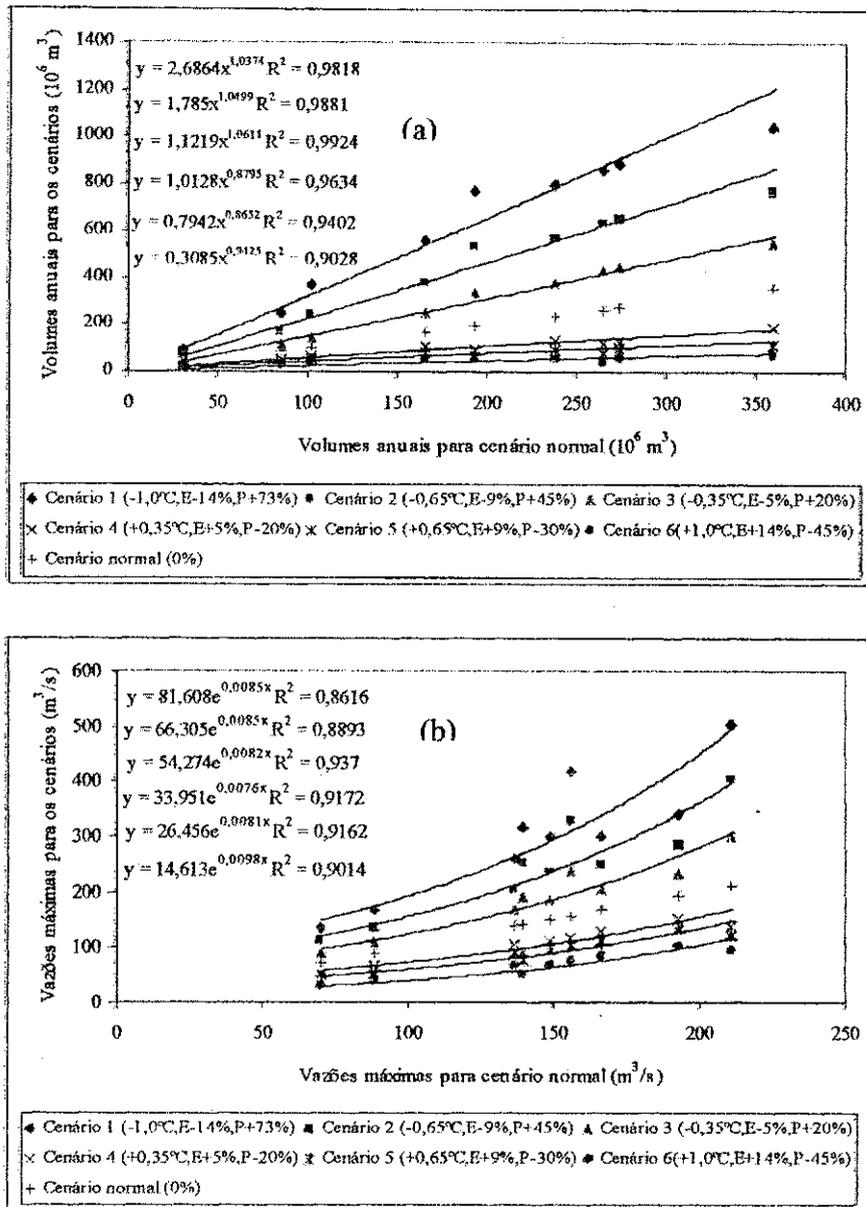


Figura 6.9 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima para a bacia de Emas (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

6.3.5 Cenários Conjuntos de Clima e Uso do Solo

Os efeitos de todos os fatores (temperatura, precipitação, evaporação e uso do solo) considerados em conjunto produzem grandes efeitos sobre o escoamento. Para os volumes simulados chega-se até um aumento médio regional máximo de 228% e uma diminuição de 70% (Tabela 6.19) e para as vazões máximas anuais aumentos médios regionais máximos de até 142% e diminuições máximas de até 64% (Tabela 6.20). Maiores efeitos são sentidos para aumento de precipitação, diminuição da temperatura (evaporação)

e diminuição do valor CN sobre os volumes escoados do que na situação inversa, condizente com o trabalho de Kite (1993) que associou cenários de efeito estufa com modificações no uso do solo, encontrando que o escoamento aumenta sensivelmente com o aumento da precipitação e com a redução da evapotranspiração devido à mudança do uso do solo.

O valor do aumento médio no volume escoado (228%) para o cenário 1 (T-1,0°C, E-9%, P+73% e CN-25%) é inferior ao do cenário 1 de clima (T-1,0°C, E-9% e P+73%) que possui aumento médio de 261%. Este comportamento é esperado. Inserindo-se uma redução do valor CN de 25% significa uma intensificação da cobertura vegetal, diminuindo, assim, o escoamento gerado na bacia hidrográfica. Portanto, os três fatores estudados são de fundamental importância para a geração do escoamento, sendo a precipitação e o uso do solo os fatores que mais influenciam o escoamento.

Tabela 6.19 – Razão V/Vn* para os cenários conjuntos

Cenário	$\Delta T(^{\circ}C)$	$\Delta E(\%)$	$\Delta P(\%)$	$\Delta CN(\%)$	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
					PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-1,00	-9	+73	-25	3,43	3,15	3,55	3,54	3,18	3,18	2,91	3,28
2	-0,65	-6	+45	-17	2,35	2,30	2,46	2,39	2,18	2,17	2,10	2,28
3	-0,35	-3	+20	-9	1,35	1,43	1,42	1,40	1,38	1,40	1,36	1,39
4	+0,35	+3	-20	+7	0,64	0,59	0,61	0,62	0,64	0,62	0,62	0,62
5	+0,65	+6	-30	+15	0,52	0,47	0,49	0,49	0,51	0,49	0,50	0,50
6	+1,00	+9	-45	+23	0,33	0,30	0,30	0,30	0,31	0,29	0,28	0,30

* V=volume médio dos anos no cenário simulado e Vn o volume médio dos anos no cenário normal

Tabela 6.20 – Razão de Q/Qn* para os cenários conjuntos

Cenário	$\Delta T(^{\circ}C)$	$\Delta E(\%)$	$\Delta P(\%)$	$\Delta CN(\%)$	Bacia Hidrográfica							MÉDIA
					PIAN	EMAS	PAFE	SIVA	SANT	BOQU	SJPI	
1	-1,00	-9	+73	-25	2,58	2,11	2,87	2,67	2,43	2,28	1,97	2,42
2	-0,65	-6	+45	-17	1,96	1,67	2,10	1,95	1,84	1,75	1,59	1,84
3	-0,35	-3	+20	-9	1,30	1,25	1,31	1,32	1,33	1,31	1,25	1,30
4	+0,35	+3	-20	7	0,68	0,75	0,69	0,67	0,67	0,67	0,74	0,70
5	+0,65	+6	-30	15	0,55	0,65	0,55	0,54	0,53	0,53	0,62	0,57
6	+1,00	+9	-45	23	0,35	0,49	0,35	0,32	0,31	0,30	0,41	0,36

* Q = média das vazões máx. nos cenários simulados e Qn a média das vazões máx. no cenário normal

A Figura 6.10 mostra o aumento no escoamento para o cenário 1 de clima (T-1,0°C, E-9% e P+73%) na bacia de Emas em 1965, onde além do aumento no volume existe um crescimento nos valores dos picos do hidrograma. A Figura 6.11 mostra a

diminuição no escoamento para o cenário 6 (T+1,0°C, E+9%E e P-45%) também em 1965 na mesma bacia, existindo grande diminuição dos picos.

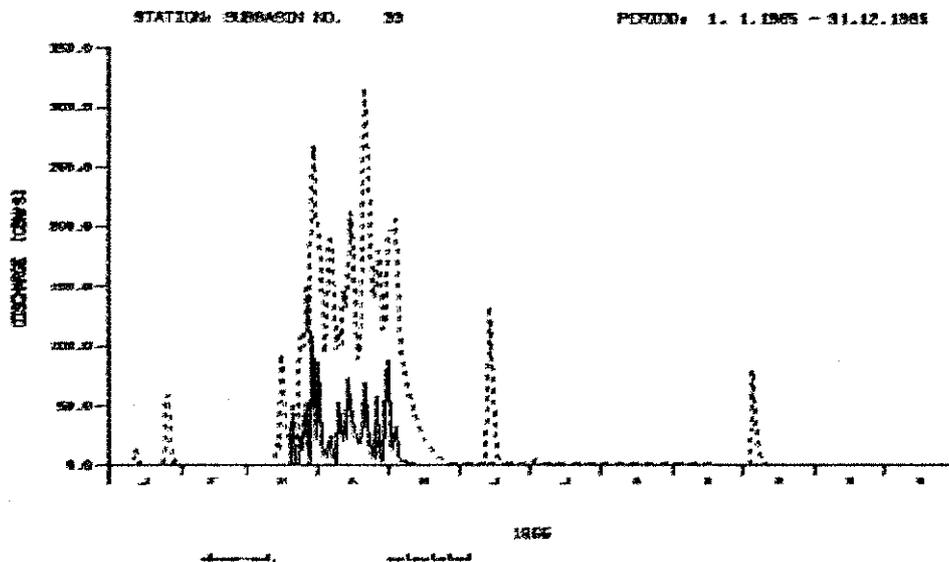


Figura 6.10 – Hidrogramas observado e simulado do cenário 1 (conjuntos de clima e uso do solo T-1,0°C, E-9%, P+73% e CN-25%) na bacia de Emas em 1965 (— valores observados e ----valores simulados)

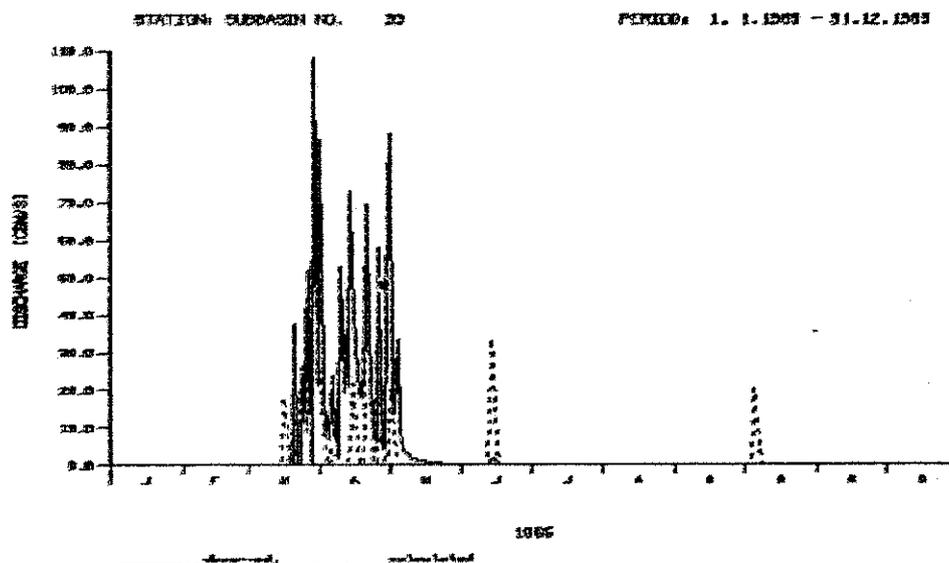


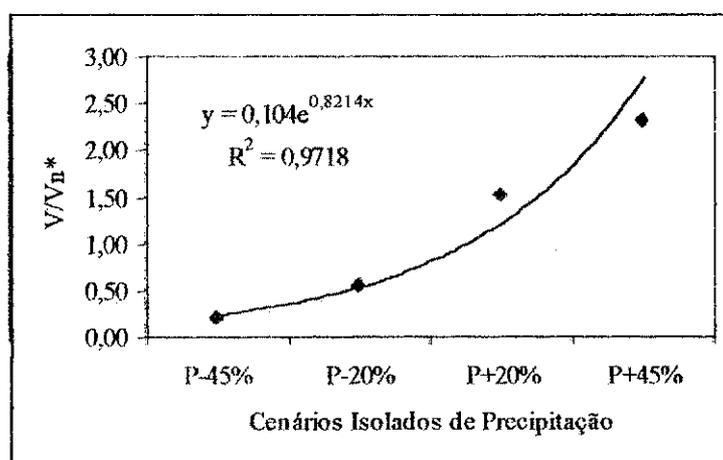
Figura 6.11 – Hidrogramas observado e simulado do cenário 6 (conjuntos de clima e uso do solo T+1,0°C, E+9%E, P-45% e CN+23%) na bacia de Emas em 1965(—valores observados e ----valores simulados)

Outros gráficos mostrando o comportamento das simulações nos vários cenários e bacias encontram-se no Anexo E.

6.4 Resultados Regionais

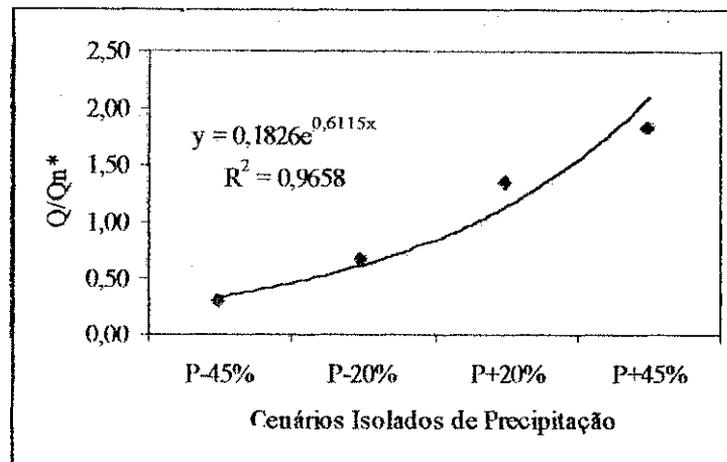
Os resultados regionais são as médias regionais das simulações das bacias. Assim, pode-se ter idéia do comportamento regional em cada um dos cenários tanto com relação à variação média dos volumes anuais como em relação à variação média das vazões máximas anuais. Os resultados regionais são mostrados nas Figuras 6.12 a 6.21. Verifica-se que para o tipo de gráfico obtido nestas figuras existe uma forte correlação entre as variações dos fatores climáticos e as variações de volumes e vazões máximas anuais.

Comparando-se as Figuras de 6.12 a 6.21 observa-se, graficamente, a grande influência da precipitação e da mudança do uso do solo bem como a menor influência da evaporação sobre o escoamento gerado. Observa-se também que os cenários conjuntos possuem maior efeito que os cenários isolados, devendo ser considerados para um melhor manejo dos recursos hídricos existentes já que estes são fatores marcantes em regiões semi-áridas.



* V=volume médio dos anos no cenário simulado e Vn o volume médio dos anos no cenário normal

Figura 6.12 – Relação entre V/Vn médio regional e os cenários isolados de precipitação



* Q = média das vazões máx. nos cenários simulados e Qn a média das vazões máx. no cenário normal

Figura 6.13 – Relação entre Q/Qn médio regional e os cenários isolados de precipitação

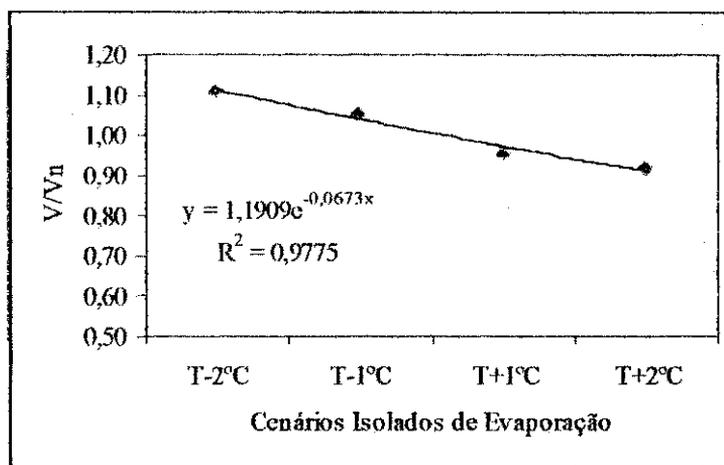


Figura 6.14 – Relação entre V/Vn médio regional e os cenários isolados de evaporação

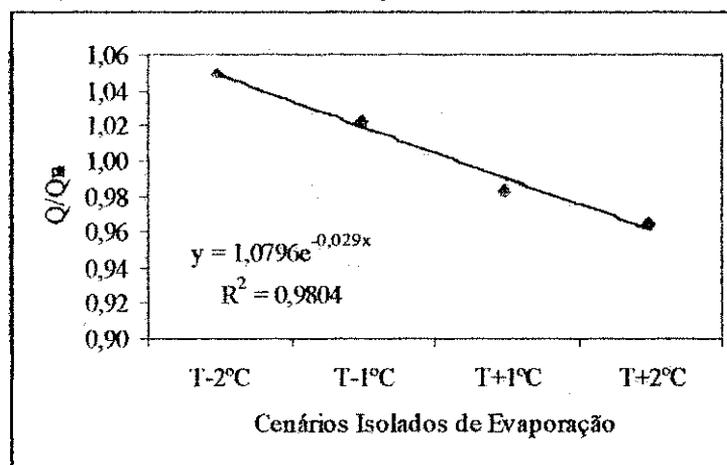


Figura 6.15 – Relação entre Q/Qn médio regional e os cenários isolados de evaporação

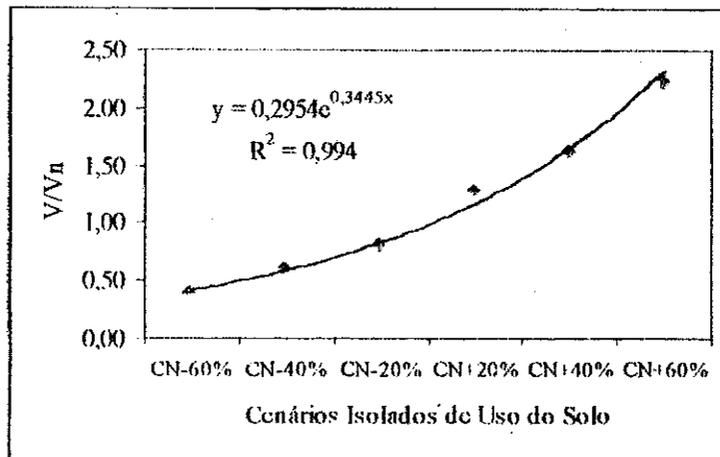


Figura 6.16 - Relação entre V/V_n médio regional e os cenários isolados de uso do solo

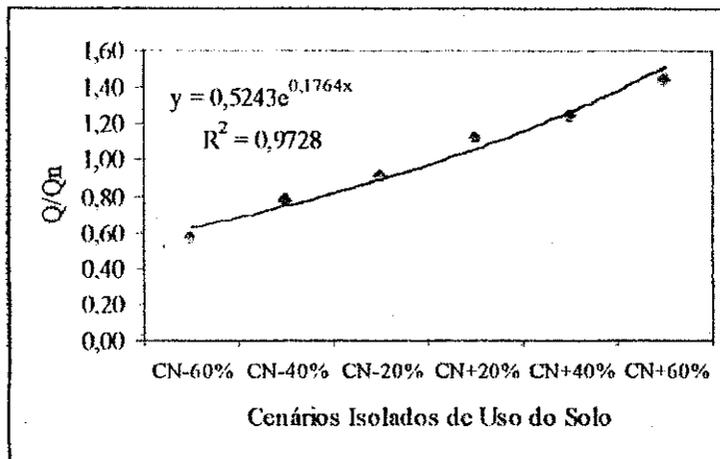


Figura 6.17 - Relação entre Q/Q_n médio regional e os cenários isolados de uso do solo

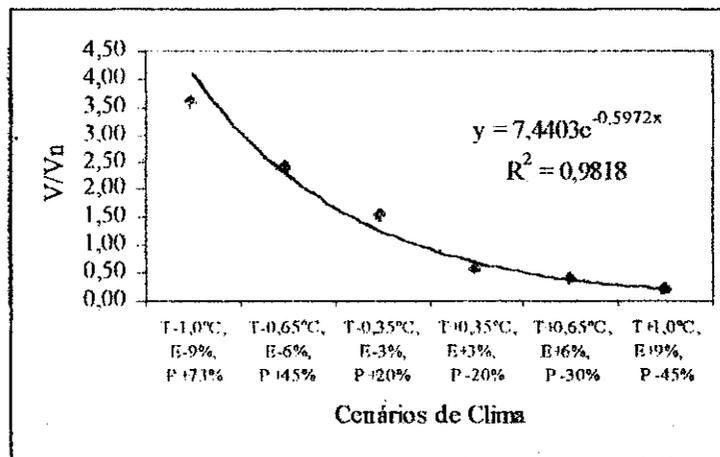


Figura 6.18 - Relação entre V/V_n médio regional e os cenários conjuntos de clima

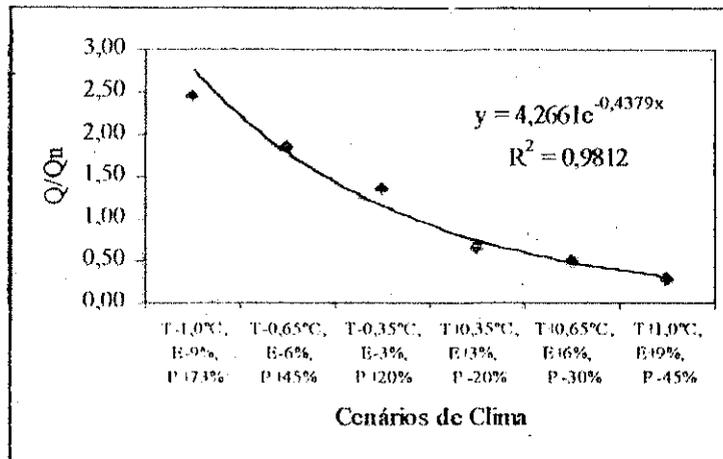


Figura 6.19 - Relação entre Q/Qn médio regional e os cenários conjuntos de clima

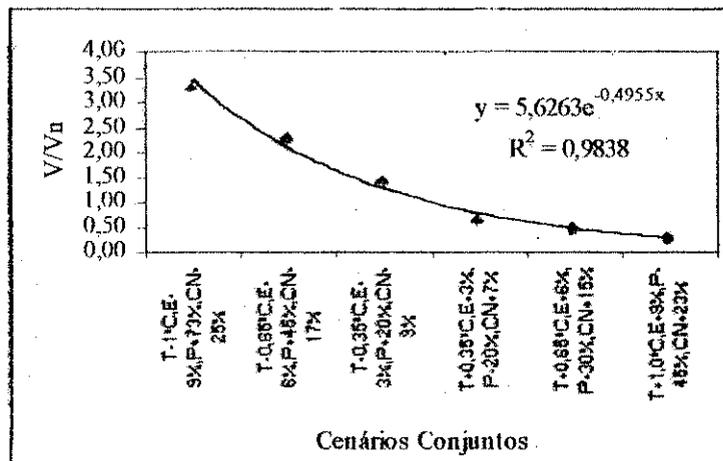


Figura 6.20 - Relação entre V/Vn médio regional e os cenários conjuntos de clima e uso do solo

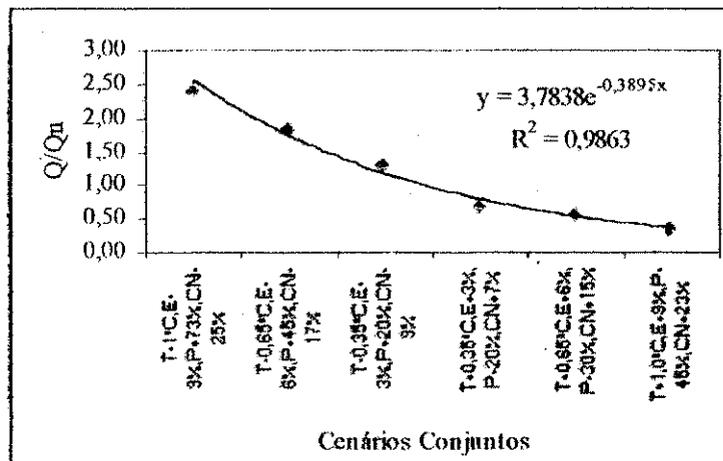


Figura 6.21 - Relação entre Q/Qn médio regional e os cenários conjuntos de clima e uso do solo

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Conclusões

O estudo dos efeitos da variabilidade de fatores climáticos (precipitação e evaporação) e da mudança de uso do solo sobre o escoamento é de grande importância visto que afetam os sistemas de recursos hídricos existentes e podem diminuir a oferta da água, principalmente em regiões semi-áridas como o Nordeste do Brasil, comprometendo ainda mais a difícil situação destas regiões onde os recursos naturais são altamente propensos a degradação e a onde a seca é um fenômeno freqüente.

Estudos avaliando os efeitos de fatores climáticos e uso do solo em conjunto ainda são incipientes no Nordeste do Brasil e devem ser realizados. Esta pesquisa buscou avaliar efeitos tanto isolados quanto em conjunto de fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento simulado em uma área de 14.850 km², região do Alto Piranhas, localizada no semi-árido paraibano, através de um modelo hidrológico distribuído capaz de captar a variabilidade destes fatores. Para tanto, o modelo foi validado para a região e foram criados cenários onde foram inseridas variações destes fatores (através de diferentes metodologias) e foi possível comprovar quem mais influenciava o escoamento.

A validação foi baseada em grupos de parâmetros obtidos por Lopes (1994) para a bacia do Rio Piancó (4.550 km²) já que esta bacia estava inserida na região do Alto Piranhas, sendo aqui realizada uma validação abrangente com duas discretizações da região de estudo. Buscou-se a validação de um mesmo grupo de parâmetros (média dos valores obtidos para bacia do Rio Piancó) aplicados em toda a área de estudo. No intuito de fortalecer a validação do modelo e seus parâmetros foram ainda realizadas duas outras: uma com os parâmetros anuais e outra considerando os parâmetros para anos secos, úmidos e normais, definidos através de um índice.

Os resultados em geral indicam que as discretizações aplicadas não influenciam significativamente o escoamento e que o modelo pode simular razoavelmente os volumes escoados anuais na região (r^2 médio $\sim 0,7$), com exceção, relativamente, das bacias de Aguiar e Antenor Navarro para as quais o modelo não foi validado com o grupo de parâmetros médios. As vazões máximas simuladas foram ruins, com $0,02 < r^2 < 0,21$, a exceção dos resultados para as bacias de Piancó ($r^2 = 0,38$), Boqueirão de Mãe-d'água ($r^2 = 0,66$) e São José de Piranhas ($r^2 = 0,51$). Os resultados para as vazões máximas melhoram significativamente se forem aplicados os parâmetros anuais (r^2 médio $\sim 0,6$). Esta melhora se deve ao fato do modelo ter sido calibrado com base nos picos com reflexo nos resultados da validação.

Sucesso com a validação foi alcançado na simulação de duas bacias que ainda não tinham sido testadas: Boqueirão de Mãe-d'água (r^2 médio $=0,69$ para volumes e r^2 médio $=0,67$ para vazões máximas) e Santa Rita do Curema (r^2 médio $=0,55$ para volumes e r^2 médio $=0,02$ para vazões máximas). Estas bacias têm séries antigas, difíceis de serem verificadas de outro modo.

A validação por parâmetros médios foi realizada por diferentes critérios existentes: utilizando diferentes bacias, diferentes períodos e bacias que ainda não tinham sido testadas. Estes tipos de validação, sugeridos na literatura (ver Klemeš, 1986, por exemplo) habilita o modelo a simular os cenários que permitem a análise dos efeitos da variabilidade dos fatores climáticos e do uso do solo.

A geração de cenários isolados e em conjunto permitiu detectar que o efeito dos fatores isolados é sempre menor do que o efeito dos fatores conjuntos (precipitação e uso do solo). Entre as situações que mais afetam o escoamento estão:

- Para os cenários isolados de precipitação: aumento da precipitação
- Para os cenários isolados de evaporação: diminuição da temperatura
- Para os cenários isolados de uso do solo: aumento do valor CN (desmatamento)
- Para os cenários de clima (precipitação e evaporação): diminuição da temperatura (evaporação) e aumento da precipitação
- Para os cenários conjuntos (precipitação, evaporação e uso do solo): diminuição da temperatura (evaporação), aumento da precipitação e diminuição do valor CN (recuperação da vegetação natural).

De acordo com os diferentes cenários gerados, os picos e volumes são sensíveis à precipitação e a mudança do uso do solo, comprovando que estes dois fatores influenciam mais o escoamento, na ordem de $0,21 < V/V_n < 2,34$; $0,3 < Q/Q_n < 1,83$ (precipitação) e $0,4 < V/V_n < 2,24$; $0,58 < Q/Q_n < 1,44$ (uso do solo) e que a evaporação influencia em menor escala, $0,92 < V/V_n < 1,11$; $0,97 < Q/Q_n < 1,05$.

O efeito dos cenários conjuntos de clima (precipitação e evaporação) e conjuntos de clima e uso do solo (precipitação, evaporação e uso do solo) possuem intervalos de variação maiores do que os efeitos isolados: $0,20 < V/V_n < 3,61$; $0,29 < Q/Q_n < 2,46$ (clima) e $0,30 < V/V_n < 3,28$; $0,36 < Q/Q_n < 2,42$ (clima e uso do solo).

De posse desses resultados, percebe-se que a variabilidade natural de fatores como precipitação e evaporação conjuntamente, juntamente com a crescente influência ação humana sobre o uso do solo (Paraíba, 1997), geram cenários preocupantes que podem piorar a já afetada condição dos recursos hídricos da região. Por exemplo o cenário de aumento de $1,0^{\circ}\text{C}$ na temperatura, 9% na evaporação e diminuição de 45% na precipitação resulta numa diminuição média de 75% no escoamento, uma redução alta que compromete os sistemas existentes.

7.2 Recomendações

Devido a grande sensibilidade apresentada nas vazões máximas anuais pela aplicação dos parâmetros médios, sugere-se uma nova calibragem dos coeficientes do modelo para cada bacia com a redefinição de novo grupo de parâmetros para a região. Como por exemplo, para o posto de Antenor Navarro que não foi validado com os parâmetros médios (r^2 médio = 0,23) mas apresentou uma melhor correlação com a utilização dos parâmetros por faixas ($r^2 = 0,61$ para volumes e $r^2 = 0,28$ para picos), incitando uma nova calibração, a fim de se modificar os grupos de parâmetros e melhorar os resultados.

Sugere-se também uma avaliação mais profunda dos valores CN e dos coeficientes de Manning-Strickler para confirmar valores usados, pois a análise realizada foi dentro da bacia delimitada do posto de Piancó existindo a necessidade da investigação dentro das demais sub-bacias, já que existe evidência na literatura que são dependentes da

escala (Simanton et al., 1996; Figueiredo, 1998). Para a região adianta-se que a dificuldade a ser encontrada é a falta de hidrogramas instantâneos para esta finalidade.

Estes parâmetros são importantes no modelo NAVMO. O conceito de Curva-Número é aplicado de maneira a considerar as heterogeneidades dos solos e da vegetação nas bacias no cálculo do escoamento. Em bacias semi-áridas, onde existe um alto índice de degradação, o valor CN deve ser o mais preciso possível, visto que influencia fortemente o escoamento gerado nestas bacias. Neste contexto, deve-se buscar uma melhor avaliação das condições do uso do solo na região para tentar se evitar as aproximações, observação esta que fortifica sugestão já feita por Lopes (1994).

Deve-se buscar, também, incluir uma análise de incertezas na parametrização avaliada, o que pode ser feito a partir do momento da definição de novos grupos de parâmetros para a região (nova calibração). Além de uma investigação mais profunda sobre os efeitos da escala nos parâmetros do modelo e nos processos hidrológicos existentes.

O modelo NAVMO também é capaz de simular os efeitos de armazenamento nos açudes. Esta característica deve ser explorada em trabalhos futuros, pois uma característica da região é a existência de grande número de mananciais de pequeno, médio e grande porte.

E por fim, pode ainda ser realizada uma regionalização das variações de volumes e vazões máximas anuais sobre a bacia estudada, determinando-se em qualquer ponto da bacia o valor exato desta variação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agnew, C., Anderson, E. (1992) *Water Resources in the Arid Realm*. Routledge, London and New York. Routledge.
- Arnell, N. W., (1996). *Global Warming, River Flows and Water Resources*. John Wiley & Sons.
- Askew, A. J. (1987). Climate Change and Water Resources. In: Solomon, S. I., Beran, M., Hogg, W. (editors). *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*. IAHS pub. n. 168. p. 389-402.
- Azevedo, J. R. G. (1999). *Water Resources and Global Warming for the São Francisco River in Brazil*. PhD Thesis. University of Southampton, Department of Civil Engineering, Southampton, UK.
- Bardossy, A., Mierlo, J. M. C. V., (2000). Regional Precipitation and Temperature Scenarios for Climate Change. *Hydrological Sciences Journal* . N. 45 vol. 4 p. 559-575.
- 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.
- Blaney, H. F., Criddle, W. D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data, *U. S. Dept. Agr., Div. Irrigation and Water Conserv., SCS TP-96*.
- Bogardi, I., Matyasovszky, I., Bardossy, A., Duckstein, L. (1994). Estimation of Local and Areal Drought Reflecting Climate Change. *American Society of Agricultural Engineers*. v. 37, n. 6, p. 1771-1781.
- Brasil (1981). Ministério das Minas e Energia. Projeto Radam-Brasil. Levantamento de Recursos Naturais. Vol. 23. Folhas SB24/25, Jaguaribe/Natal. Rio de Janeiro/RJ.
- Brenner, A. J., Richards, P. L., Barlage, M., Sousounis, P. (1999). The Impact of Land Use Changes 1820-2020 on Water Quality and Quantity in Southeast Michigan. In: Heathwaite, L. (editor). *Impact of Land Use Changes on Nutrient Loads from Diffuse Sources*. IAHS pub. n. 257. p. 229-233.
- Bruce, J. P., Clark, R. H., (1977). *Introduction to Hydrometeorology*. Pergamon International Library.
- Calder, I. R., Hall, R. L., Bastable, H. G., Gunston, H. M., Shela, O., Chirwa, A., Kafundu, R. (1995). The Impact of Land Use Change on Water Resources in Sub-Saharan Africa: a Modelling Study of Lake Malawi. *Journal of Hydrology*. v. 170. p. 123-135.

- Chow, V. T. (1959) *Open channel hydraulics*. International Student Edition. McGraw-Hill International Book Company.
- 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. (1964). *Hanbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Publishing Company. USA.
- Chow, V. T., Maidment. D. R., Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions Civil Engineers Series. Singapore.
- Conway, D., Krol, M., Alcamo, J., Hulme, M. (1996). Future Availability of Water in Egypt: the Interaction of Global, Regional, and Basin Scale Driving Forces in the Nile Basin. *Ambio*. v. 25, n. 5, p. 336-342.
- Diniz, L. S. (1994) Calibração Automática de modelos Chuva-Vazão Usando um Algoritmo Genético. Campina Grande. Tese (Mestre em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- DNAEE, Departamento Nacional de Energia Elétrica (1987/1993). Versão 4.0/OPUS (1987/1993), INFO.
- 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. University of Newcastle Upon Tyne, Department of Civil Engineering, Newcastle.
- Figueiredo, E. E., Srinivasan, V.S. (1999). Avaliação dos Impactos do Uso do Solo e da Influência dos Açudes sobre o Escoamento para o Açude de Sumé. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. Em CD-ROM.
- Figueiredo, E.E., Lopes, P.L., Srinivasan, V.S. (1999). Calibração e Validação de um Modelo Distribuído para a Bacia do Rio Piancó - PB. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. Em CD-ROM.
- Fread, D. L. (1985). Channel Routing. In: *Hydrological Forecasting*. Anderson, M. G., Burts, T. P. (editors). John Willey & Sons. Londres. U. K.
- Galvão, C.O. (1999). *Aplicabilidade em Recursos Hídricos da Previsão de Longo Prazo no Nordeste do Brasil*. Porto Alegre. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

- Gleick, P. H. (1987). Global Climatic Changes and Regional Hydrology: Impacts and Responses. In: Solomon, S. I., Beran, M., Hogg, W. (editors). *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*. IAHS pub. n. 168. p. 389-402.
- Gomes, H. P. 1999. Engenharia de Irrigação. Universidade Federal da Paraíba. 3ª edição. Campina Grande/PB
- Grasse, F. (1998). Water resources variability in tropical and subtropical África in the past. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J. M., Hulme, M. (editors). *Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS. Pub. n. 252. p. 97-105.
- Haan, C. T. (1977). Statistical Methods in Hydrology. The Iowa State University Press. USA.
- Hearthcote, R. L. (1983). The Arid Lands: Their Use and Abuse. Longman. London. pp. 323.
- <http://www.pbnet.com.br/openline/cbsfilho/> Sobre Coremas. Disponível on-line. Em 23/04/2001.
- <http://www.dca.ufpb.br>. Dados climatológicos do Estado da Paraíba. Disponível on-line. Em 31/01/2001.
- Hughes, D., Smakhtin, V. (1998). Simulating the Impacts of Land Use Change on Streamflow Time Series for Southern African Rivers. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J. M., Hulme, M. (editors). *Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS. Pub. n. 252. p. 419-428.
- Kite, G. W., Waititu, J. K. (1981). Effects of Changing Precipitation and Evaporation on Nzoia River Flows and Lake Victoria Levels, Contribution to the World Climate Program, report, 5 pp., World Meteorol. Org., Geneva.
- Kite, G. W. (1993). Application of a Land Class Hydrological Model to Climatic Change. *Water Resources Research*. v. 29, n. 7, p. 2377-2384.
- Kleeberg, H. B., Overland, H., Paus, B. (1989). NAVMO, *Version 1.1, niederschlag – abfluss – verdunstung modell*. Documentation Universität der Bundeswehr München, Alemanha.
- Klemeš, V. (1986). Operational Testing of Hydrological Simulation Models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 1, 13-24
- Lencastre, A., Franco, F. M. (1984) *Lições de Hidrologia*. Universidade de Lisboa. Centro de Ciências e Tecnologia.
- 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.

- Lørup, J. K., Refsgaard, J. C., Mazvimavi, D. (1998). Assessing the Effect of Land Use Change on Catchment Runoff by Combined Use of Statistical Tests and Hydrological Modelling: Case Studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*. v. 205 p. 147-163.
- 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.
- McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Haines, A., Srikanthan, R. (1987). Runoff Variability: a Global Perspective. In: Solomon, S. I., Beran, M., Hogg, W. (editors). *The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic regime and Water Resources*. IAHS. Pub. n. 168. p. 3-12.
- Medeiros, Y. (1994). Modelling the Hydrological Impacts of Climatic Change on a Semi-Arid Region. PhD Thesis. University of Newcastle Upon Tyne, Department of Civil Engineering, Newcastle.
- Micholson, S.E. (1998). Interannual and Interdecadal Variability of Rainfall over the African Continent during the Last Two Centuries. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J. M., Hulme, M. (editors). *Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS. Pub. n. 252. p. 107-116.
- Moreda, F., Bauwens, W., 1998. Influences of variability of rainfall on flow regimes in central Ethiopia. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J. M., Hulme, M. (editors). *Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS. Pub. n. 252. p. 297-305.
- Munn, R. E., Machta. (1978). Human Activities that Afect Climate. In: Proc. World Climate Conference: a Conference of Experts on Climate and Mankind. WMO. No. 537. Geneva, Switzerland.
- Nemec, J., Schaake, J. (1982). Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Variation. *Hydrology Science Journal*. v. 27, n. 3, p. 327-343.
- Ojo, O. (1987) Rainfall Trends in West Africa, 1901-1985. In: Solomon, S. I., Beran, M., Hogg, W. (editors). *The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic regime and Water Resources*. IAHS. Pub. n. 168. p. 37-44.
- Oliveira, M. Q. C., Medeiros, Y. D. P. , (1999). Aplicação do Modelo Swat na Avaliação de Impactos Decorrentes da Modificação no Uso do Solo em Bacias Hidrográficas. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. Em CD-ROM.
- Parkin, G., O'Donnell, G., Ewen, J., Bathurst, J. C., O'Connell, P. E., Lavabre, J. (1996) Validation of Catchment Models for Predicting Land-Use and Climate Change Impacts. 2. Case Study for a Mediterranean Catchment. *Journal of Hydrology*, v. 175, p. 595-613.
- Paraíba, Governo do Estado (1997). Plano Diretor de Recursos Hídricos do estado da Paraíba, Diagnóstico do Estado – Estudo de Base das Bacias do Rio Piancó e do Alto Piranhas. SCIENTEC. João Pessoa/PB. Em CD-ROM.

- Priestley, C. H. B., Taylor, R. J. (1972). On The Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Rev.*, vol. 100, pp. 81-92.
- Refsgaard, J. C., Alley, W. M., Vuglinsky, V. S., (1989). Methods for Distinguishing Between Man's Influence and Climatic Effects on The Hydrological Cycle. IHP-III Project 6.3. Unesco, Paris.
- Ribot, J. C., Najam, A., Watson, G. (1996). Climate Variation, Vulnerability and Sustainable Development in the Semi-Arid Tropics. In: Ribot, J.C., Magalhães, A. R. , Panagides, S.S. (editors). *Climate variability, Climate Change and Social Vulnerability in the Semi- Arid Tropics*. Cambridge University Press. P. 13-51.
- Sichingabula, H. M. (1998). Rainfall Variability, Drought and Implications of its Impacts on Zambia, 1886-1996. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J. M., Hulme, M. (editors). *Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS. Pub. n. 252. p. 125-133.
- Silva, L. P., Ewen, J. (2000). Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias Hidrográficas: a Necessidade de Novas metodologias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*. Vol 5. n. 2.
- 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. (1995). Watershed Moddeling. In: Singh, V. P. (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Louisiana.
- Sorooshian, S., Gupta, V. K. (1995). Model Calibration. In: Singh, V. P. (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Louisiana.
- Strong, A. E. (1989). Greater Global Warming Revealed by Satellite-Derived Sea-Surface Temperature Trends. *Nature*, 338, 642-645.
- Thorntwaite, C. W., Wilm, H. G., and others. 1944. Report of the Comittee on Transpiration and Evaporation, 1943-1944, *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 25, pt. V, pp. 683-693.
- Tucci, C. E. M., Beltrami, L. F. S. (1993). Evaporação e Evapotranspiração . In: Tucci, *Hidrologia – Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade. p. 253-277.
- Tucci, C.E.M., Damiani, A. (1994). Potencial Impacto da Modificação Climática do Rio Uruguai. *Revista Brasileira de Engenharia*, Porto Alegre, v. 12, n.2,p. 5-34.
- Tucci, C. E. M., Clarke, R. T. (1997). Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.2, n. 1, p. 135-152.

- Tucci, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Editora da Universidade. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ABRH. Porto Alegre.
- Vieux, B. E., Looper, J. P. (1998). Exploring Climatic Impacts on Water Resources in West Niger, Africa. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J. M., Hulme, M. (editors). *Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS. Pub. n. 252. p.347-354.
- Viner, D., Hulme, M. (1997). *The Climate Impacts*. Link Project: Applying Results from the Hadley Centre's Climate Change Experiments for climate change impacts assessments. Published by Climate Research Unit. UEA, Norwich.
- Williams, J. R. (1969). Flood Routing with Variable Travel Time on Variable Storage Coefficients. *Transactions of the ASAE*. Vol. 12, p. 100-103.
- Williams, M. A. J., Balling, R.C. (1996). *Interactions of Desertification and Climate*. World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme. New York.

ANEXOS

Anexo A: Esquema linear do Rio Piancó/Piranhas no modelo NAVMO para 55 sub-bacias

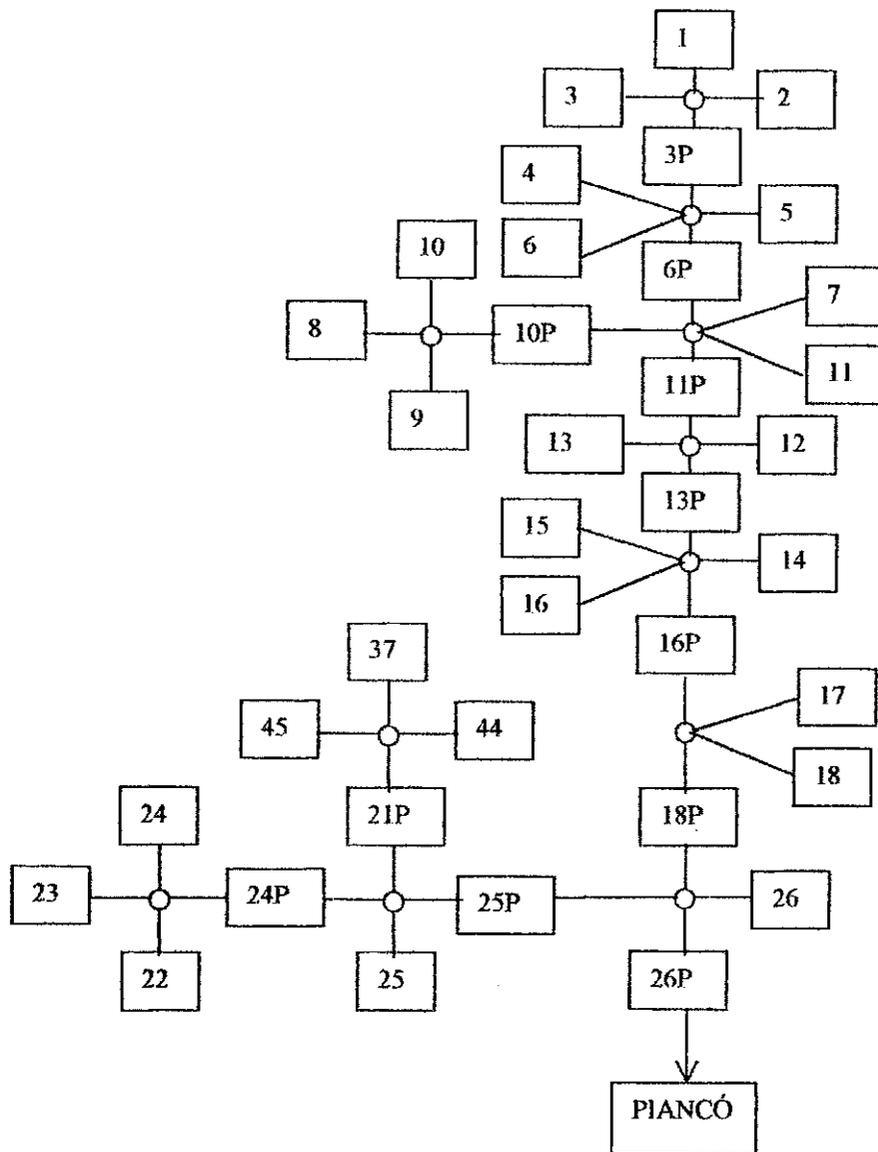
Anexo B: Arquivo *are* de entrada no modelo NAVMO para simulação com 55 sub-bacias

Anexo C: Hidrogramas da validação para diversas bacias para a discretização de 55 sub-bacias

Anexo D: Tabelas utilizadas no cálculo da evapotranspiração

Anexo E: Gráficos de volumes anuais e vazões máximas anuais nos cenários isolados e conjuntos para diversas bacias.

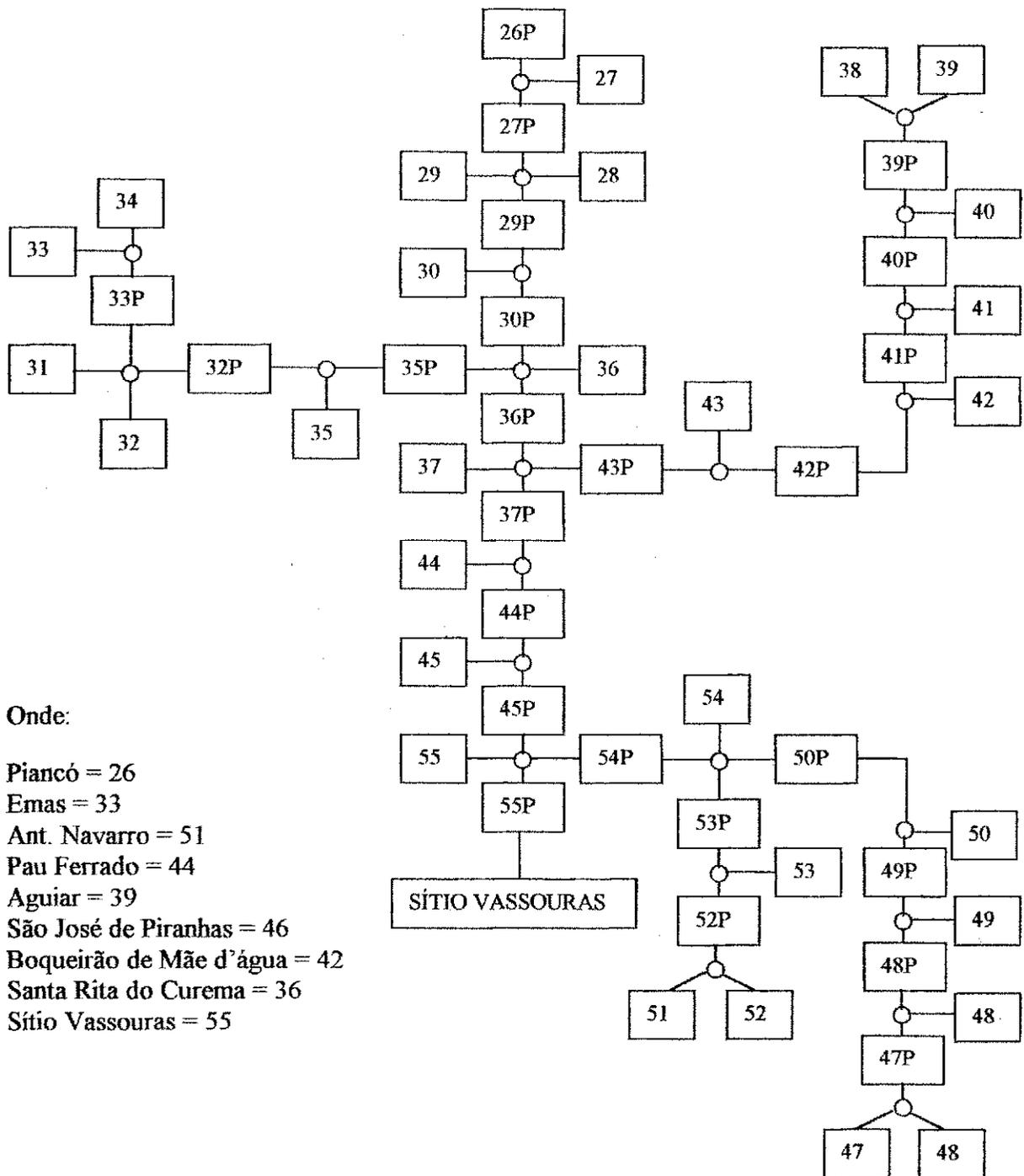
Anexo A



Convenção: P = propagação; o = adição de escoamento; □ = sub-bacia

Figura A1 – Esquema linear do rio PIANCÓ/Piranhas com 55 sub-bacias

Anexo A (continuação)



Onde:

- Piancó = 26
- Emas = 33
- Ant. Navarro = 51
- Pau Ferrado = 44
- Aguiar = 39
- São José de Piranhas = 46
- Boqueirão de Mãe d'água = 42
- Santa Rita do Curema = 36
- Sítio Vassouras = 55

Convenção: P = propagação; o = adição de escoamento; □ = sub-bacia

Figura A.1 - Esquema linear do rio Piancó/Piranhas com 55 Sub-bacias (continuação)

Anexo B

Sub-bacias	Ordem	Área (km ²)	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
1	100	171.0						1
1	170371	170370						2
1								3
1	0.74	56.0						4
2	200	127.5	17.6	638.000	400.000	543.500	9165.000	1
2	170371	170370						2
2								3
2	1.35	56.0						4
3	300	42.6	4.6	488.000	377.000	555.000	9163.200	1
3	170370	161231	0.00220	2.500	50.000	50.000	50.000	2
3	2.0	50.0	50.000	40.000	5.000	5.000		3
3	2.44	56.0						4
4	400	174.4	32.000	700.000	374.000	555.000	9164.000	1
4	161231	161230						2
4								3
4	1.02	56.0						4
5	500	76.3	15.400	637.000	374.000	550.000	9171.000	1
5	161231	161230						2
5								3
5	1.71	56.0						4
6	600	150.9	23.9	775.000	356.000	564.000	9162.000	1
6	161230	146361	0.0018	3.000	100.0	50.000	50.000	2
6	2.0	50.0	50.0	40.000	5.000	5.000		3
6	1.75	56.0						4
7	700	185.9	37.200	737.000	350.000	555.000	9176.000	1
7	146361	146360						2
7								3
7	1.04	56.0						4
8	800	128.9	20.700	600.000	377.000	571.500	9153.300	1
8	153162	153161						2
8								3
8	1.08	56.0						4
9	900	286.3	34.900	700.000	377.000	580.000	9151.500	1
9	153161	153160						2
9								3
9	0.93	56.0						4
10	1000	28.9	4.500	420.000	360.000	570.500	9163.000	1
10	153160	146360	0.00400	2.500	50.000	50.000	50.000	2
10	2.0	50.0	50.000	40.000	5.000	5.000		3
10	1.34	56.0						4
11	1100	71.2	10.700	400.000	340.000	571.500	9173.500	1
11	146360	135161	0.00100	4.000	170.000	180.000	180.000	2
11	4.0	75.0	75.000	40.000	5.000	5.000		3
11	0.56	56.0						4
12	1200	181.2	24.400	650.000	340.000	565.000	9180.000	1
12	135161	135160						2
12								3
12	1.27	56.0						4
13	1300	110.2	10.300	350.000	300.000	579.000	9177.500	1
13	135160	117790	0.0023	4.000	170.000	200.000	200.000	2
13	4.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
13	0.48	56.0						4

Sub-bacias	Ordem	Área (km ²)	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
14	1400	219.5	34.600	600.000	300.000	576.500	9188.500	1
14	117792	117791						2
14								3
14	0.87	56.0						4
15	1500	186.5	24.100	538.000	300.000	586.500	9171.000	1
15	117791	117790						2
15								3
15	0.99	56.0						4
16	1600	112.6	9.200	357.000	290.000	592.000	9184.500	1
16	117790	99390	0.00050	4.500	180.000	250.000	250.00	2
16	5.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
16	0.73	56.0						4
17	1700	98.9	19.400	550.000	290.000	586.500	9191.500	1
17	99391	99390						2
17								3
17	1.34	56.0						4
18	1800	191.0	10.600	400.000	285.000	599.000	9196.000	1
18	99390	78380	0.00050	5.000	200.000	300.000	300.00	2
18	5.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
18	1.08	56.0						4
19	1900	237.4	34.800	1000.000	430.000	591.000	9154.000	1
19	121222	121221						2
19								3
19	1.64	56.0						4
20	2000	184.8	30.200	750.000	430.000	599.000	9154.000	1
20	121221	121220						2
20								3
20	1.06	56.0						4
21	2100	158.7	9.300	450.000	290.000	598.500	9172.000	1
21	121220	95370	0.00540	2.500	100.000	150.000	150.00	2
21	4.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
21	1.71	56.0						4
22	2200	325.3	34.100	750.000	400.000	610.000	9153.500	1
22	121372	121371						2
22								3
22	1.03	56.0						4
23	2300	529.8	39.100	770.000	400.000	626.500	9165.000	1
23	121371	121370						2
23								3
23	0.95	56.0						4
24	2400	294.0	33.800	400.000	295.000	611.000	9174.000	1
24	121370	95370	0.0042	3.000	150.000	150.000	150.000	2
24	4.0	100.0	100.0	40.000	5.000	5.000		3
24	0.31	56.0						4
25	2500	166.4	16.200	350.000	280.000	608.200	9187.500	1
25	95370	78380	0.00060	3.000	200.000	300.000	300.00	2
25	5.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
25	0.43	56.0						4
26	2600	172.5	17.900	360.000	260.000	615.000	9195.500	1
26	78380	64280	0.00210	6.000	250.000	300.000	300.00	2
26	5.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
26	0.56	56.0						4
27	2700	62.5	6.000	298.000	235.000	617.500	9207.000	1
27	64280	56280	0.00390	7.000	250.000	300.000	300.00	2
27	5.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
27	1.05	56.0						4

Sub-bacias	Ordem	Area (km ²)	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
28	2800	270.0	21.000	607.000	300.000	633.000	9182.000	1
28	83281	83280						2
28								3
28	1.46	56.0						4
29	2900	185.1	17.000	445.000	278.000	622.000	9196.000	1
29	83280	56280	0.00230	2.500	70.000	70.000	70.00	2
29	2.0	50.0	50.000	40.000	5.000	5.000		3
29	0.98	56.0						4
30	3000	45.0	10.000	307.000	235.000	618.000	9213.000	1
30	56280	50280	0.00080	8.000	250.000	300.000	300.00	2
30	5.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
30	0.72	56.0						4
31	3100	502.5	24.000	752.000	348.000	651.000	9181.000	1
31	99281	99280						2
31								3
31	1.68	56.0						4
32	3200	154.2	22.000	339.000	277.000	636.000	9200.000	1
32	99280	65280	0.0015	3.000	150.000	150.000	150.000	2
32	4.0	100.0	100.0	40.000	5.000	5.000		3
32	0.28	56.0						4
33	3300	530.0	28.000	480.000	270.000	651.000	9214.000	1
33	72781	72780						2
33								3
33	0.75	56.0						4
34	3400	308.1	25.500	436.000	250.000	646.000	9208.000	1
34	72780	65280	0.0007	3.000	150.000	150.000	150.000	2
34	4.0	100.0	100.0	40.000	5.000	5.000		3
34	0.73	56.0						4
35	3500	76.8	12.000	274.000	220.000	627.500	9212.000	1
35	65280	50280	0.0020	7.000	250.0	300.00	300.000	2
35	5.0	100.0	100.0	40.000	5.000	5.000		3
35	0.45	56.0						4
36	3600	184.6	18.500	284.000	200.000	624.50	9220.000	1
36	50280	40280	0.00200	8.000	250.000	300.000	300.00	2
36	2.0	50.0	50.000	40.000	5.000	5.000		3
36	0.45	56.0						4
37	3700	8.0	3.000	252.000	237.000	616.000	9224.500	1
37	40280	37280	0.00500	9.000	200.000	350.000	350.00	2
37	6.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
37	0.50	56.0						4
38	3800	235.0	19.000	695.000	373.000	573.000	9203.000	1
38	80281	80280						2
38								3
38	1.69	56.0						4
39	3900	260.0	12.400	447.000	292.000	581.000	9216.000	1
39	80280	66280	0.0088	2.500	100.000	100.00	100.000	2
39	2.0	50.0	50.00	40.000	5.000	5.000		3
39	1.26	56.0						4
40	4000	93.0	14.000	551.000	230.000	593.000	9219.500	1
40	66280	57280	0.0022	3.000	150.000	150.00	150.000	2
40	4.0	100.0	100.00	40.000	5.000	5.000		3
40	2.29	56.0						4
41	4100	165.0	21.000	497.000	230.000	591.000	9205.000	1
41	57281	57280						2
41								3
41	1.27	56.0						4

Sub-bacias	Ordem	Área (km ²)	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
42	4200	310.5	21.000	376.000	200.000	606.000	9213.500	1
42	57280	42280	0.00200	8.000	200.000	300.000	300.00	2
42	5.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
42	0.84	56.0						4
43	4300	10.6	3.000	250.000	230.000	613.500	9225.000	1
43	42280	37280	0.00300	9.000	200.000	350.000	350.00	2
43	6.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
43	0.67	56.0						4
44	4400	99.1	7.000	253.000	200.000	615.000	9230.000	1
44	37280	28280	0.00170	10.000	250.000	350.000	350.00	2
44	5.0	150.0	150.000	40.000	5.000	5.000		3
44	0.76	56.0						4
45	4500	382.5	28.500	395.000	207.000	633.000	9236.000	1
45	28280	2280	0.00020	11.000	300.000	350.000	350.00	2
45	5.0	150.0	150.000	40.000	5.000	5.000		3
45	0.66	56.0						4
46	4600	475.0	21.500	729.000	344.000	555.000	9204.000	1
46	113781	113780						2
46								3
46	1.79	56.0						4
47	4700	501.0	16.000	476.000	277.000	562.000	9221.000	1
47	113780	92780	0.0030	2.500	100.000	150.000	150.00	2
47	4.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
47	1.24	56.0						4
48	4800	74.0	14.000	330.000	250.000	565.000	9230.500	1
48	92780	77780	0.0018	3.000	100.000	150.000	150.00	2
48	4.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
48	0.57	56.0						4
49	4900	142.0	13.600	375.000	226.000	575.000	9236.000	1
49	77780	66780	0.00220	4.000	150.000	150.000	150.00	2
49	4.0	100.0	100.000	40.000	5.000	5.000		3
49	1.10	56.0						4
50	5000	350.5	21.600	300.000	205.000	586.000	9242.500	1
50	66780	41280	0.0010	5.000	200.000	250.000	250.000	2
50	5.0	150.0	150.0	40.000	5.000	5.000		3
50	0.44	56.0						4
51	5100	1580.0	36.000	632.000	247.000	552.000	9265.500	1
51	96781	96780						2
51								3
51	1.07	56.0						4
52	5200	1050.0	20.000	318.000	225.000	561.000	9248.000	1
52	96780	78280	0.00110	7.00	250.00	300.00	300.00	2
52	5.0	150.0	150.0	40.00	5.00	5.00		3
52	0.47	56.0						4
53	5300	1120.0	28.000	460.000	208.000	592.000	9265.000	1
53	78280	41280	0.0005	8.500	250.000	350.000	350.000	2
53	5.0	150.0	150.0	40.000	5.000	5.000		3
53	0.90	56.0						4
54	5400	1105.0	22.500	426.000	195.000	606.500	9242.500	1
54	41280	2280	0.00090	10.000	300.000	350.000	350.00	2
54	5.0	150.0	150.000	40.000	5.000	5.000		3
54	1.03	56.0						4
55	5500	20.0	5.500	251.000	198.000	633.000	9256.000	1
55	2280	0	0.00220	12.00	300.00	400.00	400.00	2
55	5.0	150.0	150.0	40.00	5.00	5.00		3
55	0.96	56.0						4

Anexo C

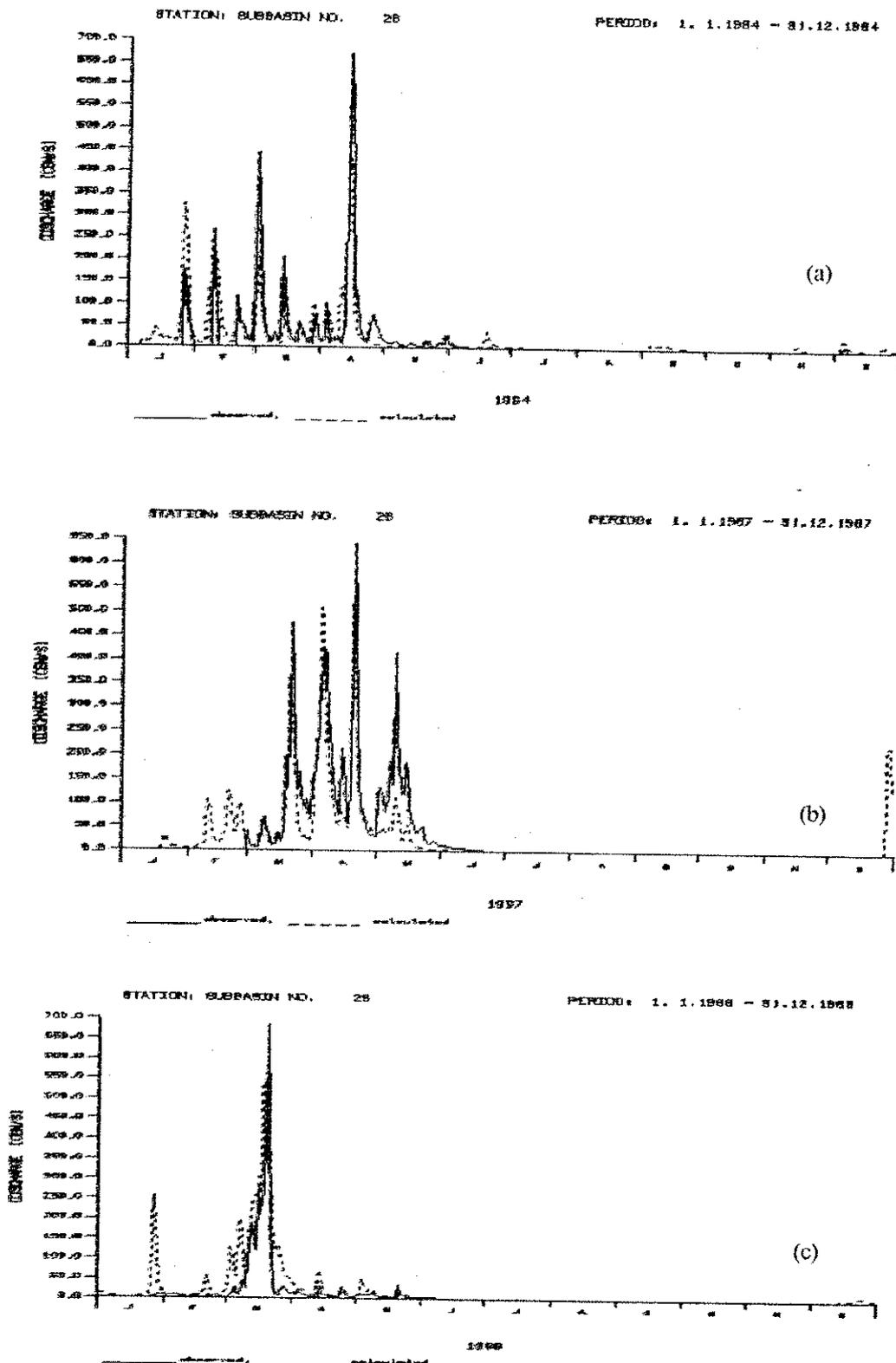


Figura C.1 – Hidrogramas observado e simulado na bacia de Piancó subdividida em 26 sub-bacias (a) 1964, (b) 1967e (c) 1968 (— vazões observadas -----vazões simuladas)

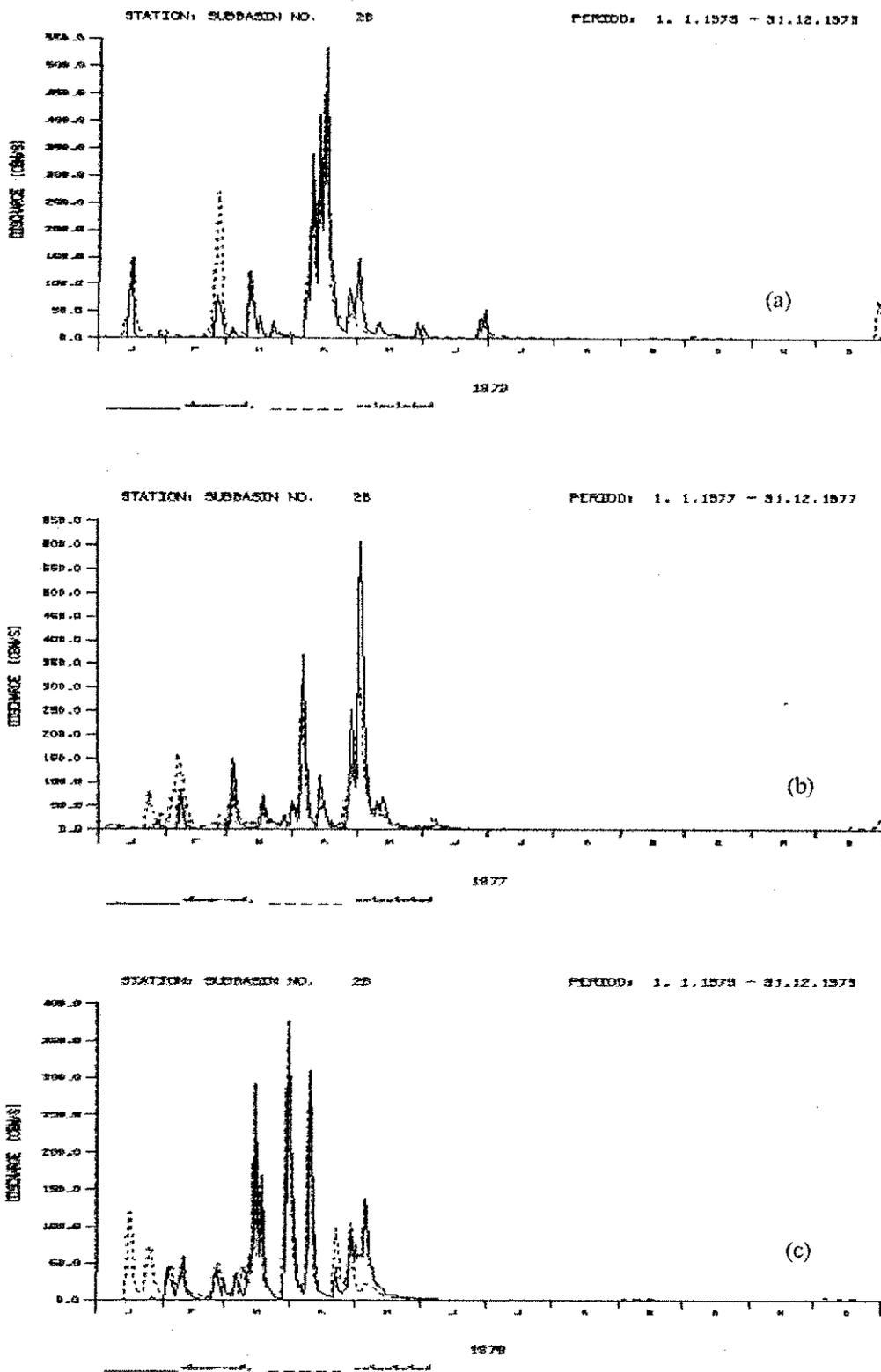


Figura C.2 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Piancó subdividida em 26 sub-bacias (a) 1973, (b) 1977e (c) 1979 (—vazões observadas -----vazões simuladas)

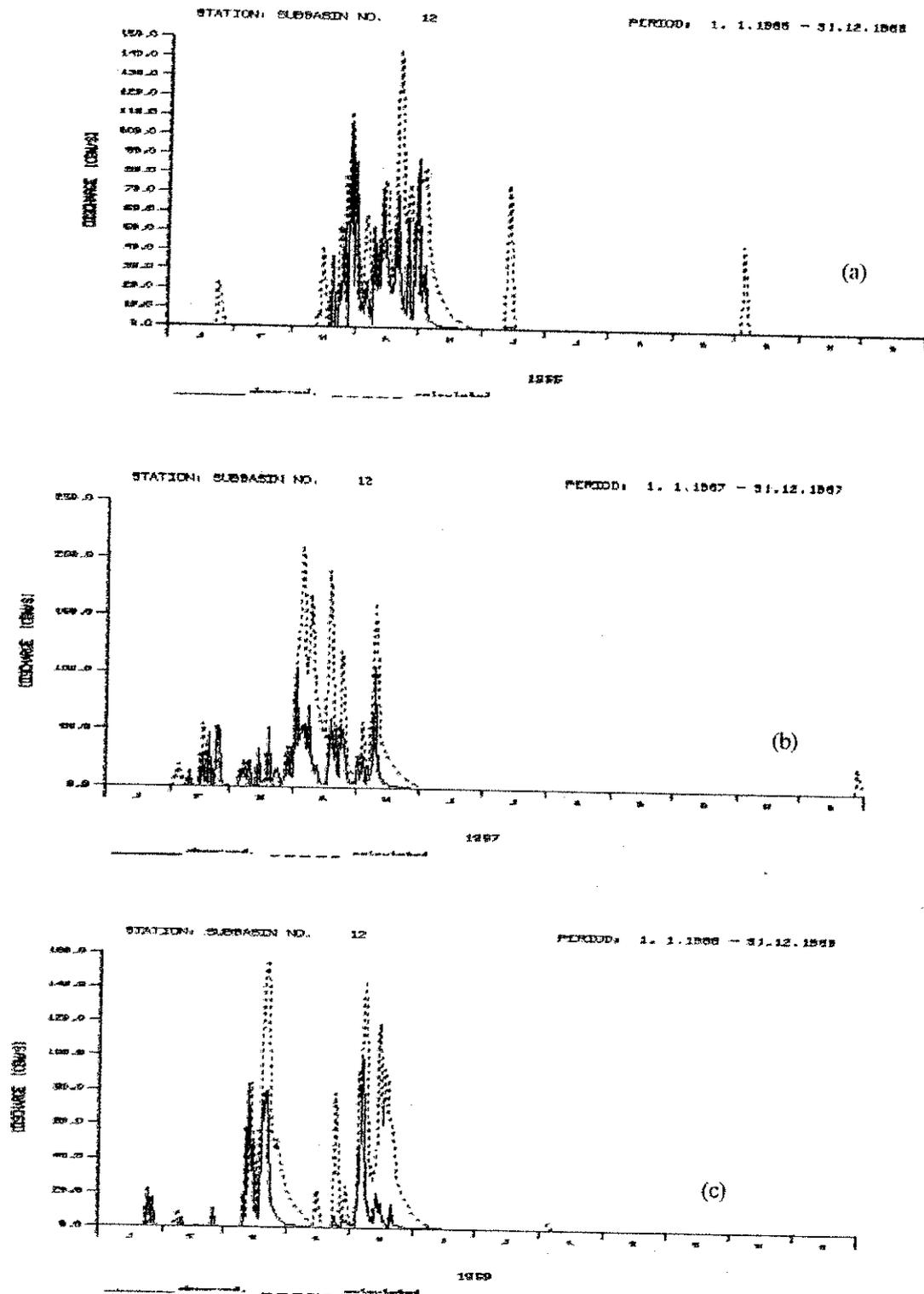


Figura C.3 – Hidrogramas simulado e observado na bacia de Emas (a)1965, (b) 1967e (c)1968 (— vazões observadas -----vazões simuladas)

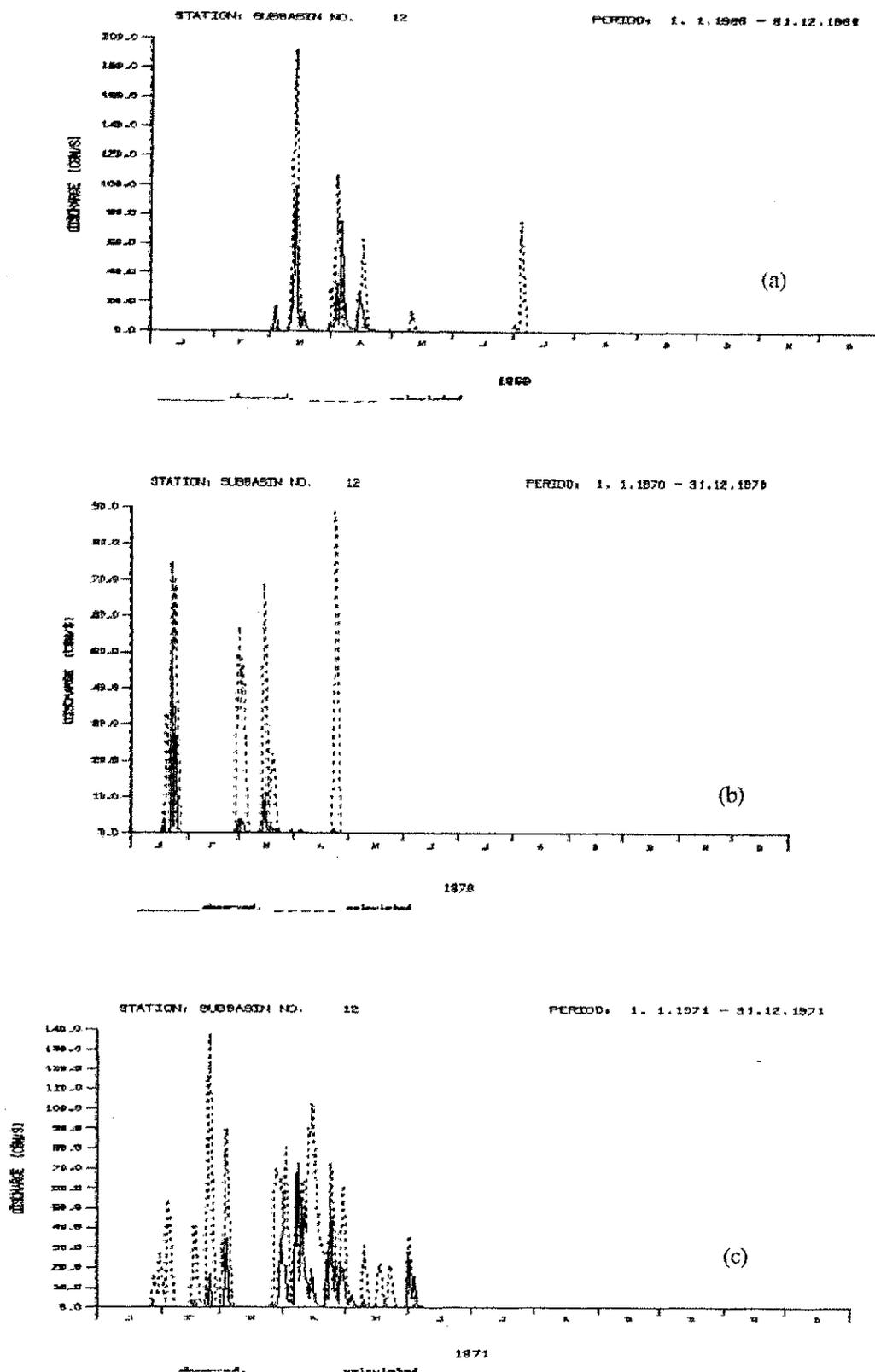


Figura C.4 - Hidrogramas simulado e observado na bacia de Emas (a)1969, (b) 1970 e (c)1971 (— vazões observadas -----vazões simuladas)

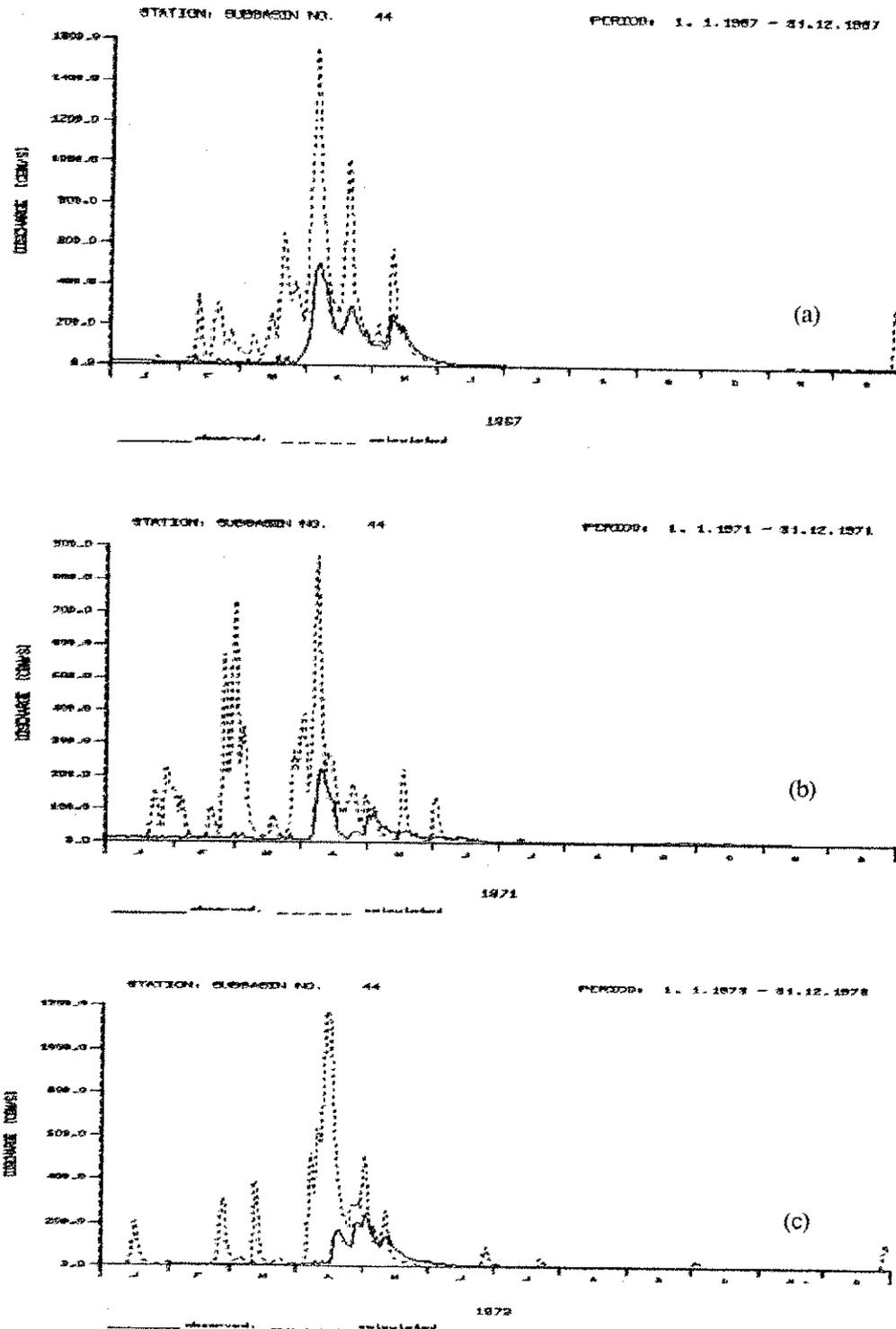


Figura C.5 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 44 sub-bacias (a)1967, (b) 1971 e (c)1973 (— vazões observadas -----vazões simuladas)

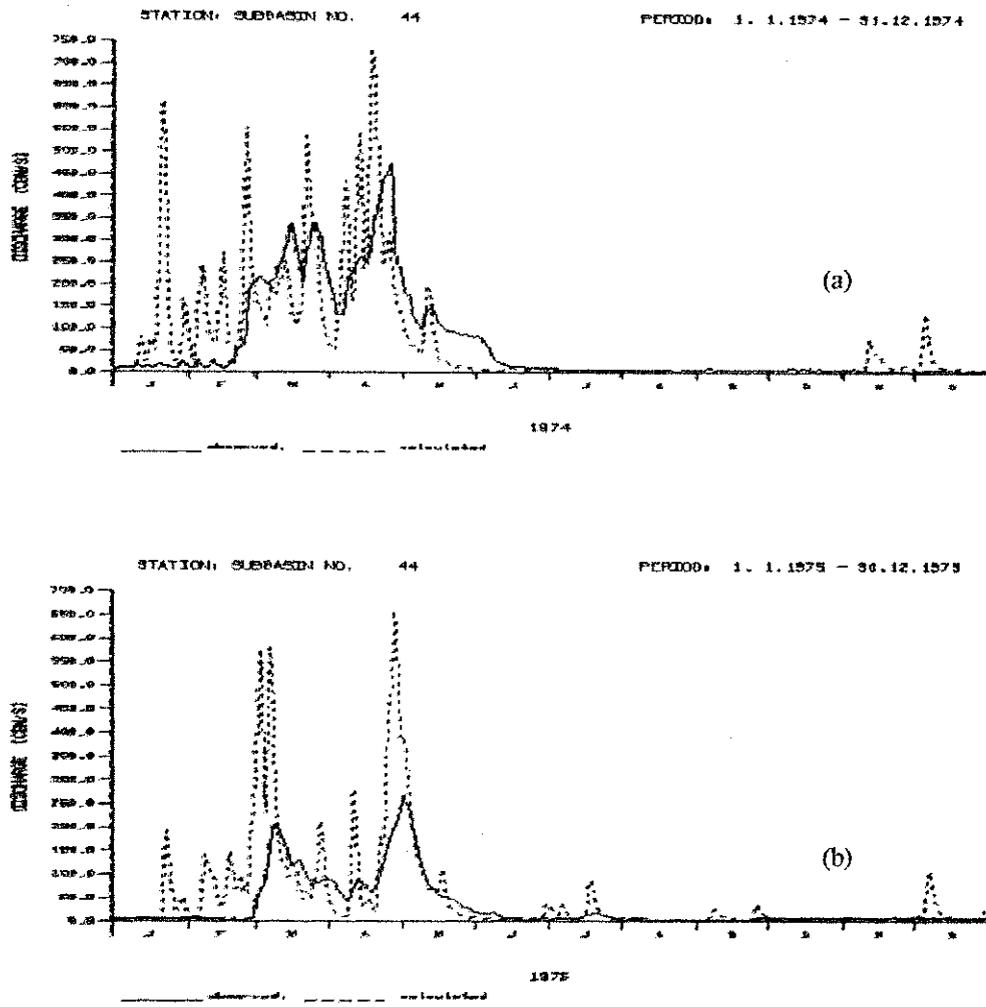


Figura C.6 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Pau Ferrado subdividida em 44 sub-bacias (a)1974 e (b) 1975 (— vazões observadas -----vazões simuladas)

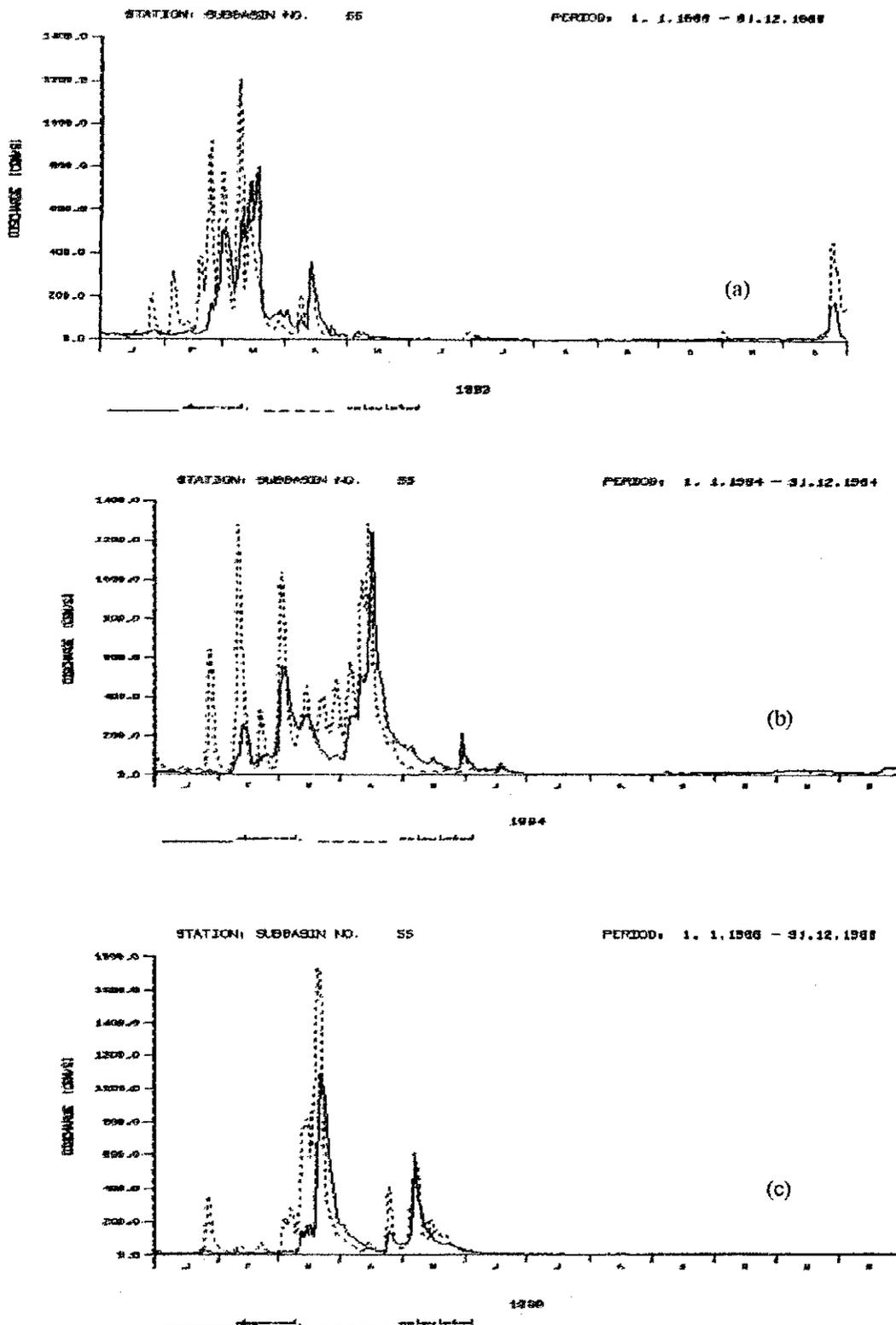


Figura C.7 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 55 sub-bacias (a)1963, (b) 1964 e (c)1968 (— vazões observadas - - - - -vazões simuladas)

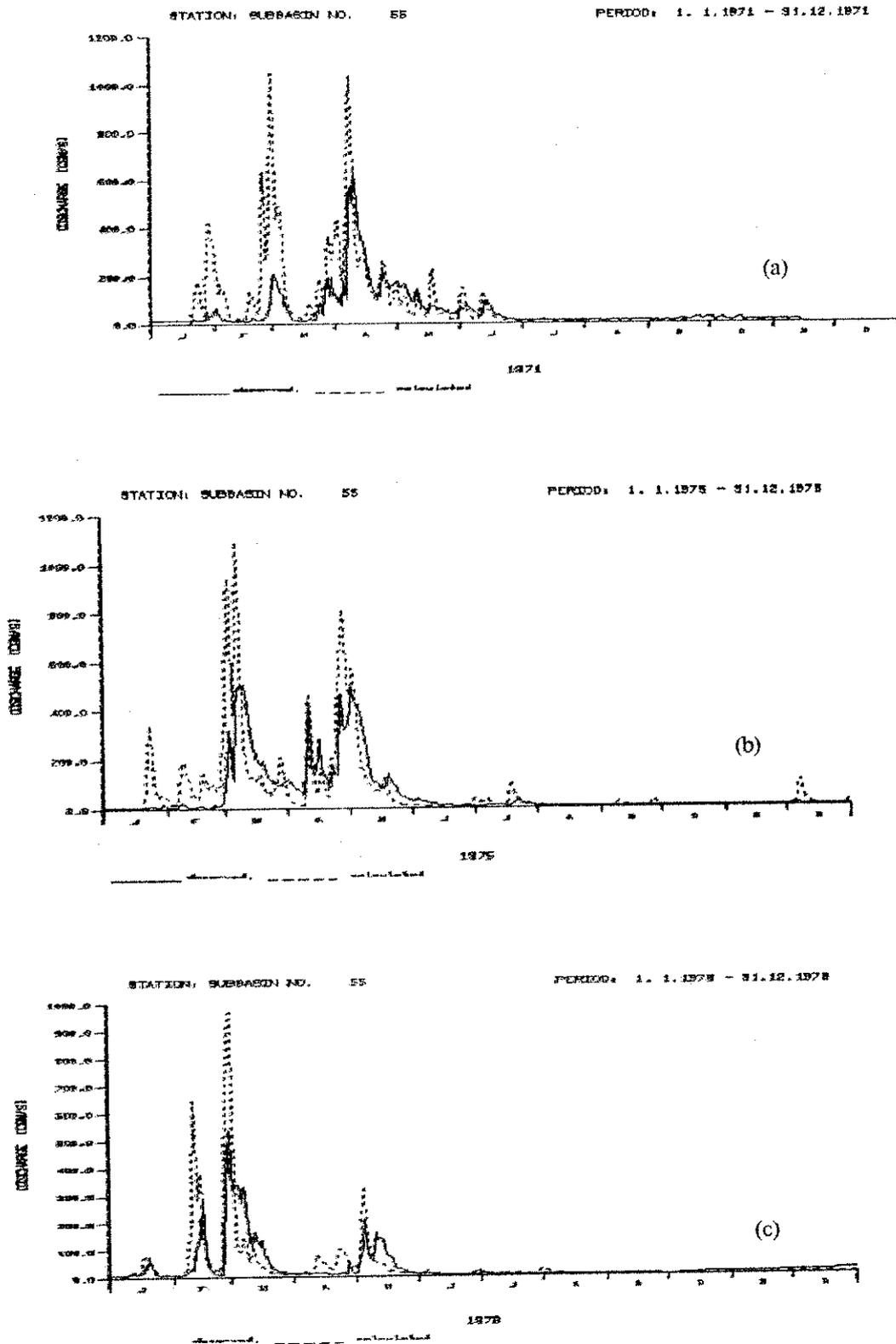


Figura C.8 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Sítio Vassouras subdividida em 55 sub-bacias (a)1971, (b) 1975 e (c)1978 (— vazões observadas - - - - -vazões simuladas)

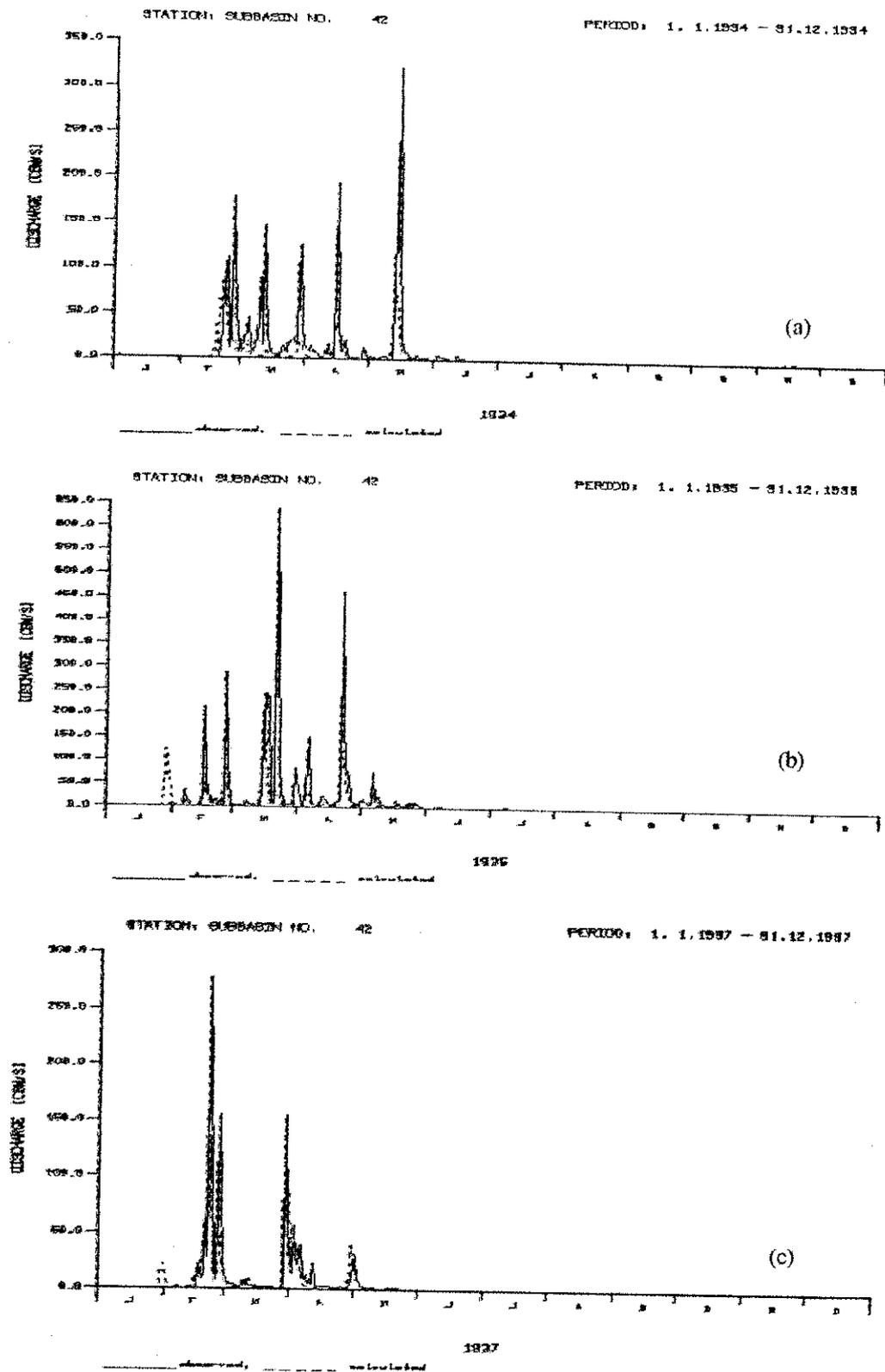


Figura C.9 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água subdividida em 42 sub-bacias: (a) 1934, (b) 1935 e (c) 1937 (— vazões observadas ----- vazões simuladas)

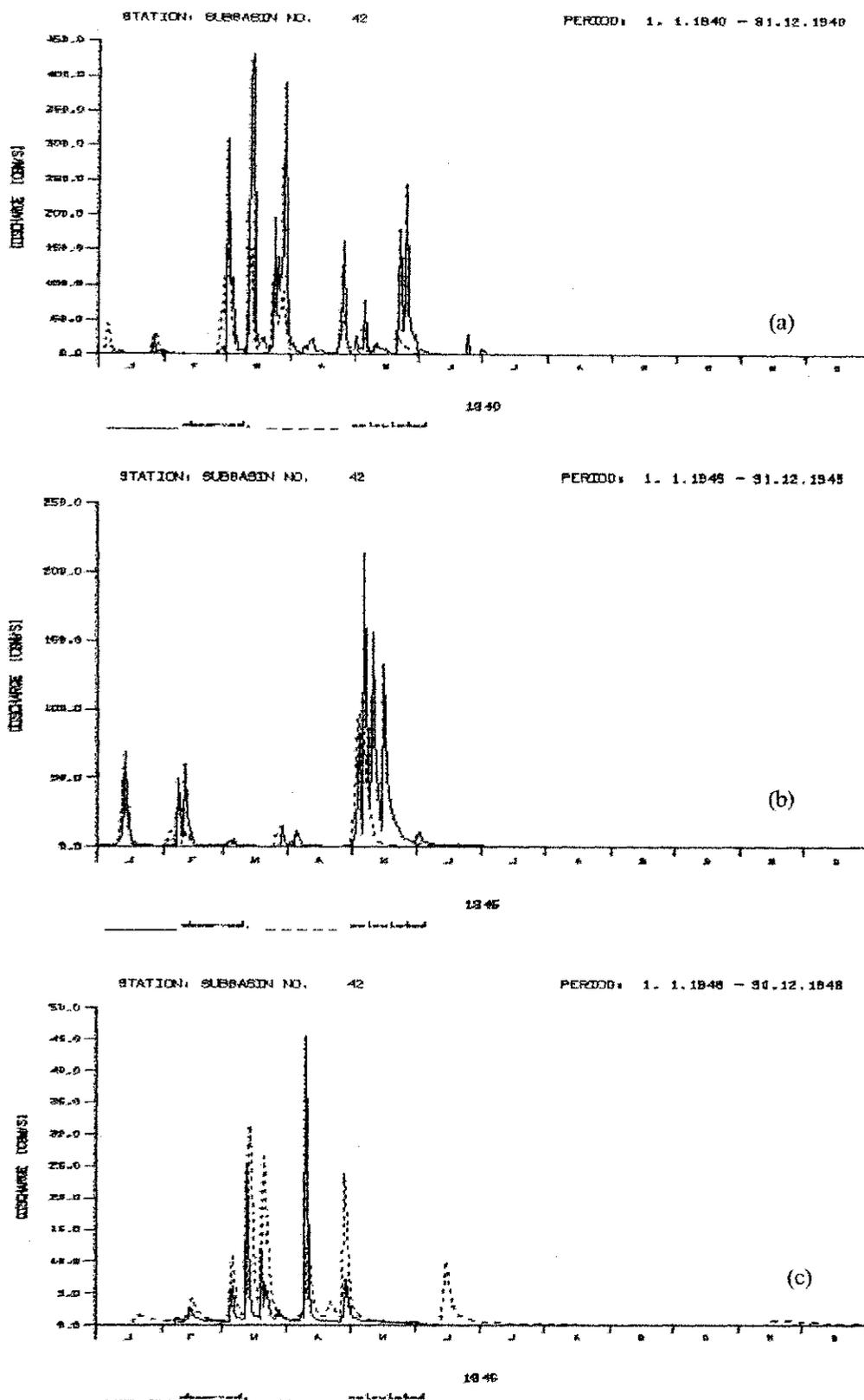


Figura C.10 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Boqueirão de Mãe-d'água subdividida em 42 sub-bacias: (a) 1940, (b) 1945 e (c) 1946 (— vazões observadas ----- vazões simuladas)

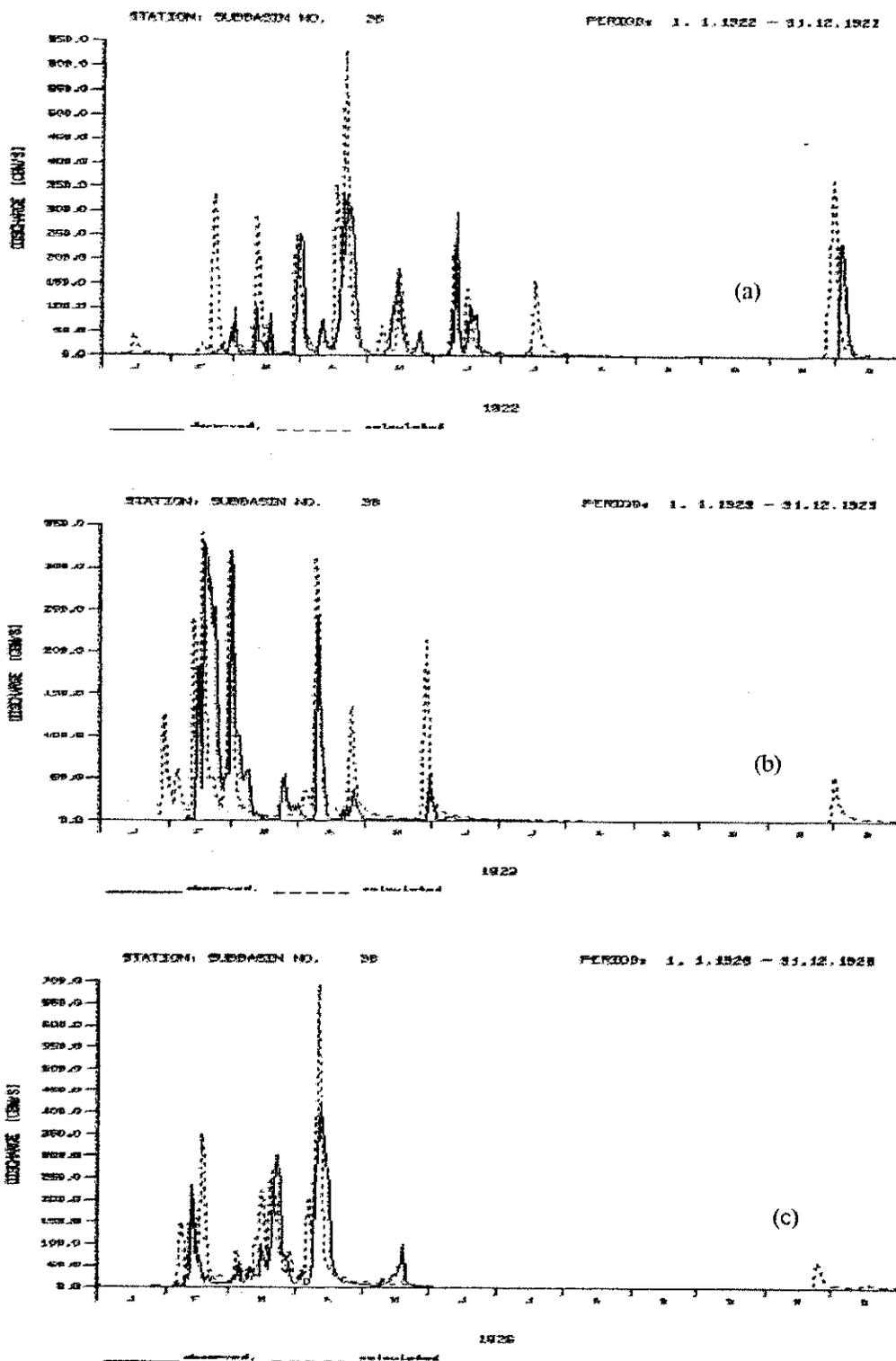


Figura C.11 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 36 sub-bacias: (a)1922, (b) 1923e (c)1926 (— vazões observadas - - - - - vazões simuladas)

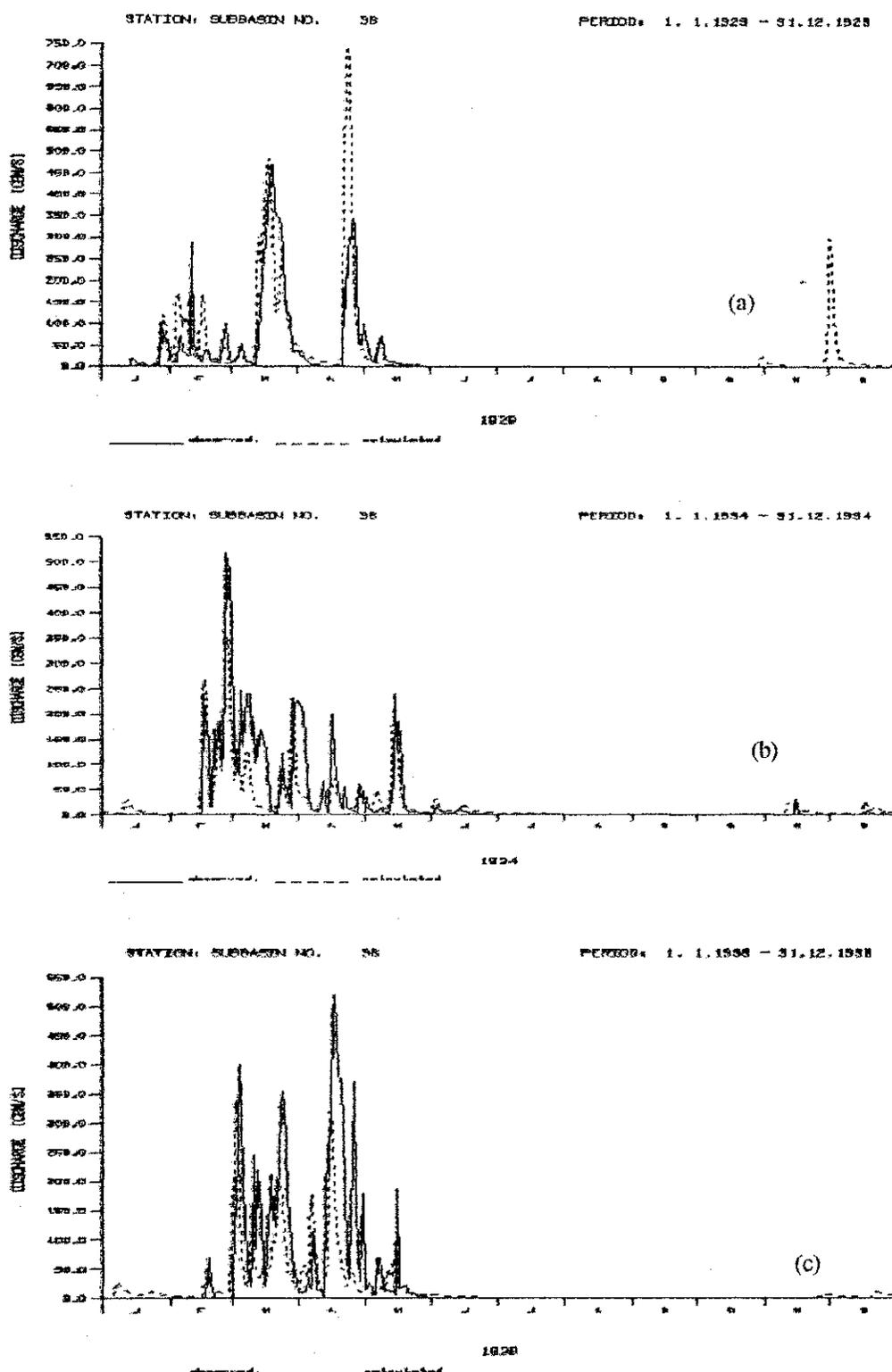


Figura C.12 - Hidrogramas observado e simulado na bacia de Santa Rita do Curema subdividida em 36 sub-bacias: (a)1929, (b) 1934e (c)1938 (— vazões observadas ----- vazões simuladas)

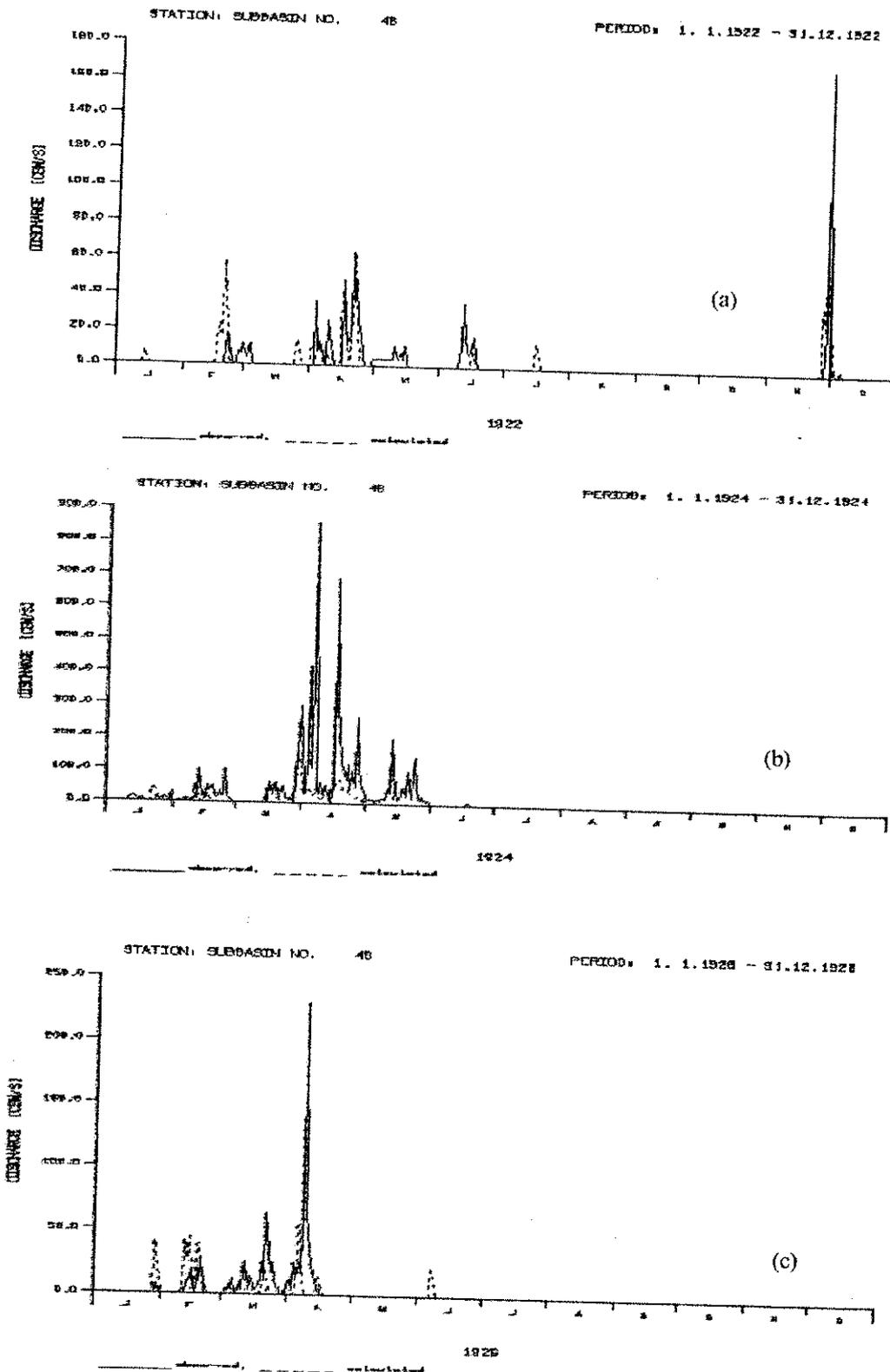


Figura C.13 - Hidrogramas simulado e observado na bacia de São José de Piranhas (a)1922, (b) 1924 e (c)1926 (— vazões observadas -----vazões simuladas)

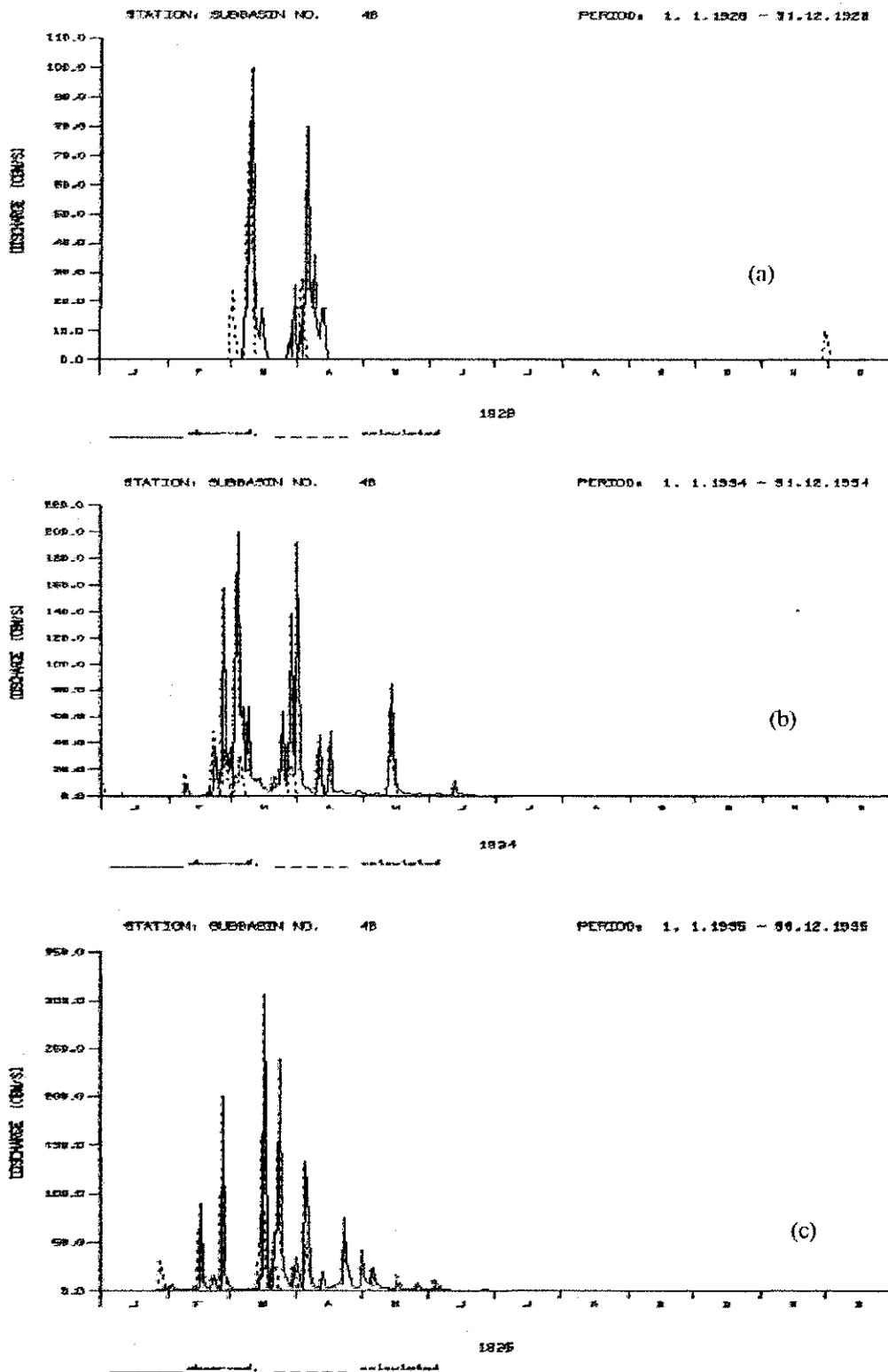


Figura C.14 - Hidrogramas simulado e observado na bacia São José de Piranhas (a)1929, (b) 1934 e (c)1935 (—vazões observadas -----vazões simuladas)

Anexo D

Tabela D.1 – Fator de correção Fc da fórmula de Thornthwaite

latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
10 N	0,98	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5 N	1,00	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
0	1,02	0,94	1,04	1,01	1,01	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5 S	1,04	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10 S	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15 S	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20 S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
25 S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
30 S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
35 S	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
40 S	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,20	1,29

Fonte: Tucci, 1998

Tabela D.2 – Proporção média diária (p) de horas luz para diferentes latitudes

latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0 S	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,277	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
5 S	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28
10 S	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29
15 S	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29
20 S	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
25 S	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31
30 S	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32
35 S	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32
40 S	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34
46 S	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20	0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35
50 S	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36

Fonte: Tucci, 1998

Anexo E

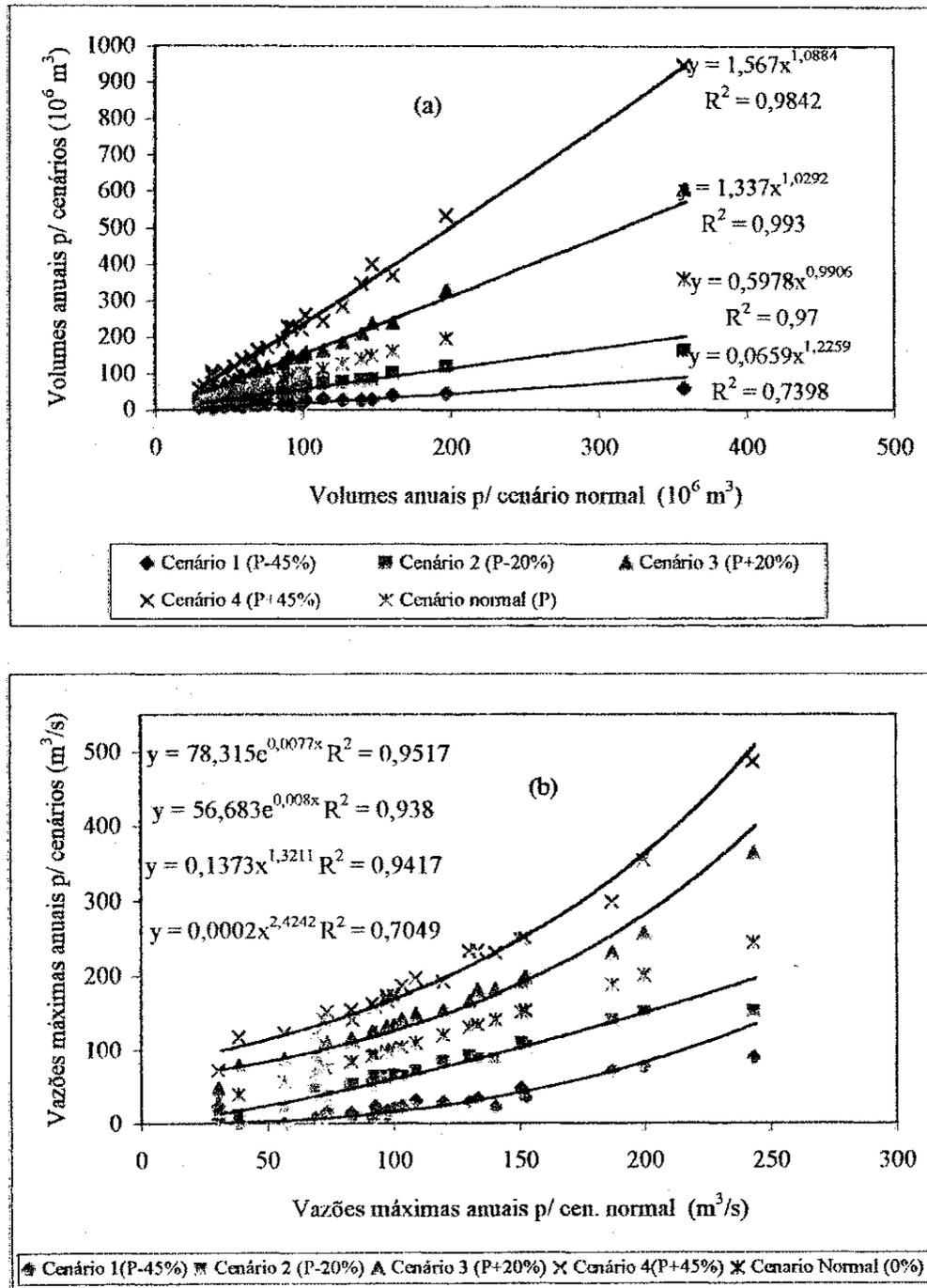


Figura E.1- Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de precipitação para a bacia de Boqueirão de Mãe-d'água: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

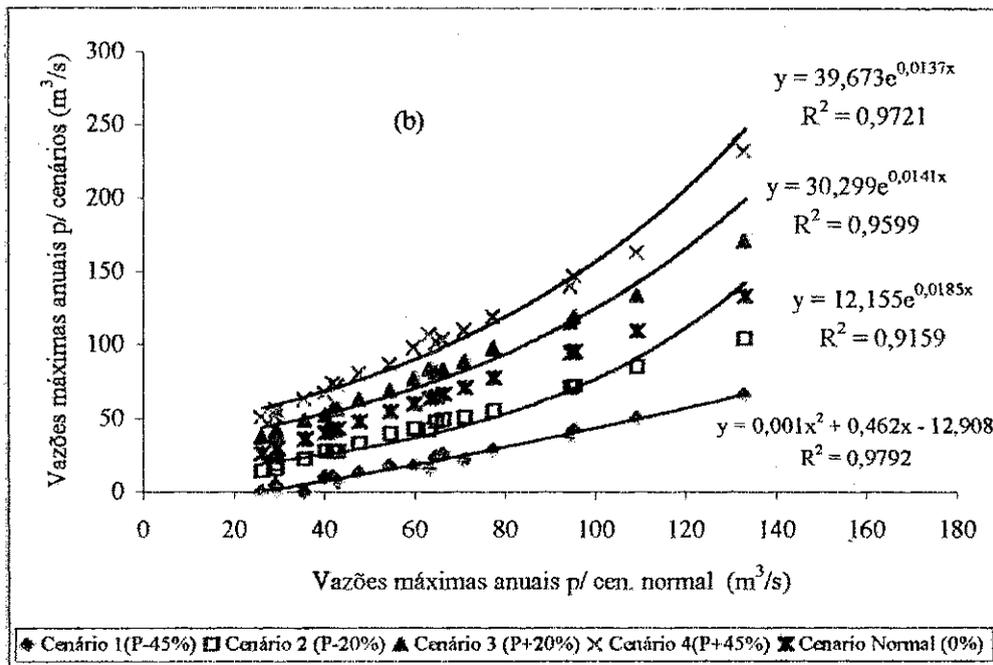
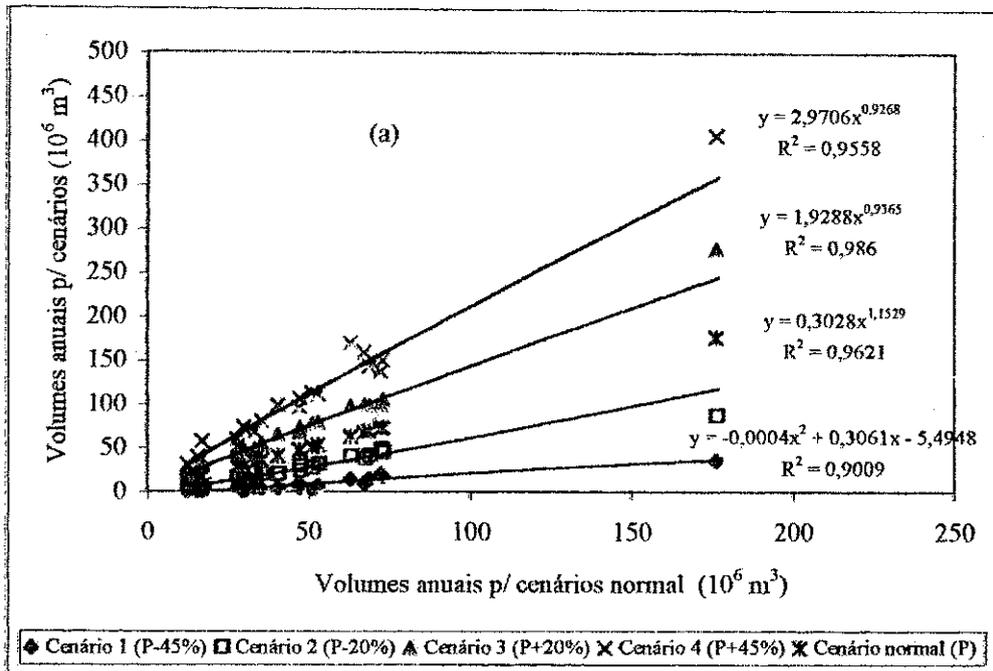


Figura E.2 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de precipitação para a bacia de São José de Piranhas: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

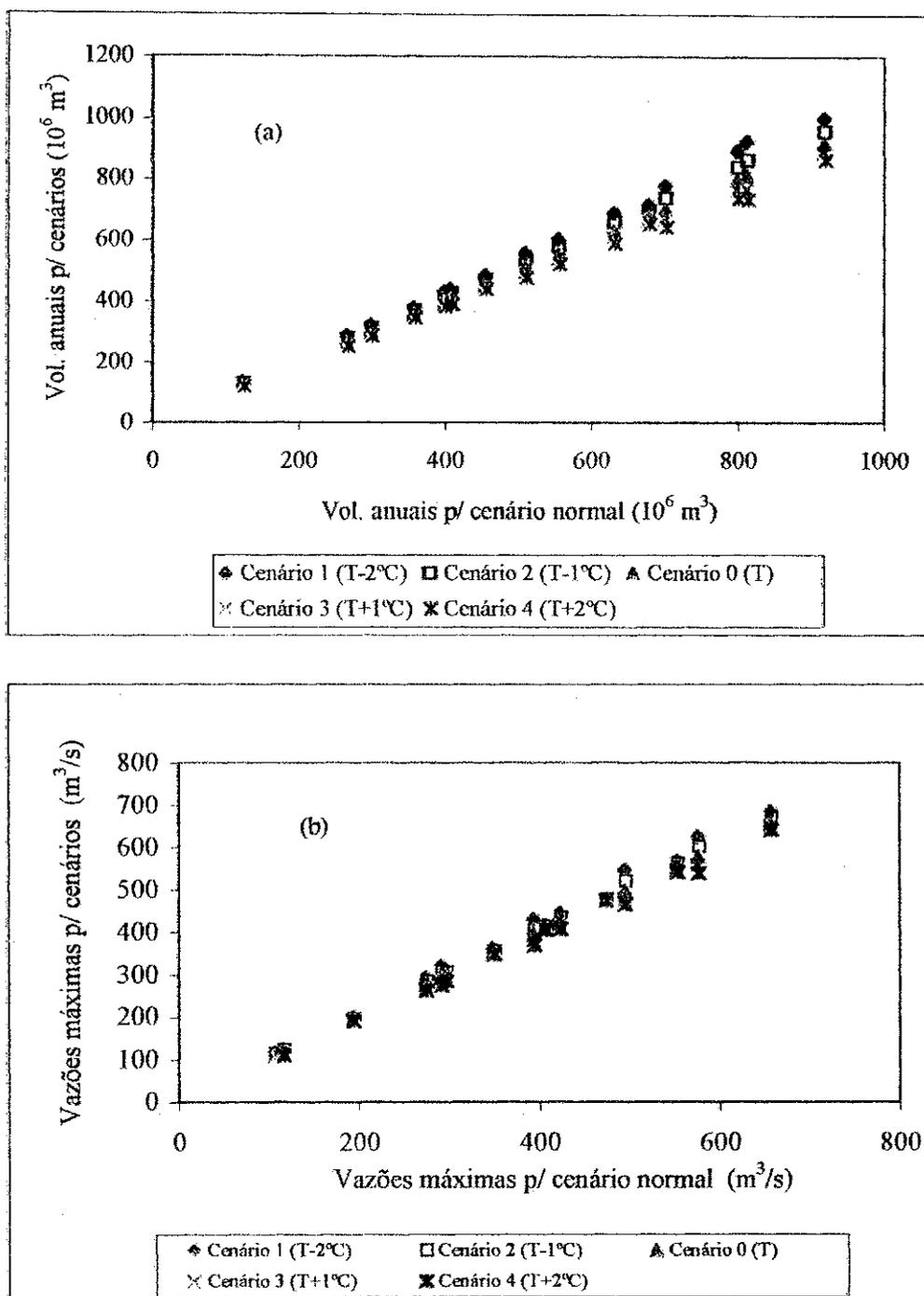


Figura E.3 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de evaporação para a bacia de Piancó: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

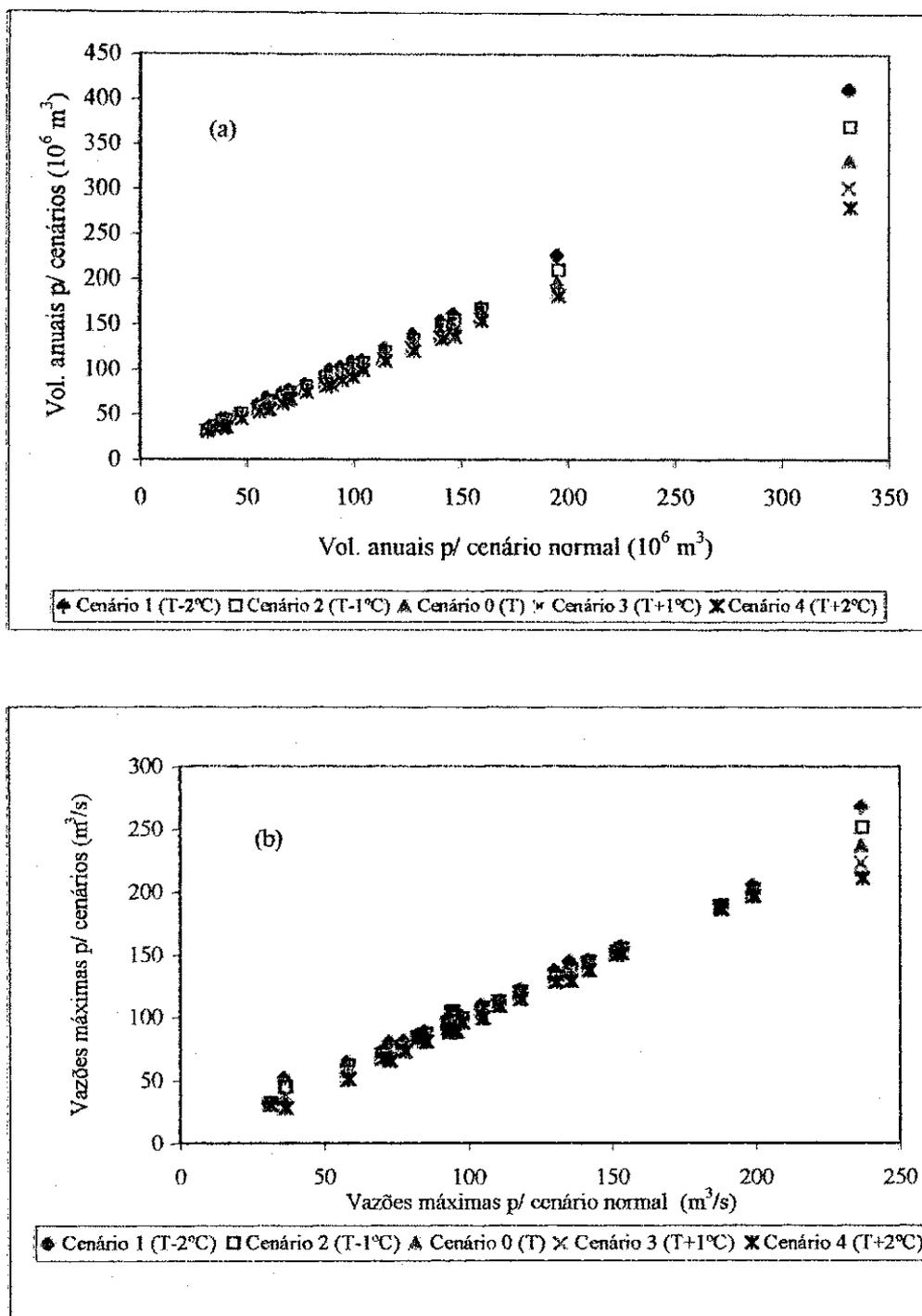


Figura E.4 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de evaporação para a bacia de Boqueirão de Mãe-d'água: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

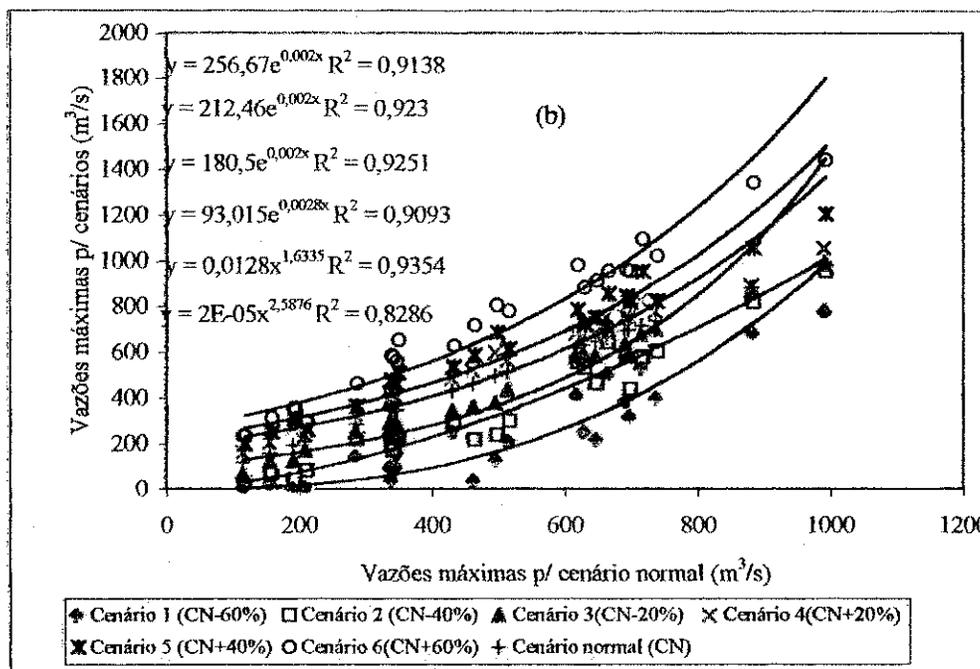
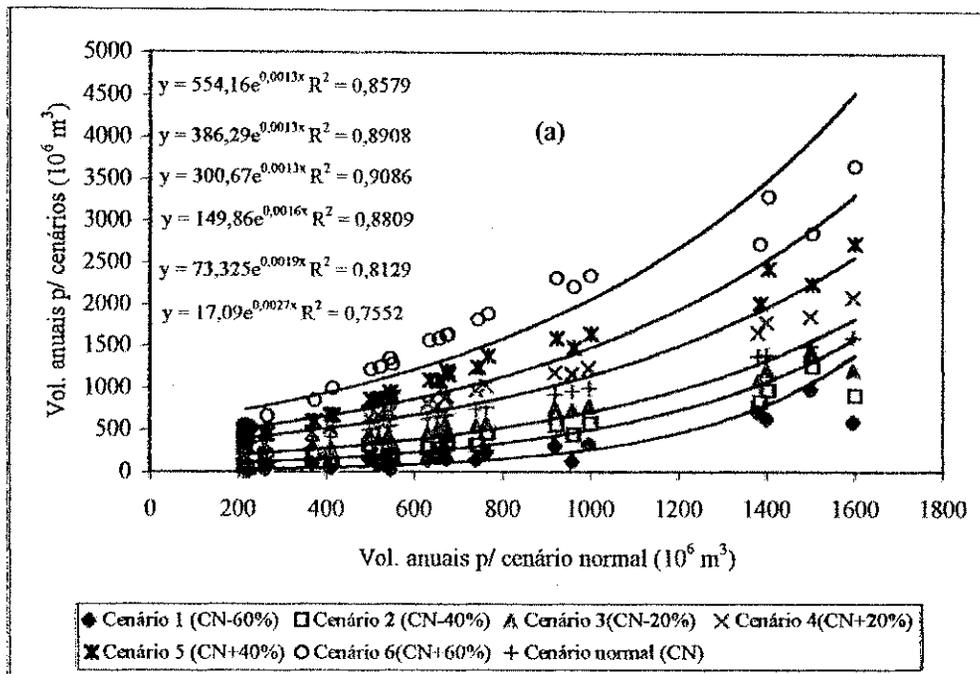


Figura E.5 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de uso do solo para a bacia de Santa Rita do Curema: (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

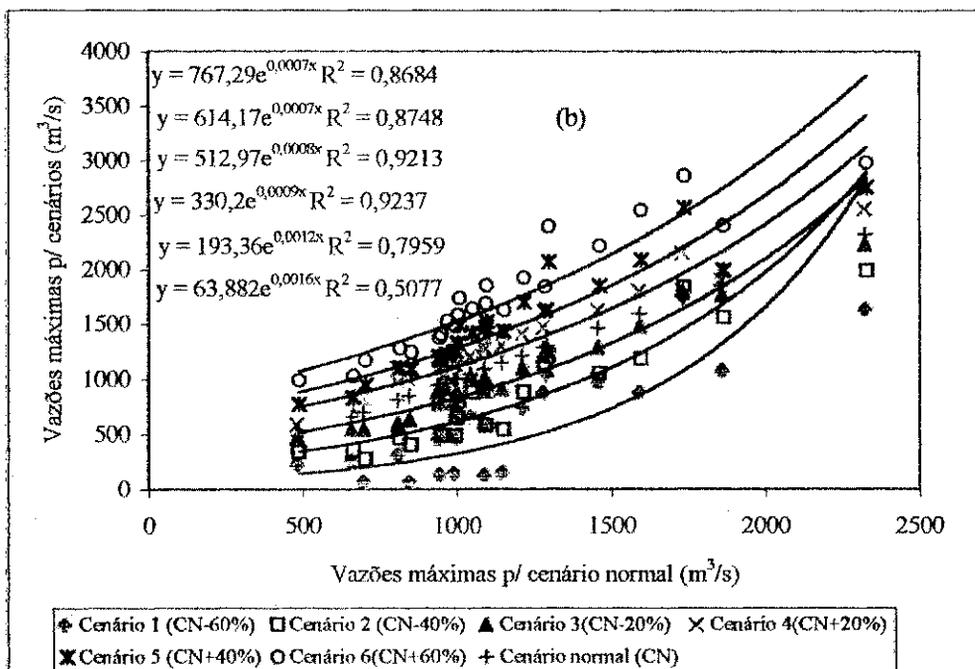
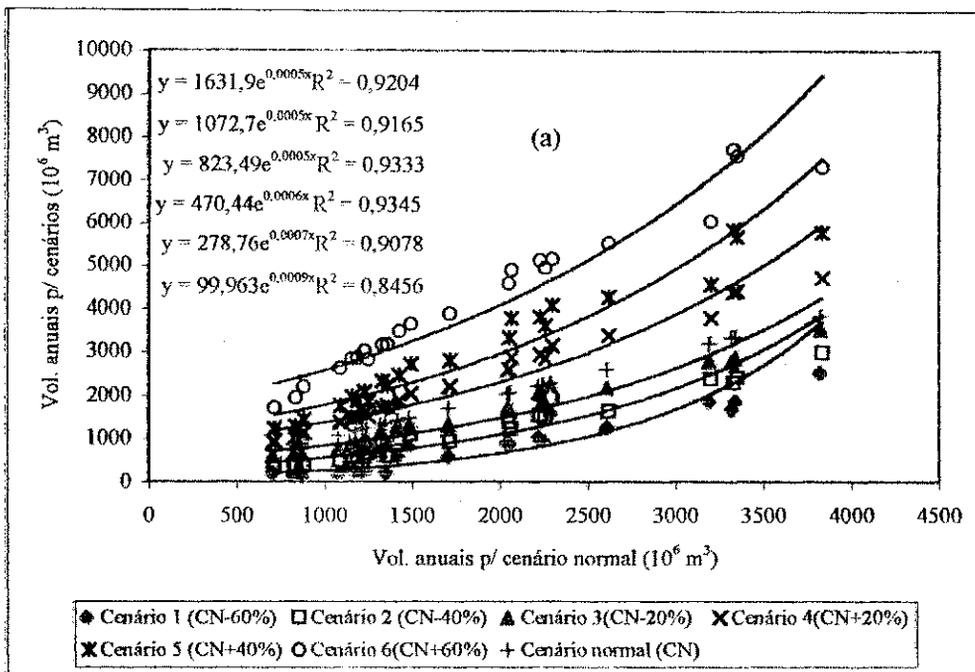


Figura E.6 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários de uso do solo para a bacia de Sítio Vassouras (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

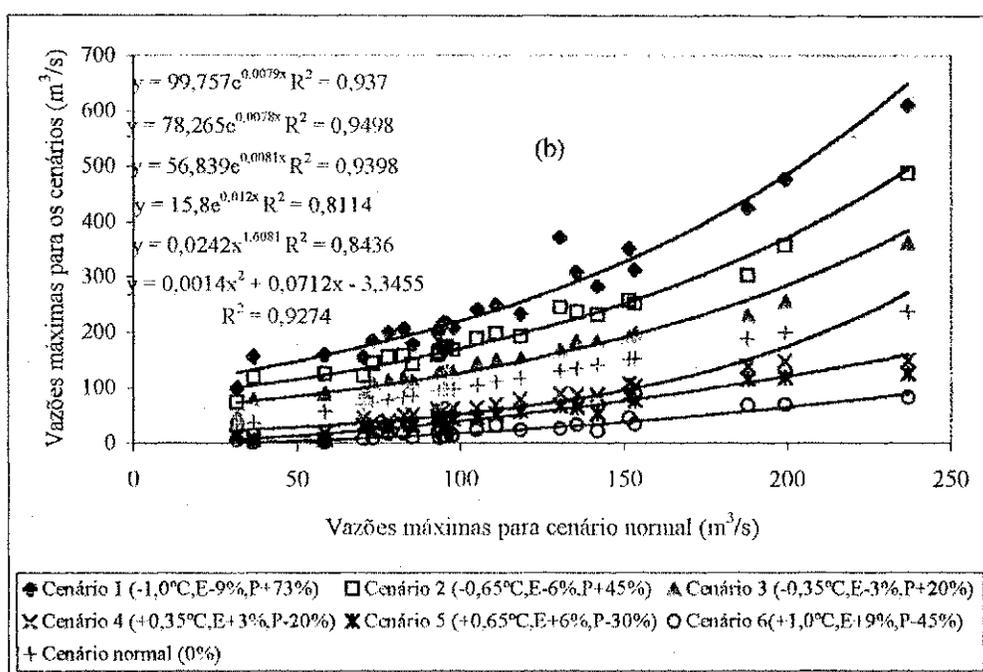
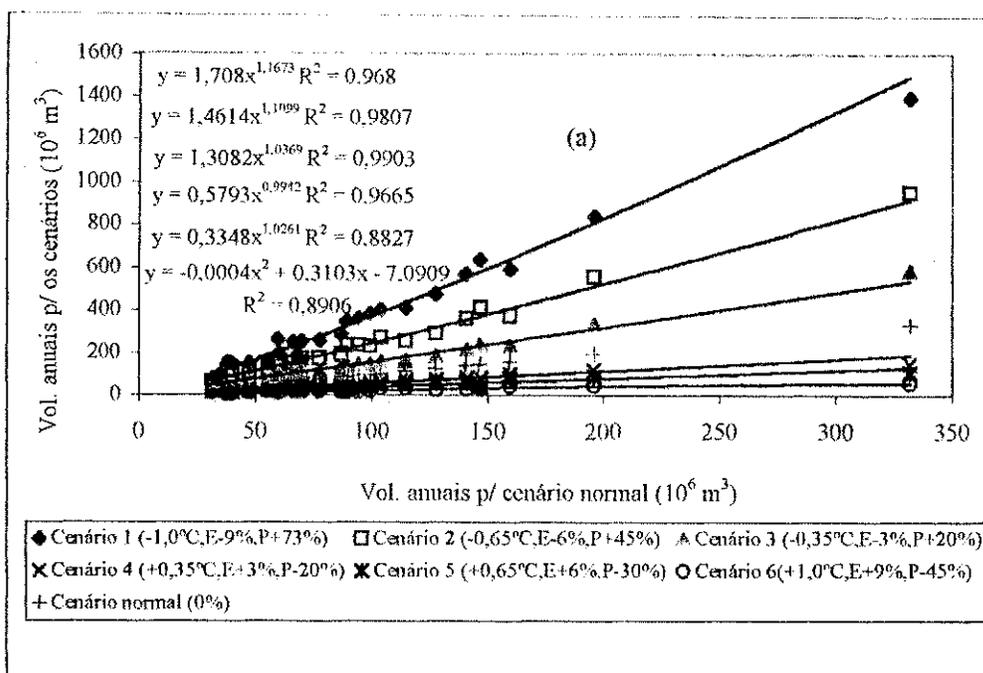


Figura E.7 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima para a bacia de Boqueirão de Mãe-d'água (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

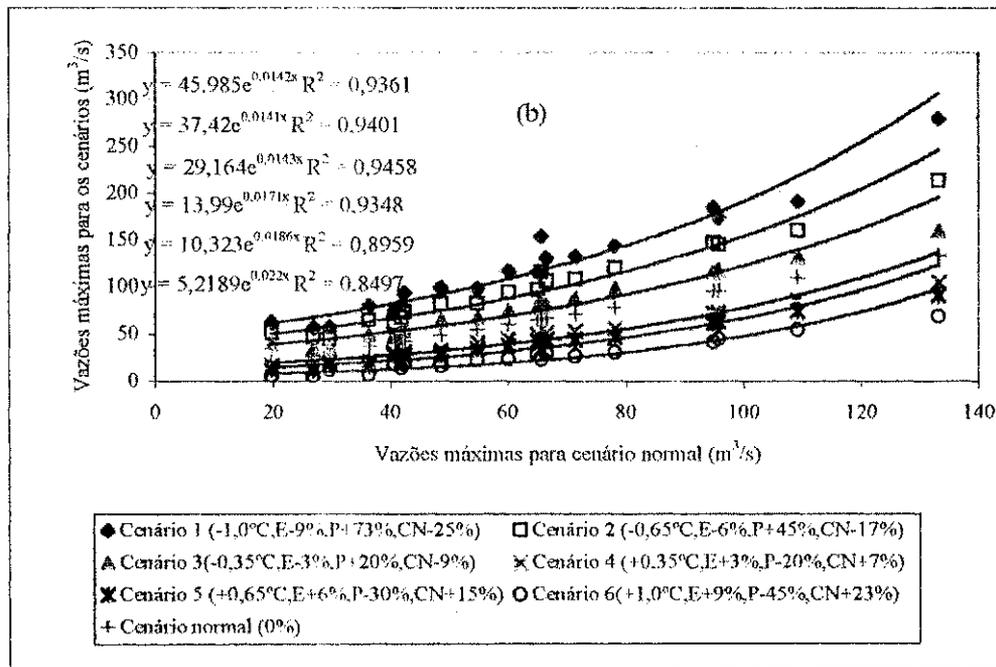
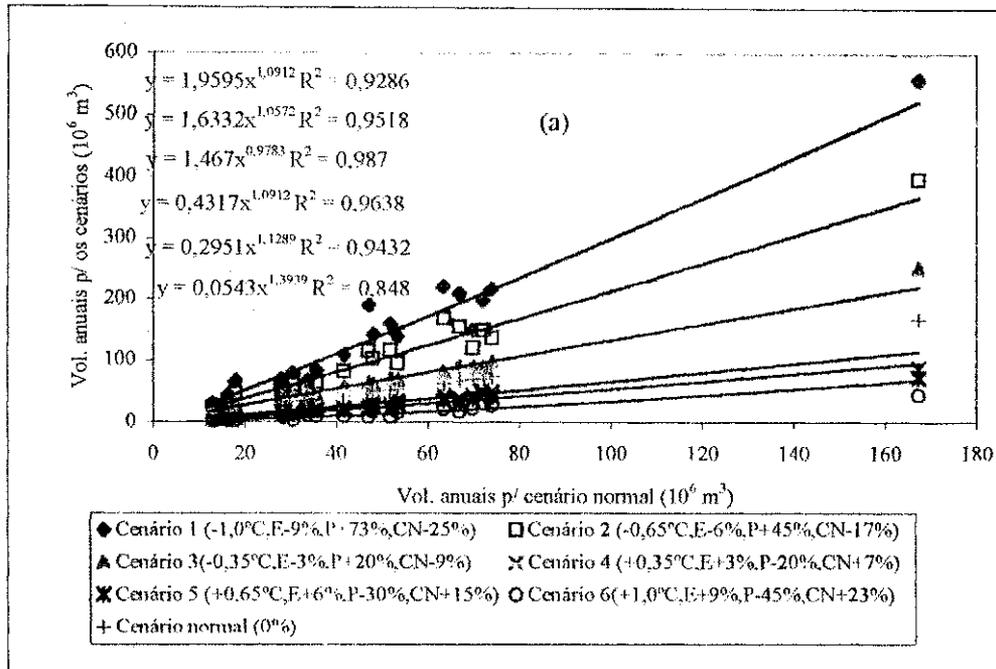


Figura E.9 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima e uso do solo para a bacia de São José de Piranhas (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais

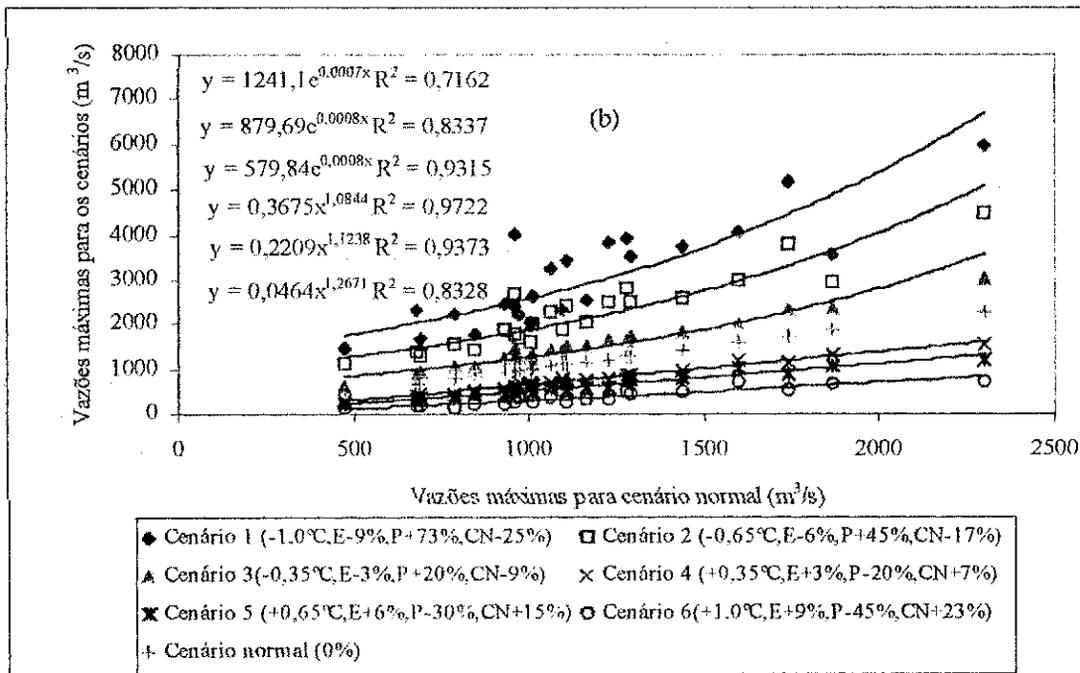
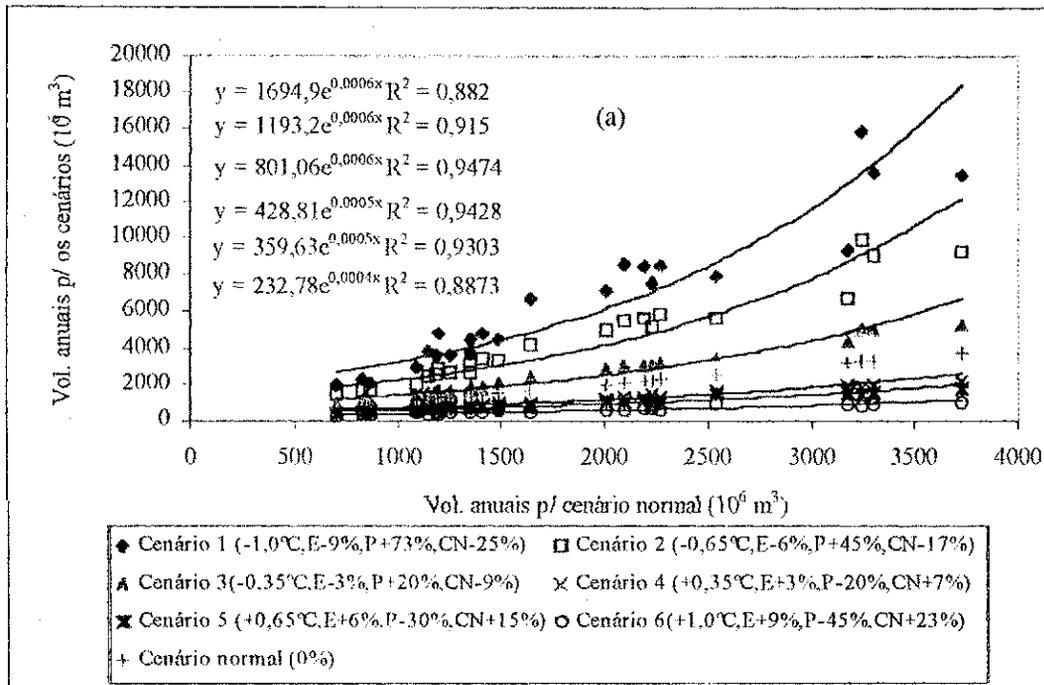


Figura E.10 - Comparação entre valores simulados em diferentes cenários conjuntos de clima e uso do solo para a bacia de Sítio Vassouras (a) volumes anuais (b) vazões máximas anuais