

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS

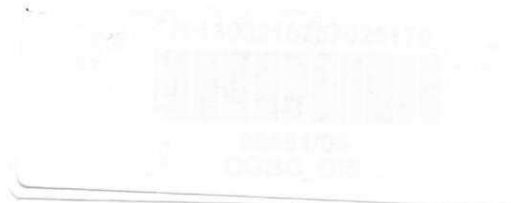
**REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA NA REGIÃO DO ALTO RIO
PIRANHAS – PB UTILIZANDO DADOS SIMULADOS COM
MODELO DISTRIBUÍDO**

Dissertação de Mestrado

ANDRÉA MOTTA COELHO CRISPIM

CAMPINA GRANDE /PB

Março/2005



ANDRÉA MOTTA COELHO CRISPIM

**REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA NA REGIÃO DO ALTO RIO
PIRANHAS – PB UTILIZANDO DADOS SIMULADOS COM
MODELO DISTRIBUÍDO**

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

Área de Concentração: ENGENHARIA HIDRÁULICA

Orientador: PROF. EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO

CAMPINA GRANDE / PB

MARÇO – 2005



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

C932r Crispim, Andréa Motta Coelho
Regionalização hidrológica na região do Alto Rio Piranhas-PB utilizando dados simulados com modelo distribuído / Andréa Motta Coelho. — Campina Grande: UFCCG, 2005.
138f. : il. color.

Inclui Bibliografia.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
Orientador: Eduardo Enéas de Figueiredo

1— Hidrologia-Escoamento 2— Solo-Uso 3— Regionalização Hidrológica
I— Título

CDU 556.16

ANDRÉA MOTTA COELHO CRISPIM

**REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA NA REGIÃO DO ALTO RIO
PIRANHAS – PB UTILIZANDO DADOS SIMULADOS COM
MODELO DISTRIBUÍDO**

Aprovado em 23 de março de 2005.

COMISSÃO EXAMINADORA:



**Prof. Eduardo Eneas de Figueiredo – PhD
Presidente - Orientador (DEC/CCT/UFCG - PB)**



**Prof. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan – PhD
Examinador interno (DEC/CCT/UFCG - PB)**



**Prof. Dr. Eduardo Sávio P. R. Martins
Examinador externo (FUNCEME - CE)**

Campina Grande, 23 de março de 2005

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Múcio e Judith, ao meu
esposo Marcos César e a meus filhos
Henrique e Letícia, **DEDICO**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por tudo que ele tem me permitido realizar nela.

Aos meus pais, Múcio Coelho de Oliveira e Judith Motta Coelho, pelo amor, carinho, dedicação e apoio incondicionais, durante todos os momentos de minha vida.

Ao meu esposo Marcos César Crispim Lima e aos meus filhos Henrique e Letícia, pela paciência, sabedoria e compreensão, com as quais souberam superar minha ausência durante os incontáveis dias de estudo e trabalho dedicados à realização desta dissertação.

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

Aos professores da Área de Recursos Hídricos da UFCG: Carlos de Oliveira Gaivão, Gledsneli Maria de Lima Lins, Hans Schuster, Janiro Costa Rego, Márcia Maria Rios Ribeiro, Rosires Catão Curi, Wilson Fadió Curi e Vajapeyam S. Srinivasan pelos conhecimentos adquiridos e dedicação durante o curso.

A todos da minha turma de mestrado, Aracy Siqueira, Aurelubia Rufino, Alysson Guimarães, Gabriela Pedreira, Hugo Alcântara, Martha Viviane Cabral, Saulo de Tarso, Rosenilton Maracajá, pelo companheirismo durante o curso.

Aos funcionários, Alrezinha, Aroldo, Ismael, Josete, Lindimar, Raulino, Ronaldo, Vera e Valdomiro pela amizade e compreensão durante estes dois anos de convívio.

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

Aos examinadores pelas contribuições que deram para a melhoria deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

RESUMO

As bacias hidrográficas localizadas no Nordeste semi-árido do Brasil apresentam, de um modo geral, séries hidrológicas com pequenos tamanhos e/ou descontínuas. Para superar esse problema, modelos hidrológicos bem calibrados e validados podem ser utilizados para gerar séries de longo período. Por outro lado, técnicas de regionalização podem ser empregadas em regiões homogêneas na determinação de uma dada variável hidrológica de interesse (e.g., vazão máxima, média, etc) em locais sem informação. Nesta pesquisa, técnicas de regionalização hidrológica foram empregadas para o estabelecimento de funções matemáticas para a determinação de vazões médias diárias máximas, vazões médias de longo período e vazões com 95% de garantia com base em dados simulados com o modelo NAVMO em nove sub-bacias da região homogênea do alto rio Piranhas – PB (~15000 km²). O modelo foi calibrado para cada uma das sub-bacias e os parâmetros utilizados na simulação de séries de longo período. Testes paramétricos e não paramétricos foram empregados para verificar a consistência e a homogeneidade das séries simuladas e distribuições de probabilidade, indicadas na literatura, foram testadas com o teste de Kolmogorov-Smirnov (teste K-S). Análises de correlação e regressão (simples e múltipla) entre as variáveis de interesse e características físicas e climáticas das bacias permitiram estabelecer funções para o cálculo das variáveis hidrológicas em quaisquer locais da região do estudo. Os resultados mostraram que o modelo escolhido foi razoavelmente calibrado com base nas vazões e volumes anuais e as séries simuladas com os parâmetros calibrados apresentaram razoável consistência e homogeneidade. Os resultados do teste K-S mostraram que a distribuição Pearson III se ajustou às frequências dos dados de vazões máximas e vazões médias de longo período em todos os locais. As distribuições Gama, de Gumbel e Normal apresentaram algumas restrições. As análises de correlação e regressão com funções lineares e potenciais mostraram que as duas variáveis físicas que melhor explicaram as variáveis hidrológicas investigadas foram a área da bacia (regressão simples) e a área da bacia e o comprimento do rio principal (regressão múltipla). A inclusão de outras variáveis físicas e climáticas (e.g., declividade da bacia densidade de drenagem e precipitações) melhorou os resultados, mas não de maneira marcante. Em geral as equações lineares representaram melhor as variáveis do que as equações potenciais.

ABSTRACT

The catchments located in the semiarid northeast region of Brazil show, in general, either hydrologic data of short length or time series with gaps. In such situations, hydrologic models can be used to generate long time series. On the other hand, regional analysis can be used to establish relationships to determine hydrological variables of interest (e.g., annual maximum and mean discharges, etc) in ungaged areas. In this research, regional analyses were employed to establish relationships capable of determining the mean, maximum and 95% of guarantee discharges based on simulated values with the NAVMO model at nine sub-basins in the homogeneous Piranhas river basin (~15000 km²). The model was calibrated to each sub-basin and used to simulate long time series of discharge. Parametric and non-parametric tests were used to verify the consistency and homogeneity of the simulated data and, distributions of probability from the literature were tested with the method of Kolmogorov-Smirnov (K-S test). Regression analyses (simple and multiple) were used to investigate the explicative variables and establish relationships to determine the hydrologic variables at any place in the region. The results showed that the model was reasonably calibrated comparing simulated and observed annual maximum discharges and volumes. The simulated time series showed reasonable consistency and homogeneity and, based on the K-S test the Pearson III distribution of probability was adjusted to the frequencies of the wean end maximum discharges at every sub basin. The regression analyses using liner and non-linear functions showed that the basin area (simple regression) and the basin area and river length (multiple regression) are the most important explicative variables of the investigated processes. The inclusion of other variables (e.g., slope area, density of drainage and precipitation) improved the results but not much. In general, the hydrological variables were better represent of by linear equations.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral e específico da Pesquisa	2
1.2 Organização da Dissertação	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Regionalização Hidrológica	4
2.2. Metodologias utilizadas na regionalização	5
2.2.1. Regionalização de Parâmetros	10
2.2.2. Regionalização de Variável	11
2.2.3. Regionalização de Indicadores	11
2.2.4. Funções Regionais	13
2.2.4.1. Análise de Correlação e Regressão	13
2.2.4.2. Variáveis Explicativas	15
2.3. Séries Temporais para Regionalização	16
2.3.1. Séries de Vazões Máximas	16
2.3.2. Séries de Vazões Médias	16
2.3.3. Séries de Vazões Mínimas	17
2.3.4. Séries de Vazões com Garantia	17
2.4. Estacionariedade das Séries Temporais	18
2.4.1. Testes Paramétricos	18
2.4.2. Testes não Paramétricos	21
2.5. Homogeneidade de Séries Temporais	21
2.5.1. Análise de Homogeneidade Regional (Dupla massa)	21

2.6. Análise Estatística de Séries Temporais	22
2.6.1. Distribuição de Probabilidade	22
2.6.1.1. Distribuição Normal e Log-Normal	24
2.6.2. Distribuição de Probabilidade Aplicada a Eventos Extremos	25
2.6.2.1. Distribuição de Extremos Tipo I (Gumbel)	26
2.6.2.2. Distribuição (Gama)	26
2.6.2.3. Distribuição de Pearson Tipo III	27
2.6.3. Teste de Ajustamento de Distribuição de Probabilidade	27
2.6.3.1. Teste de Kolmogoroff-Smirnow (teste K-S)	27
2.7. Discussão e Considerações	28
3. ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS	29
3.1. Área de Estudo	29
3.1.1. Características Climatológicas	30
3.1.2. Características Fisiográficas.....	32
3.2. Base de Dados	34
3.2.1. Dados Requeridos pelo Modelo	35
3.2.2. Dados Hidroclimatológicos	35
4. O MODELO NAVMO	38
4.1. Características Gerais do Modelo NAVMO	38
4.2. Cálculo das Lâminas dos Escoamentos nas Sub-Bacias	40
4.3. Cálculo da Precipitação Média nas Sub-Bacias.....	42
4.4. O Balanço Hídrico dos Reservatórios	42
4.5. Capacidades dos Reservatórios	43
4.6. Transformação das Lâminas dos Escoamentos	46
4.6.1. Escoamento Superficial (QD1)	46
4.6.2. Escoamento Sub-superficial (QD2)	47
4.6.3. Escoamento Subterrâneo (QGES):	47
4.6.4. Escoamento Total (QGES):	48
4.7. Propagação do Escoamento nos Canais	48
4.8. Parâmetros Calibráveis do Modelo NAVMO	49
4.9. Resultados Gerados pelo Modelo NAVMO	50

4.10. Pesquisas Recentes Utilizando o Modelo NAVMO	50
5. CALIBRAÇÃO DO MODELO NAVMO	52
5.1. Introdução	52
5.2. Calibração	52
5.2.1. Considerações Gerais	52
5.2.2. Tipos de Calibração	53
5.2.3. Calibração do Modelo NAVMO	54
5.3. Análise e discussão da calibração	61
5.3.1. Piancó – 4550Km ² (1964 a 1983)	61
5.3.2. Emas – 530Km ² (1964 a 1972)	63
5.3.3. Santa Rita do Coremas – 6869Km ² (1914, 1921 a 1941)	65
5.3.4. Aguiar – 495Km ² (1969 e 1970)	67
5.3.5. Boqueirão Mãe D'Água – 1063Km ² (1923 a 1946)	68
5.3.6. Pau Ferrado – 8050Km ² (1967, 1968, 1971, 1973 a 1975).....	70
5.3.7. São José de Piranhas – 475Km ² (1912 a 1915 e 1921 a 1935)	72
5.3.8. Antenor Navarro – 1580Km ² (1964 a 1972)	73
5.3.9. Sítio Vassouras – 14850Km ² (1964 a 1985)	75
5.4. Comentários Finais	77
6. SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NAVMO	78
6.1. Introdução	78
6.2. Parâmetros Utilizados na Simulação	78
6.3. Dados Pluviométricos	80
6.4. Análise dos resultados da Simulação	81
6.4.1. Bacia de Piancó – 4.550 km ²	81
6.4.2. Bacia de Emas – 530 km ²	82
6.4.3. Bacia de Santa Rita do Coremas – 6.869 km ²	83
6.4.4. Bacia de Aguiar – 495 km ²	84
6.4.5. Bacia de Boqueirão Mãe D'Água – 1.063 km ²	85
6.4.6. Bacia de Pau Ferrado – 8.050 km ²	87
6.4.7. Bacia de São José de Piranhas – 475 km ²	88
6.4.8. Bacia de Antenor Navarro – 1.580 km ²	89

6.4.9. Bacia de Sítio Vassouras – 14.850 km ²	90
6.5. Validação das Séries Simuladas	91
6.5.1. Bacia de Piancó (1964 a 1983) – 4.550 km ²	91
6.5.2. Bacia de Emas (1964 a 1972)– 530 km ²	92
6.5.3. Bacia de Boqueirão Mãe D'Água (1923 a 1946)– 1.063 km ²	93
6.5.4. Bacia de Pau Ferrado (1967,1968,1971,1973 a 1975)– 8.050 km ²	94
6.5.5. Bacia de Antenor Navarro (1964 a 1972)– 1.580 km ²	95
6.5.6. Bacia de Sítio Vassouras (1963 a 1985)– 14.850 km ²	96
6.5.7. Verificação da Homogeneidade das Séries (Dupla Massa)	97
6.6. Comentários Finais	98
7. REGIONALIZAÇÃO DA BACIA DO ALTO PIRANHAS	99
7.1. Variáveis	99
7.2. Séries Temporais	99
7.3. Distribuição de Probabilidade	100
7.4. Análise de Estacionariedade	101
7.4.1. Testes Paramétricos	101
7.4.2. Testes não Paramétricos	103
7.4.3. Verificação da Homogeneidade das Séries (Dupla Massa)	104
7.5. Teste de Ajustamento de Distribuições de Probabilidade	105
7.5.1. Teste K-S	105
7.6. Relações entre Vazões, Período de Retorno e Área da Bacia	107
7.7. Relações entre Índice Regional, Período de Retorno e Características da Bacia	109
7.7.1. Regionalização I, para Q_{mip} com Regressões Simples	110
7.7.2. Regionalização II, para Q_{mip} com Regressões Múltiplas	111
7.7.3. Regionalização III, para $Q_{95\%}$ com Regressões Múltiplas	112
7.7.4. Regionalização IV, Regressões Múltiplas entre Vazões Médias das Distribuições e características das Bacias	112
7.8. Comentários Finais	116
8. ANÁLISES DE RESULTADOS	117
9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	119

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E OBRAS CONSULTADAS	121
ANEXOS	129
Anexo A: Arquivo de dados da bacia no modelo NAVMO	130
Anexo B: Diagrama de barras e detalhamento das falhas	134
Anexo C: Mapas da Região do Alto Piranhas com a distribuição dos postos pluviométricos	136

LISTA DE FIGURAS NOS CAPÍTULOS

Capítulo 3

3.1.	Localização da Bacia do Alto Rio Piranhas (Brasil, 1981)	29
3.2.	Precipitação média mensal na região do Alto Piranhas	30
3.3.	Mapa de Clima (Brasil, 1981)	31
3.4.	Mapa de Solo (Brasil, 1981)	33
3.5.	Mapa de Relevo (Brasil, 1981)	33
3.6.	Mapa de Vegetação (Brasil, 1981)	34
3.7.	Bacia Hidrográfica do Alto Piranhas (Figueiredo et al, 1999)	36

Capítulo 4

4.1.	Fluxograma do modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)	40
4.2.	Representação dos processos de precipitação-vazão-evaporação no modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)	42
4.3.	Seção transversal do rio (Kleeberg et al., 1989)	49

Capítulo 5

5.1.a.	Esquema Linear do Rio Piancó/Piranhas até a Sub-Bacia 26	55
5.1.b.	Esquema Linear do Rio Piancó/Piranhas da Sub-bacias 26 a 55.	55
5.2.	Comparação de vazões máximas calibrados e observadas em Piancó	62
5.3.	Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Piancó	62
5.4.	Hidrogramas observados na bacia de Piancó e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	63
5.5.	Hidrogramas observados na bacia de Piancó e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	63
5.6.	Comparação de vazões máximas calibrados e observadas em Emas	64
5.7.	Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Emas	64
5.8.	Hidrogramas observados na bacia de Emas e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	64
5.9.	Hidrogramas observados na bacia de Emas e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	65
5.10	Comparação de vazões máximas calibrados e observados em Santa Rita de Coremas.	66
5.11	Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Santa Rita do Coremas.	66
5.12.	Hidrogramas observados na bacia de Santa Rita do Coremas e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	66
5.13	Hidrogramas observados na bacia de Santa Rita do Coremas e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	67

5.14.	Hidrogramas observados na bacia de Aguiar e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	67
5.15	Hidrogramas observados na bacia de Aguiar e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	68
5.16	Comparação de vazões máximas calibrados e observadas em Boqueirão Mãe D'Água.	69
5.17	Comparação de volumes anuais calibrados e observadas em Boqueirão Mãe D'Água.	69
5.18	Hidrogramas observados na bacia de Boqueirão Mãe D'Água e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	69
5.19.	Hidrogramas observados na bacia de Boqueirão Mãe D'Água e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	70
5.20	Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Pau Ferrado.	70
5.21	Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Pau Ferrado	71
5.22	Hidrogramas observados na bacia de Pau Ferrado e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	71
5.23.	Hidrogramas observados na bacia de Pau Ferrado e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	71
5.24.	Comparação de vazões máximas calibrados e observadas em São José de Piranhas.	72
5.25	Comparação de volumes anuais calibrados e observados em São José de Piranhas	72
5.26	Hidrogramas observados na bacia de São José do Piranhas e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	73
5.27	Hidrogramas observados na bacia de São José do Piranhas e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	73
5.28	Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Antenor Navarro.	74
5.29	Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Antenor Navarro.	74
5.30	Hidrogramas observados na bacia de Antenor Navarro e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	74
5.31	Hidrogramas observados na bacia de Antenor Navarro e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	75
5.32	Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Sítio Vassouras	75
5.33	Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Sítio Vassouras.	76
5.34	Hidrogramas observados na bacia de Sítio Vassouras e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.	76

5.35	Hidrogramas observados na bacia de Sítio Vassouras e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.	76
Capítulo 6		
6.1	Simulação das Vazões Máximas em Piancó.	82
6.2.	Simulação das Vazões Médias em Piancó.	82
6.3	Simulação das Vazões Máximas em Emas	83
6.4.	Simulação das Vazões Médias em Emas	83
6.5.	Simulação das Vazões Máximas em Santa Rita do Coremas	84
6.6.	Simulação das Vazões Médias em Santa Rita do Coremas	84
6.7.	Simulação das Vazões Máximas em Aguiar	85
6.8.	Simulação das Vazões Médias em Aguiar	85
6.9.	Simulação das Vazões Máximas em Boqueirão Mãe D'Água	86
6.10.	Simulação das Vazões Médias em Boqueirão Mãe D'Água	86
6.11.	Simulação das Vazões Máximas em Pau Ferrado	87
6.12.	Simulação das Vazões Médias em Pau Ferrado	87
6.13.	Simulação das Vazões Máximas em São José de Piranhas	88
6.14.	Simulação das Vazões Médias em São José de Piranhas	88
6.15.	Simulação das Vazões Máximas em Antenor Navarro	89
6.16.	Simulação das Vazões Médias em Antenor Navarro	89
6.17.	Simulação das Vazões Máximas em Sítio Vassouras	90
6.18.	Simulação das Vazões Médias em Sítio Vassouras	90
6.19.	Validação das Vazões Máximas em Piancó	91
6.20.	Validação das Vazões Médias em Piancó	92
6.21.	Validação das Vazões Máximas em Emas	92
6.22.	Validação das Vazões Médias em Emas	93
6.23.	Validação das Vazões Máximas em B. M.D'Água	93
6.24.	Validação das Vazões Médias em B. M.D'Água	94
6.25.	Validação das Vazões Máximas em Pau Ferrado	94
6.26.	Validação das Vazões Médias em Pau Ferrado	95
6.27.	Validação das Vazões Máximas em Antenor Navarro	95
6.28.	Validação das Vazões Médias em Antenor Navarro	96
6.29.	Validação das Vazões Máximas em Sítio Vassouras	96
6.30.	Validação das Vazões Médias em Sítio Vassouras	97
6.31.	Análise de Dupla Massa das séries de Vazões Máximas Simuladas	97
6.32.	Análise de Dupla Massa das séries de Vazões Médias Simuladas	98

LISTA DE TABELAS NOS CAPÍTULOS

Capítulo 3

3.1.	Dados Climatológicos	31
3.2.	Evaporação média mensal em São Gonçalo (1963-1967)	31
3.3	Tabela das Variáveis Físicas e Climáticas das Sub-bacias	32
3.4.	Período de Dados dos Postos Fluviométricos	35
3.5.	Postos Pluviométricos	37

Capítulo 4

4.1.	Parâmetros calibráveis do modelo NAVMO e seus significados	50
------	--	----

Capítulo 5

5.1	Sub-bacias onde se Localizam os Postos Fluviométricos conforme da Região Discretização.	56
5.2.	Valores dos Parâmetros pouco sensíveis do Modelo NAVMO para a bacia de Piancó.	56
5.3.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Piancó.	57
5.4.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Emas.	57
5.5.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Santa Rita do Coremas	58
5.6.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Aguiar	58
5.7.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Boqueirão Mãe D'Água	59
5.8.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Pau Ferrado	59
5.9.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para São José de Piranhas	60
5.10.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Antenor Navarro	60
5.11.	Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Sitio Vassouras	61
5.12	Coeficiente de Correlação (R^2) para a Simulação de Vazão e Volume.	77

Capítulo 6

6.1.	Valores Médios de ALFA conforme a Escala e Pluviometria.	79
6.2.	Valores Médios de EET conforme a Escala e Pluviometria	79
6.3.	Valores Médios de CN conforme a Escala e Pluviometria	80

Capítulo 7

7.1.	Curvas de Permanência das Nove Sub-bacias	100
7.2.	Teste de Student para Vazões Máximas ($\alpha = 5\%$)	102
7.3.	Teste de Student para Vazões Médias ($\alpha = 5\%$)	102

7.4.	Teste de Snedecor para Vazões Máximas ($\alpha = 5\%$)	103
7.5.	Teste de Snedecor para Vazões Médias ($\alpha = 5\%$)	103
7.6.	Teste de Wilcoxon para Vazões Máximas ($\alpha = 5\%$)	104
7.7.	Teste de Wilcoxon para Vazões Médias ($\alpha = 5\%$)	104
7.8.	Teste de Kolmogorov-Smirnov para a distribuição Log-Normal(Q_{med})	105
7.9.	Teste de Kolmogorov-Smirnov para a distribuição de Gumbel (Q_{max})	105
7.10.	Teste de Kolmogorov-Smirnow para a distribuição Gama (Q_{max})	106
7.11.	Teste de Kolmogorov-Smirnow para a distribuição Gama (Q_{med})	106
7.12.	Teste de Kolmogorov-Smirnov para a distribuição Pearson III (Q_{max})	106
7.13.	Teste de Kolmogorov-Smirnov para a distribuição Pearson III (Q_{med})	106
7.14.	Regressões para Período de Retorno da distribuição Log-Normal (Q_{med})	107
7.15.	Regressões para Período de Retorno da distribuição de Gumbel (Q_{max})	107
7.16.	Regressões para Período de Retorno da distribuição Gama (Q_{max})	108
7.17.	Regressões para Período de Retorno da distribuição Gama (Q_{med})	108
7.18.	Regressões para Período de Retorno da distribuição Pearson III (Q_{max})	108
7.19.	Regressões para Período de Retorno da distribuição Pearson III (Q_{med})	109
7.20.	Indicadores Regionais	110
7.21.	Equações de Regressões Simples para a_T (Q_{max})	111
7.22.	Equações de Regressões Simples para a_T I (Q_{med})	111
7.23.	Equações de Regressões Simples para Q_{mlp}	111
7.24.	Equações de Regressões Múltiplas para Q_{mlp}	111
7.25.	Equações de Regressões Múltiplas para $Q_{95\%}$	112
7.26.	Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Log-Normal (Q_{med})	113
7.27.	Equações de Regressões Múltiplas para $Q_{2,33}$ da distribuição Gumbel (Q_{max})	113
7.28.	Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Gama (Q_{max})	114
7.29.	Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Gama (Q_{med})	114
7.30.	Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Pearson III (Q_{max})	115
7.31.	Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Pearson III (Q_{med})	115

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A água, vital à sobrevivência humana, é um recurso natural que está se tornando cada vez mais escasso devido ao aumento das demandas em consequência do crescimento das populações e das atividades econômicas. Portanto, o planejamento, o gerenciamento e a gestão dos recursos hídricos no semi-árido são cada vez mais indispensáveis no contexto do desenvolvimento sustentável.

O planejamento, o gerenciamento e a gestão dos recursos hídricos requerem dados hidrológicos confiáveis e representativos, para que se possa avaliar o potencial hidrológico e os recursos hídricos disponíveis nas bacias hidrográficas. A dificuldade de obtenção de dados, voltados para os estudos em hidrologia e recursos hídricos, tem motivado os especialistas a estudar métodos de estimativa de processos hidrológicos em locais sem informações (Tucci, 1998; IAHS, 2002).

Um grande problema é a falta de dados, oriundos da rede hidrométrica que é composta de postos fluviométricos e pluviométricos e que dificilmente cobre todos os locais de interesse, principalmente os de medição fluviométrica. Ademais, os dados, quando disponíveis, apresentam problemas na sua série temporal, isto é, apresentam poucos anos com informações e não retratam necessariamente uma amostra representativa. Segundo Tucci (1997) devido aos altos custos de implantação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica, torna-se importante a otimização das informações disponíveis.

Para suprir o problema da deficiência da rede hidrométrica, duas técnicas tem sido utilizadas: o uso de modelos para simulação de séries (Tucci, 1997) e a regionalização hidrológica (Eletrobrás, 1985) que se fundamenta na homogeneidade fisiográfica e climatológica de uma região. Uma vantagem da análise regional é a de permitir o aproveitamento dos dados oriundos da rede de coleta dos dados hidrológicos, utilizando ferramentas estatísticas que viabilizam a determinação de um dado processo em locais não monitorados.

Devido a grande descontinuidade nos dados disponíveis na região escolhida para esta pesquisa, optou-se pela utilização de séries simuladas através do modelo distribuído

NAVMO (Kleeberg et al., 1989), o qual foi testado na região do estudo (Lopes, 1994; Braga, 2001) e permite considerar as variabilidades de variáveis do clima e do sistema da bacia. O modelo foi inicialmente testado por Lopes (1994) na bacia da estação de Piancó (4550 km²), a qual é uma sub-bacia do alto Rio Piranhas - PB, e validado extensivamente por Braga (2001) utilizando os parâmetros calibrados por Lopes na simulação das demais sub-bacias com disponibilidade de dados.

Nesta pesquisa o modelo NAVMO foi calibrado para cada uma das sub-bacias da região do alto Piranhas – PB, que conta com nove sub-bacias com dados de vazão observados em diferentes períodos, e os parâmetros utilizados para a simulação de séries de longo período. A homogeneidade das séries simuladas foi verificada através de testes paramétricos e não-paramétricos, as quais serviram de base para a regionalização hidrológica das vazões médias diárias máximas, médias de longo período e vazões com 95% de garantia. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados indicadores regionais como o índice regional de cheia (Rego et al., 1989), curva de permanência e distribuições de probabilidade testadas com o método de Kolmogoroff-Smirnow (teste K-S). Foram empregadas análises de correlação e regressão (simples e múltipla) entre as variáveis de interesse e características físicas (área, comprimento do rio principal, densidade de drenagem e declividade média das bacias) e climáticas (precipitação média, máxima anual e média diária máxima anual) das bacias.

1.1 Objetivo Geral e específico da Pesquisa

A presente pesquisa tem por objetivo principal aplicar técnicas de regionalização hidrológica para o estabelecimento de funções matemáticas que permitirão a determinação de variáveis hidrológicas de interesse para o planejamento, gerenciamento e gestão dos recursos hídricos na região hidrológica do alto Rio Piranhas – PB, no semi-árido do Estado da Paraíba, que possui características físicas e climáticas homogêneas (Rego et al., 1989).

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- ❖ Modelar o escoamento na bacia do Alto Piranhas-PB com o modelo NAVMO: calibração de parâmetros e simulação de séries de longo período;

- ❖ Definir séries temporais de vazões (e.g., média e máxima anuais, curva de permanência, etc.) para a regionalização;
- ❖ Validar e verificar a Homogeneidade e a Consistência das séries de vazões simuladas com base em técnicas estatísticas;
- ❖ Verificar distribuições de probabilidade que se ajustem às frequências dos dados amostrais, típicas para a estimativa de vazões com diferentes períodos de retorno;
- ❖ Investigar funções com base em análise de correlação (simples e múltiplas) que permitam determinar a variável hidrológica de interesse em locais específicos da bacia.

1.2 Organização da Dissertação

As metodologias empregadas e os resultados da pesquisa são discutidos nesta dissertação que inclui uma revisão sobre o assunto, apresentada no capítulo 2, a área de estudo e a base de dados no capítulo 3, a descrição do modelo no capítulo 4, a calibração do modelo no capítulo 5, a simulação e validação do modelo no capítulo 6, a regionalização no capítulo 7, a análise dos resultados no capítulo 8 e as conclusões e recomendações com comentários a respeito do estudo no capítulo 9.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Introdução

A regionalização ou análise regional é uma técnica que vem sendo utilizada para estimar variáveis climatológicas (Aragão et al., 1998) ou hidrológicas (Rego et al., 1989) em bacias sem informações. A técnica de regionalização é muito aplicada para estimar a relação intensidade, duração e frequência - i.d.f. (Aragão et al., 1998) e variáveis típicas do escoamento (e.g. vazão máxima, mínima, etc) em bacias desprovidas de séries históricas. A previsão das variáveis em bacias com dados deficientes, ou inexistentes, pode ser investigada pela análise e aplicação de técnicas aos dados existentes em bacias que pertençam à mesma região hidrológica (Chow, 1964). Portanto, fundamenta-se na homogeneidade climática e fisiográfica da região.

De acordo com Tucci e Clarke (2001) as regiões homogêneas são definidas pela delimitação de áreas que apresentem semelhanças nas características das variáveis climáticas e fisiográficas. Para isso, utilizam-se metodologias estatísticas para verificar se características não diferem significativamente. Neste caso são consideradas as similaridades das características geográficas das regiões em estudo para a definição das regiões homogêneas.

A regionalização torna-se possível quando a região que se investiga é homogênea, ou seja, é uma região que apresenta regime fluviométrico e climático relativamente uniforme e onde o tipo de cobertura vegetal, uso do solo e determinadas características físicas e geomorfológicas são razoavelmente semelhantes. Assim, pode-se afirmar que uma região é hidrologicamente homogênea, com base na análise de suas características físicas e climáticas. Posteriormente, durante o estudo da análise regional essa homogeneidade pode ser confirmada ou não.

Pode acontecer, por exemplo, que a região seja homogênea com relação ao seu regime pluviométrico, mas devido a alguma variação no tipo de solo, não conhecida no

início do estudo, não apresente um regime fluviométrico homogêneo. Nesse caso, a região como um todo, não pode ser considerada hidrologicamente homogênea.

A qualidade dos dados hidrológicos é essencial para a regionalização. Em qualquer estudo sobre o assunto, antes de elaborar a regionalização, é necessário realizar uma análise da qualidade dos dados históricos. Segundo Tucci (1993), os postos devem ser classificados de acordo com a qualidade das informações disponíveis. Essa classificação permite ao usuário melhor definir a análise regional e se baseia nas séries mais confiáveis. É possível também a utilização de dados de postos que não têm uma qualidade boa, mas que possuam informações que permitam consolidar a regionalização. Se os dados não possuem qualidade ou não forem consistentes a análise em escala regional poderá ser difícil e as funções ou parâmetros não representem bem os processos, mesmo que haja homogeneidade fisiográfica.

2.2. Metodologias utilizadas na regionalização

O principal propósito da regionalização hidrológica é a inferência em bacias hidrográficas. Para isto, a regionalização de bacias deve ocorrer, como dito, com base nas suas características geomorfológicas e climáticas, independentes da continuidade geográfica, visto que estas características definem a resposta hidrológica da região (Franchini e Suppo, 1996). Para se fazer a regionalização são utilizadas várias metodologias as quais são aplicadas e validadas de acordo com a escolha dos vários métodos existentes.

De acordo com Pinto e Naghettini (2000), independentemente do método de regionalização a ser utilizado, um dos pontos cruciais é a definição de regiões estatisticamente homogêneas, ou seja, aquelas contendo várias estações cujas séries sejam oriundas de populações regidas pela mesma distribuição de probabilidades, com os parâmetros de posição e escala variando entre as estações.

O trabalho elaborado por Wallis (1969) sobre técnicas de regionalização *index-flood* representou um avanço nos estudos de regionalização. Hosking e Wallis (1993, 1995) desenvolveram estudos para a análise de consistência de dados, identificação de regiões homogêneas e definição da distribuição de frequência regional. No método de regionalização *index-flood*, os postos localizados nas regiões estatisticamente homogêneas

seguem as mesmas distribuições de frequência, à exceção de um fator dependente de cada posto. Esse fator de adimensionalização conhecido como método da cheia-índice ou *index-flood*.

Segundo Elesbon et al. (2001) estudos de regionalização vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos podendo-se citar: Wright (1970) que apresentou uma equação de avaliação das médias das vazões mínimas usando a declividade e a área da bacia com variáveis independentes; o Institute of Hidrology (1980) que desenvolveu um estudo regional de vazão mínima para a Inglaterra; Lanna et al. (1983) que estabeleceram curvas adimensionais de frequência para três regiões da bacia do rio Jacuí.

Silveira et al. (1998) apresentam metodologias para obtenção de dados de vazão em pequenas bacias hidrográficas onde há ausência de rede hidrométrica. Entre os processos destaca-se a regionalização da curva de permanência, onde poderiam ser adotados dois procedimentos: (a) parametrização da curva, relacionando os parâmetros com características fisiográficas e climatológicas da bacia e (b) interpolação gráfica ou analítica de uma curva passando por vazões com permanências pré-definidas e estimadas a partir das referidas características da bacia. Esta última é a mais recomendada por minimizar os erros em virtude da estimativa ponto a ponto da curva. Os autores citam alguns trabalhos realizados anteriormente entre os quais destaca-se o trabalho realizado por Mínikou e Kaemaki (1985) nas regiões oeste e noroeste da Grécia onde se contou com onze estações para calibração e duas para validação.

Segundo estudo feito por Andrade e Hawkins (2000) onde foi aplicada uma metodologia onde grupos homogêneos foram avaliados através da função de Andrews. A referida técnica permite a inspeção da homogeneidade dos grupos, e a transferência de dados das bacias entre grupos expressando assim a dinâmica do método; o qual mostra um alto potencial de uso na classificação de bacias não instrumentadas. Para se testar a metodologia mencionada, foram utilizadas 60 bacias hidrográficas localizadas em regiões áridas e semi-áridas de três diferentes países (Austrália, Brasil, USA). Através dos gráficos gerados pelas funções foi possível identificar as bacias discrepantes existentes em cada grupo, previamente estabelecidos como homogêneos por técnicas estatísticas de regionalização, "cluster analysis". Para se elaborar as funções de Andrews utilizaram-se as variáveis mais relevantes, determinadas pela matriz de correlação.

Dentre os métodos mais utilizados de regionalização de vazões mínimas está o uso de equações de regressão regionais, que usa variáveis fisiográficas e climáticas das bacias, aplicadas dentro de regiões hidrológicamente homogêneas, previamente definidas (Eletrobrás, 1985; Tucci, 2002). Em um trabalho recente de regionalização no Alto São Francisco, que possui um clima sub-úmido e uma área de 51.000 km², Euclides et al. (2001), usando esta metodologia tradicional, obteve resultados razoáveis para vazões mínimas através de dois métodos: equações de regressão regionais e modelos de curva regional. Os autores dispunham de 33 postos fluviométricos com dados confiáveis, e os valores médios de R² foram 0,94 e 0,80 para os dois métodos, respectivamente. Entretanto, em algumas situações, erros de predição significativos podem ocorrer quando regressões regionais são usadas na estimativa de vazões mínimas (Stedinger et al., 1992). Thomas e Benson (1975), revisando a precisão das regionalizações hidrológicas no Rio Potomac (EUA), que possui alta densidade de postos fluviométricos, concluíram que o erro padrão observado na estimativa de vazões mínimas (e.g., Q_{95%} - Vazão com 95% de garantia), através do uso de regressões regionais, foi de 50%.

Em outro trabalho sobre regionalização realizado na bacia do Alto São Francisco a montante da Barragem de Três Marias, Minas Gerais, Euclides et al. (2001) buscou as variáveis vazões máximas, médias e mínimas, curvas de regularização e curva de permanência com base em duas metodologias. Na primeira metodologia, as vazões foram regionalizadas com base nas estatísticas dos resultados de aplicação da regressão múltipla das vazões com as características físicas e climáticas das sub-bacias da região em estudo. A segunda metodologia teve como objetivo avaliar as potencialidades e disponibilidades hídricas a partir da precipitação espacializada na bacia hidrográfica.

Segundo Finzi et al. (2003), o método *Two Component Extreme Value*, TCEV, tem sido largamente utilizado no Sul da Itália por pesquisadores do *Consiglio pela Difesa dalle Catastrofi Idrologiche (CNR-GNDCI)* em dados de máximas de chuva e vazão. Este modelo considera como princípio básico, que as precipitações e vazões extremas não se originam do mesmo grupo de funções de distribuição. A TCEV leva em conta a presença de "outliers" (valores singulares), relacionados a altos valores de coeficiente de assimetria, que caracterizam as séries de valores extremos. Finzi et al. (2002) aplicou a metodologia conhecida como index-flood, adotando o TCEV, a fim de prever valores extremos de vazão baseados em variáveis geomorfológicas e hidrológicas da região em estudo. O

estudo foi dividido em três níveis, no primeiro nível foram determinadas as regiões homogêneas e no segundo foram determinadas sub-regiões homogêneas. No terceiro nível foram estimados os valores da Cheia-Índice (index-flood), ou seja, determinada a relação entre vazões máximas e médias da bacia. O método TCEV foi aplicado apenas a uma parte da região do estudo, onde se constatou a presença de *outliers*. A ausência dos *outliers* pode ser percebida quando os parâmetros da função regional encontrados tendem a uma distribuição de Gumbel.

Finzi et al. (2001) estudaram as sub-bacias dos Rios Carinhanha e Correntes com o objetivo de chegar à regionalização hidrológica das vazões máximas e médias de longo período. O estudo partiu do pressuposto da estacionariedade das séries e análises de regressão realizadas com parâmetros físicos e climáticos das áreas de estudo. Após a etapa inicial do estudo de regionalização (delimitação da área, definição das variáveis dependentes e explicativas e seleção de dados) foram definidas funções regionais com a identificação das regiões homogêneas.

Cirilo et al. (1992) utilizaram modelos de simulação hidrológica para diferentes bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco visando a regionalização de parâmetros dos modelos para a aplicação em bacias sem dados fluviométricos. Os resultados obtidos com esses modelos foram confrontados com os valores do escoamento superficial observado na região.

Andrade et al. (2001) estudaram dezesseis sub-bacias da região litorânea do Estado do Ceará com o objetivo de agrupar em regiões homogêneas sem considerar a continuidade geográfica, mas sim os aspectos fisiográficos e climáticos.

Góes e Campana (2001) tiveram como objetivo a formulação de modelos para regionalização de vazões que pudessem incorporar variáveis representativas das modificações no uso e ocupação do solo, possibilitando a estimativa de valores anuais de vazões mínimas, médias e máximas para a bacia hidrográfica utilizando técnicas de geoprocessamento. Para isso foram utilizadas imagens de satélites de seis datas diferentes; com a classificação dessas imagens pode-se perceber as modificações temporais dos percentuais de terras impermeáveis, solos expostos e área irrigada.

Obregon et al. (1999) apresentam um modelo mensal de transformação de precipitação em vazão para as bacias afluentes à Lagoa Mirim - RS. Sua metodologia consiste em: (a) extensão de séries através de um modelo hidrológico mensal, IPHMEN e

(b) na regionalização das vazões com base nas séries históricas geradas. O modelo IPHMEN é baseado em intervalo mensal de cálculo e composto das seguintes etapas: distribuição de volumes, escoamentos superficial e subterrâneo e otimização de parâmetros. A regionalização foi aplicada para a curva de permanência das vazões com 50 e 95% de permanência.

Barbosa et al. (2000), em virtude das curtas séries históricas de vazões na região semi-árida, buscaram a extensão de séries por meio de modelos de simulação calibrados. Este trabalho utilizou para isso o modelo SMAP diário, calibrado e validado para a bacia de Antenor Navarro no Estado da Paraíba. A calibração foi feita aproximando-se os valores das vazões calculadas às observadas, manualmente, para um ano normal. A validação dos parâmetros do modelo foi feita para três casos: (a) um ano seco, (b) um ano chuvoso e (c) uma série de 4 anos.

Guimarães et al. (2001) apresentaram um modelo hidrológico simples de transformação chuva-vazão mensal, denominado Modelo Hidrológico para o Semi-Árido - MODHISA, aplicável a pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas do semi-árido nordestino que contém grande número de pequenos açudes. Este modelo pode ser classificado como determinístico e concentrado. Neste programa calcula-se para cada mês o deflúvio produzido na bacia a partir da precipitação mensal média na bacia. São levadas em consideração a precipitação efetiva, lâmina máxima de retenção superficial, coeficientes de escoamento e a depleção das vazões.

Ramos e Galvão. (2001) tiveram em seu trabalho o objetivo de verificar a estabilidade da técnica de redes neurais em uma aplicação hidrometeorológica. Os autores concluíram que, o modelo mesmo apresentando bons resultados na fase de calibração, obtendo-se altas correlações com os dados observados, na fase de validação o mesmo pode não acontecer. Os autores explicam que, para se obter sucesso com este tipo de técnica é necessário se ter alguns cuidados, entre os quais destaca-se o excesso de parâmetros numa rede, o que ocasionaria super ajustamento dos dados. Discutem ainda a necessidade de se realizar um pré-processamento dos dados de entrada da rede neural antes de utilizá-los no treinamento de modelos e também o estabelecimento de critérios de estabilidade para a escolha da melhor rede.

Amorim et al. (1999) desenvolveram um trabalho com o objetivo de estimar a evapotranspiração potencial mensal no Brasil aplicando os dados de temperatura média do

ar ao modelo de Thornthwaite, devidamente corrigido para temperaturas superiores a 26,5° C utilizando para isso um sistema de informações geográficas. Este trabalho realizado no INPE, utilizando informações fornecidas pelo INMET, tem sua importância tendo em vista a precariedade de informações sobre evaporação e a facilidade com que esse modelo se aplica, tendo apenas uma equação para qualquer temperatura, entretanto a validação deste não foi realizada.

Araújo Filho e Cirilo (1994) analisaram diferentes fórmulas para o cálculo da evapotranspiração, juntamente com séries de evaporação medidas em tanques em diferentes postos no Estado de Pernambuco e daí desenvolveram metodologia de regionalização da evapotranspiração neste Estado. Entre as fórmulas analisadas estão a da UNESCO, Thornthwaite, Blaney-Criddle e Hargreaves. Sua metodologia baseia-se na correlação entre as variáveis climáticas e de posição geográfica com a evapotranspiração potencial através de tanques classe A em 5 postos onde havia informações sobre todas essas variáveis.

As metodologias existentes, como algumas citadas acima, foram sendo desenvolvidas motivadas pela carência de dados e informações hidrológicas, sendo notado assim o grande problema da precária rede hidrométrica existente no Brasil. O desenvolvimento destas se deu à partir da década de 70. Desde então já existem vários estudos em vários países, assim como a aplicação de várias metodologias.

2.2.1. Regionalização de parâmetros

Os processos hidrológicos podem ser estimados por funções que contêm parâmetros. O parâmetro é interpretado como uma característica local ou de um sistema hídrico, como, por exemplo, o coeficiente de rugosidade de Manning, o valor CN do modelo do Soil Conservation Service (Tucci, 2002), etc. Aragão et al. (1998), por exemplo, estabeleceram isolíneas para os parâmetros da função i.d.f. (intensidade, duração e frequência) no Estado da Paraíba.

As características de uma distribuição estatística podem ser determinadas para vários locais da região, permitindo sua determinação em outros locais sem dados (Rego et al., 1989). Alexandre e Martins (2004) desenvolveram um trabalho para estimar quantis de cheias no Estado do Ceará utilizando uma regionalização do parâmetro de forma da

distribuição Valor Extremo Generalizado (GEV), podendo os demais parâmetros ser estimados localmente.

2.2.2. Regionalização de variável

A variável é entendida aqui como um processo, como, por exemplo: a precipitação, a vazão média, a vazão máxima ou a vazão com certa garantia. As isoietas são um exemplo típico de regionalização da variável obtida a partir de valores médios observados em vários locais (Tucci, 2002). Para os demais processos é mais comum a utilização de indicadores regionais (índices).

2.2.3. Regionalização de indicadores

Segundo definição de Tucci (2002) um indicador regional é um valor médio de uma variável ou proporção entre variáveis hidrológicas. A utilização destes valores está sujeita às incertezas dos dados hidrológicos e às indefinições dos locais sem dados, porém ele deve ser aplicado quando:

- ❖ Deseja-se verificar se os resultados de estudos específicos estão dentro de uma ordem de grandeza de uma determinada região;
- ❖ O objetivo é fazer uma primeira estimativa das variáveis em locais sem dados.

Os principais indicadores utilizados na hidrologia são explicados em sequência.

a) Vazão Específica

Este indicador é definido como sendo a relação entre a vazão e a área contribuinte da bacia e é expresso por:

$$q = \frac{Q_{mp}}{A} \quad (2.1)$$

onde: q é a vazão específica, Q_{mp} é a vazão média de longo período e A é a área de contribuição da bacia.

b) Indicadores com base na Curva de Permanência

As principais relações utilizadas são: a $r_{cp_{50\%}}$ e $r_{cp_{95\%}}$ (Obregon et al., 1999), os quais representam respectivamente a relação entre as vazões com 50% e 95% de permanência com a vazão média de longo período:

$$r_{cp_{50\%}} = \frac{Q_{50\%}}{Q_{mp}} \quad (2.2)$$

$$r_{cp_{95\%}} = \frac{Q_{95\%}}{Q_{mp}} \quad (2.3)$$

c) Índices de Vazões Mínimas

Os índices relativos às mínimas têm valores associados aos períodos de estiagem, sendo a Equação 2.3 apresentada anteriormente um exemplo destes valores. Outros indicadores utilizados são dados pelas seguintes expressões o $r_{7,10}$ e r_m (Euclides et al., 2001):

$$r_{7,10} = \frac{Q_{7,10}}{Q_{mp}} \quad (2.4)$$

$$r_m = \frac{Q_{95}}{Q_{7,10}} \quad (2.5)$$

onde: $r_{7,10}$ é a relação entre a vazão mínima com 7 dias de permanência associada a um tempo de retorno igual a 10 anos ($Q_{7,10}$) e a vazão média de longo período, e r_m é a relação

entre as duas condições usualmente utilizadas de vazão mínima, a vazão $Q_{95\%}$ e a vazão $Q_{7,10}$.

2.2.4. Funções Regionais

A função regional é uma relação entre uma variável hidrológica e uma ou mais variáveis explicativas. As variáveis hidrológicas mais comuns são as vazões médias de longo período, máximas, mínimas e com certa garantia.

As equações são geralmente estabelecidas com base em regressões em termos das características físicas e climáticas (variáveis explicativas) das sub-bacias.

2.2.4.1. Análise de Correlação e Regressão

As equações de regressão podem ser lineares ou não, simples ou múltiplas.

a) Regressão Linear Simples ou Múltipla

Na regressão linear simples somente uma variável independente (x) é utilizada para explicar a variação da variável dependente (y) conforme a equação:

$$E[y] = ax + b + \alpha \quad (2.6)$$

onde $E[y]$ é o valor esperado da variável dependente (y), a e b são parâmetros e α é o erro da estimativa tomado em geral igual a zero;

Os parâmetros da equação (2.6) podem ser determinados pelo método dos mínimos quadrados, que minimiza a diferença quadrática entre os valores observados e calculados pela expressão acima.

$$a = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.7)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (2.8)$$

O coeficiente de determinação representa a parcela que o modelo consegue explicar da variação total da variável dependente y , sendo dado por:

$$R^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.9)$$

Na regressão linear múltipla consideram-se outras variáveis independentes ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) que expliquem a variação da variável dependente (y), sendo o valor esperado $E[y]$ dado por:

$$E[y] = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n + b + \alpha \quad (2.10)$$

onde $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ e b são parâmetros da equação, os quais podem ser obtidos pelo método dos mínimos quadrados e α é o erro da estimativa tomado em geral igual a zero.

A literatura (e.g., Fonseca et al., 1978) indica as equações a serem utilizadas na sua determinação dos parâmetros da equação acima.

b) Regressão Não Linear

Nas regressões não lineares, a variável dependente é expressa por uma função não linear, com parâmetros $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ e b e erro α , podendo ser exponencial, logarítmica ou potencial. A função potencial é a mais usual sendo o valor esperado $E[y]$, para regressão múltipla, dado pela equação:

$$E[y] = b x_1^{a_1} x_2^{a_2} x_3^{a_3} \dots x_n^{a_n} + \alpha \quad (2.11)$$

A equação (2.11) pode ser transformada numa equação linear pela aplicação do logaritmo aos termos, resultando em:

$$E[\ln y] = \ln b + a_1 \ln x_1 + a_2 \ln x_2 + a_3 \ln x_3 + \dots + a_n \ln x_n + \alpha \quad (2.12)$$

Os coeficientes $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ e b podem ser obtidos conforme aqueles definidos para equação linear porém com as variáveis logaritimizadas. O nível de correlação obtido é medido pelo coeficiente de determinação não-tendencioso.

Na regionalização, o número de variáveis independentes é normalmente pequeno, o que torna possível examinar as regressões possíveis.

2.2.4.2. Variáveis Explicativas

Nos estudos de regionalização devem ser consideradas as características físicas e climáticas das bacias que mais explicam a distribuição da vazão e que sejam mais facilmente mensuráveis, para assim serem determinadas e usadas na investigação da função de regionalização.

a) Variáveis Físicas

Segundo Viessman et al. (1972) e Garcez e Alvarez (1988), a área de drenagem (A), a área plana delimitada pelo divisor de águas, constitui-se numa das principais variáveis explicativas na quase totalidade dos estudos de regionalização de vazões em função da sua influência na potencialidade hídrica da bacia hidrográfica.

Outra característica física usada na regionalização hidrológica é o comprimento do rio principal (L), que afeta o tempo de percurso da água. A declividade média da bacia (S_b) controla a velocidade do escoamento superficial, que também afeta o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se na seção de drenagem da bacia, afetando principalmente os valores de enchentes máximas.

A densidade de drenagem (D_d) é o índice que indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, ou seja, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia, sendo expressa pela relação entre o comprimento total dos cursos d'água, sejam eles perenes, intermitentes ou efêmeros, e a área total da bacia, conforme a equação:

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A} \quad (2.13)$$

onde: L_i é o comprimento do segmento i , A é a área total da bacia e N o número total de segmentos da bacia.

b) Variáveis Climáticas

A precipitação é a variável climática explicativa mais importante do ciclo hidrológico, formado o elo de ligação entre a água da atmosfera e a água do solo, principalmente com respeito ao escoamento superficial. Nos estudos de regionalização, são comuns a precipitação média anual, a máxima e a média diária.

2.3. Séries Temporais para Regionalização

2.3.1. Séries de vazões máximas

Segundo Tucci (1997) a vazão máxima pode ser obtida a curto ou longo prazo. A estimativa de curto prazo é feita por meio do acompanhamento de um evento em tempo real resultante de uma precipitação. A previsão de longo prazo é a previsão estatística da vazão máxima (diária ou instantânea) em qualquer ano. A vazão máxima está ligada a um determinado período de retorno e pode ser obtida por uma distribuição de probabilidade. A regionalização da vazão máxima envolve a determinação da curva de probabilidade a partir dos dados observados.

O objetivo da curva de probabilidade de vazões máximas é o de representar a relação entre a vazão extrema e a probabilidade de ocorrerem valores maiores ou iguais a esta vazão. A partir da análise das distribuições de probabilidade ajustáveis aos valores máximos de vazão, pode-se obter, para intervalos de tempo de retorno definidos, qual a enchente correspondente.

2.3.2. Séries de vazões médias

A vazão média para um estudo de regionalização destinado a servir de base para o desenvolvimento de projetos de uso da água, tais como o abastecimento de água, a

produção de energia elétrica, a irrigação, a navegação e outros usos, é a vazão média de longo período, definida como a média das vazões da série histórica disponível em um determinado local.

O conhecimento da vazão média e suas variações permitem estimar a disponibilidade hídrica da bacia. Na prática, os limites de regularização correspondem a uma fração da vazão média de longo período.

2.3.3. Séries de vazões mínimas

O conhecimento da vazão mínima e sua distribuição temporal e espacial assume papel importante no planejamento regional, em setores como geração de energia elétrica e navegação, bem como em projetos setoriais de abastecimento artificial, outorga de uso da água, qualidade de água, estudos de autodepuração na diluição de efluentes em corpos d'água, entre outros. As vazões mínimas que ocorrem em época de estiagem são utilizadas nestes estudos dentro de uma das seguintes finalidades: análise, projeto, estimativa da regularização legal, operação e planejamento.

Segundo Tucci (2002), a vazão mínima é caracterizada por dois fatores: a quantidade de água e a duração. Na prática, pouca utilidade tem a vazão mínima instantânea, que deve ser muito próxima da vazão mínima diária. Normalmente, durações maiores como sete ou trinta dias apresentam maior interesse ao usuário já que a sequência de vazões baixas é que representa uma situação desfavorável para a demanda ou para as condições de conservação ambiental. A vazão mínima com sete dias de duração é utilizada, com frequência, como indicador da disponibilidade hídrica natural dos cursos d'água. A principal vantagem do uso deste valor reside no fato de não sofrer tanta influência de erros operacionais e de intervenções humanas no curso d'água e de ser mais minuciosa que a vazão mínima mensal. A vazão com garantia de 95% é também uma variável que caracteriza a condição mínima explorável numa bacia.

2.3.4. Séries de vazões com garantia

As vazões com garantia mais comum são as vazões com 50 e 95% de permanência, que podem ser determinadas através das análises de frequências. Podem ser escolhidas

outras vazões a serem regionalizadas, sendo estabelecidas através de correlações com as características físicas e climáticas das bacias em estudo.

As curvas de permanência uniformizadas, ou seja, aquelas cujos valores de vazão foram divididos pela vazão média de longo termo, são plotadas simultaneamente. A curva de permanência regional é a média entre as curvas de todas as estações.

Para a obtenção de informações no local desejado, a curva de permanência uniformizada adotada é multiplicada pela respectiva vazão média de longo termo. Segundo Euclides et al. (2003), além dos resultados diretos que fornece para o estudo do aproveitamento das disponibilidades do curso d'água, as curvas de permanência constituem um instrumento valioso de comparação entre as características distintas das bacias hidrográficas, colocando em evidência o relevo, a vegetação e o uso do solo e a precipitação, sobre a distribuição das vazões.

As séries temporais acima descritas são a base para o estabelecimento de funções de determinação da variável em locais sem dados. A utilização das séries, no entanto, requer análise cuidadosa quando a sua consistência em termos da estacionariedade e homogeneidade.

2.4. Estacionariedade das Séries Temporais

Uma série é dita estacionária quando durante o período de observações não ocorreram mudanças significativas nas características dos dados estatísticos das séries históricas. Entre as alterações que podem modificar estas características destacam-se o aumento da urbanização, desmatamento e a construção de reservatórios. A verificação da estacionariedade poderá ser feita através de dois tipos de testes estatísticos: paramétricos e não paramétricos.

2.4.1. Testes Paramétricos

Esta metodologia é aplicada quando há indícios de mudanças no comportamento hidrológico de um sistema a partir de um determinado período. Com a utilização dos testes paramétricos é possível verificar se ocorreram mudanças nas estatísticas da média e da variância destes dois períodos, mas para isso os dados observados devem ser

independentes entre si e devem se ajustar a uma distribuição normal. Os testes usualmente empregados são o de *Student* para a média e o de *Fischer* para a variância (Tucci, 2002).

a) Teste de Identidade de Variâncias

Para a verificação de alterações na estatística de variância é necessário subdividir a série em dois períodos. O primeiro período, com uma série de tamanho N_1 e variância s_1^2 , seria formado pelos valores observados anteriormente à suposta alteração. Enquanto o segundo período, posterior às mudanças, possui série com tamanho N_2 e variância s_2^2 . A partir destas informações calcula-se o valor F_{calc} , dado por:

$$F_{calc} = \frac{\text{Variância maior}}{\text{Variância menor}} \quad (2.14)$$

Supondo que as séries amostrais utilizadas tenham uma distribuição F , com v ($v_1 = N_1 - 1$; $v_2 = N_2 - 1$) ou ($v_2 = N_2 - 1$; $v_1 = N_1 - 1$) graus de liberdade, respectivamente, o valor calculado de F deverá ser comparado com o valor de F teórico (F_t), retirado da tabela de distribuição F , com os graus de liberdade e com o nível de significância (α) requerido. Se $F_{calc} > F_t$ a hipótese de identidade entre as variâncias poderá ser rejeitada, assumindo um erro de acordo com o nível de significância adotado, geralmente de 1 ou 5% (ver tabelas em Fonseca et al., 1978).

b) Teste de Identidade das Médias

Esta metodologia, assim como o teste de identidade de variâncias, requer a divisão da série em dois períodos, anterior e posterior às mudanças, com tamanhos das amostras N_1 e N_2 e médias \bar{x}_1 e \bar{x}_2 respectivamente. A análise final para a verificação da identidade das médias dependerá do resultado obtido anteriormente para as variâncias.

Caso a hipótese de identidade das variâncias tenha sido aceita e as médias \bar{x}_1 e \bar{x}_2 sejam idênticas do ponto de vista estatístico, a estatística t com distribuição de *Student* e apresentando $N_1 + N_2 - 2$ graus de liberdade será calculada da seguinte maneira:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s \left(\sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}} \right)} \quad (2.15)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \sum_{i=1}^{N_2} (x_2 - \bar{x}_2)^2}{N_1 + N_2 - 2} \quad (2.16)$$

onde: s^2 é uma estimativa da variância em todo período de dados. Neste caso a identidade das médias poderá ser rejeita quando o valor calculado de t cair fora do intervalo: $\left[-t_{\alpha/2, N_1+N_2-2}; t_{\alpha/2, N_1+N_2-2} \right]$. Estes valores são obtidos nas tabelas de distribuição de Student, para o numero de dados (N), o nível de significância (α) e o grau de liberdade (ν) que é calculado através da seguinte equação (ver tabelas em Fonseca et al., 1978):

$$\nu = \frac{1}{\frac{k^2}{N_1 - 1} + \frac{(1-k)^2}{N_2 - 1}} \quad (2.17)$$

onde :

$$k = \frac{N_2 s_1^2}{N_2 s_1^2 + N_1 s_2^2} \quad (2.18)$$

Caso a hipótese da identidade das variâncias tenha sido rejeitada o valor de t é calculado por meio da seguinte fórmula:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}} \quad (2.19)$$

Neste caso o grau de liberdade é calculado também pela equação acima.

2.4.2. Testes não Paramétricos

A vantagem desta metodologia é sua aplicabilidade mesmo quando as séries observadas não se ajustam à distribuição normal, critério exigido na utilização dos testes paramétricos. Isso poderá ser aplicado a vazões máximas e mínimas que geralmente não se distribuem normalmente. Existem vários testes não paramétricos, sendo descrito a seguir apenas o de *Wilcoxon*. Segundo Tucci (2002) esta metodologia consiste no desmembramento de uma série hidrológica em dois períodos, cujos valores x_i e y_i são ordenados de forma decrescente, quando o valor de x é seguido por um valor da série y , conta-se uma inversão, ou seja, a inversão é contada a cada valor de y menor a um determinado valor de x . Estas séries têm que ter, pelo menos 10 valores cada e pertencerem à mesma população, sendo a média do número de inversões:

$$M = \frac{n_x n_y}{2} \quad (2.20)$$

$$D = \frac{n_x n_y}{12} (n_x + n_y + 1) \quad (2.21)$$

onde: n_x e n_y são, respectivamente, os tamanhos das séries de x e y . Para um nível de significância α , a região crítica para a hipótese de igualdade das médias é:

$$M - t_{\alpha} S \leq \mu \leq M + t_{\alpha} S \quad (2.22)$$

onde: $S = \sqrt{D}$; μ é o número de inversões e t_{α} é o valor obtido da tabela de Student.

2.5. Homogeneidade de Séries Temporais

2.5.1. Análise de homogeneidade regional (Dupla massa)

A análise de dupla massa (Tucci, 1997) é bastante usada para analisar a homogeneidade das séries dentro de uma região. O método da Dupla Massa, desenvolvido

pelo *Geological Survey* (USA) segundo Pinto et al. (1976), é uma prática comum adotada pela comunidade científica.

Este método consiste na comparação gráfica entre a soma dos valores médios das precipitações e/ou vazões anuais acumuladas em vários postos da região e as precipitações e/ou vazões anuais de cada posto investigado. Quando se alinham os pontos segundo uma única reta, diz-se que os dados do posto são homogêneos com respeito à média regional. A declividade da reta determina o fator de proporcionalidade entre ambas as séries. A descontinuidade da reta implica em modificações ocorridas no sistema que alteraram o comportamento da série.

2.6. Análise Estatística de Séries Temporais

Os dados hidrológicos, que resultam de processos naturais, são geralmente aleatórios e estocásticos. Conseqüentemente, para cada evento existe uma probabilidade de ocorrência. Dependendo da natureza do dado (e.g., média, máxima, mínima, etc), existem distribuições teóricas disponíveis na literatura, as quais podem ser testadas comparando-se a com a distribuição de frequência das séries. Na hidrologia as distribuições usuais são:

- ❖ Normal;
- ❖ Gumbel;
- ❖ Gama;
- ❖ Pearson III.

Uma breve revisão é mostrada a seguir, conforme descrito em Kite (1977).

2.6.1. Distribuição de Probabilidade

Segundo definição de Soong (1986) o comportamento de uma variável aleatória é caracterizado por sua função de distribuição de probabilidades, isto é, pela maneira como as probabilidades se distribuem pelos valores que elas assumem.

A Probabilidade acumulada de uma função densidade de probabilidade pode ser expressa através da seguinte equação:

$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2.23)$$

onde: $f(x)$ é a função densidade de probabilidade e X representa a variável aleatória, sendo x um valor real qualquer para uma probabilidade $P(X \leq x)$; deve-se lembrar que $P(X > x) = 1 - P(X \leq x) = \frac{1}{T}$ onde T é o tempo médio em que o evento x pode ser ultrapassado.

O tempo de recorrência ou período de retorno é definido como um intervalo de tempo médio (em anos) em que um determinado evento deve ser igualado ou superado pelo menos uma vez. Um dos critérios para escolha do período de retorno baseia-se no chamado risco permissível ou risco que se pode correr para o caso ou falha da estrutura. Segundo Villela (1975), a probabilidade de ocorrer a maior enchente no período de retorno (T) é dada por:

$$P(X > x) = \frac{1}{T} \quad (2.24)$$

e a probabilidade $P(X \leq x)$ de não ocorrer é:

$$P(X \leq x) = 1 - P(X > x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (2.25)$$

A probabilidade de não ocorrência dentro de N quaisquer anos é:

$$J = P(X \leq x)^N = (1 - P(X > x))^N \quad (2.26)$$

em que:

J é a probabilidade do evento não ocorrer em N anos consecutivos (-);

N é o período de tempo (anos);

$P(X > x)$ é a probabilidade do evento ser ultrapassado (-);

$P(X \leq x)$ é a probabilidade do evento ser alcançado (-);

T é o período de retorno (anos).

Os períodos de retorno selecionados para a regionalização devem ser, portanto, bastante representativos. Silva e Araújo. (2002), em estudo de regionalização hidrológica utilizaram os períodos de retorno de 2, 10, 20, 50, 100 e 500 anos para estimativa da vazão máxima e de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos para estimativa da vazão mínima. Já Euclides et al. (2001) utilizaram os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos para estimativa da vazão mínima e de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos para estimativa da vazão máxima. O período de retorno a ser adotado para fins práticos depende de muitos fatores e não é objeto de discussão desta pesquisa.

Alguns fenômenos hidrológicos podem ser modelados através de ajustes a determinadas distribuições teóricas de probabilidade e a análise da natureza destes fenômenos influenciará diretamente na escolha do modelo a ser aplicado. No item a seguir serão mostradas as principais distribuições aplicadas para as variáveis aleatórias contínuas.

2.6.1.1. Distribuições Normal e Log-Normal

A distribuição normal, também denominada de distribuição Gaussiana, é de grande importância tanto do ponto de vista teórico quanto nas suas aplicações em Hidrologia. Uma variável aleatória é dita *normalmente distribuída* quando sua função densidade de probabilidade $f_x(x)$ tem a seguinte forma:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad (2.27)$$

onde: μ e σ representam, respectivamente, a média e o desvio padrão da população. A distribuição normal não apresenta assimetria e tem a seguinte função de distribuição de probabilidade cumulativa:

$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad -\infty < x < \infty \quad (2.28)$$

A distribuição log-normal a dois parâmetros é dada pela seguinte função:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right], \quad x > 0 \quad (2.29)$$

onde:

$f(x)$ é a função densidade ou de intensidade de probabilidade de uma variável aleatória contínua qualquer;

μ_y é o parâmetro de posição da distribuição log-normal;

σ_y^2 é o parâmetro de escala da distribuição log-normal;

x é a variável aleatória;

y é $\ln(x)$.

A função de distribuição acumulada é dada pela expressão:

$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \left\{ \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] \right\} \quad (2.30)$$

A distribuição log-normal a três parâmetros é dada pela seguinte função:

$$f(x) = \frac{1}{(x-x_o)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x-x_o) - \mu_y]^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (2.31)$$

Esta distribuição difere da distribuição log-normal a dois parâmetros pela introdução do parâmetro de posição (x_o), tal que $y = \ln(x-x_o)$. A distribuição cumulativa é:

$$P(X \leq x) = \int_{x_o}^x \frac{1}{(x-x_o)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x-x_o) - \mu_y]^2}{2\sigma_y^2}\right\} dx \quad (2.32)$$

2.6.2. Distribuição de Probabilidade Aplicada a Eventos Extremos

As distribuições de probabilidade que apresentam assimetria (positiva ou negativa) são típicas de valores extremos, tais como a distribuição log-normal (Kite, 1977), bem como outras distribuições e suas formas logarítmicas tais como:

- ❖ Distribuição de Extremos Tipo I (Gumbel);
- ❖ Distribuição Gama;
- ❖ Distribuição de Pearson Tipo III.

2.6.2.1. Distribuição de Extremos Tipo I (Gumbel)

A função extremal tipo I ou de Gumbel (Kite, 1977, pg. 87) e a função de distribuição de probabilidade acumulada são dadas por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right) - \exp\left[-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]\right\} \quad \text{quando} \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ -\infty < \beta < \infty \\ \alpha > 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right) - \exp\left[-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]\right\} dx \quad (2.34)$$

ou

$$P(X \leq x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (2.35)$$

onde: α é o parâmetro de escala; β é o parâmetro de posição, sendo válidas as seguintes relações:

$$E(x) = \beta + \frac{\delta}{\alpha}; \quad \delta = 0,57721 (\text{constante de Euler}) \quad (2.36)$$

$$Var(x) = \frac{\pi}{\sqrt{6}\alpha^2} \quad (2.37)$$

2.6.2.2. Distribuição Gama

A distribuição Gama torna-se um caso particular da distribuição Pearson III quando o coeficiente de assimetria é igual a duas vezes o coeficiente de variação (Lanna et al., 1989). A sua apresentação pode ser vista em Kite (1977) e não será mostrada aqui.

2.6.2.3. Distribuição de Pearson Tipo III

As funções densidade e de distribuição de probabilidade acumulada são dadas por:

$$f(x) = \frac{1}{(x-x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x-x_0)-\mu_y]^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (2.38)$$

$$P(X \leq x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left\{\frac{x-x_0}{\alpha}\right\}^{\beta-1} \exp\left\{-\frac{x-x_0}{\alpha}\right\} dx \quad (2.39)$$

onde:

- α é o parâmetro de escala da distribuição Pearson tipo III;
- β é o parâmetro de forma da distribuição Pearson tipo III;
- x_0 é o parâmetro de posição da distribuição Pearson tipo III;
- $\Gamma(\cdot)$ é a função Gama.

Conforme se vê, a distribuição de Pearson III apresenta 3 parâmetros podendo ser aplicada a dados de quaisquer natureza haja vista que a assimetria pode assumir valores negativos, positivos ou nulos. Quando a assimetria é nula são semelhantes aos da distribuição normal. As formas logarítmicas das distribuições aplicadas a valores extremos podem ser obtidas substituindo a variável x por $\ln x$.

2.6.3. Teste de Ajustamento de Distribuição de Probabilidade

2.6.3.1. Teste de Kolmogorov-Smirnov (teste K-S)

O teste de aderência mais utilizado para seleção da distribuição ajustável as frequências de cada série histórica é o de Kolmogorov-Smirnow, com nível de significância geralmente de 1% ou 5%. Este teste foi utilizado nos estudos de regionalização de vazões realizadas por Silva et al. (2002) e Euclides et al. (2002). O teste consiste em comparar as probabilidades estimadas pela distribuição de probabilidade $[P(X \leq x)]$ com as frequências dos dados amostrais $[F(X \leq x)]$. A variável de teste (D_0), definida como a maior diferença,

em modulo, entre $P(X \leq x)$ e $F(X \leq x)$ é comparada com a variável crítica (D_c) que depende do número de dados (n), do nível de significância (α) e da distribuição (Koch e Rego, 1985). A distribuição é aceita quando $D_i < D_{c,\alpha,n}$. Valores criticos podem ser encontrados na literatura (Koch e Rego, 1985).

A seleção da distribuição de probabilidade a ser adotada é comumente baseada em resultados de aderência, já que, a priori, não se pode definir a melhor distribuição de probabilidade para descrever a frequência de ocorrência de uma variável.

Após a seleção das distribuições probabilidades com melhor ajuste às frequências dos dados de vazões, os valores das vazões mínimas, médias e máximas associadas aos diferentes períodos de retorno, em geral adotados em estudos de regionalização, podem ser determinados.

2.7. Discussão e Considerações

A presente pesquisa tem por objetivo principal aplicar técnicas de regionalização hidrológica como subsidio para o planejamento, gerenciamento e gestão dos recursos hídricos na região hidrológica do alto rio Piranhas – PB (~15000 km²), no semi-árido do Estado da Paraíba, que possui características físicas e climáticas homogêneas (Rego et al., 1989). Nesta região, os dados disponíveis apresentam descontinuidade e, em alguns locais as séries são pequenas. Para a presente pesquisa optou-se pela utilização de séries simuladas através do modelo distribuído NAVMO (Kleeberg et al., 1989). O modelo já havia sido calibrado de maneira pouco extensiva, para uma das sub-bacias (Lopes, 1994) da região, e os parâmetros utilizados para a simular as vazões em outros locais com dados medidos (Braga, 2001). Na presente pesquisa, o modelo foi exaustivamente calibrado e séries de longo período simuladas.

A importância deste trabalho deve-se ao fato que ainda não havia sido feito um estudo de regionalização com séries de longo período simuladas. Ademais, os resultados servirão de análise da representatividade do modelo e seus parâmetros para simular o escoamento na região.

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS

3.1. Área de Estudo

A região do alto Rio Piranhas localiza-se no Oeste da Paraíba (Figura 3.1.) onde estão inseridos os maiores reservatórios de armazenamento de água do Estado, com finalidades de abastecimento, geração de energia e irrigação através de perímetros irrigados, voltados para o desenvolvimento do semi-árido paraibano e de grande importância sócio-econômica para o Estado (Paraíba, 1997). O açude Coremas-Mãe d'água é um deles, que conta com uma unidade geradora de energia e regulariza o Rio Piranhas até o açude Armando Ribeiro Gonçalves (barragem do Açú) no Rio Grande de Norte. Com base nestas características, sobressai-se no contexto Estadual captando a atenção de estudiosos para o desenvolvimento de estudos que forneçam melhores subsídios para o gerenciamento dos seus recursos hídricos.

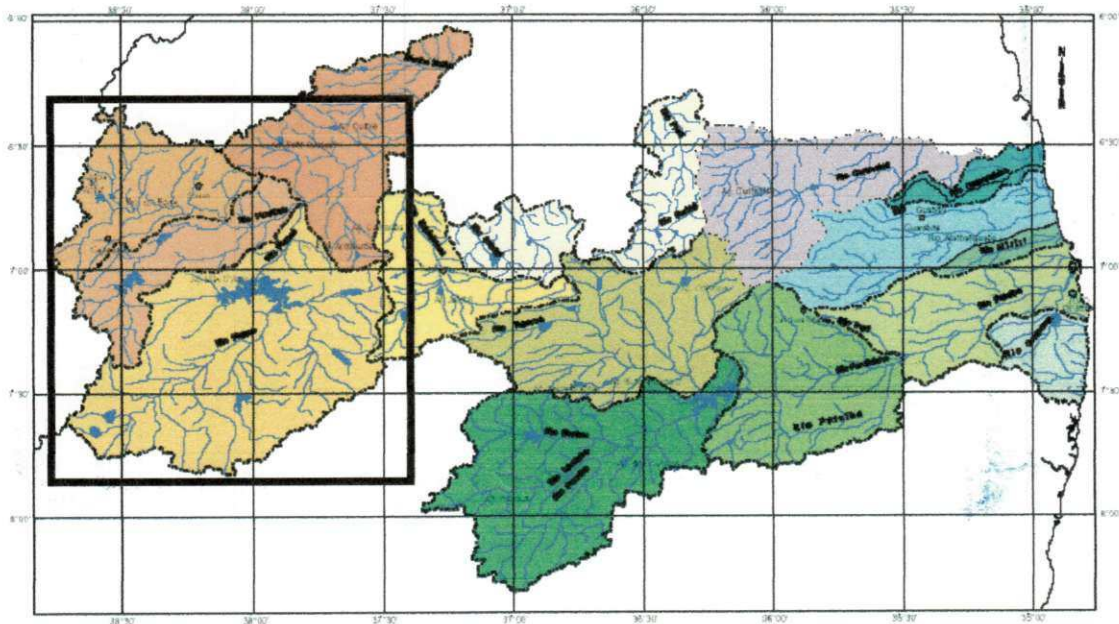


Figura 3.1. Localização da Bacia do Alto Rio Piranhas (Brasil, 1981)

O conhecimento dos recursos hídricos atuais em termos quantitativos e qualitativos bem como das necessidades futuras é fundamental para o estabelecimento de uma política de gestão e implementação de medidas de aumento da oferta d'água.

No entanto, para o desenvolvimento de uma melhor gestão dos recursos hídricos, surge à necessidade de se determinar a disponibilidade hídrica para atender as demandas, muitas vezes são locais sem monitoramento, séries de curta duração ou com períodos longos de falhas de observação. Por mais densa que seja a rede de monitoramento hidrometeorológico ela dificilmente atenderá com seus dados às necessidades de informação. Com isto surge a necessidade de uma regionalização hidrológica que permitiria a determinação de variáveis em bacias sem dados.

Nos estudos de regionalização devem ser consideradas as características físicas e climáticas das bacias da região que mais influem nas variáveis de interesse.

3.1.1. Características Climatológicas

A região do alto Rio Piranhas encontra-se inserida numa região com clima seco (xerófito), com temperatura média em torno de 24°C e amplitude térmica anual menor que 4°C. A pluviometria média anual é aproximadamente 870 mm (calculada com dados de postos da região entre 1911 e 1990). A distribuição da precipitação, tanto no tempo quanto no espaço, é bastante irregular, com chuvas concentradas em 4 meses (Figura 3.2). A taxa de evaporação potencial assume valor de 1554,4 mm. A Figura 3.3 mostra a classificação do clima da região.

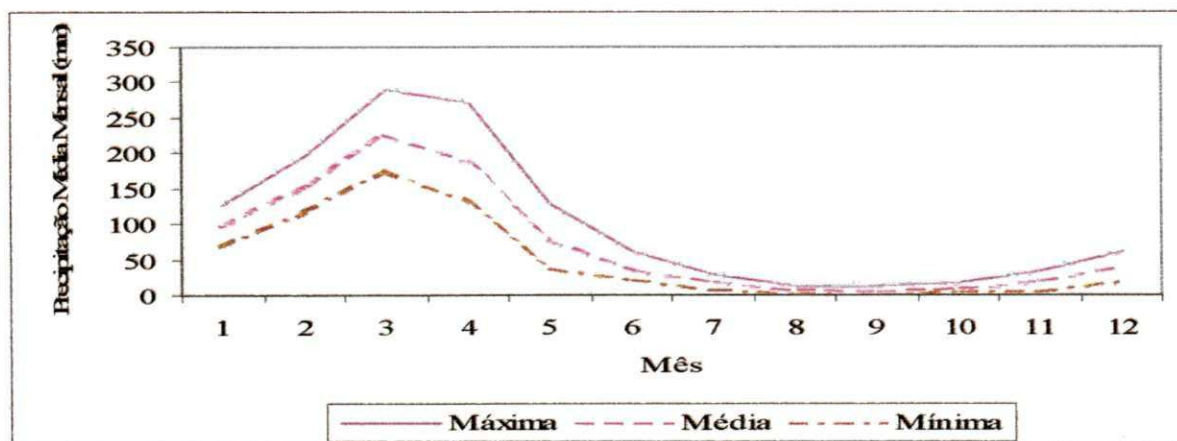


Figura 3.2. Precipitação média mensal na região do Alto Piranhas.

A Tabela 3.1 mostra valores médios de algumas variáveis climáticas. A Tabela 3.2. mostra os dados de evaporação média em São Gonçalo. 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.

Tabela 3.1. 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.ufcg.edu.br)

Tabela 3.2. Evaporação média mensal em 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

* dados de tanque classe A

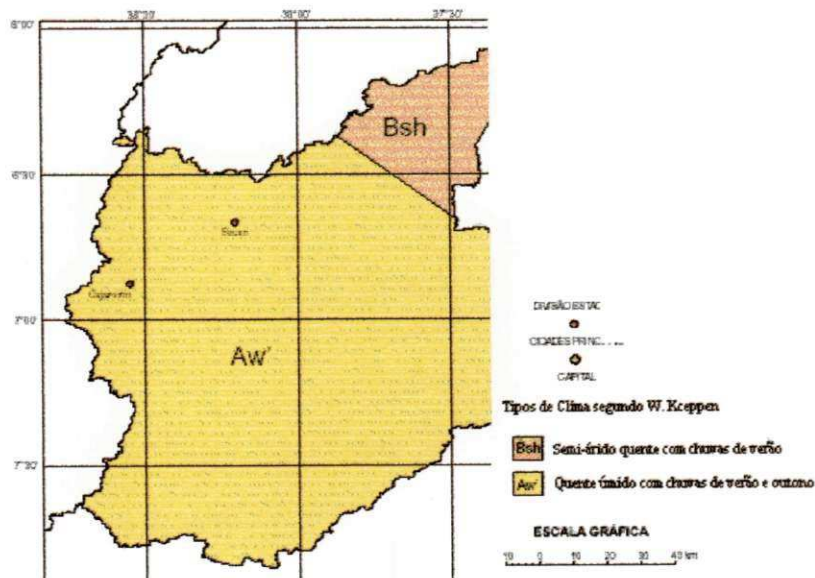


Figura 3.3. Mapa de Clima (Brasil, 1981)

3.1.2. Características fisiográficas

A região do alto Rio Piranhas engloba uma área de 14.850 km², limitada pelo posto fluviométrico de Sítio Vassouras (lat. 6°43' e long. 37°48'), incluindo as seguintes sub-bacias: Piancó, São José de Piranhas, Emas, Aguiar, Antenor Navarro, Pau Ferrado, Santa Rita do Curema, e Boqueirão de Mãe-d'água. A Tabela 3.3 mostra as principais características dessas sub bacias.

Tabela 3.3. Variáveis Físicas e Climáticas das Sub bacias.

<i>Bacia</i>	A km ²	L km	S_b m/km	D_d m/km ²	P_{max} anual mm	P_{max} diária mm	P_{med} mm
Piancó	4550	96	10,93	78,36	1553,86	161,99	866,70
Emas	530	17	7,50	57,42	2405,45	145,78	1003,58
SR Curema	6869	117	10,27	70,26	1708,28	157,85	884,87
Aguiar	495	22	14,75	70,27	1632,70	171,08	893,90
BM Dagua	1063	43	14,70	61,35	1594,70	163,20	908,73
Pferrado	8050	126	10,51	63,73	1678,14	157,46	893,08
SJ Piranhas	475	43	17,90	219,68	1535,60	151,83	922,93
Anavarro	1580	57	10,70	110,07	1447,45	124,25	838,18
Svass	14850	161	10,27	89,88	1616,39	149,07	885,39

Onde: A é a área das bacias; L é comprimento do rio principal; S_b é declividade média da bacia; D_d é a densidade de drenagem; P_{max} anual, P_{max} diária, P_{med} são as precipitações máximas médias anuais, máxima média diária e média anual respectivamente.

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 Rio 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.

a) Solo

Os solos predominantes na bacia (Figura 3.4) são: Litólitos Eutróficos, Bruno Não-Cálcico e Podzólicos Vermelho-Amarelo-Eutrófico, ocorrendo Vertissolos e Solonetz Solodizados, em menor escala, ao norte.

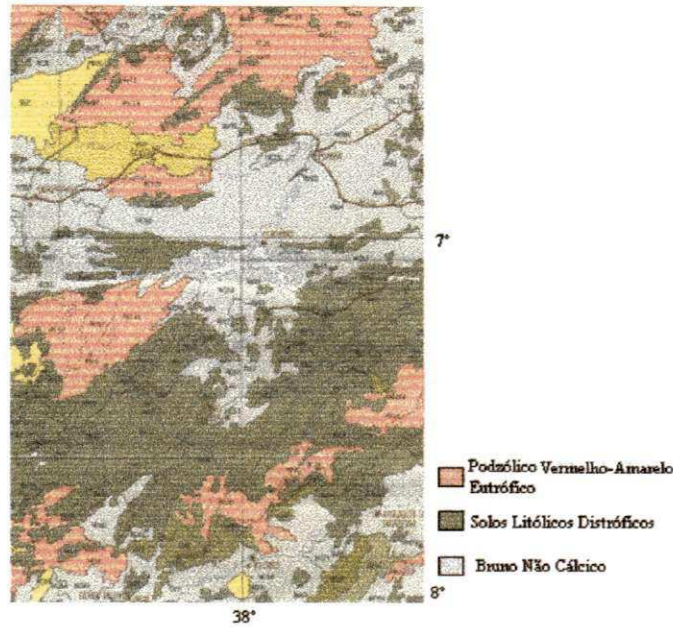


Figura 3.4. Mapa de Solo (Brasil, 1981)

b) Relevo

A bacia do alto Rio Piranhas se encontra limitada por uma cadeia de serras ao Sul e Oeste que divide o Estado da Paraíba dos Estados de Pernambuco e Ceará e adentra ao Estado do Rio Grande do Norte em relevos mais aplainados e suaves (Figura 3.5).

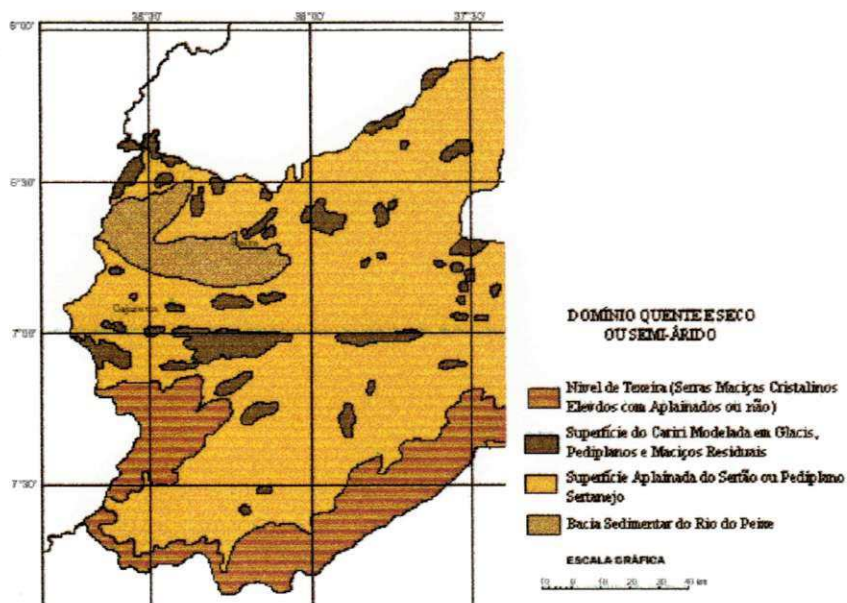


Figura 3.5. Mapa de Relevo (Brasil, 1981)

c) Vegetação

A vegetação predominante é a caatinga (Figura 3.6) é do tipo arbórea aberta com existência de agricultura de cultura cíclica concentrada ao norte, porém com presenças esparsas ao sul da região (Brasil, 1981).

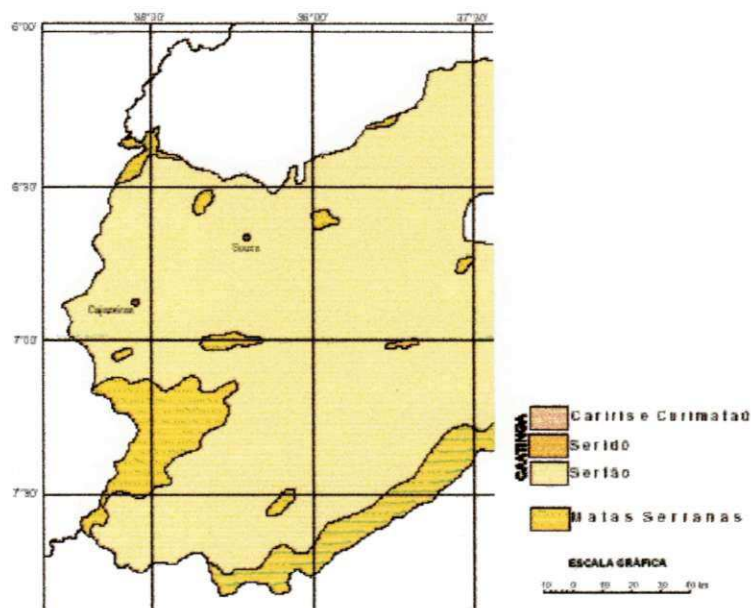


Figura 3.6. Mapa de Vegetação (Brasil, 1981)

d) Geologia

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, há predominância do complexo cristalino sobre terrenos sedimentares e ocorrências de rochas vulcânicas e plutônicas de idades diversas.

3.2. Base de Dados

Os dados de vazões a serem utilizados na regionalização serão extraídos das simulações com o modelo NAVMO. Uma descrição dos dados requeridos pelo modelo é dada a seguir.

3.2.1. Dados Requeridos pelo Modelo

O modelo requer dados médios diários de precipitação, vazão e evaporação. No nível de sub-bacias exige dados de 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).

3.2.2. Dados Hidroclimatológicos

A partir da área delimitada, selecionou-se os postos fluviométricos e pluviométricos (Figura 3.7) 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 de dados encontram-se na Tabela 3.4. Estes postos delimitam as principais sub-bacias da região. Ressalta-se que foi descartado o posto de Várzea Grande que apresentou dados duvidosos, Braga (2001) utilizou as séries históricas desses postos para validar os parâmetros calibrados por Lopes (1994).

Tabela 3.4. Período de Dados dos Postos Fluviométricos

Código	Nome do Posto	Altitude (m)	Latitude gg mm	Longitude gg mm	Área (km ²)	Período de dados
37200000	S. José de Piranhas	300	7° 7'	38° 30'	475	(1912 a 1915; 1921 a 1929)
37260000	Antenor Navarro	240	6° 44'	38° 27'	1580	(1964 a 1972)
37340000	Piancó	250	7° 13'	38° 4'	4550	(1964 a 1983)
37360000	Emas	270	7° 8'	38° 17'	530	(1964 a 1972)
37363000	Aguiar	280	7° 5'	38° 11'	495	(1969 e 1970)
37380000	Pau Ferrado	170	6° 58'	38° 6'	8050	(1967, 1968, 1971, 1973 a 1975)
37410000	Sítio Vassouras	300	6° 43'	38° 12'	14850	(1963 a 1985)
37366000	Boqueirão de Mãe d'água	200	7° 3'	38° 0'	1063	(1923 a 1946)
37368500	Sta. Rita de Coremas	250	7° 2'	38° 28'	6869	(1913, 1914; 1921 a 1941)

Fonte: SUDENE (1990)

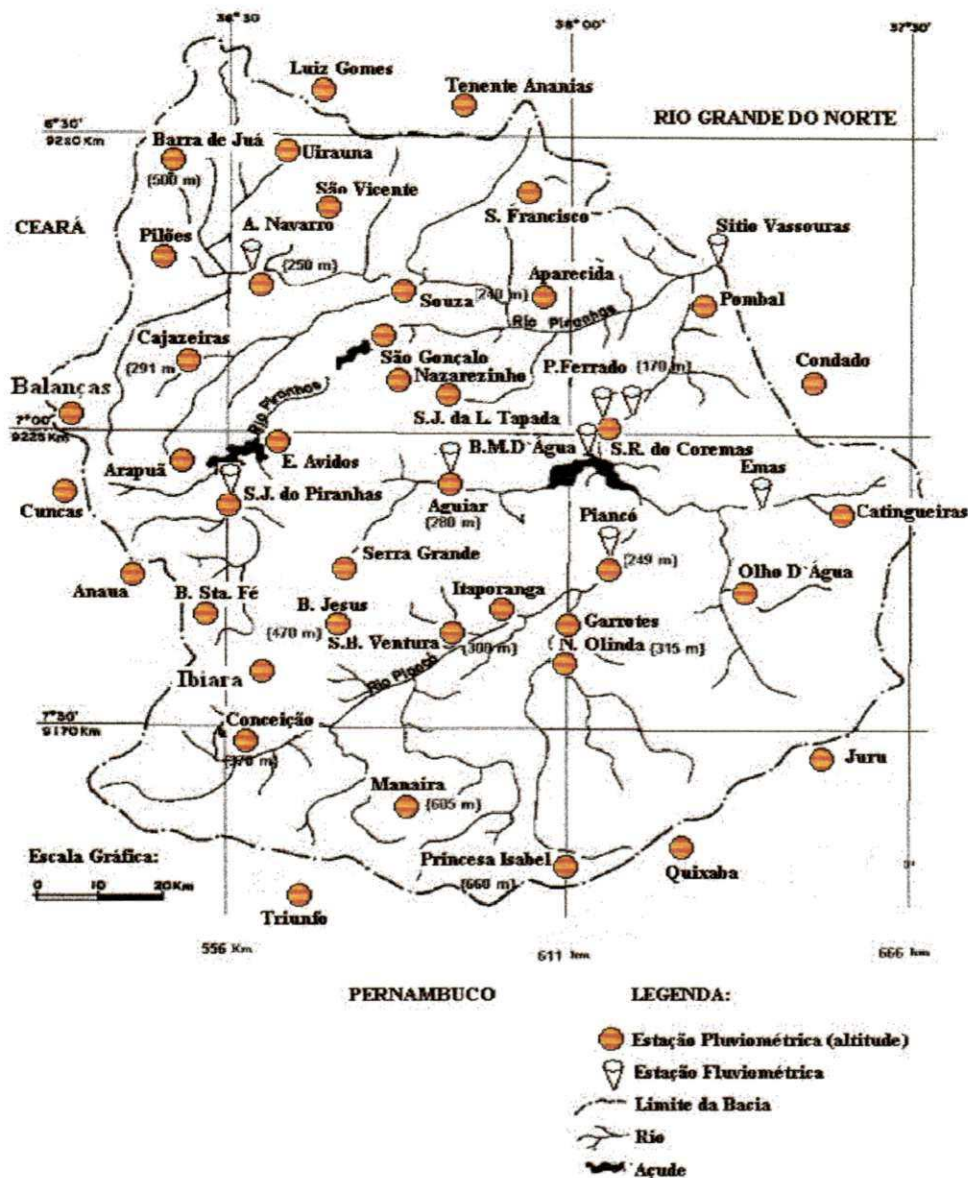


Figura 3.7. Bacia Hidrográfica do Alto Rio Piranhas (Figueiredo et al., 1999).

Os postos pluviométricos foram selecionados buscando uma distribuição homogênea dentro dos 14.850 km² da área, num total de 41 postos, dos quais 35 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 1929. A Tabela 3.5 mostra os postos pluviométricos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.5. Postos Pluviométricos

	Código	Nome do Posto	Altitude (m)	Latitude gg mm	Longitude gg mm	Estado
1	3843166	Aguiar	280	7° 5'	38° 11'	PB
2	3842574	Anauá	600	7° 15'	38° 38'	CE
3	3833413	Antenor Navarro	240	6° 44'	38° 27'	PB
4	3833588	Aparecida	170	6° 46'	38° 4'	PB
5	3842185	Arapua	500	7° 4'	38° 35'	PB
6	3832956	Balanças	400	6° 59'	38° 44'	PB
7	3832089	Barra de Jua	500	6° 32'	38° 34'	PB
8	3843727	Bom Jesus	470	7° 21'	38° 22'	PB
9	3842698	Bonito de Santa Fé	575	7° 19'	38° 31'	PB
10	3832789	Cajazeiras	291	6° 53'	38° 34'	PB
11	3844279	Catingueiras	290	7° 8'	37° 37'	PB
12	3852197	Conceição	370	7° 33'	38° 31'	PB
13	3834877	Condado	260	6° 54'	37° 37'	PB
14	3844008	Coremas	220	7° 1'	37° 58'	PB
15	3842254	Cuncas	480	7° 6'	37° 44'	CE
16	3833908	Engenheiros Avidos	250	6° 58'	38° 28'	PB
17	3844703	Garrotes	305	7° 23'	38° 0'	PB
18	3843919	Ibiara	330	7° 29'	38° 25'	PB
19	3843667	Itaporanga	230	7° 8'	37° 37'	PB
20	3854036	Juru	470	7° 18'	38° 10'	PB
21	3823822	Liuz Gomes	640	6° 25'	38° 24'	RN
22	3853467	Manaira	605	7° 42'	38° 10'	PB
23	3833835	Nazarezinho	265	6° 55'	38° 20'	PB
24	3843992	Nova Olinda	315	7° 28'	38° 3'	PB
25	3844448	Olho D'Água	275	7° 13'	37° 46'	PB
26	3844313	Piancó	250	7° 11'	37° 57'	PB
27	3833433	Pilões Açude	255	6° 40'	38° 31'	PB
28	3834538	Pombal	178	6° 46'	37° 49'	PB
29	3853499	Princesa Isabel	660	7° 44'	38° 1'	PB
30	3854428	Quixaba	500	7° 43'	37° 52'	PE
31	3843857	São Boa Ventura	300	7° 24'	38° 13'	PB
32	3833285	São Francisco	150	6° 37'	37° 5'	PB
33	3833639	São Gonçalo	235	6° 50'	38° 19'	PB
34	3833869	S. J. da Lagoa Tapada	260	6° 56'	38° 10'	PB
35	3843202	S. J. de Piranhas	300	7° 7'	38° 30'	PB
36	3833235	São Vicente Sítio	420	6° 37'	38° 20'	PB
37	3843537	Serra Grande	585	7° 15'	38° 19'	PB
38	3833554	Souza	200	6° 45'	38° 14'	PB
39	3853679	Triunfo	1010	7° 50'	38° 7'	PE
40	3823965	Tenente Ananias	380	6° 28'	38° 11'	RN
41	3833018	Uirauna	300	6° 31'	38° 25'	PB

Fonte: SUDENE (1990)

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DO MODELO NAVMO

4.1. Características Gerais do Modelo NAVMO

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

O *NAVMO* é um modelo diário, determinístico, conceitual e distribuído, o qual permite que sejam consideradas 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).

Possui algoritmos alternativos para a solução dos seguintes processos hidrológicos, (Braga, 2001):

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

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

Possui na sua concepção um processo de transformação da precipitação efetiva em escoamento superficial utilizando a equação do balanço hídrico que é aplicada à bacia através de *dois reservatórios hipotéticos*, um superficial e outro sub-superficial, e *uma função de recessão*, para representar o escoamento subterrâneo, que controlam o escoamento. Para avaliar a capacidade de armazenamento de água nos reservatórios, os

quais são dependentes do tipo e das condições de uso do solo, é utilizado o método da curva numérico (CN) desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos – SCS (McCuen, 1982). 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 da cada tipo de uso de solo. Pode-se, assim, considerar alterações naturais ou antropogênicas, para a avaliação das suas influências sobre o escoamento simulado na bacia hidrográfica, (Braga, 2001).

O cálculo da precipitação média no modelo NAVMO pode ser feito através da aplicação de duas metodologias, que 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.

A propagação do escoamento pode ser feita utilizando diferentes métodos como: o método de Williams (1969), o método de Kalinin-Miljukov (1958), apud Fread (1985), e o método da velocidade de fluxo. O modelo apresenta também critérios alternativos para avaliar a qualidade dos resultados como desvio médio, desvio hidrológico, centróides dos hidrogramas, volumes e picos (Figueiredo et al., 1999), além dos hidrogramas simulado e observado. O hidrograma de uma sub-bacia é à 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 utilizados como dados de entrada os valores de precipitação, evaporação, vazões observadas e as características físicas das sub-bacias como: área, cotas, declividades, características geométricas dos canais. O fluxograma do modelo NAVMO está apresentado na Figura 4.1.

4.2. Cálculo das Lâminas dos Escoamentos nas Sub-Bacias

O cálculo dos escoamentos no modelo *NAVMO* é feito individualmente para cada sub-bacia, considerando um sistema de reservatórios, conforme apresentado no esquema físico mostrado na *Figura 4.2*. Cada reservatório possui a função de controlar os componentes do fluxo total (Lopes, 1994).

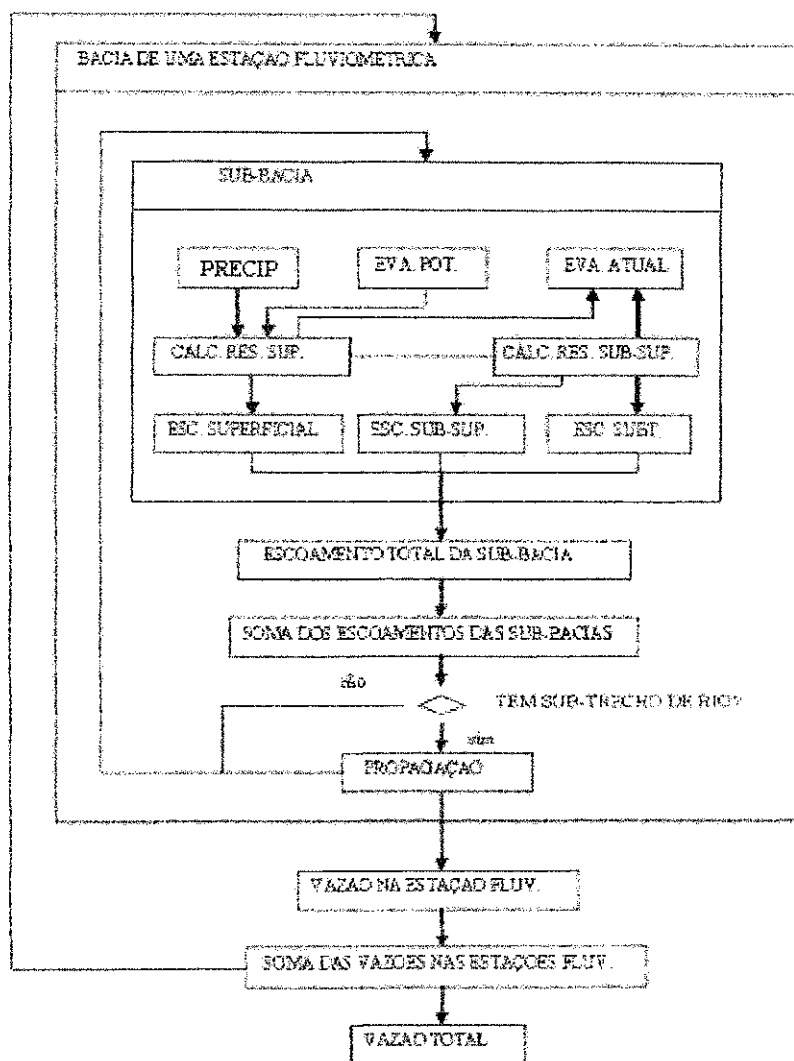


Figura 4.1. Fluxograma do modelo *NAVMO* (Kleeberg et al., 1989)

O *escoamento superficial* é calculado a partir do reservatório superficial, que é abastecido pela precipitação e sobre ele age a evaporação potencial. Quando o reservatório superior enche, ocorre o transbordamento, onde parte da lâmina do transbordamento do

reservatório superficial irá abastecer o reservatório sub-superficial e outra parte será transformada no escoamento direto após aplicação de uma função de transformação. Esta função de transformação do escoamento em hidrograma é uma função linear, tanto na ascensão quando na recessão.

O *escoamento sub-superficial* é calculado a partir do reservatório sub-superficial que é alimentado por uma parte do transbordo do reservatório superficial. A evaporação deste reservatório é calculada em função do seu déficit de umidade. Quando esta parcela é suficiente para encher o reservatório sub-superficial faz surgir uma lâmina de transbordamento, a qual se dividirá em duas lâminas, uma usada no cálculo do escoamento subterrâneo e a outra que será transformada no escoamento sub-superficial após aplicação de uma função de transformação. A função de transformação deste escoamento em hidrograma é feita através de uma função linear na ascensão e uma função exponencial na recessão.

O *escoamento subterrâneo* é calculado a partir do transbordo do reservatório sub-superficial, onde este transbordo é transformado em escoamento subterrâneo após a aplicação de uma função de transformação. Esta função de transformação é uma função de recessão.

O escoamento total simulado na saída da sub-bacia é a soma dos três escoamentos. Os hidrogramas em cada caso são obtidos através de funções de transformação e adicionados para que seja obtido o hidrograma total. Nas *Figuras 4.1 e 4.2* observam-se as diversas etapas dos processos considerados para o cálculo da vazão total.

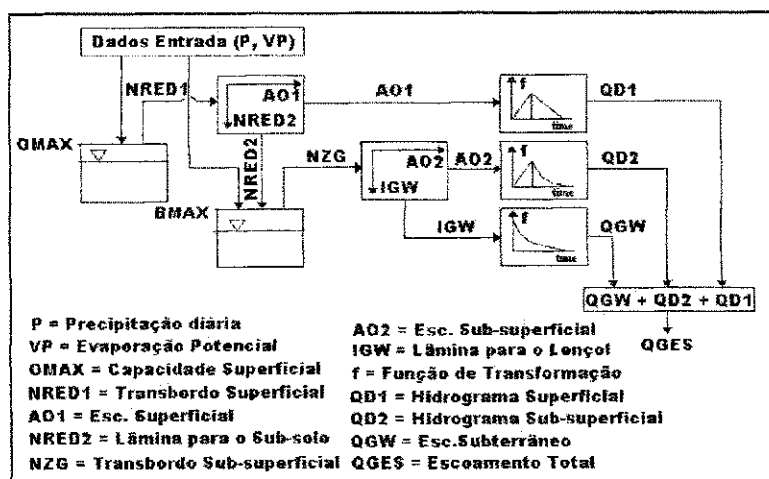


Figura 4.2. Representação dos processos de precipitação-vazão-evaporação no modelo NAVMO (Figueiredo e Braga, 2002).

4.3. Cálculo da Precipitação Média nas Sub-Bacias

O método do Ponto Reticular modificado ou Método modificado das quadriculas, 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 (4.1) apresentada abaixo:

$$N_{I,t} = \frac{\sum_{s=1}^4 N_{n,s,t} / D_s^{RAST}}{\sum_{s=1}^4 \sqrt{D_s^{RAST}}} \quad (\text{mm}) \quad (4.1)$$

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.

4.4. O Balanço Hídrico dos Reservatórios

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

Para o reservatório superficial:

$$N(t) - VA(t) - OD(t-1) > 0 \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.2)$$

Para o reservatório subterrâneo:

$$N(t) - VA(t) - OD(t-1) - AO1(t) - BD(t-1) > 0 \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.3)$$

onde:

N(t)	é a precipitação durante o intervalo de tempo t;
VA (t)	é a evaporação durante no intervalo de tempo t;
OD (t-1)	é o déficit de umidade no reservatório superficial antecedente;
BD (t-1)	é o déficit de umidade no reservatório subterrâneo antecedente;
AO1	é a lâmina do escoamento superficial direto.

Os déficits de umidade são:

$$\text{Na superfície: } OD(t) = OMAX - OAKT \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.4)$$

$$\text{No solo: } BD(t) = BMAX - BAKT \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.5)$$

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

4.5. Capacidades dos Reservatórios

As capacidades dos reservatórios superficial e sub-superficial, OMAX e BMAX, estão associados às propriedades físicas das bacias como solos, cobertura vegetal e relevo (Lopes, 1994). São espacialmente dependentes e não mudam com o evento de precipitação. São determinadas considerando-se a capacidade de armazenamento (S) do solo, calculada pelo método CN (curva-número) do SCS (McCuen, 1982), dada por:

$$S = 25,4 \times [(1000/CN) - 10] \quad (\text{mm}) \quad (4.6)$$

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

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

$$OMAX = 0,1 \times S \times e^{-4 \times GE \times GEF} \quad (\text{mm}) \quad (4.7)$$

O escoamento superficial só será gerado se as condições citadas anteriormente no *balanço hídrico dos reservatórios* forem satisfeitas, caso contrário nenhuma vazão ocorrerá nos reservatórios hipotéticos, e a água ficará armazenada aumentando a umidade do solo que será sujeita à evaporação depois do término da chuva.

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:

$$VA = VP \quad \text{enquanto } OD < OMAX \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.8)$$

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

Para $OD \geq OMAX$:

$$VA(t) = EET \cdot (VP) \cdot [(BMAX - BD(t-1)) / BMAX] \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.9)$$

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

$$\begin{aligned} \text{Para } VA(t) < BAKT(t-1) \\ \text{e } OD(t) \geq OMAX \quad \Rightarrow \quad BD(t) = BD(t-1) + VA(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Para } VA(t) > BAKT(t-1) \\ \text{e } OD(t) \geq OMAX \quad \Rightarrow \quad BD(t) = BMAX \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Para } VA(t) = VP \\ \text{e } OD(t) < OMAX \quad \Rightarrow \quad BD(t) = BD(t-1) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.12) \end{aligned}$$

O déficit do reservatório superficial é dado por:

$$OD(t) = OD(t-1) + VA(t) - N(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.13)$$

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

$$NRED1(t) = N(t) - OD(t-1) - VA(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.14)$$

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:

$$AO1 = ALFA \times NRED1(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.15)$$

$$NRED2(t) = (1 - ALFA) \times NRED1 \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.16)$$

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

$$BD(t) = BD(t-1) - NRED2(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.17)$$

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

$$NZG(t) = NRED2(t) - BD(t-1) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.18)$$

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

$$AO2(t) = BETA \times NZG(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.19)$$

$$IGW(t) = (1-BETA) \times NZG(t) \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.20)$$

onde:

BETA e ALFA são parâmetros calibráveis do modelo.

4.6. Transformação das Lâminas dos Escoamentos

A determinação do hidrograma do escoamento é feita através da soma dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, calculados através de funções de transformação conforme se explica a seguir.

4.6.1. Escoamento Superficial (QD1)

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

Para a subida:

$$QD1(t+J) = \frac{2 \times J \times AO1(t) \times AE}{MET1 \times MAX1} \quad (\text{m}^3/\text{dia}) \quad (4.21)$$

Para a recessão:

$$QD1(t+J) = \frac{2 \times (MAX1 - J) \times AO1(t) \times AE}{MAX1 \times (MAX1 - MET1)} \quad (\text{m}^3/\text{dia}) \quad (4.22)$$

onde:

AE é a área da sub-bacia

QD1(t+J) é o escoamento direto num intervalo de tempo t+J

MET1 é o tempo para atingir o pico do escoamento superficial

MAX1 é o tempo de base do escoamento superficial.

4.6.2. Escoamento Sub-superficial (QD2)

A transformação da lâmina do escoamento sub-superficial (AO2) em hidrograma é feita através de uma função linear para a subida do hidrograma e por uma função exponencial para a recessão, dadas por (Braga, 2001).

Para a subida:

$$QD2(t + J) = \frac{QM(t) \times J}{MET2} \quad (m^3/dia) \quad (4.23)$$

Para a recessão:

$$QD2(t + J) = QM(t) \times \left[1,1 \times e^{\frac{\ln 0,1}{1,1} \times \frac{J - MET2}{MAX2 - MET2}} - 0,1 \right] \quad (m^3/dia) \quad (4.24)$$

onde:

$$QM(t) = \frac{AO2(t) \times AE}{(MAX2 - MET2) \times (1 / \ln 1,1 - 0,1) + MET2 \times 0,5} \quad (m^3/dia) \quad (4.25)$$

Sendo:

MET 2 é o tempo para atingir o pico do escoamento sub-superficial

MAX 2 é o tempo de base do escoamento sub-superficial

4.6.3. Escoamento Subterrâneo (QGES):

A transformação da lâmina do escoamento subterrâneo em hidrograma é feita por uma função para a recessão, dada por:

$$QGW(t) = AGW(t) \cdot AE \quad (m^3/dia) \quad (4.26)$$

onde: AGW (t) é dado por:

$$AGW(t) = \frac{AGW(t-1)}{1 + 1/K} + \frac{IGW(t)}{1 + K} \quad (\text{mm/dia}) \quad (4.27)$$

Sendo:

- K é a constante do reservatório a ser calibrada
 IGW (t) é a infiltração no lençol subterrâneo.
 AE é a área da sub-bacia

4.6.4. Escoamento Total (QGES):

A soma das vazões superficial, sub-superficial e subterrâneo dividido pelo tempo de um dia em segundos fornece o escoamento total médio diário:

$$QGES(t) = \frac{QDI(t) + QDZ(t) + QGW(t)}{86400} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.28)$$

4.7. Propagação do Escoamento nos Canais

O hidrograma de uma sub-bacia serve como hidrograma de entrada do trecho de rio da bacia subsequente (Kleeberg et. al., 1989). A propagação do escoamento nos trechos de rios pode ser feita pelas seguintes metodologias, (Braga, 2001):

- ❖ Método da Velocidade de Fluxo
- ❖ Método de Williams (1969)
- ❖ Método de Kalinin-Miljukov (1958, apud Fread, 1985).

Todos os métodos são hidrológicos e fundamentados no método de Munkingum. Vai-se aplicar o método de Williams, onde a retenção no trecho de rio é descrita por reservatórios cujas constantes dependem tanto da vazão na entrada quanto na saída do trecho do rio.

A propagação do escoamento total é feita nos trechos de rios cuja seção é considerada trapezoidal conforme mostrado na Figura 4.3. A equação de Manning é utilizada para o cálculo das velocidades de escoamento na calha principal e nos planos de inundação, as quais são multiplicadas por três coeficientes de ajuste; EKM (usado para o cálculo da velocidade no canal principal), EKL e EKR (usados para o cálculo das velocidades nos planos de inundação esquerdo e direito, respectivamente).

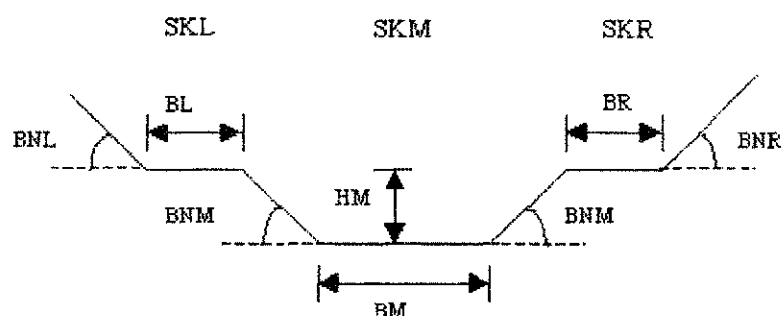


Figura 4.3. Seção transversal do rio (Kleeberg et al., 1989).

Definição de termos:

BM é a largura da calha principal (m)

HM é a altura da calha principal (m)

BL é a largura do plano de inundação esquerdo (m)

BR é a largura do plano de inundação direito (m)

BNM é a declividade das paredes laterais da calha do rio principal

BNL é a declividade da parede lateral da margem esquerda

BNR é a declividade da parede lateral da margem direita

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

SKL é igual a $(1/n)$, onde n é o coeficiente de Manning da margem esquerda.

SKR é igual a $(1/n)$, onde n é o coeficiente de Manning da margem direita.

4.8. Parâmetros Calibráveis do Modelo NAVMO

Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros calibráveis do modelo NAVMO e os seus respectivos significados.

Tabela 4.1. 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 ($m^3/seg/Km^2$)
CN*	Parâmetro que define a capacidade de armazenamento do solo (mm)

(*) o parâmetro CN é para ser definido em termos do solo e seu uso; a falta da informação sobre o uso do solo impõe que o mesmo seja calibrado.

4.9. Resultados Gerados pelo Modelo NAVMO

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

- ❖ Hidrogramas do escoamento diário de cada ano;
- ❖ Volumes anuais dos anos simulados;
- ❖ Vazões máximas anuais dos anos simulados;
- ❖ Desvio médio;
- ❖ Desvio hidrológico;
- ❖ Diferença de picos de vazão.

4.10. Pesquisas Recentes Utilizando o Modelo NAVMO

No Brasil este modelo foi inicialmente utilizado por Figueiredo et al. (1991 e 1993). Eles o utilizaram num estudo das prováveis causas da diminuição do volume de armazenamento do açude público de Sumé, o qual capta água da bacia hidrográfica do Rio Sucurú (748,6 km²). Eles concluíram que o problema de enchimento do açude não é devido

à variação da pluviosidade, e sim devido à presença de armazenamentos a montante do reservatório.

Na literatura encontram-se outras aplicações deste modelo, como os trabalhos realizados por:

- ❖ *Lopes (1994)*, que calibrou e validou o modelo NAVMO para avaliar o escoamento na bacia do rio Piancó (4550 km²), encontrando bons resultados;
- ❖ *Figueiredo e Srinivasan (1999)*, avaliaram os impactos do uso do solo e da presença dos açudes sobre o escoamento superficial a montante do açude público de Sumé;
- ❖ *Braga (2001)*, estudou os efeitos de fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento através de aplicações do modelo NAVMO à bacia do alto rio Piranhas, concluindo que estes efeitos afetam diretamente a formação do escoamento nas bacias da região. *Figueiredo e Braga (2002)*, discutiram e apresentaram a calibração e os resultados da validação dos parâmetros mais sensíveis do modelo para aquela bacia;
- ❖ *Lacerda Júnior (2002)*, utilizou este modelo para fazer uma avaliação dos efeitos de escala e uso do solo na parametrização do mesmo com dados de bacias do cariri paraibano, concluindo que os parâmetros mais sensíveis do modelo sofrem variação quando aumenta o tamanho da bacia;
- ❖ *Furtunato (2004)*, estudou os efeitos de fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento através de aplicações do modelo NAVMO à bacia do alto rio Paraíba, apresentando a calibração e os resultados da validação dos parâmetros mais sensíveis do modelo para aquela bacia, concluindo que o modelo simula razoavelmente o escoamento, sendo afetado principalmente pela variabilidade conjunta da precipitação e evaporação.

CAPÍTULO 5

CALIBRAÇÃO DO MODELO NAVMO

5.1. Introdução

O modelo hidrológico é uma ferramenta que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (Tucci, 1998). Para se processar as informações dos modelos podem se realizar simulações que geram respostas e se obtém previsões, sendo estas importantes para análises das mudanças do comportamento da bacia hidrográfica e da disponibilidade de recursos hídricos.

As principais limitações dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, bem como a dificuldade em formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial das variáveis e dos fenômenos.

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

5.2.1. Considerações Gerais

O processo de calibração envolve a seleção dos valores para os parâmetros do modelo tal que simule, o mais próximo possível, o escoamento nas bacias de uma região (Sorooshian e Gupta, 1995). A calibração é, portanto, um processo de ajuste, onde se busca igualar os hidrogramas calibrados dos observados, uma fase que contribui significativamente para a precisão dos modelos hidrológicos (Diniz, 1994). A calibração

pode ser feita por métodos como o da tentativa e erro ou por técnicas de otimização (Silva e Ewen, 2000).

5.2.2. 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.

5.2.3. Calibração do Modelo NAVMO

O trabalho realizado por Lopes (1994) foi pioneiro com o uso do modelo NAVMO, o qual foi calibrado para a bacia do Rio Piancó (4.550 km²). Ele trabalhou com uma série de dados fluviométricos de 1964 a 1983 e dados de 16 postos pluviométricos. A calibração realizada por Lopes foi feita anualmente por tentativa e erro, observando-se as vazões máximas, a forma do hidrograma como também o volume total do fluxo. Os resultados de Lopes foram utilizados por Braga (2001) que usou parâmetros médios para gerar o escoamento nas sub-bacias do alto Rio Alto Piranhas. Braga não calibrou os parâmetros para as demais sub-bacias da região, nem estudou o efeito de escala (Simanton et al., 1996; Figueiredo, 1998). Por isto Braga (2001) recomendou uma nova calibração dos parâmetros levando-se em consideração todas as sub-bacias. Na presente pesquisa, devido a necessidade de se ter melhor aproximação dos valores simulados, optou-se por uma calibração dos parâmetros do modelo ano a ano, comparando-se hidrogramas diários, volumes e vazões máximas anuais simuladas e observadas nas varias sub-bacias da região. Para tanto foram aproveitados os trabalhos de modelagem das bacias (Figuras 5.1.a e 5.1.b) feitos por Braga (2001). A Tabela 5.1 mostra as sub-bacias estudadas e em qual sub-bacia a seção de medição se localiza. A Tabela 5.2. mostra os valores médios dos parâmetros que não apresentam sensibilidade, os quais foram estabelecidos por Lopes para a bacia de Piancó. As Figuras 5.1.a e 5.1.b. mostram o esquema linear da subdivisão da região em 55 sub-bacias; 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. 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.

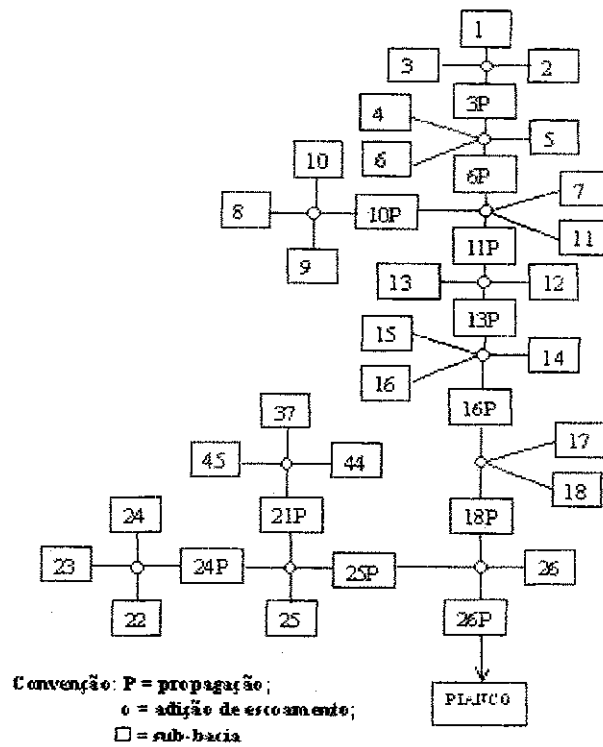


Figura 5.1.a. Esquema linear do rio Piancó/Piranhas até a sub-bacias 26.

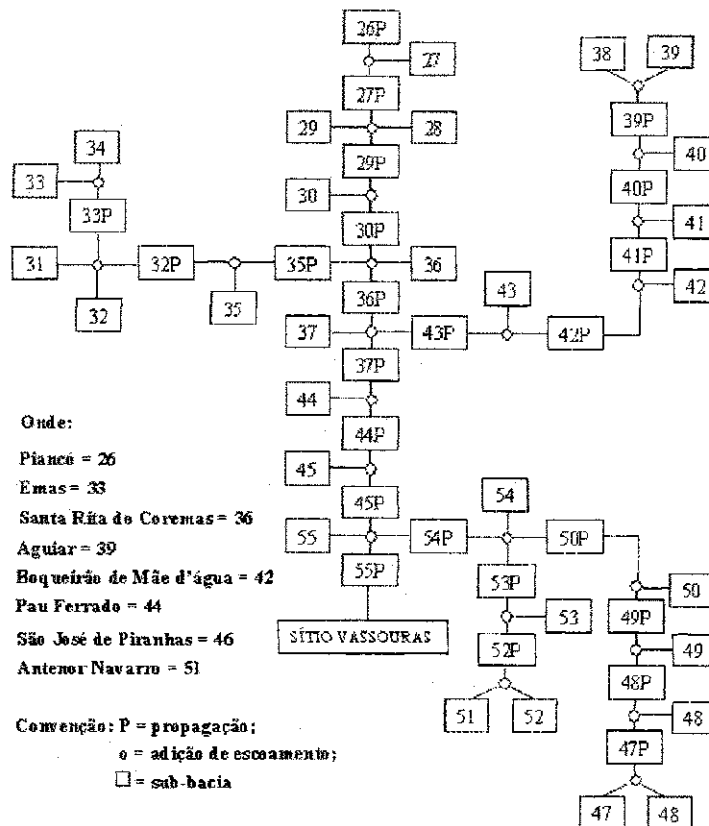


Figura 5.1.b. Esquema linear do rio Piancó/Piranhas da Sub-bacia 26 a 55.

Tabela 5.1. Sub-bacias onde se localizam os postos fluviométricos conforme a discretização da região

Postos Fluviométricos	Área (km ²)	Em 55 sub-bacias
Piancó (1964 a 1983)	4.550	26
Emas (1964 a 1972)	530	33
Sta. Rita de Coremas (1913, 1914; 1921 a 1941)	6.869	36
Aguiar (1969 e 1970)	495	39
Boqueirão de Mãe d'água (1923 a 1946)	1.063	42
Pau Ferrado (1967, 1968, 1971, 1973 a 1975)	8.050	44
S. José de Piranhas (1912 a 1915; 1921 a 1929)	475	46
Antenor Navarro (1964 a 1972)	1.580	51
Sítio Vassouras (1963 a 1985)	14.850	55

Tabela 5.2. Valores dos Parâmetros pouco sensíveis do modelo NAVMO para a bacia de Piancó.

MET1	MET2	MAX1	MAX2	KG	EKM	EKL	EKR	BETA	BFD	QBSP
0,40	1,00	2,00	7,00	250	60	60	60	0,10	95	0,0

Fonte: Lopes (1994).

Procedem-se, então, com uma nova calibração dos parâmetros que mais afetam o escoamento no modelo NAVMO (ALFA, EET e CN), considerando a variabilidade do clima e uso do solo sobre o escoamento na bacia do Alto Piranhas (~15.000km²) e suas sub-bacias. Os demais parâmetros foram mantidos conforme os resultados de Lopes (1994), conforme pode ser visto na Tabela 5.2. Foram utilizados dados diários das nove (9) estações fluviométricas na região (Tabela 5.1.) e de 41 postos pluviométricos (ver Tabela 3.5 do capítulo 3). Para a variabilidade do clima os anos foram classificados (Figueiredo e Srinivasan, 1999) em anos secos ($P < 600$ mm/ano), normais ($600 \leq P \leq 800$ mm/ano) e úmidos ($P > 800$ mm/ano).

Os valores de ALFA, EET e de CN foram calibrados por tentativa e erro, comparando-se hidrogramas, vazões máximas e volumes anuais. Foram utilizados os dados de evapotranspiração potencial constantes da Tabela 3.2 do capítulo 3, a partir dos quais o parâmetro EET pode ser ajustado conforme os critérios definidos (vazão máxima, volumes anuais e hidrogramas). Os valores calibrados de ALFA, EET e CN, tanto pelos picos quanto pelos volumes, encontram-se nas Tabelas 5.3 a 5.11 para as nove bacias. Todas as sub-bacias foram calibradas de maneira independente, pois possuíam dados com poucos períodos coincidentes.

Tabela 5.3. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Piancó.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1982	6,20	0,290	46,00	9,00	0,100	46,00	Seco
Média	6,20	0,290	46,00	9,00	0,100	46,00	
1972	4,60	0,160	49,00	8,00	0,104	48,00	Normal
1978	6,50	0,260	50,00	7,00	0,178	50,00	Normal
1979	6,00	0,318	56,00	7,50	0,210	60,00	Normal
1980	5,80	0,372	45,00	8,00	0,249	50,00	Normal
1981	7,00	0,150	40,00	8,00	0,202	49,00	Normal
1983	7,50	0,300	48,00	8,30	0,165	50,00	Normal
Média	6,23	0,260	48,00	7,80	0,185	51,17	
1964	3,00	0,288	52,00	7,00	0,178	50,00	Úmido
1965	6,00	0,125	50,00	9,90	0,125	50,00	Úmido
1967	5,60	0,235	47,00	7,70	0,309	50,00	Úmido
1968	6,20	0,133	51,00	9,00	0,020	48,00	Úmido
1971	5,75	0,050	48,00	8,50	0,175	50,00	Úmido
1973	5,00	0,225	52,00	8,20	0,200	49,00	Úmido
1974	3,00	0,338	65,00	4,80	0,200	50,00	Úmido
1975	4,20	0,195	56,00	8,00	0,160	50,00	Úmido
1977	3,34	0,393	65,00	8,00	0,220	51,00	Úmido
Média	4,68	0,220	54,00	7,90	0,176	49,78	

Tabela 5.4. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Emas.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1969	7,00	0,200	56,00	7,40	0,100	55,00	Normal
1972	6,00	0,110	45,00	9,00	0,035	37,00	Normal
Média	6,50	0,155	50,50	8,20	0,068	46,00	
1964	6,70	0,230	65,00	7,60	0,022	60,00	Úmido
1965	6,50	0,060	62,00	5,70	0,016	61,00	Úmido
1967	7,00	0,200	40,00	8,00	0,080	35,00	Úmido
1968	6,50	0,100	50,00	7,80	0,010	39,00	Úmido
1970	6,00	0,240	50,00	8,60	0,006	50,00	Úmido
1971	7,70	0,200	39,00	9,15	0,010	30,00	Úmido
Média	6,73	0,172	51,00	7,81	0,024	45,83	

Tabela 5.5. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Santa Rita do Coremas.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1930	4,00	0,350	60,00	7,00	0,080	50,00	Seco
1931	3,80	0,341	50,00	5,80	0,200	56,00	Seco
1932	4,80	0,280	50,00	9,00	0,021	45,00	Seco
1936	3,00	0,600	56,00	3,00	0,400	56,00	Seco
Média	3,90	0,393	54,00	6,20	0,175	51,75	
1923	5,80	0,241	56,00	5,80	0,200	56,00	Normal
1927	5,00	0,220	50,00	5,00	0,240	50,00	Normal
1928	7,00	0,300	50,00	7,00	0,200	50,00	Normal
1933	5,00	0,250	56,00	5,00	0,200	56,00	Normal
Média	5,70	0,253	53,00	5,70	0,210	53,00	
1914	5,15	0,150	45,00	5,15	0,100	45,00	Úmido
1921	7,00	0,100	56,00	7,00	0,120	56,00	Úmido
1922	6,00	0,147	56,00	6,00	0,140	56,00	Úmido
1924	7,80	0,100	50,00	5,80	0,250	56,00	Úmido
1925	6,50	0,100	56,00	5,50	0,120	56,00	Úmido
1926	6,00	0,150	50,00	6,70	0,100	50,00	Úmido
1929	7,00	0,200	50,00	7,80	0,200	50,00	Úmido
1934	5,80	0,200	56,00	4,80	0,200	56,00	Úmido
1935	7,80	0,100	50,00	6,80	0,100	50,00	Úmido
Média	6,56	0,139	52,11	6,17	0,148	52,78	

Tabela 5.6. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Aguiar.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1969	6,60	0,160	59,00	7,50	0,120	54,00	Normal
Média	6,60	0,160	59,00	7,50	0,120	54,00	
1970	5,80	0,140	49,00	8,20	0,100	40,00	Úmido
Média	5,80	0,140	49,00	8,20	0,100	40,00	

Tabela 5.7. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Boqueirão Mãe D'Água.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1930	5,50	0,650	60,00	8,50	0,250	56,00	Seco
1931	5,50	0,200	56,00	6,50	0,120	56,00	Seco
1932	7,00	0,085	45,00	9,00	0,015	35,00	Seco
1936	2,50	0,885	56,00	2,50	0,485	56,00	Seco
1942	3,00	0,750	65,00	6,00	0,250	56,00	Seco
Média	4,70	0,514	56,40	6,50	0,224	51,80	
1923	3,00	0,540	56,00	5,00	0,240	56,00	Normal
1927	5,50	0,285	56,00	3,50	0,600	60,00	Normal
1928	3,50	0,600	60,00	8,50	0,185	56,00	Normal
1933	5,00	0,300	56,00	3,00	0,600	70,00	Normal
1937	3,00	0,550	65,00	3,50	0,485	56,00	Normal
1938	8,50	0,185	56,00	6,50	0,200	56,00	Normal
1939	6,50	0,285	56,00	6,50	0,285	56,00	Normal
1941	1,50	0,955	56,00	6,50	0,250	56,00	Normal
1943	5,50	0,300	56,00	3,50	0,500	56,00	Normal
1944	4,00	0,585	56,00	4,50	0,485	56,00	Normal
1946	6,00	0,385	56,00	8,50	0,185	50,00	Normal
Média	4,73	0,452	57,18	5,41	0,365	57,09	
1924	0,50	0,985	56,00	0,50	0,985	56,00	Úmido
1925	1,50	0,754	75,00	5,50	0,485	75,00	Úmido
1926	2,50	0,585	75,00	2,50	0,585	75,00	Úmido
1929	4,50	0,385	65,00	1,50	0,885	75,00	Úmido
1934	3,50	0,485	60,00	2,50	0,830	80,00	Úmido
1935	1,50	0,885	56,00	4,50	0,385	56,00	Úmido
1940	1,50	0,985	65,00	5,50	0,385	65,00	Úmido
1945	1,50	0,785	65,00	3,00	0,400	65,00	Úmido
Média	2,13	0,731	64,63	3,19	0,62	68,38	

Tabela 5.8. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Pau Ferrado.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1967	9,90	0,005	47,00	9,90	0,005	47,00	Úmido
1968	9,90	0,005	47,00	9,20	0,025	47,00	Úmido
1971	9,70	0,025	47,00	9,60	0,025	47,00	Úmido
1973	9,80	0,025	33,00	9,70	0,025	47,00	Úmido
1974	8,50	0,150	56,00	8,50	0,150	56,00	Úmido
1975	9,00	0,100	47,00	8,50	0,150	47,00	Úmido
Média	9,47	0,052	46,17	9,23	0,063	48,50	

Tabela 5.9. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para São José de Piranhas.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1915	3,00	0,685	95,00	5,00	0,245	56,00	Seco
1930	6,50	0,230	60,00	8,50	0,085	56,00	Seco
1931	4,50	0,585	70,00	5,50	0,425	56,00	Seco
1932	5,50	0,485	56,00	5,50	0,485	56,00	Seco
Média	4,88	0,496	70,25	6,13	0,310	56,00	
1923	5,00	0,485	70,0	5,00	0,485	70,00	Normal
1927	0,10	0,999	65,0	4,00	0,700	80,00	Normal
1928	5,00	0,500	72,0	5,00	0,500	72,00	Normal
1933	1,00	0,999	90,0	2,50	0,855	90,00	Normal
Média	2,78	0,746	74,25	4,13	0,635	78,00	
1912	1,00	0,999	95,00	1,00	0,985	95,00	Úmido
1913	1,00	0,999	65,00	5,50	0,300	65,00	Úmido
1914	4,00	0,385	66,00	4,00	0,200	66,00	Úmido
1921	4,00	0,385	70,00	3,50	0,400	70,00	Úmido
1922	2,50	0,700	56,00	5,50	0,400	56,00	Úmido
1924	5,50	0,385	75,00	5,50	0,385	75,00	Úmido
1925	4,50	0,485	70,00	4,50	0,485	70,00	Úmido
1926	1,00	0,985	90,00	5,00	0,385	72,00	Úmido
1929	1,50	0,800	80,00	4,50	0,400	72,00	Úmido
1934	1,00	0,955	90,00	2,00	0,755	90,00	Úmido
1935	2,00	0,885	65,00	2,00	0,585	65,00	Úmido
Média	2,55	0,724	74,73	3,91	0,480	72,36	

Tabela 5.10. Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Antenor Navarro.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1969	7,50	0,200	56,00	8,50	0,175	50,00	Normal
1972	7,40	0,030	35,00	6,50	0,030	50,00	Normal
Média	7,45	0,115	45,50	7,50	0,103	50,00	
1964	9,00	0,011	38,00	9,50	0,026	40,00	Úmido
1965	4,65	0,100	56,00	6,50	0,240	58,00	Úmido
1967	5,00	0,200	45,00	4,80	0,300	45,00	Úmido
1968	5,80	0,010	56,00	4,50	0,020	48,00	Úmido
1970	9,70	0,045	48,00	9,06	0,070	50,00	Úmido
1971	9,00	0,050	45,00	7,28	0,080	49,00	Úmido
Média	7,19	0,069	48,00	6,94	0,123	48,33	

Tabela 5.11 Valores de ALFA, EET e CN calibrados para Sítio Vassouras.

Ano	Vazão			Volume			Classificação
	EET	ALFA	CN	EET	ALFA	CN	
1982	8,28	0,085	45,0	8,00	0,110	45,0	Seco
Média	8,28	0,085	45,0	8,00	0,110	45,0	
1969	9,98	0,003	40,00	9,88	0,005	33,00	Normal
1972	8,28	0,065	46,00	8,28	0,085	46,00	Normal
1976	8,00	0,155	46,00	7,28	0,185	46,00	Normal
1978	8,00	0,155	56,00	6,00	0,155	58,00	Normal
1979	6,50	0,145	60,00	6,50	0,105	60,00	Normal
1980	6,00	0,185	56,00	6,50	0,185	56,00	Normal
1981	7,28	0,105	49,00	7,00	0,105	49,00	Normal
1983	8,28	0,080	46,00	8,00	0,095	46,00	Normal
Média	7,79	0,112	49,88	7,43	0,115	49,25	
1963	8,28	0,085	56,00	8,28	0,085	56,00	Úmido
1964	7,88	0,185	56,00	8,28	0,085	56,00	Úmido
1965	6,28	0,100	50,00	6,28	0,100	50,00	Úmido
1967	8,28	0,085	46,00	7,58	0,085	46,00	Úmido
1968	8,28	0,085	46,00	8,28	0,085	46,00	Úmido
1970	8,28	0,055	46,00	8,28	0,045	46,00	Úmido
1971	7,28	0,045	46,00	7,28	0,045	48,00	Úmido
1973	9,00	0,025	42,00	8,28	0,085	42,00	Úmido
1974	5,00	0,250	56,00	5,00	0,250	56,00	Úmido
1975	8,28	0,085	46,00	6,50	0,095	44,00	Úmido
1977	4,00	0,350	60,00	5,58	0,155	50,00	Úmido
1984	6,00	0,155	48,00	7,00	0,085	48,00	Úmido
1985	5,28	0,185	49,00	5,80	0,155	48,00	Úmido
Média	7,09	0,130	49,77	7,11	0,104	48,92	

5.3. Análise e discussão da calibração

Os resultados serão mostrados e discutidos neste item através de gráficos comparativos valores anuais simulados com os valores anuais observados e dos hidrogramas diários simulados e observados. As análises serão feitas para cada bacia.

5.3.1. Piancó – 4550 km² (1964 a 1983)

As Figuras 5.2 a 5.5 mostram a comparação entre os valores observados de vazões máximas e volumes com os simulados. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois apresentaram boa correlação com um coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,97 (Figuras 5.2 e 5.3); a comparação com os volumes observados resultou num melhor

coeficiente de determinação do que a comparação com as vazões máximas, embora a dispersão tenha sido maior para os volumes.

Os hidrogramas simulados representaram bem os hidrogramas observados, pois no hidrograma simulado pelo pico a vazão máxima está bem representada (Figura 5.4). No hidrograma simulado pelo volume as vazões foram subestimadas, mas seguiram a forma do hidrograma observado (Figura 5.5).

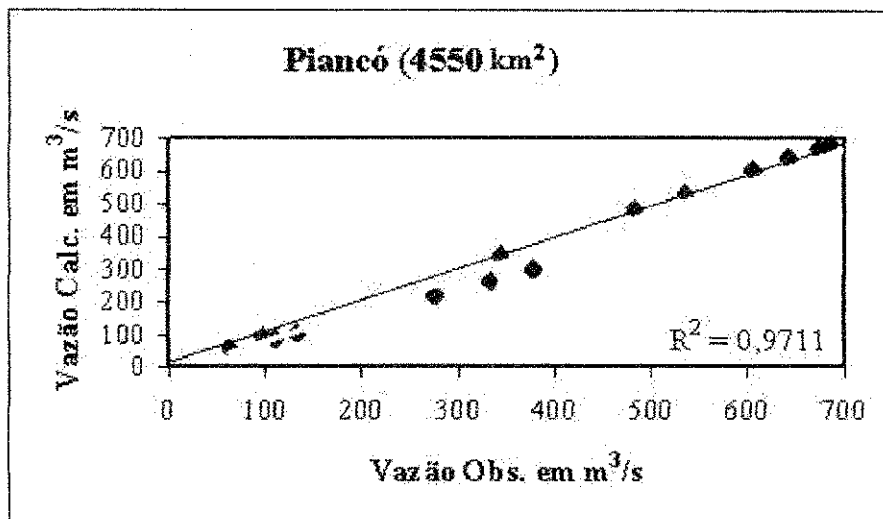


Figura 5.2. Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Piancó

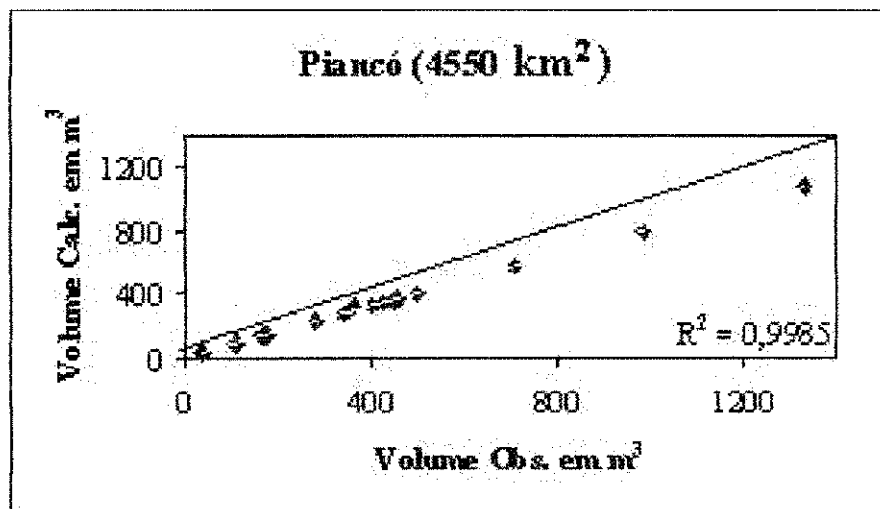


Figura 5.3. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Piancó

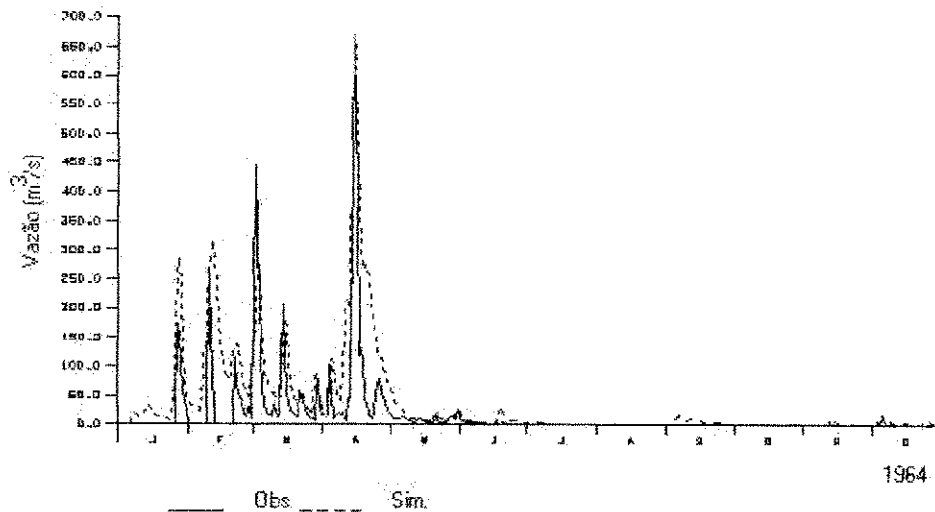


Figura 5.4. Hidrogramas observados na bacia de Piancó e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

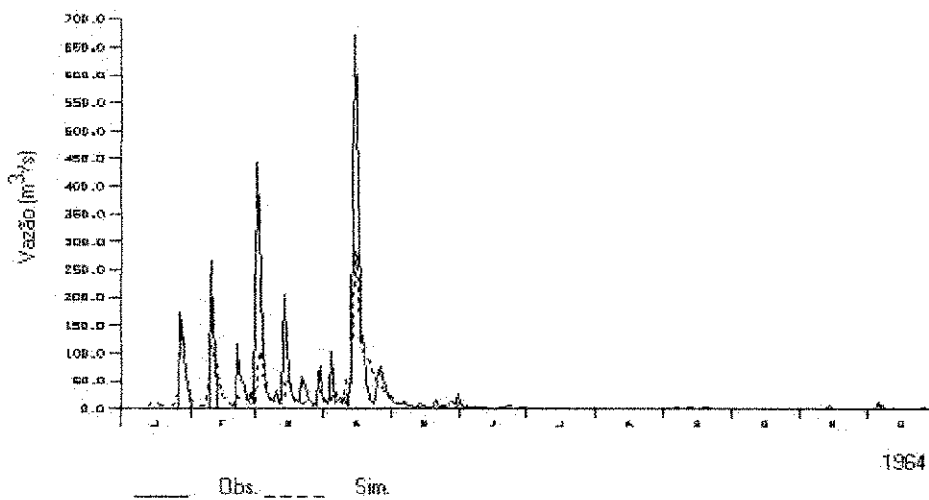


Figura 5.5. Hidrogramas observados na bacia de Piancó e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.3.2. Emas – 530 km² (1964 a 1972)

As Figuras 5.6 a 5.9 mostram alguns resultados obtidos com os parâmetros calibrados. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois apresentaram boa correlação com os dados observados, com valores do coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99 (Figuras 5.6 e 5.7), porém pode-se notar que nas duas comparações houve uma super estimação dos valores.

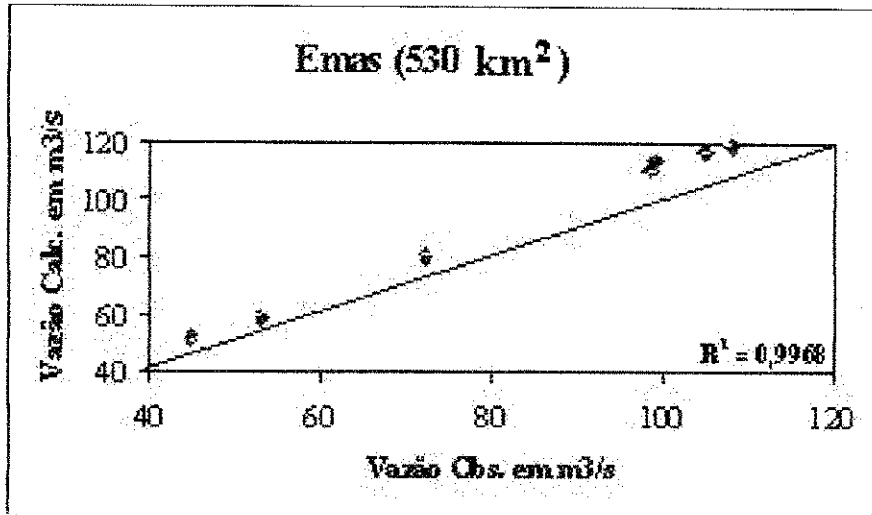


Figura 5.6. Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Emas.

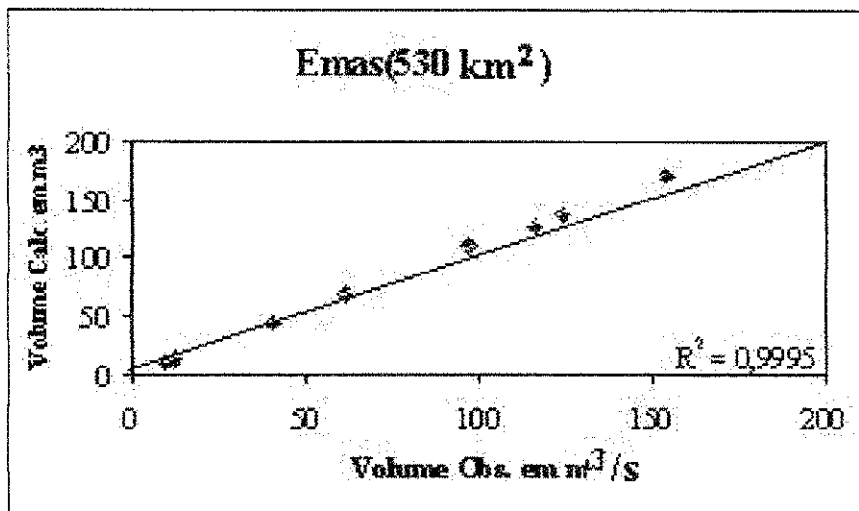


Figura 5.7. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Emas.

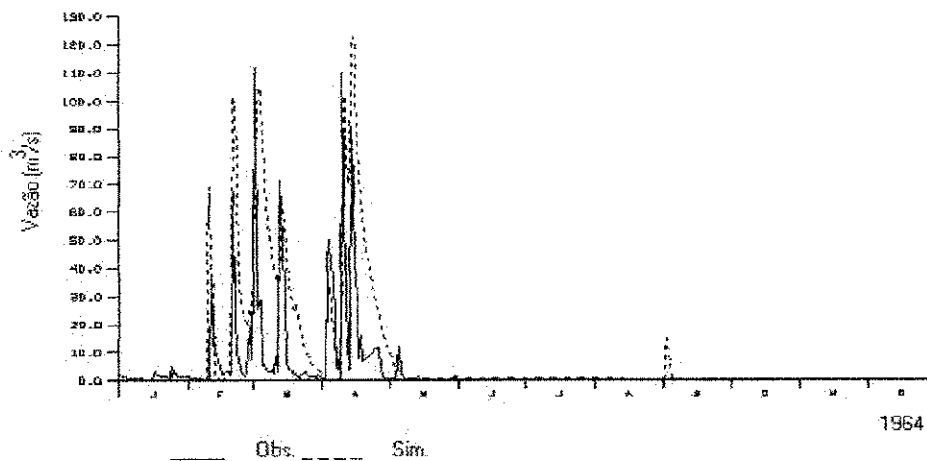


Figura 5.8. Hidrogramas observados na bacia de Emas e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

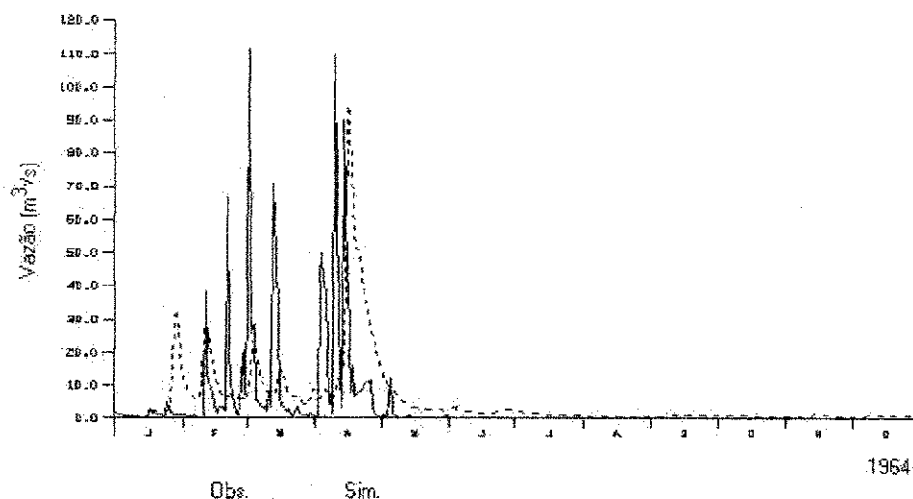


Figura 5.9. Hidrogramas observados na bacia de Emas e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

Os hidrogramas simulados representaram razoavelmente os hidrogramas observados, porém, em alguns casos, observou-se uma defasagem no tempo com relação às vazões máximas (Figuras 5.8 e 5.9), podendo-se notar que nos dois hidrogramas simulados tem um tempo de recessão maior do que nos hidrogramas observados, onde há uma queda brusca nos valores.

5.3.3. Santa Rita do Coremas – 6869 km² (1914, 1921 a 1941)

As Figuras 5.10 a 5.13 mostram alguns resultados obtidos com os parâmetros calibrados. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois apresentaram boa correlação com os dados observados, com valores do coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,97 (Figuras 5.10 e 5.11), porém pode-se notar que nas duas comparações houve uma subestimação dos valores.

Os hidrogramas simulados não representaram muito bem os hidrogramas observados, pois pode-se observar uma defasagem no tempo com relação às vazões máximas e uma subestimação nas mesmas em relação ao volume, embora o formato dos hidrogramas simulados estão parecidos com os dos observados (Figuras 5.12 e 5.13).

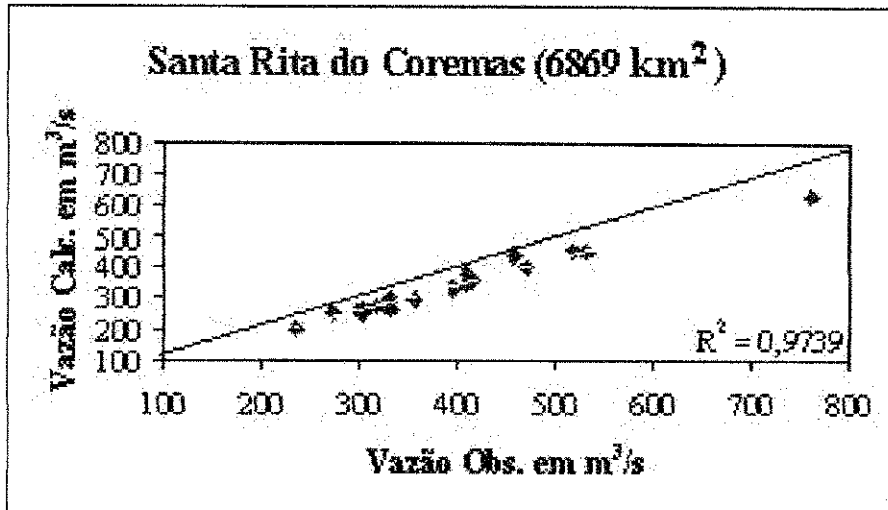


Figura 5.10. Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Santa Rita do Coremas.

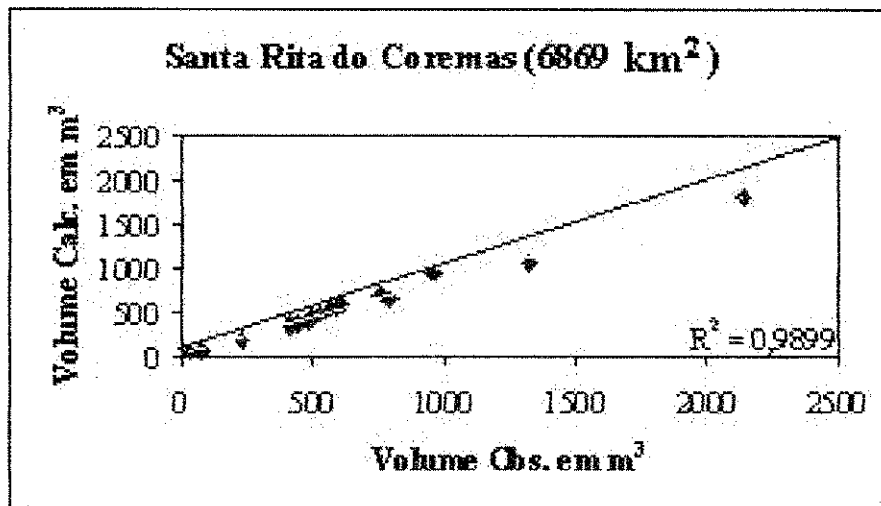


Figura 5.11. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Santa Rita do Coremas.

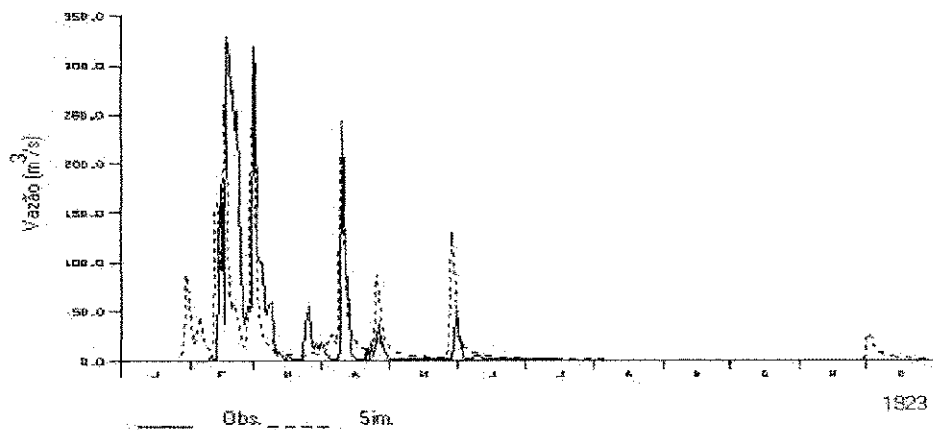


Figura 5.12. Hidrogramas observados na bacia de Santa Rita do Coremas e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

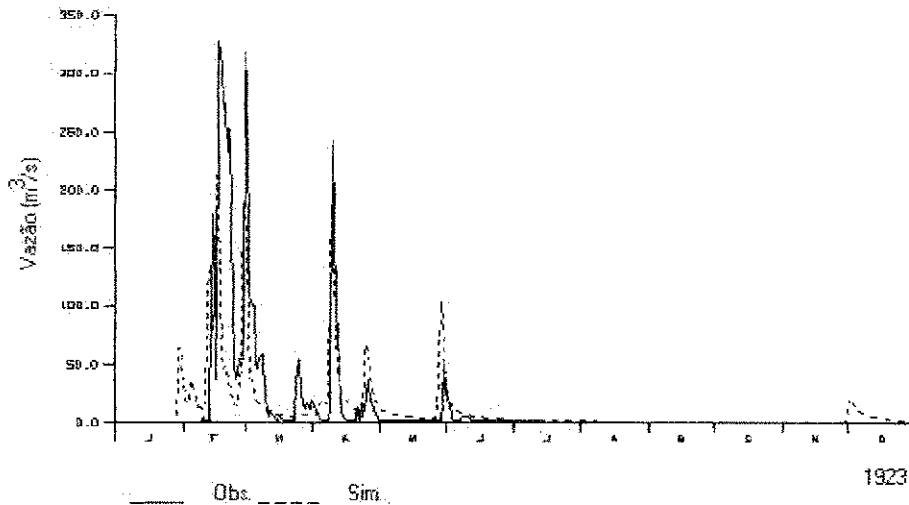


Figura 5.13. Hidrogramas observados na bacia de Santa Rita do Coremas e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.3.4. Aguiar – 495 km² (1969 e 1970)

A bacia do posto fluviométrico de Aguiar possuía apenas dois anos e com registros apenas para o período entre os meses de março a maio. Desse modo, os parâmetros não são representativos e os resultados não serão mostrados, em termos de volume e vazão máxima anual. Uma comparação dos hidrogramas diários pode ser vista nas Figuras 5.14 e 5.15, os quais não representaram bem os hidrogramas observados, pois em alguns casos, pode-se notar uma subestimação das vazões máximas, tanto para os hidrogramas simulados com os parâmetros calibrados pelos picos quanto pelos volumes.

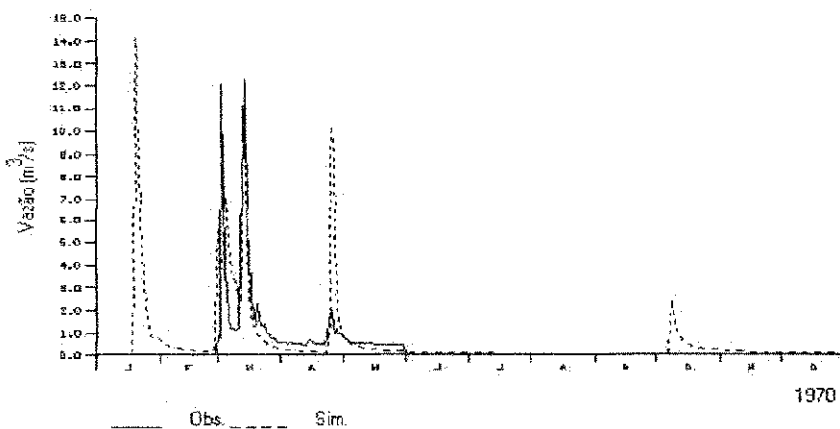


Figura 5.14. Hidrogramas observados na bacia de Aguiar e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

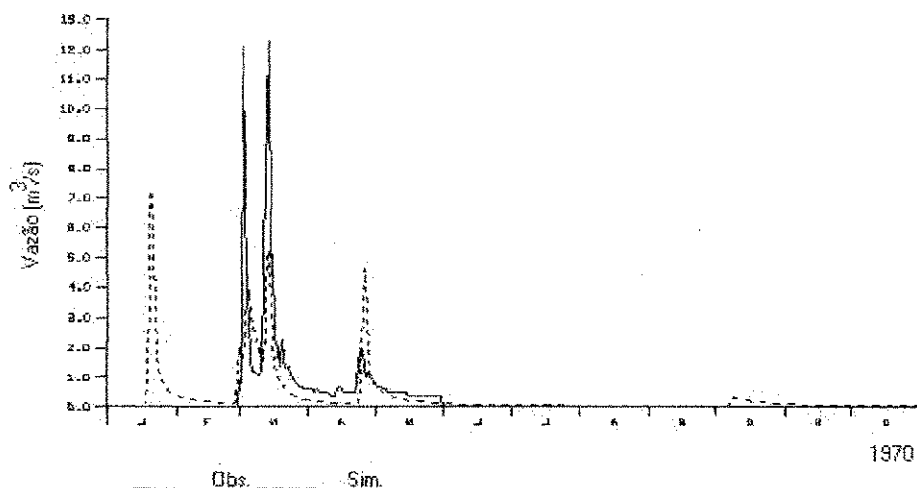


Figura 5.15. Hidrogramas observados na bacia de Aguiar e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.3.5. Boqueirão de Mãe D'Água – 1063 km² (1923 a 1946)

Esta é uma bacia cujos dados foram retirados do posto de observação que era localizado onde foi construído o Açude de Mãe d'água. Sendo os dados do posto antigos, a calibração dos parâmetros apresentou uma discrepância em relação aos parâmetros das outras sub-bacias com dados mais recentes.

As Figuras 5.16 a 5.19 mostram alguns resultados obtidos com os parâmetros calibrados. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,77 em relação às vazões e 0,99 para os volumes (Figuras 5.16 e 5.17).

Os hidrogramas simulados não representaram bem os hidrogramas observados, pois em alguns casos, observou-se uma subestimação das vazões máximas, tanto para os hidrogramas simulados com os parâmetros calibrados pelos quanto pelos volumes anuais, além de se observar uma defasagem no tempo com relação às vazões máximas (Figuras 5.18 e 5.19).

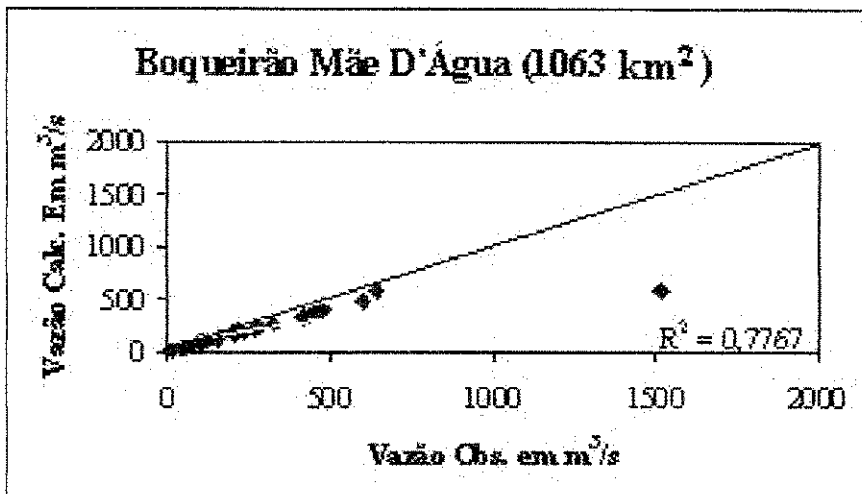


Figura 5.16. Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Boqueirão Mãe D'Água.

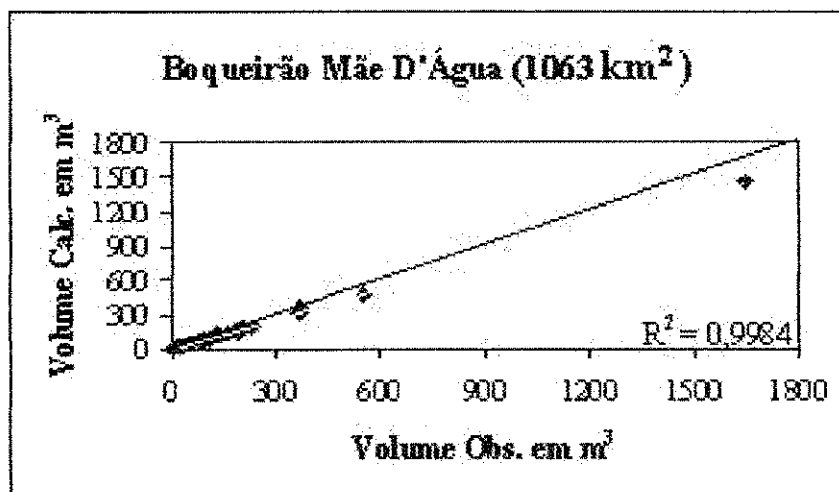


Figura 5.17. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Boqueirão Mãe D'Água.

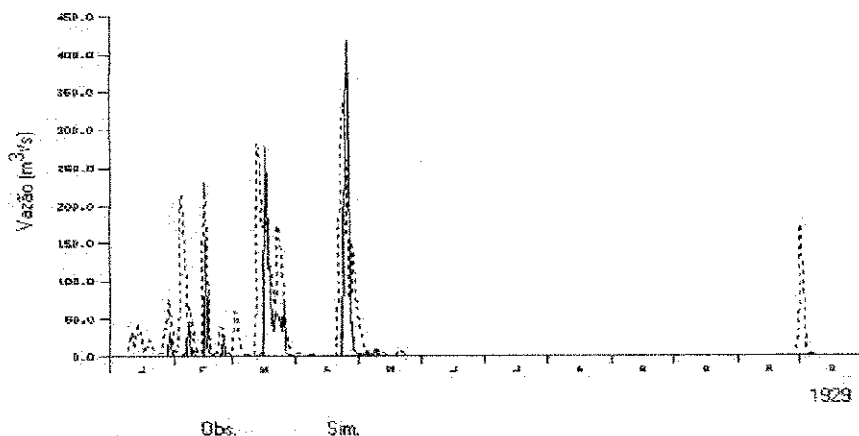


Figura 5.18. Hidrogramas observados na bacia de Boqueirão Mãe D'Água e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

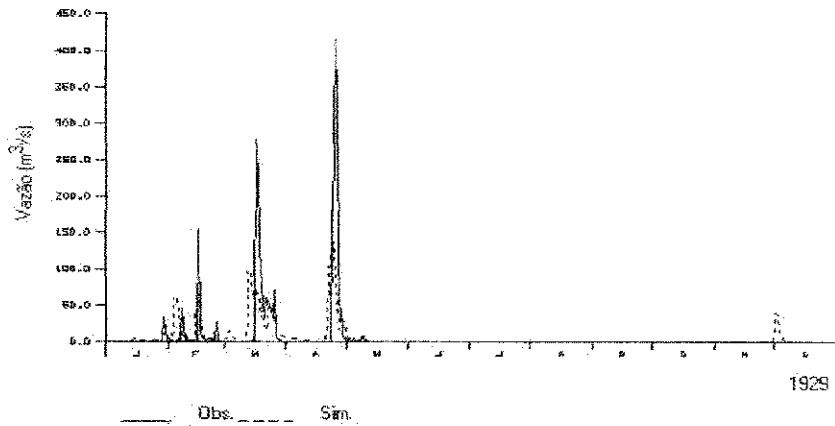


Figura 5.19. Hidrogramas observados na bacia de Boqueirão Mãe D'Água e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.3.6. Pau Ferrado – 8050 km² (1967, 1968, 1971, 1973 a 1975).

As Figuras 5.20 a 5.23 mostram os resultados obtidos, os quais mostram-se razoáveis, pois apresentaram (Figuras 5.21) bons coeficientes de determinação ($R^2 = 0,75$ para as vazões e 0,91 para os volumes). Pode-se notar que nas duas comparações houve uma super estimação na maioria dos valores, mas os hidrogramas simulados representaram bem os hidrogramas observados conforme mostrado nas Figuras 5.22 e 5.23. com boa localização dos picos em relação ao tempo.

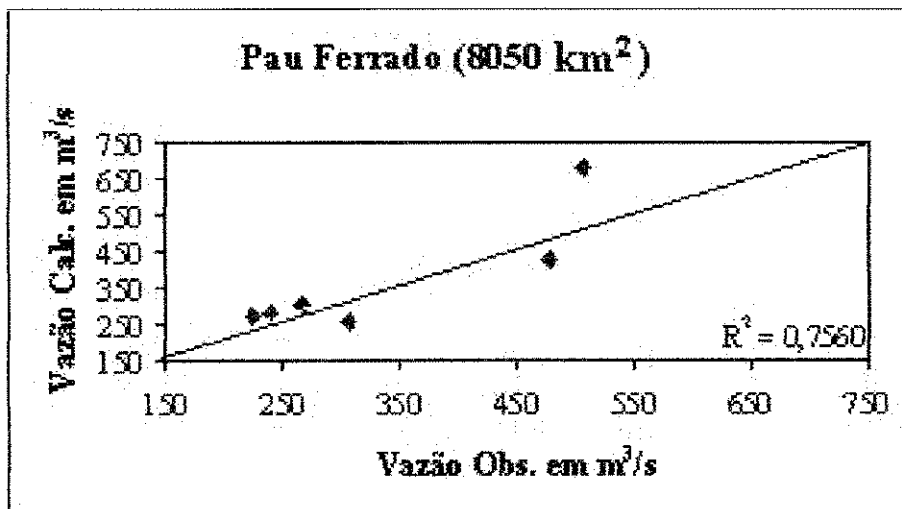


Figura 5.20. Comparação de vazões máximas calibrados e observados em Pau Ferrado.

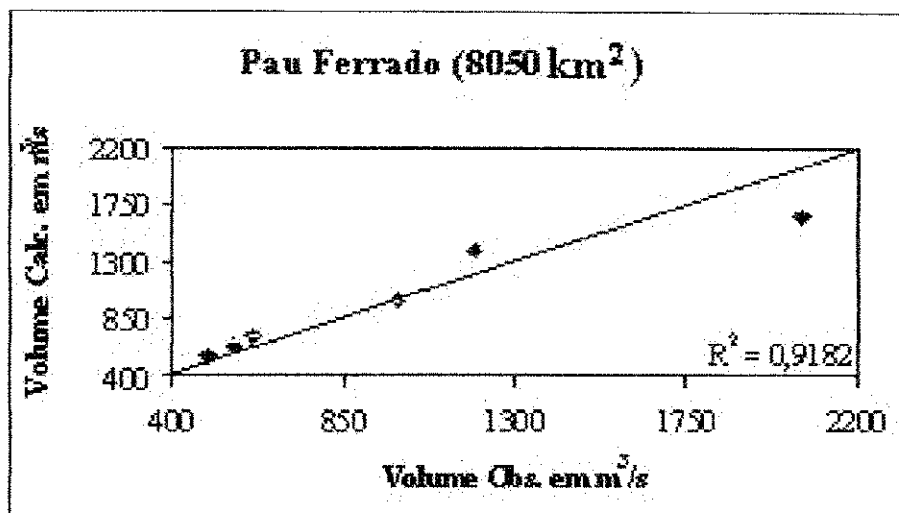


Figura 5.21. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Pau Ferrado.

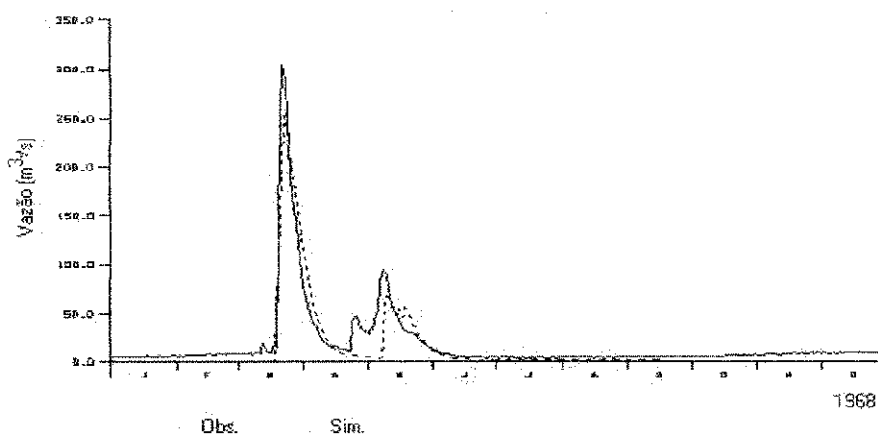


Figura 5.22. Hidrogramas observados na bacia de Pau Ferrado e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

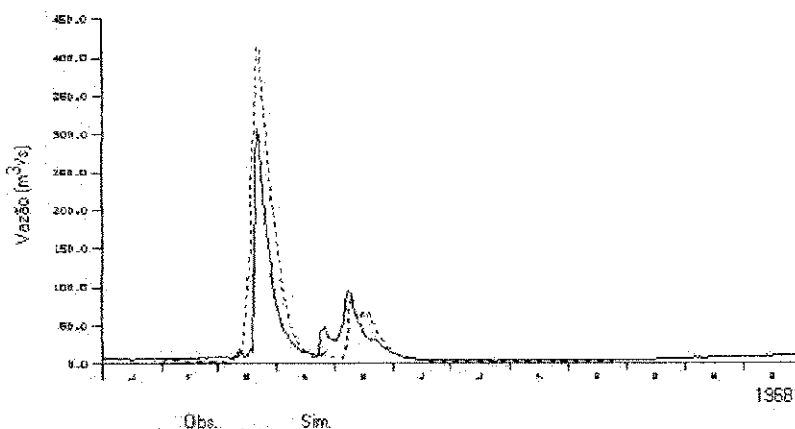


Figura 5.23. Hidrogramas observados na bacia de Pau Ferrado e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.3.7. São José de Piranhas – 475 km² (1912 a 1915 e 1921 a 1935)

As Figuras 5.24 a 5.27 mostram os resultados obtidos com os parâmetros calibrados. De um modo geral, os resultados obtidos foram razoáveis, pois apresentaram boa correlação com os dados observados, com valores do coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,74 (Figuras 5.24 e 5.25), porém pode-se notar que nas duas comparações houve uma subestimação dos valores.

Os hidrogramas simulados não representaram bem os hidrogramas observados, pois, em alguns casos, observou-se uma defasagem no tempo com relação às vazões máximas com uma subestimação na maioria dos valores (Figuras 5.26 e 5.27).

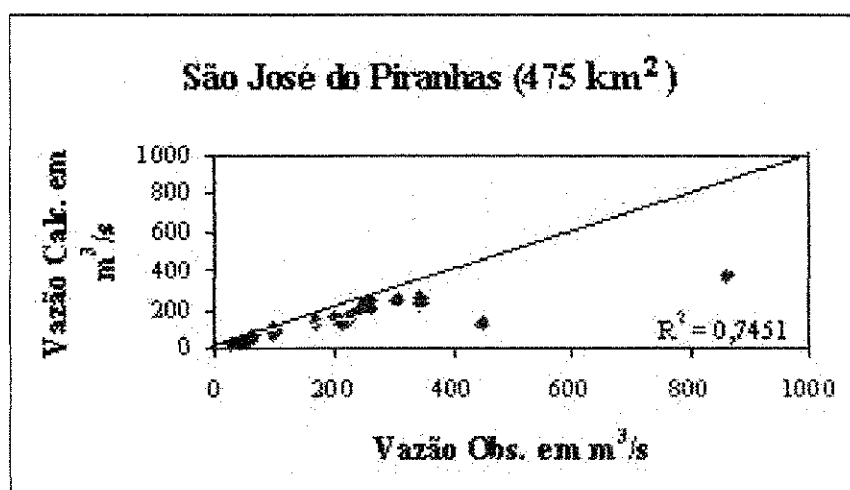


Figura 5.24. Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em São José de Piranhas.

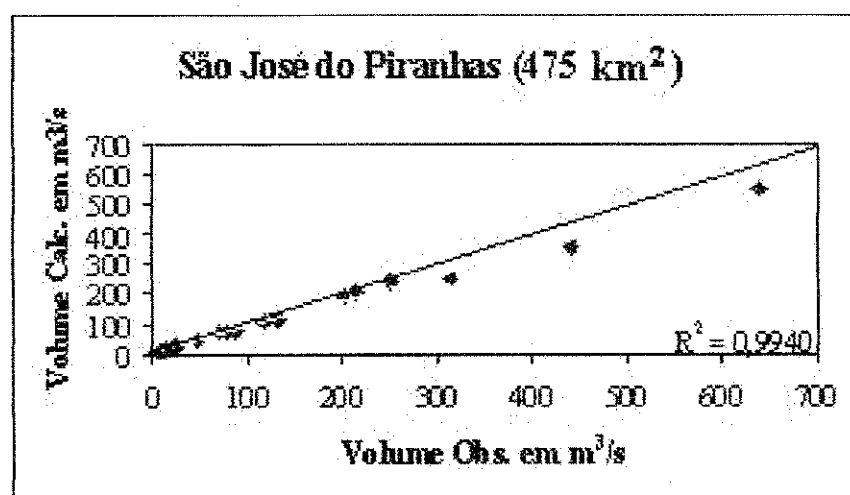


Figura 5.25. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em São José de Piranhas

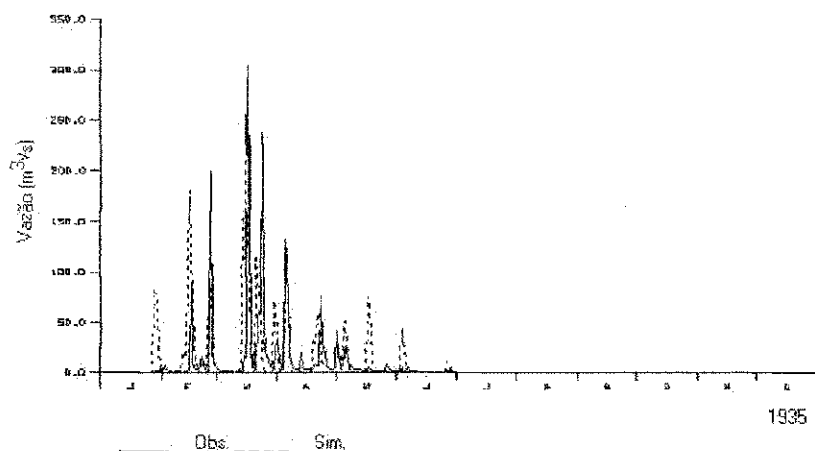


Figura 5.26. Hidrogramas observados na bacia de São José do Piranhas e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

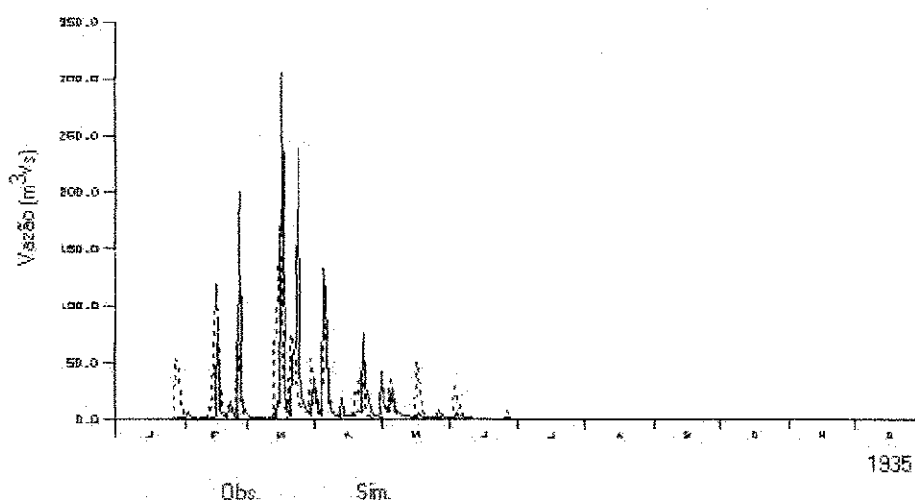


Figura 5.27. Hidrogramas observados na bacia de São José do Piranhas e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.3.8. Antenor Navarro – 1580 km² (1964 a 1972)

As Figuras 5.28 e 5.31 mostram alguns resultados obtidos com os parâmetros calibrados. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois apresentaram boa correlação com os dados observados, com valores do coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,98 (Figuras 5.28 e 5.29), porém pode-se notar que nas duas comparações houve uma subestimação na maioria dos valores. Os hidrogramas simulados representaram bem os hidrogramas observados, conforme mostrado nas Figuras 5.30 e 5.31, com boa localização dos picos no tempo, mas com volumes subestimados.

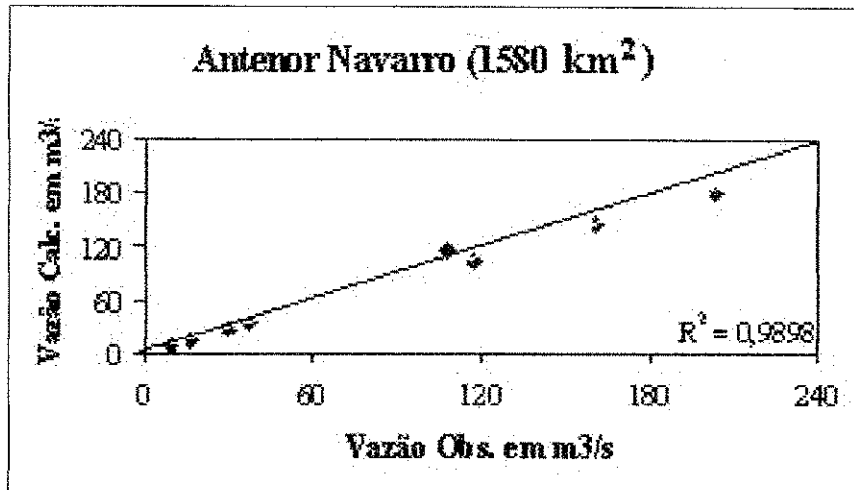


Figura 5.28. Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Antenor Navarro.

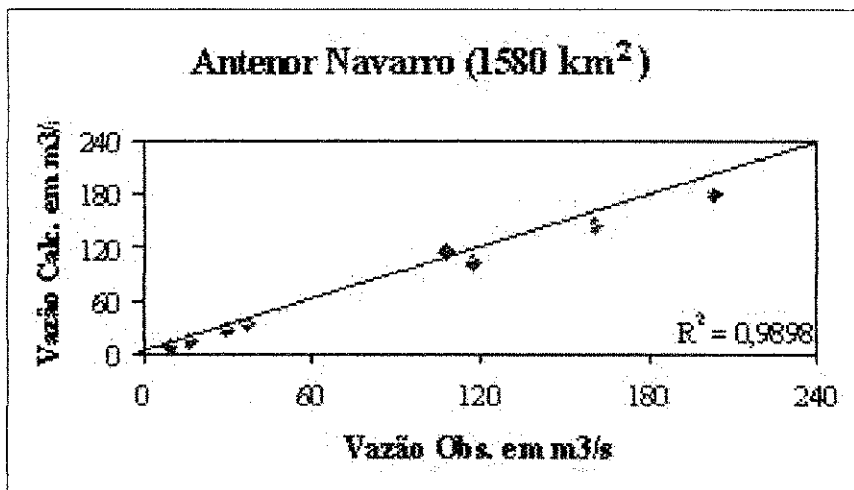


Figura 5.29. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Antenor Navarro.

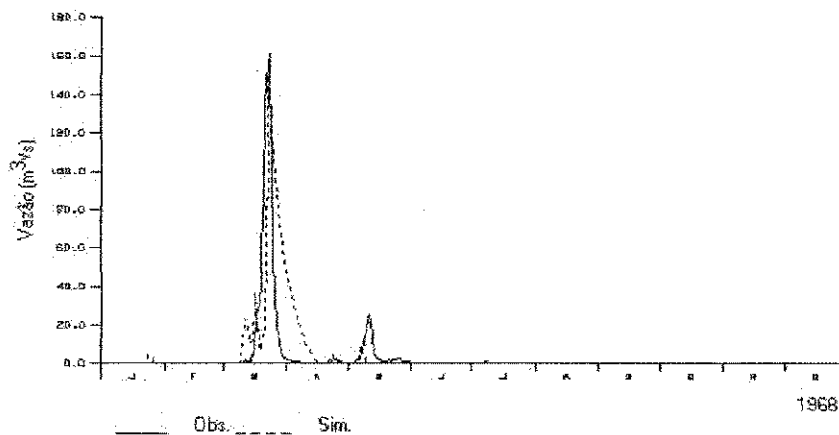


Figura 5.30. Hidrogramas observados na bacia de Antenor Navarro e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

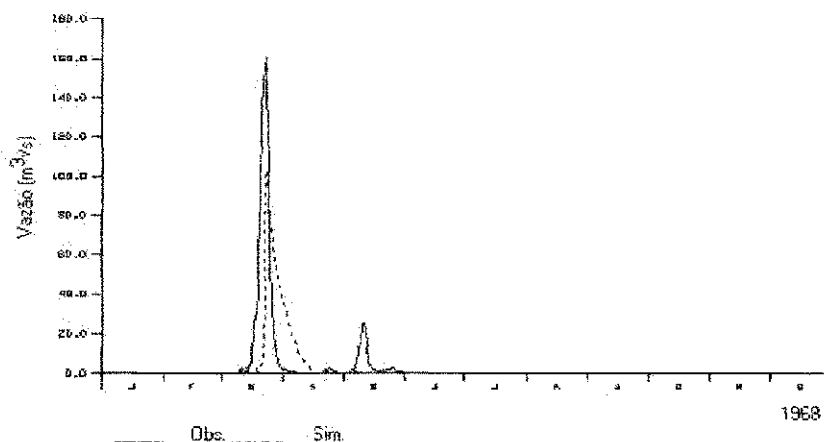


Figura 5.31. Hidrogramas observados na bacia de Antenor Navarro e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.3.9. Sítio Vassouras – 14850 km² (1964 a 1985)

Esta bacia engloba toda a área de estudo deste trabalho. As Figuras 5.32 a 5.35 mostram alguns resultados obtidos com os parâmetros calibrados. De um modo geral, os resultados foram bons, pois apresentaram boa correlação com os dados observados, com valores do coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,987 (Figuras 5.32 e 5.33), porém pode-se notar que nas duas comparações houve uma subestimação na maioria dos valores. Os hidrogramas simulados representaram bem os hidrogramas observados, conforme mostrado nas Figuras 5.34 e 5.35.

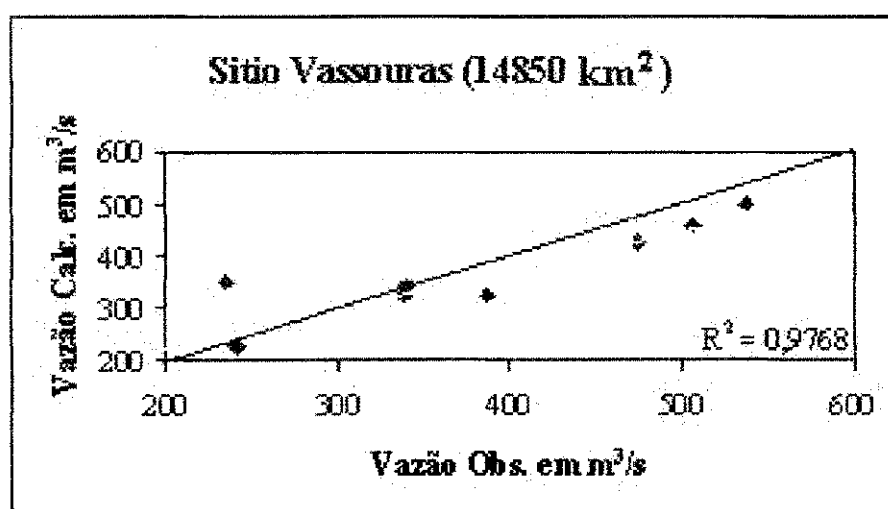


Figura 5.32. Comparação de vazões máximas calibradas e observadas em Sítio Vassouras.

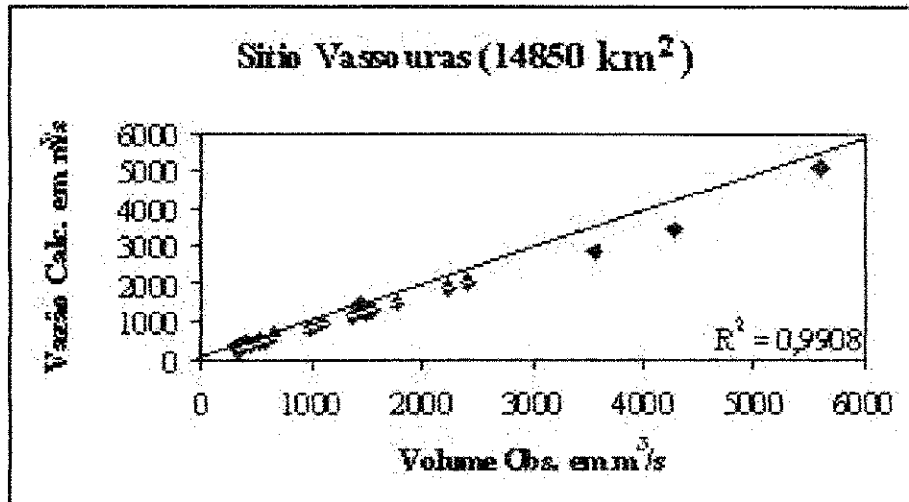


Figura 5.33. Comparação de volumes anuais calibrados e observados em Sitio Vassouras.

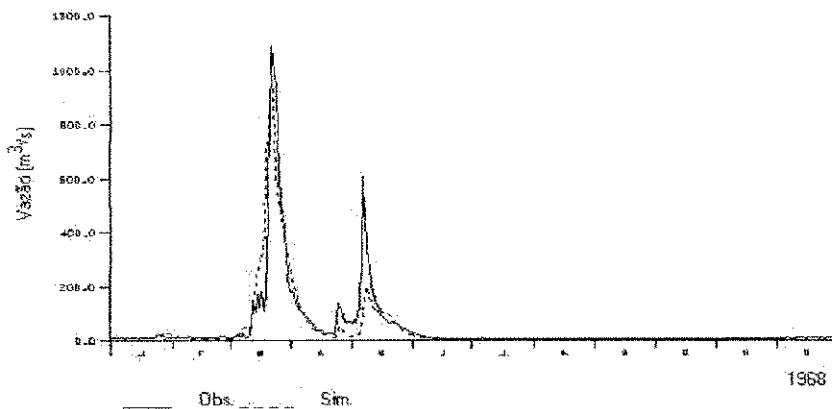


Figura 5.34. Hidrogramas observados na bacia de Sitio Vassouras e simulados com parâmetros calibrados pelo pico.

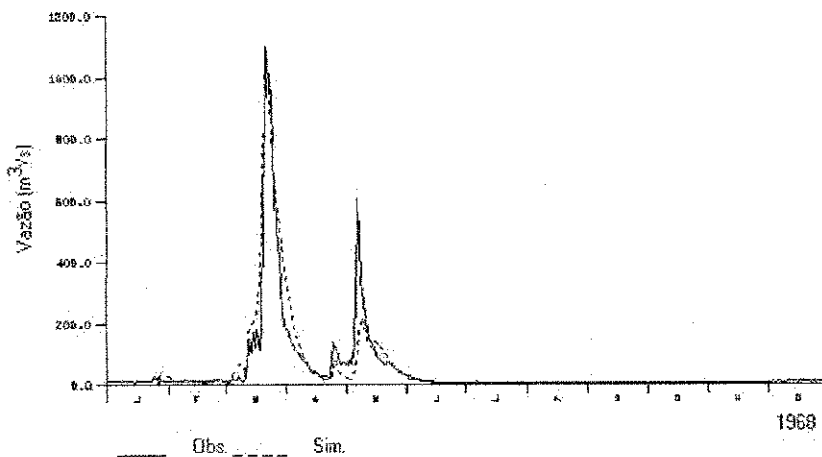


Figura 5.35. Hidrogramas observados na bacia de Sitio Vassouras e simulados com parâmetros calibrados pelo volume.

5.4. Comentários Finais

De um modo geral pode-se dizer que os resultados da calibração foram bons, obtendo-se bons coeficientes de determinação (R^2) para as várias bacias. No entanto, os resultados foram melhores para a calibração dos volumes anuais, pois, como é mostrado na Tabela 5.12, o coeficiente de determinação médio para calibração das vazões foi de 0,8983, enquanto que para os volumes foi de 0,9854. Para a bacia de Aguiar não se pode assegurar seus resultados devido aos poucos dados dos seus dois anos.

A comparação dos hidrogramas mostrou-se razoável, com os valores simulados aproximando-se bem dos observados, apesar de terem sido notadas algumas defasagens dos picos.

Tabela 5.12. Coeficiente de determinação (R^2) para a Simulação de Vazão e Volume.

Sub-bacias	Vazão	Volume
Piancó	0,9711	0,9985
Emas	0,9968	0,9995
Sta. Rita do Coremas	0,9739	0,9899
Boqueirão Mãe D'Água	0,7767	0,9984
Pau Ferrado	0,7560	0,9182
São José do Piranhas	0,7451	0,9940
Antenor Navarro	0,9898	0,9938
Sítio Vassouras	0,9768	0,9908
Média	0,8983	0,9854

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NAVMO

6.1. Introdução

Dentre os vários usos dos modelos chuva-vazão, podem ser destacadas as seguintes aplicações: (1) a extensão de séries de vazões em seções fluviais monitoradas, com os parâmetros calibrados a partir de séries existentes; (2) geração de séries de vazões em seções não monitoradas, com parâmetros estimados a partir de valores de outras bacias (Silveira et al., 1998).

A simulação de longo período é um recurso muito importante, pois como a maioria das bacias possui séries descontínuas e curtas, a hidrologia tem que se valer da simulação para poder obter séries longas e contínuas que poderão ser utilizadas para a obtenção e variáveis hidrológicas em locais sem dados, regionalização, etc.

Neste capítulo serão simulados os valores de vazões máximas e médias de longo período com os parâmetros do modelo NAVMO calibrados, conforme foi descrito anteriormente no capítulo 5, para fins de análise regional.

6.2. Parâmetros Utilizados na Simulação

Os parâmetros ALFA, CN e EET foram calibrados conforme a condição pluviométrica de cada ano. Porém algumas bacias não possuíam dados de anos secos e/ou normais; assim, nestes casos foram utilizadas as médias dos parâmetros de bacias vizinhas com semelhança na área, conforme se explica a seguir:

- ❖ **Aguiar e Emas** → estas duas bacias foram simuladas para anos secos com a média dos parâmetros de S. J. de Piranhas e Boqueirão Mãe D'Água;
- ❖ **Antenor Navarro** → esta bacia foi simulada para anos secos com a média dos parâmetros de Boqueirão Mãe D'Água e Piancó;

- ❖ **Pau Ferrado** → esta bacia foi simulada para anos secos e normais com a média dos parâmetros de Santa Rita do Coremas e Sitio Vassouras.

Nas Tabelas 6.1. a 6.3. são mostrados os parâmetros médios das bacias, inclusive os que foram calculados com as médias das outras bacias. Com estes parâmetros foram simuladas duas séries: *uma série de vazões máximas* obtidas com valores médios de parâmetros calibrados para vazões máximas de cada bacia e *uma série de vazões médias* obtidas com valores médios de parâmetros calibrados para os volumes de cada bacia. Estas séries foram simuladas de forma independente, isto é, para cada bacia independentemente, já que o modelo foi calibrado desta maneira. As bacias foram simuladas com seus parâmetros médios e para anos secos, normais ou úmidos.

Tabela 6.1. Valores Médios de ALFA conforme a Escala e Pluviometria.

Bacia	ALFA									
	Área (Km ²)	Anos Secos			Anos Normais			Anos Úmidos		
		Q _{máx.}	Vol.	Média	Q _{máx.}	Vol.	Média	Q _{máx.}	Vol.	Média
São Jose de Piranhas	475	0,496	0,310	0,403	0,746	0,635	0,690	0,724	0,480	0,602
Aguiar	495	0,505	0,267	0,386	0,160	0,120	0,140	0,140	0,100	0,120
Emas	530	0,505	0,267	0,386	0,155	0,068	0,111	0,172	0,024	0,098
Boqueirão Mãe d'água	1063	0,514	0,224	0,369	0,452	0,365	0,408	0,731	0,618	0,674
Antenor Navarro	1580	0,402	0,162	0,282	0,115	0,103	0,109	0,069	0,123	0,096
Piancó	4550	0,290	0,100	0,195	0,260	0,185	0,222	0,220	0,176	0,198
Santa Rita do Coremas	6869	0,393	0,175	0,284	0,253	0,210	0,231	0,139	0,148	0,143
Pau Ferrado	8050	0,260	0,178	0,219	0,178	0,000	0,089	0,052	0,063	0,058
Sito Vassouras	14850	0,085	0,110	0,098	0,112	0,115	0,113	0,130	0,104	0,117

Tabela 6.2. Valores Médios de EET conforme a Escala e Pluviometria.

Bacia	EET									
	Área (Km ²)	Anos Secos			Anos Normais			Anos Úmidos		
		Q _{máx.}	Vol.	Média	Q _{máx.}	Vol.	Média	Q _{máx.}	Vol.	Média
São Jose de Piranhas	475	4,88	6,13	5,50	2,78	4,13	3,45	2,55	3,91	3,23
Aguiar	495	4,79	6,31	5,55	6,60	7,50	7,05	5,80	8,20	7,00
Emas	530	4,79	6,31	5,55	6,50	8,20	7,35	6,73	7,81	7,27
Boqueirão Mãe d'água	1063	4,70	6,50	5,60	4,73	5,41	5,07	2,13	3,19	2,66
Antenor Navarro	1580	5,45	7,75	6,60	7,45	7,50	7,48	7,19	6,94	7,07
Piancó	4550	6,20	9,00	7,60	6,23	7,80	7,02	4,68	7,90	6,29
Santa Rita do Coremas	6869	3,90	6,20	5,05	5,70	5,70	5,70	6,56	6,17	6,37
Pau Ferrado	8050	6,09	7,10	6,60	6,75	6,57	6,66	9,47	9,23	9,35
Sito Vassouras	14850	8,28	8,00	8,14	7,79	7,43	7,61	7,09	7,11	7,10

Tabela 6.3. Valores Médios de CN conforme a Escala e Pluviometria.

Bacia	Área (Km ²)	CN								
		Anos Secos			Anos Normais			Anos Úmidos		
		Q _{máx.}	Vol.	Média	Q _{máx.}	Vol.	Média	Q _{máx.}	Vol.	Média
São Jose de Piranhas	475	70,25	56,00	63,13	74,25	78,00	76,13	74,73	72,36	73,55
Aguiar	495	63,33	53,90	58,61	59,00	54,00	56,50	49,00	40,00	44,50
Emas	530	63,33	53,90	58,61	50,50	46,00	48,25	51,00	45,83	48,42
Boqueirão Mãe d'água	1063	56,40	51,80	54,10	57,18	57,09	57,14	64,63	68,38	66,50
Antenor Navarro	1580	51,20	48,90	50,05	45,50	50,00	47,75	48,00	48,33	48,17
Piancó	4550	46,00	46,00	46,00	48,00	51,17	49,58	54,00	49,78	51,89
Santa Rita do Coremas	6869	54,00	51,75	52,88	53,00	53,00	53,00	52,11	52,78	52,44
Pau Ferrado	8050	49,50	48,38	48,94	51,44	51,13	51,28	46,17	48,50	47,33
Sito Vassouras	14850	45,00	45,00	45,00	49,88	49,25	49,56	49,77	48,92	49,35

6.3. Dados Pluviométricos

A montagem dos Bancos de Dados para a simulação de todo o período foi feita selecionando-se os postos pluviométricos conforme o período de dados neles contidos (ver Anexo B.1). Para tanto, fez-se uma análise minuciosa dos dados de todos os postos pluviométricos e fluviométricos já que estes apresentam períodos com lacunas. Assim, os postos pluviométricos foram selecionados conforme o período de dados disponíveis e desse modo montou-se uma série completa, compreendendo o período de 1913 a 1985, com base em três séries, com número de postos e períodos diferentes:

- ❖ A primeira série, de 1913 a 1985, preparada com 07 postos pluviométricos;
- ❖ A segunda série, de 1942 a 1985, preparada com 25 postos pluviométricos;
- ❖ A terceira série, de 1963 a 1983, preparada com 40 postos pluviométricos.

O primeiro Banco de dados utilizou dados dos seguintes postos pluviométricos: Antenor Navarro, Conceição, Itaporanga, Luiz Gomes, Pombal, Princesa Isabel e Souza, pois apenas estes postos possuíam séries de precipitação completas no período que compreendia os anos de 1913 a 1985. Neste banco de dados a distribuição espacial dos postos não ficou adequada, devido ao pequeno número de postos em relação a área da região (ver Anexo C.1).

O segundo Banco de dados utilizou dados de 25 postos pluviométricos, sendo constituída dos 7 postos do primeiro banco de dados mais 18 outros postos, sendo eles: Aguiar, Arapuá, Barra de Juá, Bom Jesus, Bonito de Santa Fé, Cajazeiras, Catingueiras, Condado, Coremas, Cuncas, Engenheiro Ávidos, Manaira, Nazarezinho, Nova Olinda, Olho D'Água, Pilões Açude, São Francisco e Serra Grande, com dados do período de 1942 a 1985 (ver Anexo C.2). Neste banco de dados a distribuição espacial dos postos pluviométricos mostrou-se mais satisfatória, pois a localização dos postos abrangeu toda a área da bacia.

O terceiro Banco de dados utilizou os dados dos 40 postos pluviométricos listados na Tabela 3.5 (Capítulo 3) exceto o posto de Piancó num total de 40 postos (ver Anexo C.3), com dados do período de 1962 a 1985.

6.4 Análise dos resultados da Simulação

Foram feitas simulações para as vazões máximas e volumes, com a utilização de 7, 25 e 40 postos pluviométricos respectivamente, para, com isto, formar séries mistas, uma de vazão máxima e outra de volume, utilizado-se os resultados de 1913 a 1941 para a simulação com 7 postos, de 1942 a 1962 para a simulação com 25 postos e de 1963 a 1985 com 40 postos. Os resultados encontram-se nas Figuras 6.1 a 6.18 em forma de diagrama de barras para analisar a consistência das séries simuladas. Deve-se frisar que os volumes anuais foram transformados em vazões médias anuais. Uma outra forma de analisar a consistência das simulações foi através do diagrama de dupla massa. Os resultados obtidos com esta análise serão mostrados mais adiante.

6.4.1. Bacia de Piancó – 4.550 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Piancó encontram-se nas Figuras 6.1 e 6.2.. As simulações abaixo mostraram resultados razoáveis; alguns valores das vazões máximas e médias foram subestimados como se pode notar. De um modo geral as simulações aparentaram consistência.

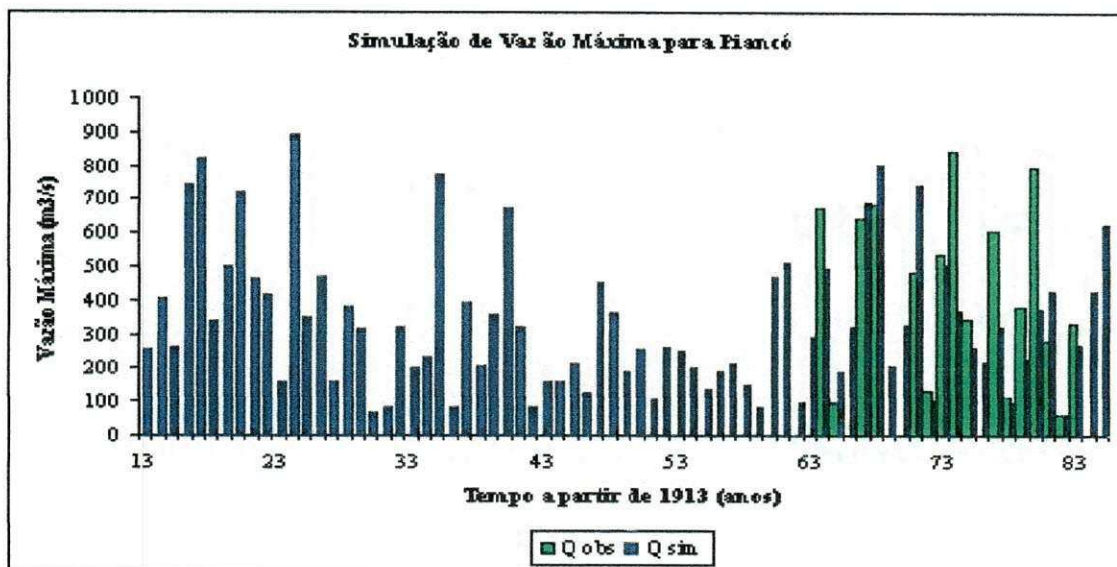


Figura 6.1. Simulação das Vazões Máximas em Piancó.

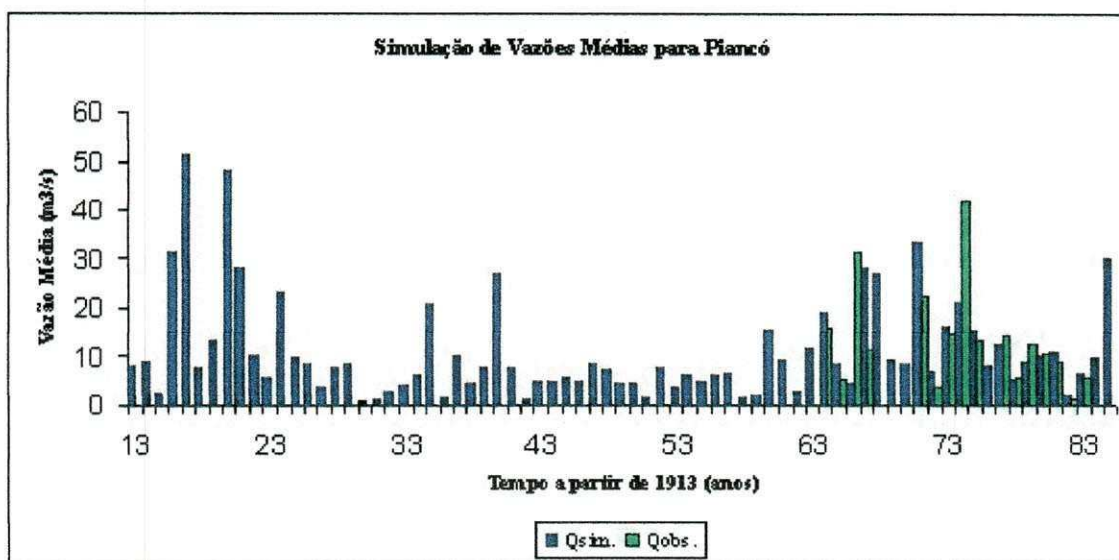


Figura 6.2. Simulação das Vazões Médias em Piancó.

6.4.2. Bacia de Emas – 530 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Emas encontram-se nas Figuras 6.3 e 6.4. Na simulação de vazões máximas para esta bacia, o modelo simulou razoavelmente bem as vazões observadas, como mostrado no gráfico de colunas, porém na simulação de vazões médias houve uma subestimação no período sem dados observados, mas com alguns valores destacados.

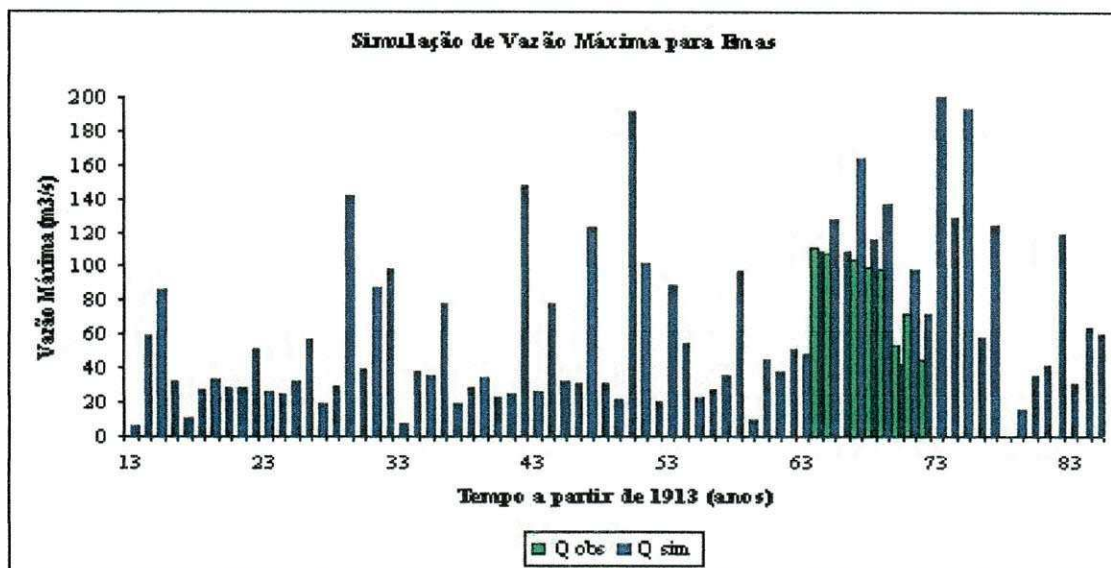


Figura 6.3. Simulação das Vazões Máximas em Emas.

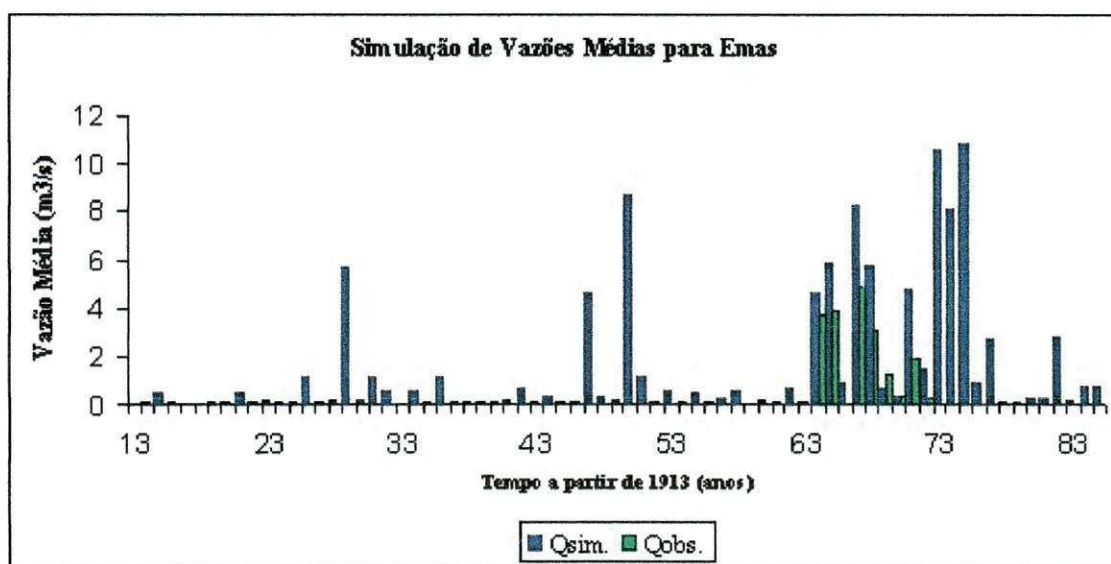


Figura 6.4. Simulação das Vazões Médias em Emas.

6.4.3. Bacia de Santa Rita do Coremas – 6.869 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Santa Rita do Coremas encontram-se nas Figuras 6.5 e 6.6. Na simulação de vazões máximas para esta bacia o modelo simulou razoavelmente bem as vazões como também as vazões médias. De um modo geral as simulações apresentaram, no período sem dados, resultados compatíveis com aqueles do período com dados observados.

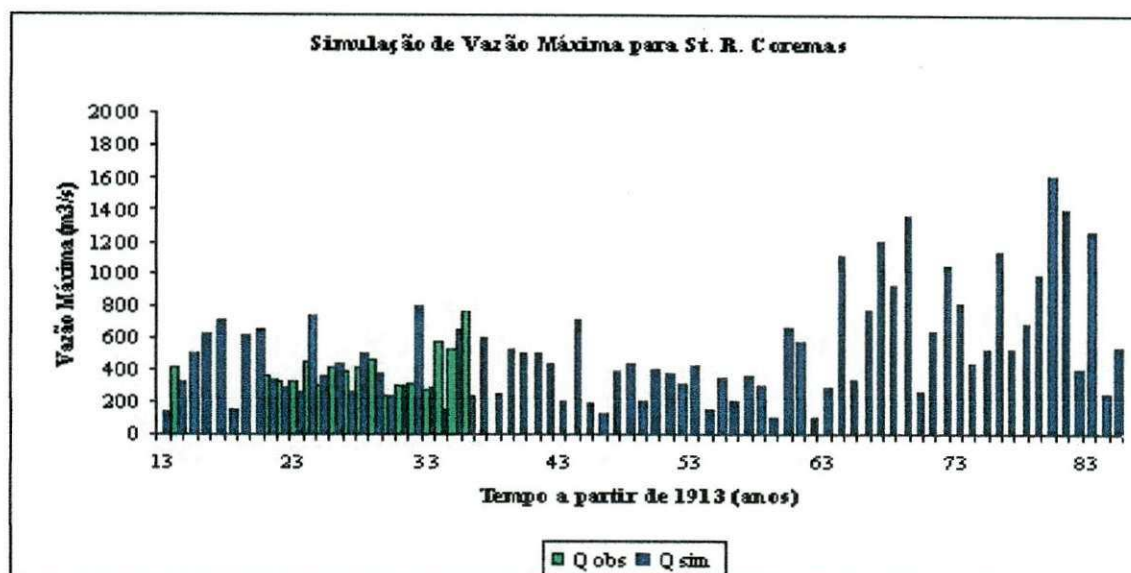


Figura 6.5. Simulação das Vazões Máximas em Santa Rita do Coremas.

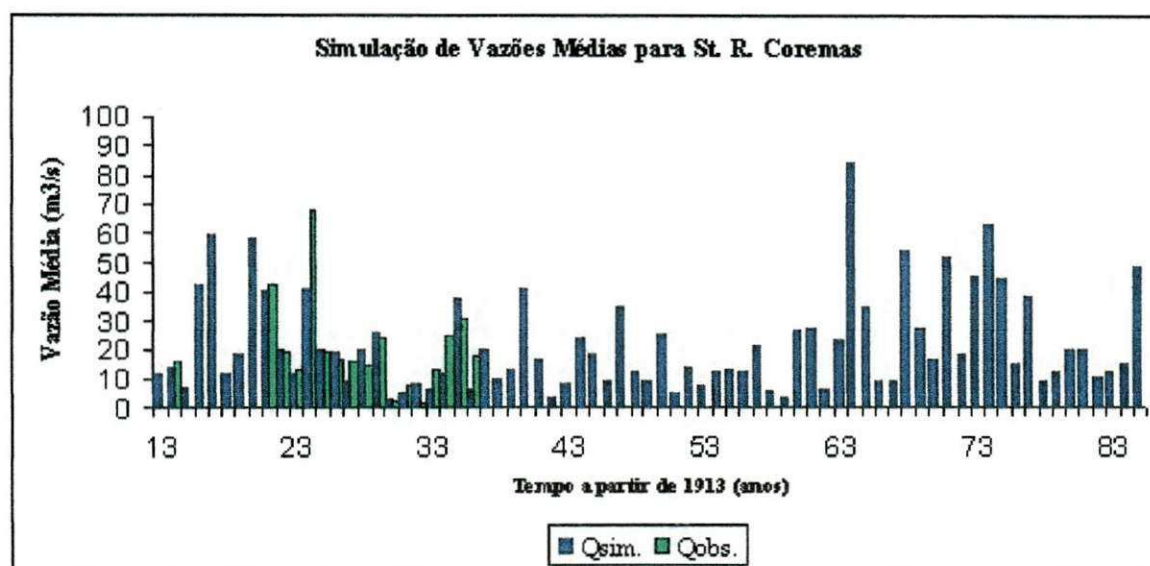


Figura 6.6. Simulação das Vazões Médias em Santa Rita do Coremas.

6.4.4. Bacia de Aguiar – 495 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Aguiar encontram-se nas Figuras 6.7 e 6.8. As simulações mostraram resultados razoáveis, apesar de não ser possível fazer uma análise mais profunda, pois só tem dois anos com dados observados; contudo, na simulação tanto das vazões máximas quanto das vazões medias os valores obtidos foram próximos dos

observados, porém no geral as simulações de períodos sem dados apresentaram valores superiores aos demais anos com dados observados.

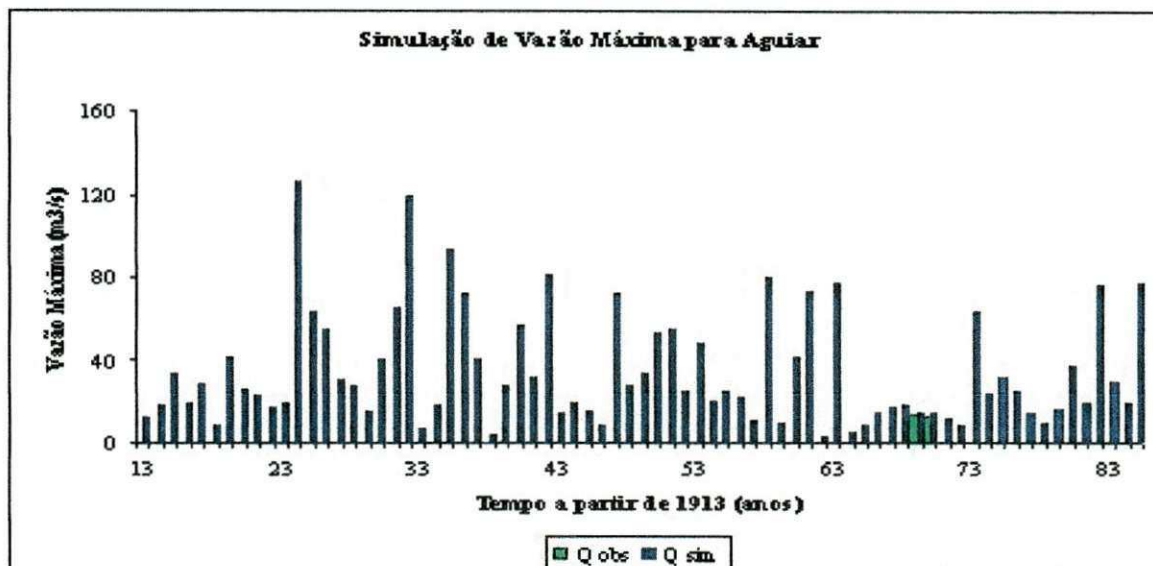


Figura 6.7. Simulação das Vazões Máximas em Aguiar.

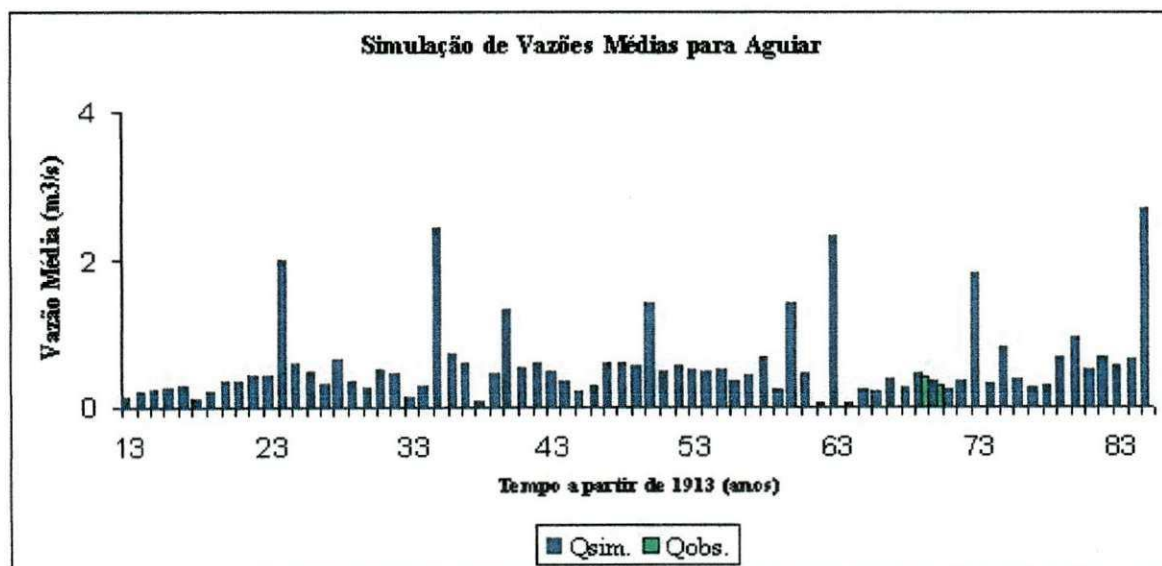


Figura 6.8. Simulação das Vazões Médias em Aguiar.

6.4.5. Bacia de Boqueirão Mãe D'Água – 1.063 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Boqueirão Mãe D'Água encontram-se nas Figuras 6.9 e 6.10. As vazões máximas e médias para esta bacia foram, em geral,

razoavelmente simuladas, com exceção de um ano, que apresentou tanto para vazões máximas e médias um valor observado discrepante em relação ao resto da série, o qual não foi bem simulado. De um modo geral as simulações apresentaram, no período sem dados, resultados compatíveis com aqueles com dados observados.

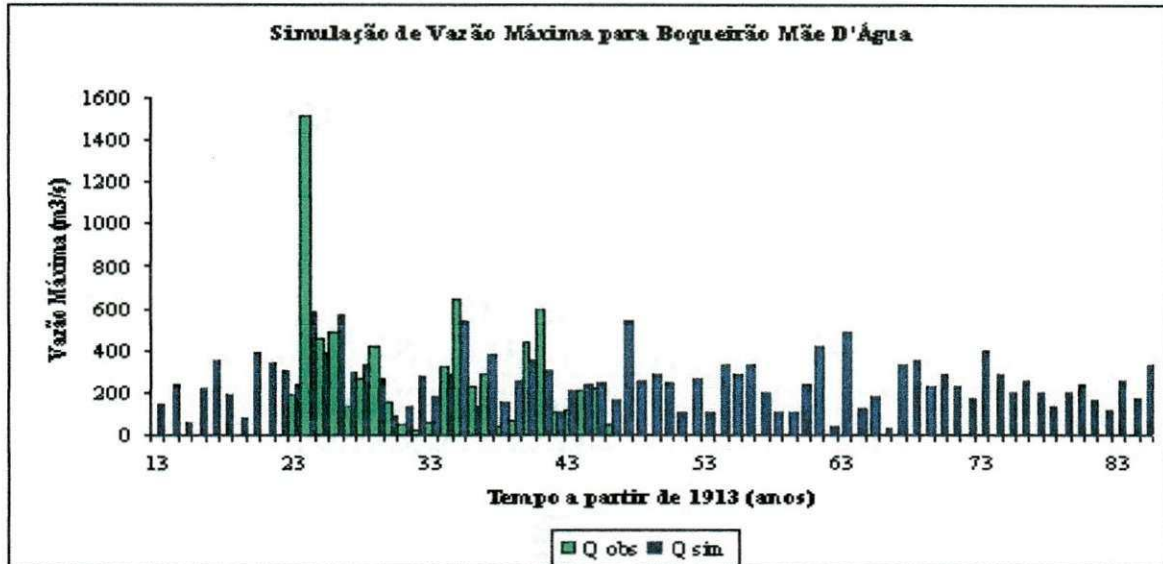


Figura 6.9. Simulação das Vazões Máximas em Boqueirão Mãe D'Água.

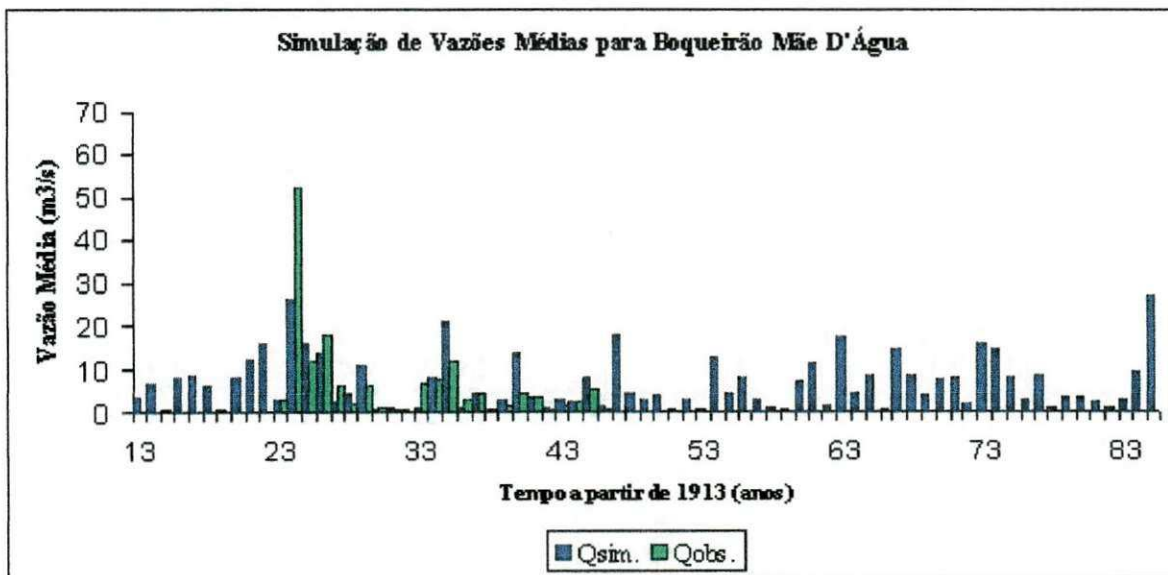


Figura 6.10. Simulação das Vazões Médias em Boqueirão Mãe D'Água.

6.4.6. Bacia de Pau Ferrado – 8.050 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Pau Ferrado encontram-se nas Figuras 6.11 e 6.12. Na simulação de vazões máximas desta bacia alguns valores foram super estimados, já para a simulação de vazões médias houve subestimação de alguns valores; um ano, particularmente, tem um valor observado muito superior aos demais valores, o qual não foi bem representado pelo modelo. De um modo geral as simulações apresentaram, no período sem dados, resultados compatíveis com aqueles com dados observados.

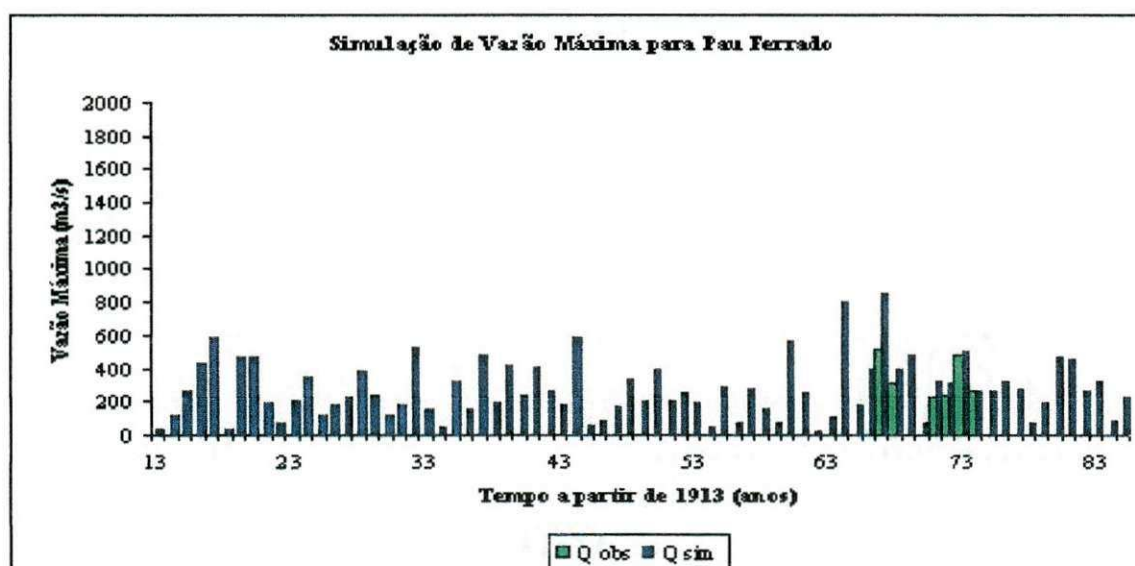


Figura 6.11. Simulação das Vazões Máximas em Pau Ferrado.

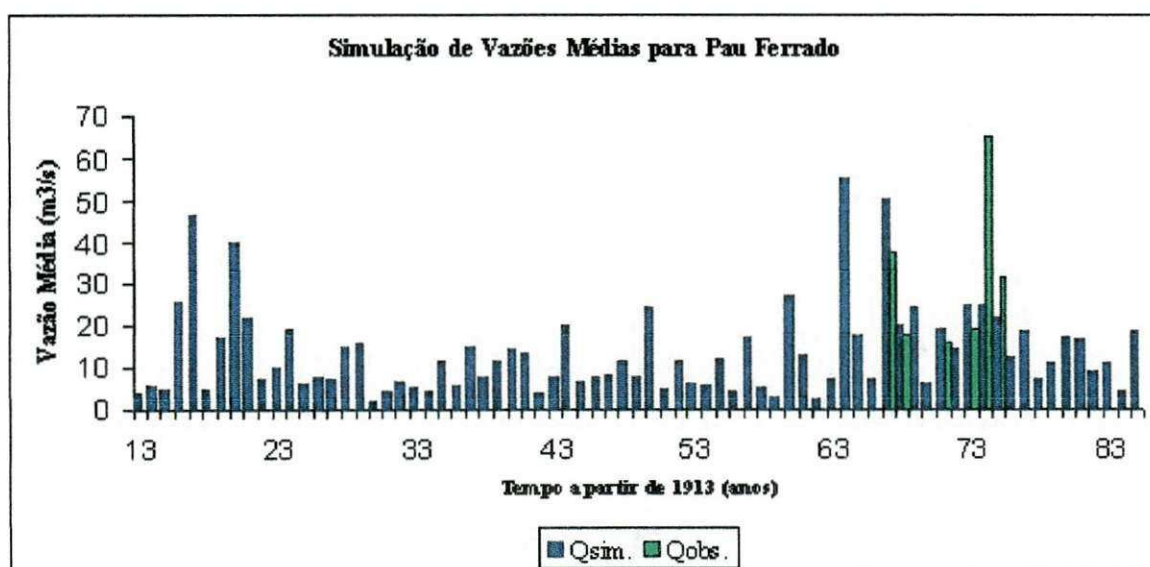


Figura 6.12. Simulação das Vazões Médias em Pau Ferrado.

6.4.7. Bacia de São José de Piranhas – 475 km²

Os resultados obtidos para a bacia de São José de Piranhas encontram-se nas Figuras 6.13 e 6.14. Nas vazões máximas e médias para esta bacia a simulação apresentou super estimações; em um ano, em particular, houve, tanto para vazões máximas quanto médias, um valor observado discrepante em relação ao resto da série, que o modelo não reproduziu satisfatoriamente. Para o período sem dados os valores simulados são inferiores aos dados observados para as duas simulações.

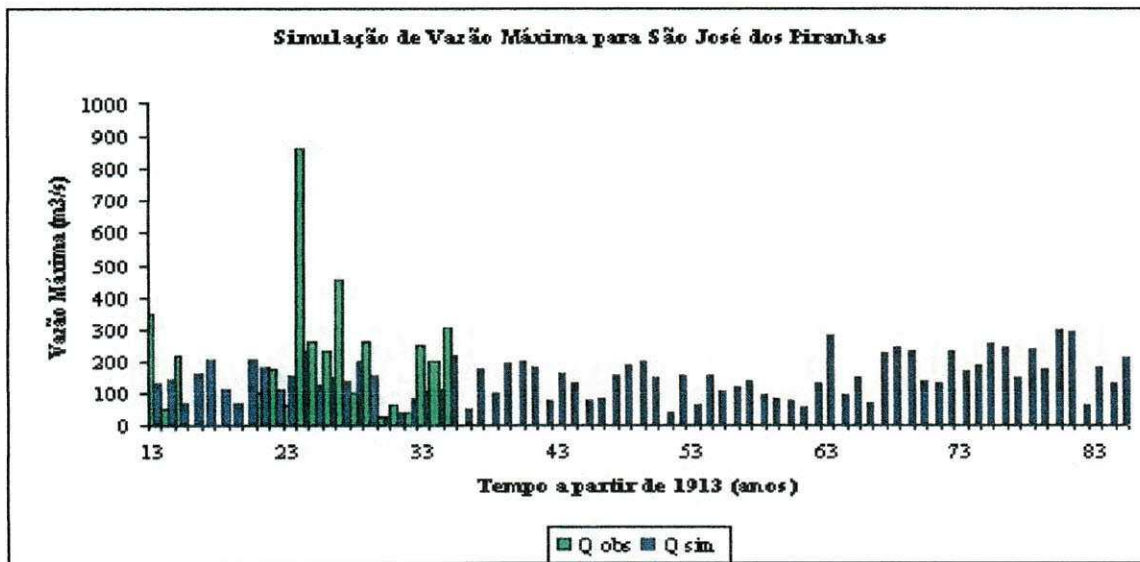


Figura 6.13. Simulação das Vazões Máximas em São José de Piranhas.

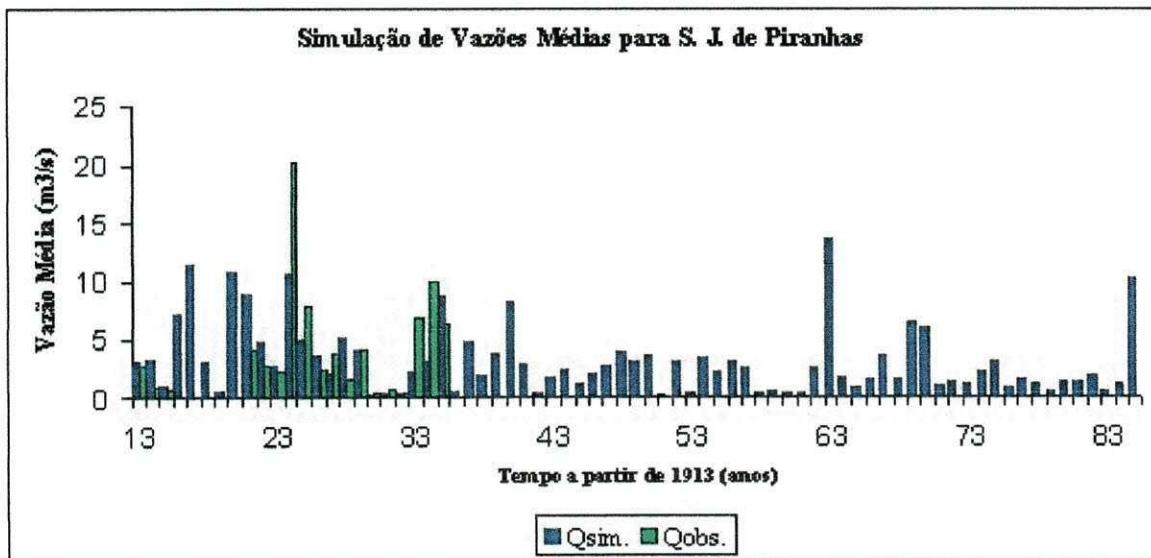


Figura 6.14. Simulação das Vazões Médias em São José de Piranhas.

6.4.8. Bacia de Antenor Navarro – 1.580 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Antenor Navarro encontram-se nas Figuras 6.15 e 6.16.. As simulações abaixo obtiveram resultados não muito bons. As simulações apresentaram, no período sem dados, resultados compatíveis com aqueles com dados observados, embora com alguns valores que se destacam dos demais.

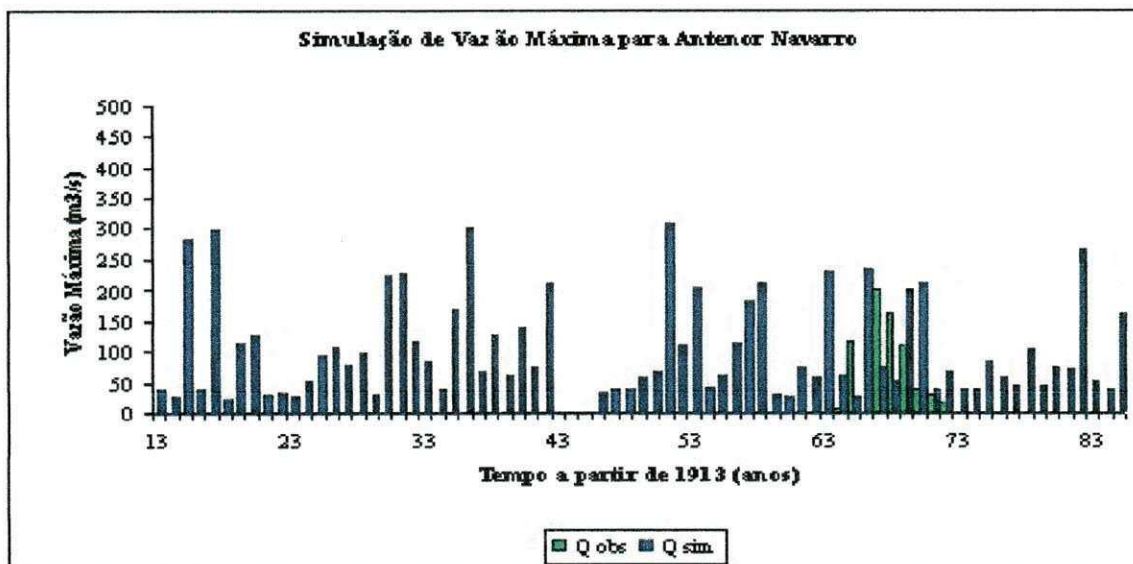


Figura 6.15. Simulação das Vazões Máximas em Antenor Navarro

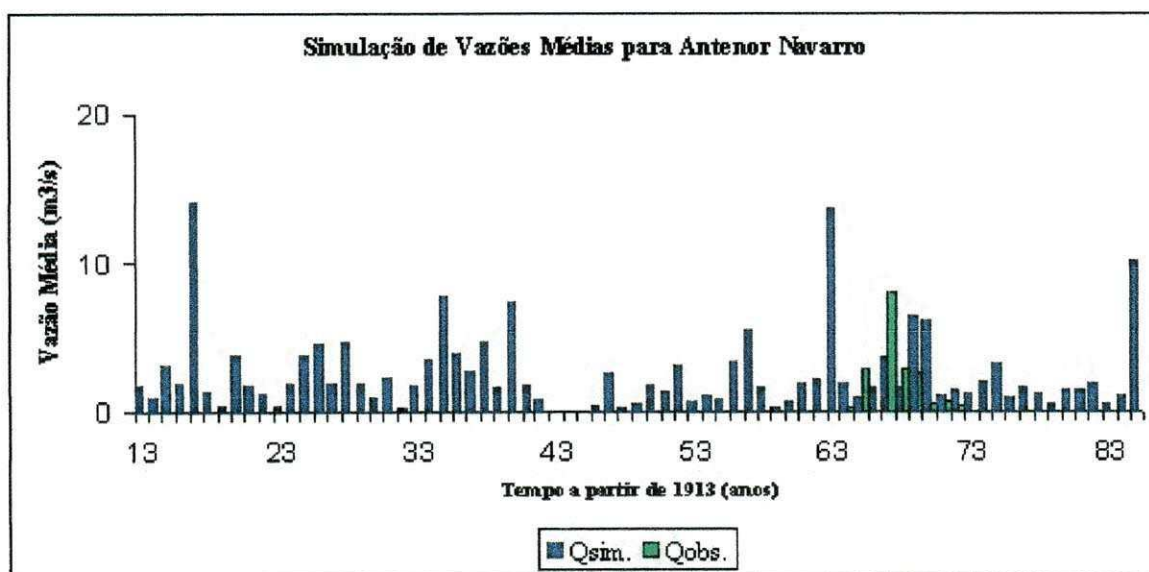


Figura 6.16. Simulação das Vazões Médias em Antenor Navarro.

6.4.9. Bacia de Sítio Vassouras – 14.850 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Sítio Vassouras encontram-se nas Figuras 6.17 e 6.18. As simulações abaixo mostram resultados razoáveis; tanto as vazões máximas quanto as médias foram bem representadas pelo modelo no período com dados observados. Para o período sem dados, as simulações mostram valores inferiores daqueles com período com dados.

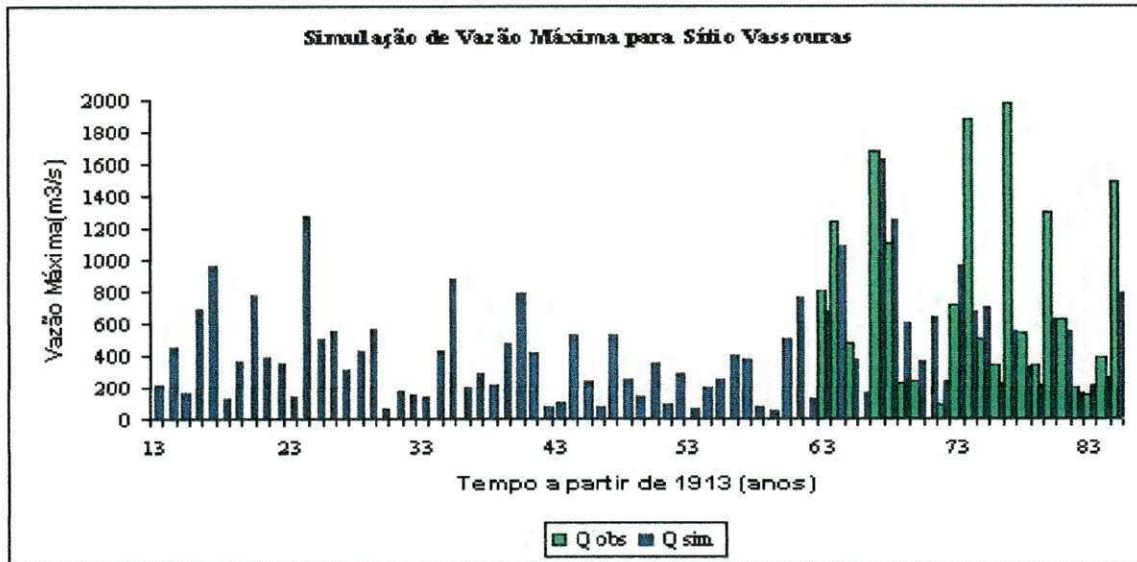


Figura 6.17. Simulação das Vazões Máximas em Sítio Vassouras

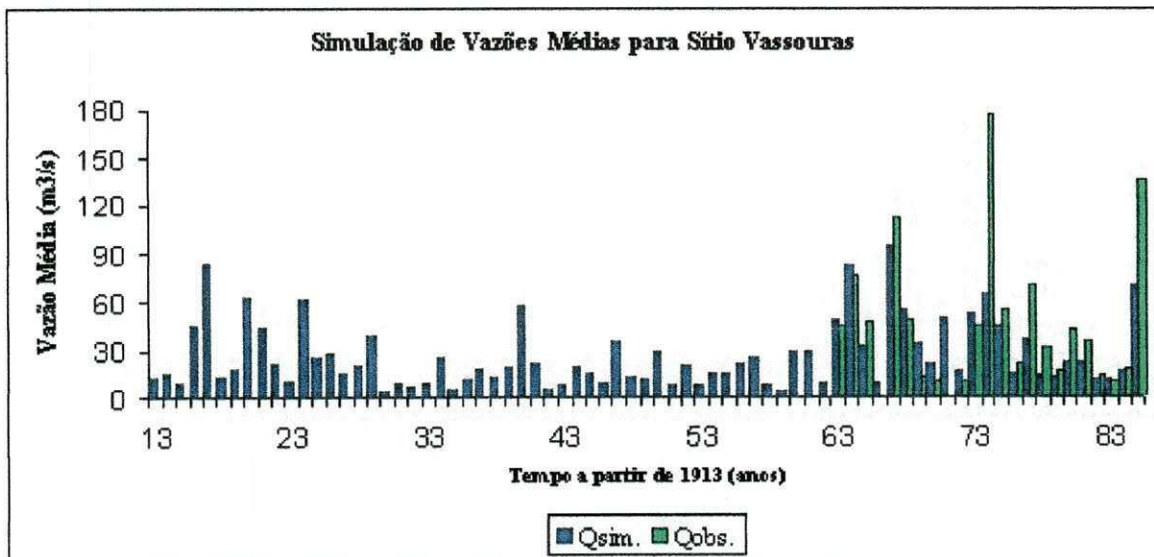


Figura 6.18. Simulação das Vazões Médias em Sítio Vassouras.

6.5. Validação das Séries Simuladas

A validação da simulação foi feita em duas etapas: uma com a comparação dos valores observados com os simulados e outra com a análise da consistência das séries simuladas feita através do teste de dupla massa.

Os resultados anteriormente mostrados nas Figuras 6.1 a 6.18 permitem uma análise mais detalhada da qualidade das simulações dos períodos com dados disponíveis. As Figuras 6.19 a 6.30 mostram uma comparação dos valores observados e simulados de vazões máximas e vazões médias anuais com respectivos parâmetros médios, para as simulações feitas com 7, 25 e 40 postos pluviométricos. Alguns resultados não foram analisados e não serão apresentados ou por causa dos poucos dados (e.g., Aguiar) ou pelo período de dados que não permitiu uma análise comparativa (e.g., Santa Rita do Coremas e S. J. Piranhas). As Figuras 6.31. e 6.32. mostram os resultados dos testes de dupla massa.

6.5.1. Bacia de Piancó (1964 a 1983) – 4.550 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Piancó encontram-se nas Figuras 6.19 e 6.20. De um modo geral, os resultados obtidos não foram bons, pois não se tem um bom coeficiente de determinação, porém nota-se que a maior parte dos valores observados e simulados não difere muito. Como pode ser visto, as simulações com a série de 7 postos não foram boas.

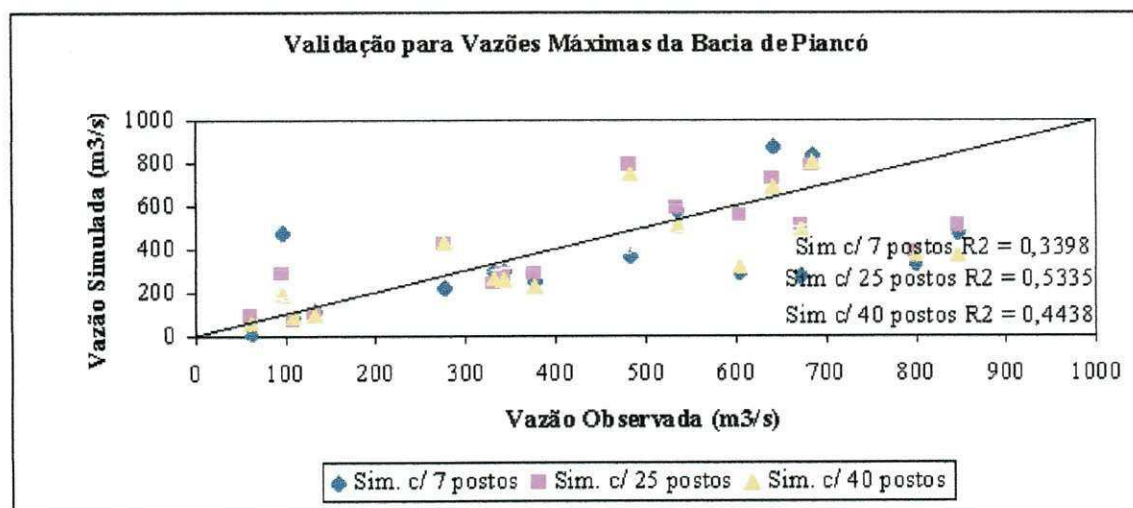


Figura 6.19. Validação das Vazões Máximas Simuladas em Piancó.

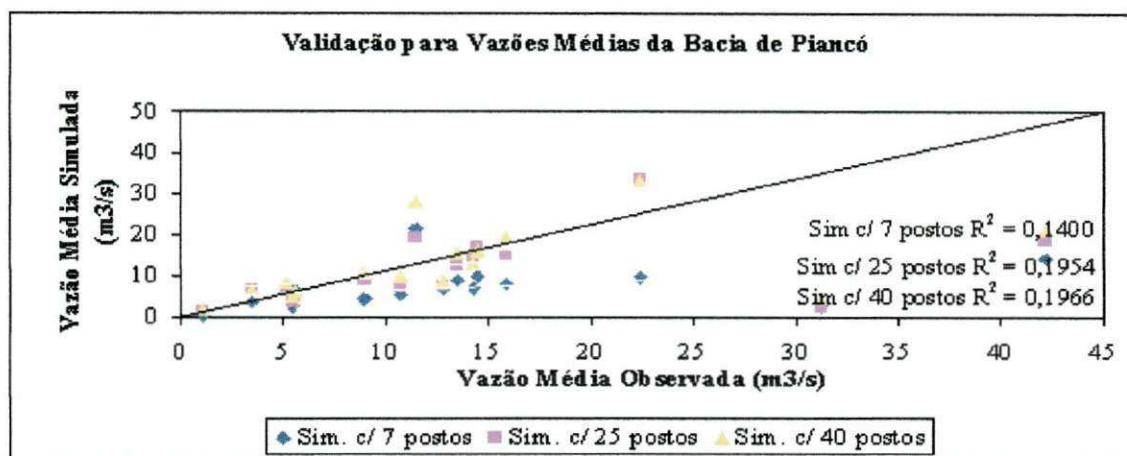


Figura 6.20. Validação das Vazões Médias Simuladas em Piancó.

6.5.2. Bacia de Emas (1964 a 1972)– 530 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Emas encontram-se nas Figuras 6.21 e 6.22. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, exceto para aqueles obtidos com a série de 7 postos. Isto se deve ao fato destes postos não abrangerem toda a área e não representarem bem a sub-bacia de Emas. Os resultados para vazões médias foram melhores do que para as vazões máximas, com relação aos valores do coeficiente R^2 .

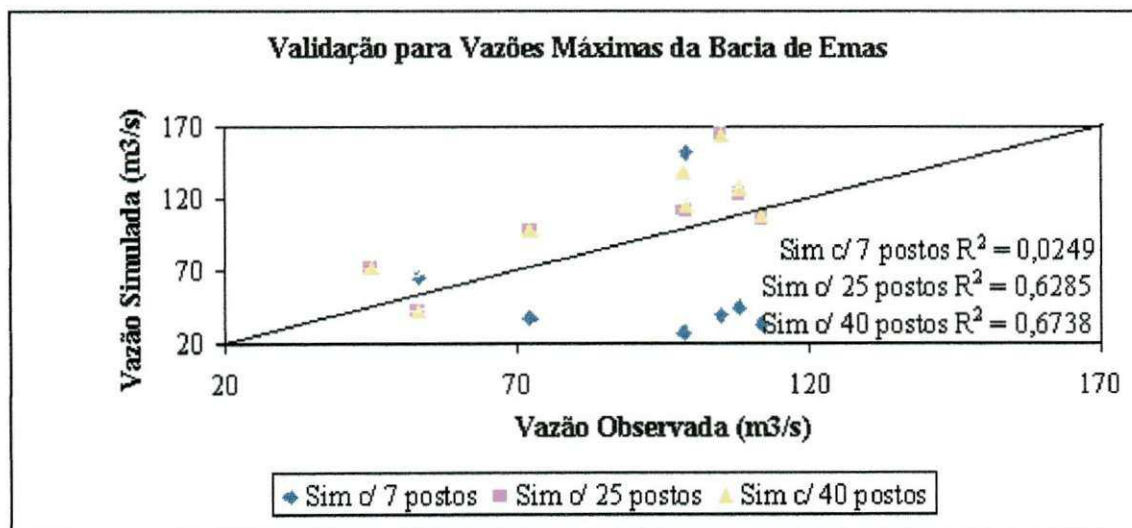


Figura 6.21. Validação das Vazões Máximas Simuladas em Emas.

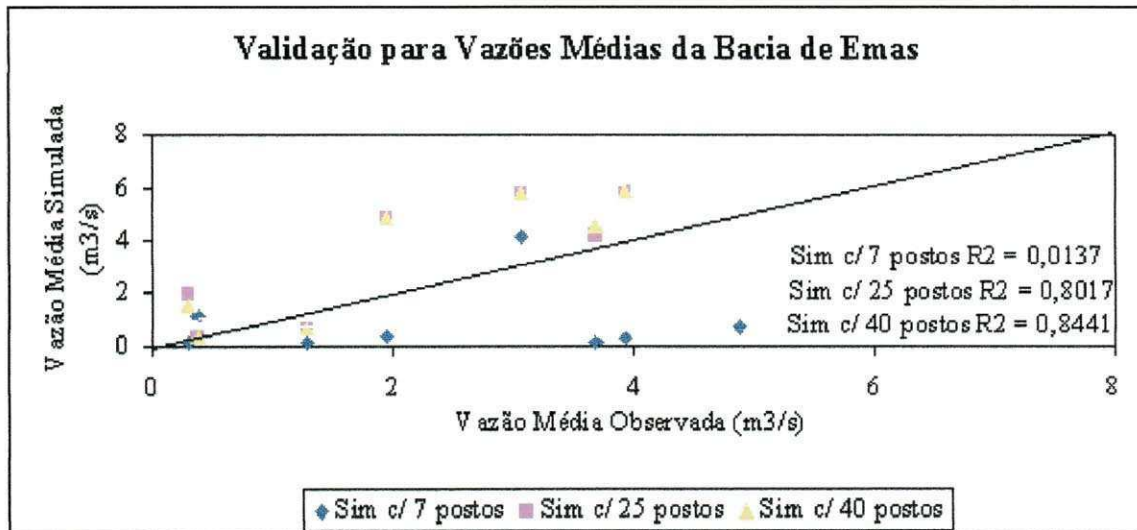


Figura 6.22. Validação das Vazões Médias Simuladas em Emas.

6.5.3. Bacia de Boqueirão de Mãe D'Água (1923 a 1946)– 1.063 km²

Os resultados obtidos para a bacia de Boqueirão Mãe D'Água encontram-se nas Figuras 6.23 e 6.24. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois se tem um bom coeficiente de determinação, principalmente para simulação das vazões médias. Não foi possível realizar a simulação com 40 postos, pois a bacia só tem dados de 1923 a 1946.

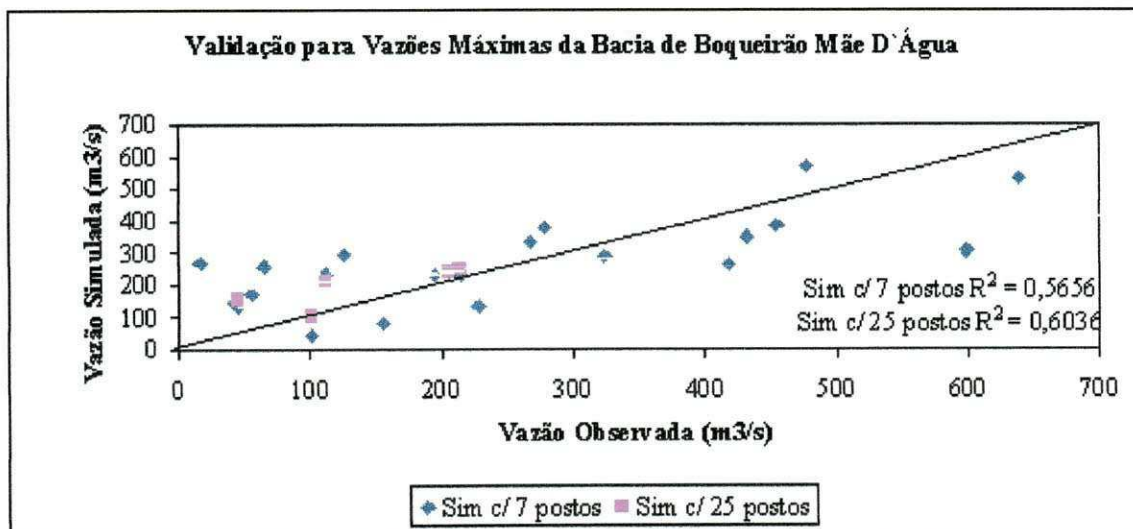


Figura 6.23. Validação das Vazões Máximas Simuladas em Boqueirão de Mãe D'água.

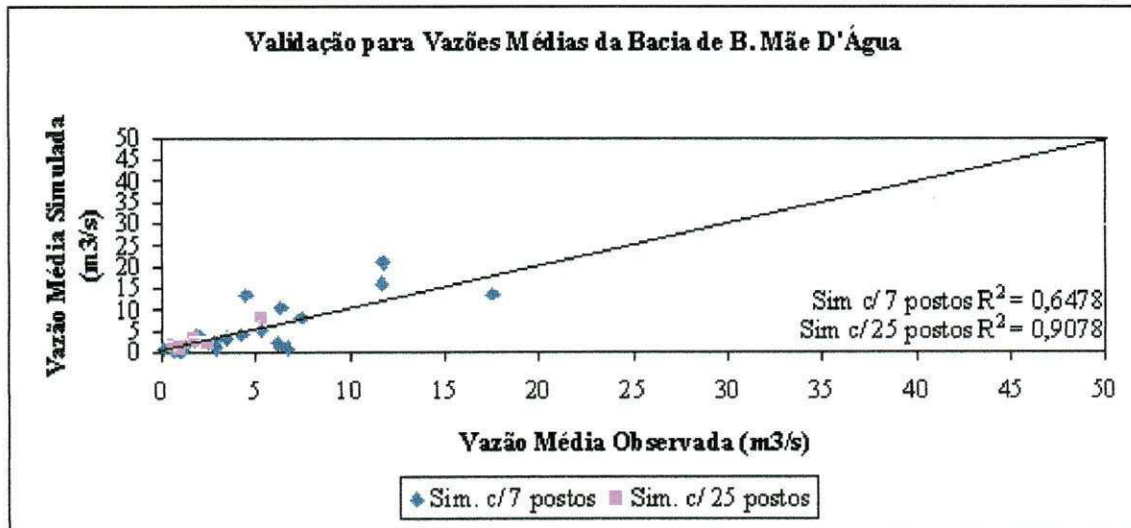


Figura 6.24. Validação das Vazões Médias Simuladas em Boqueirão de Mãe D'água.

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

Os resultados obtidos para a bacia de Pau Ferrado encontram-se nas Figuras 6.25 e 6.26. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois se tem um bom coeficiente de determinação, principalmente para as simulações com 40 postos. Pode-se notar que tanto na simulação das vazões e volumes com 7 postos, não houve um bom coeficiente de determinação, isto se deve ao fato da má distribuição dos 7 postos na região.

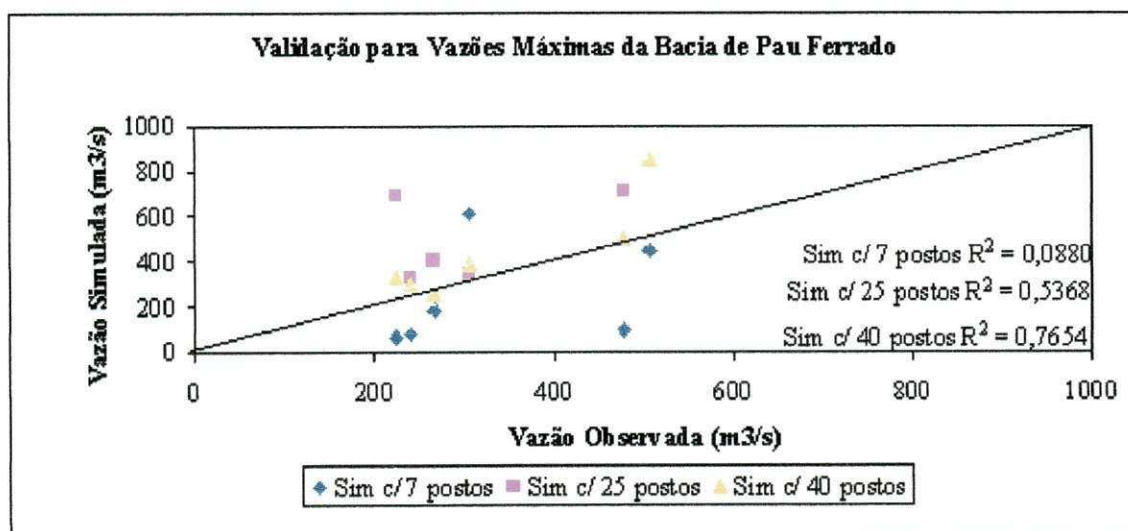


Figura 6.25. Validação das Vazões Máximas Simuladas em Pau Ferrado.

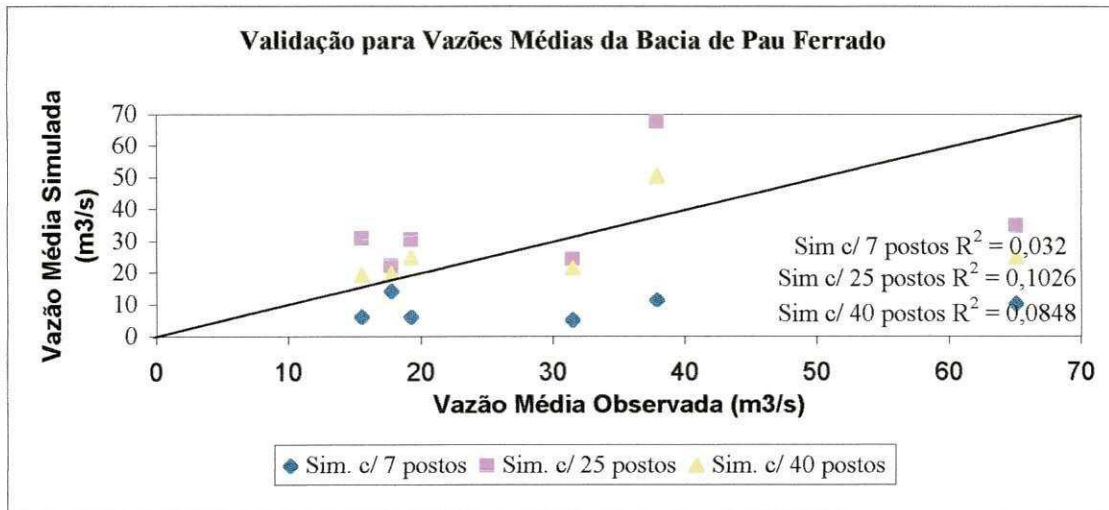


Figura 6.26. Validação das Vazões Médias Simuladas em Pau Ferrado.

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

Os resultados obtidos para a bacia de Antenor Navarro encontram-se nas Figuras 6.27 e 6.28. De um modo geral, os resultados obtidos não foram bons, pois os coeficientes de determinação são ruins, porém pode-se notar que na simulação das vazões médias com 7 postos, houve um bom coeficiente de determinação. A bacia de Antenor Navarro não tem um comportamento claro, pois em Braga (2001) também não obteve bons resultados para esta bacia.

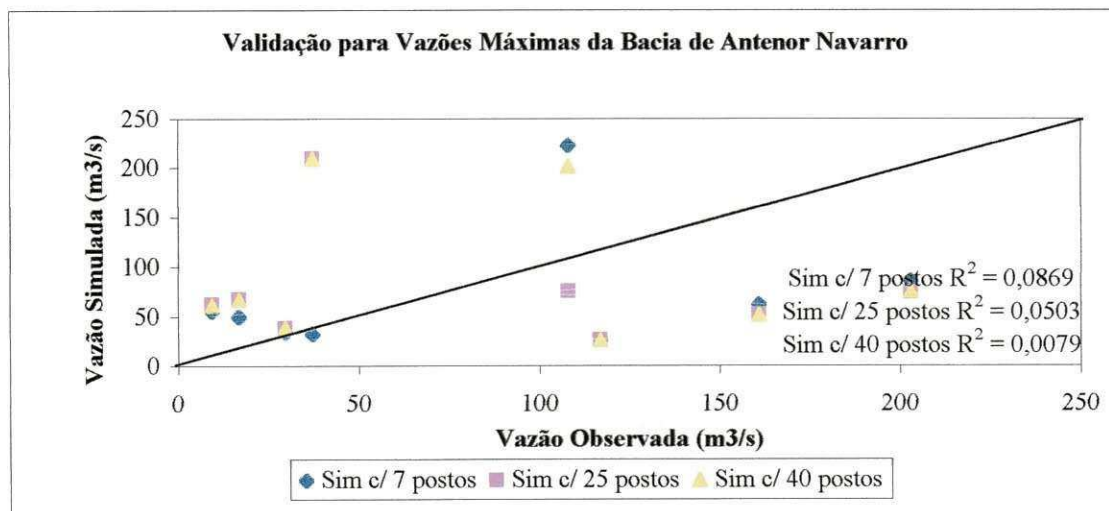


Figura 6.27. Validação das Vazões Máximas Simuladas em Antenor Navarro.

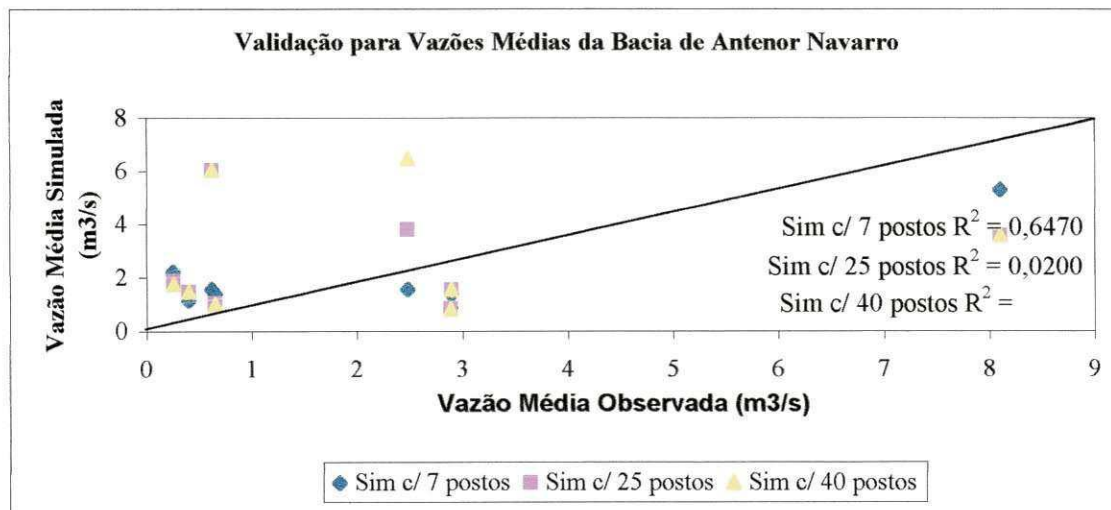


Figura 6.28. Validação das Vazões Médias Simuladas em Antenor Navarro.

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

Os resultados obtidos para a bacia de Sítio Vassouras encontram-se nas Figuras 6.29 e 6.30. De um modo geral, os resultados obtidos foram bons, pois se tem um bom coeficiente de determinação, principalmente para simulação das vazões médias, porém pode-se notar que tanto na simulação das vazões e volumes com 7 postos, não houve um bom coeficiente de determinação; isto se deve ao fato da precipitação numa grande região não ter sido bem representada por dados de poucos postos.

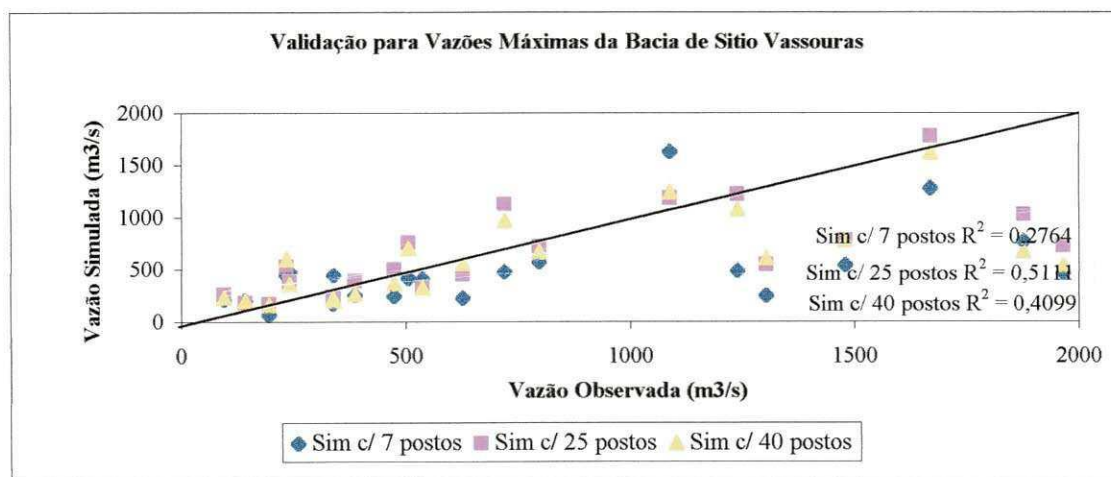


Figura 6.29. Validação das Vazões Máximas Simuladas em Sítio Vassouras.

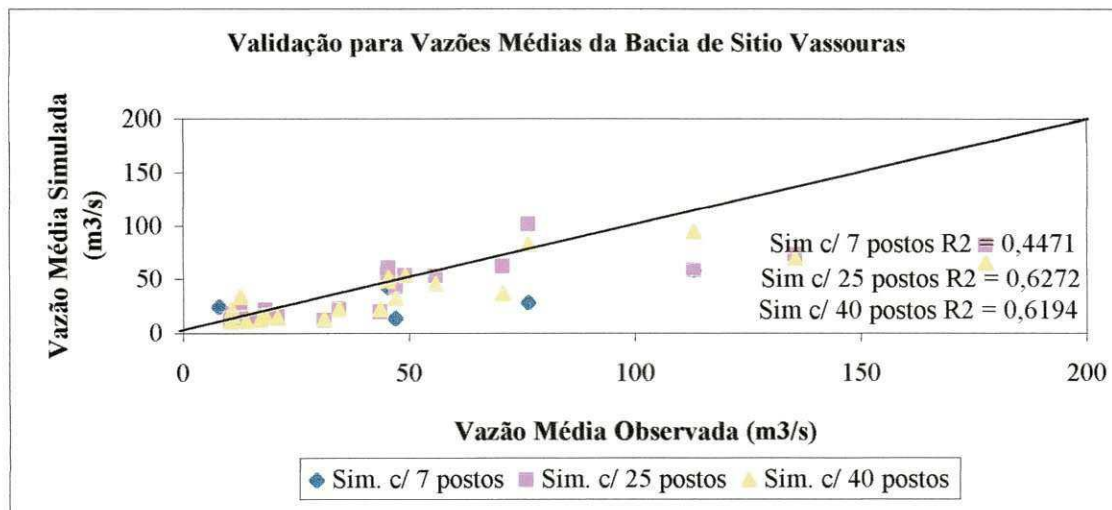


Figura 6.30. Validação das Vazões Médias Simuladas em Sitio Vassouras.

6.5.7. Verificação da Homogeneidade das Séries (Dupla Massa)

A análise de dupla massa se fez necessária para avaliar a consistência das séries simuladas dentro da região do estudo, em virtude de se ter períodos sem observações para comparação. O método da Dupla Massa, desenvolvido pelo *Geological Survey* (USA) foi utilizado para a análise de homogeneidade regional de séries anuais. As Figuras 6.31 e 6.32 mostram os resultados obtidos. Como pode ser visto, as séries simuladas apresentam razoável consistência segundo a metodologia empregada.

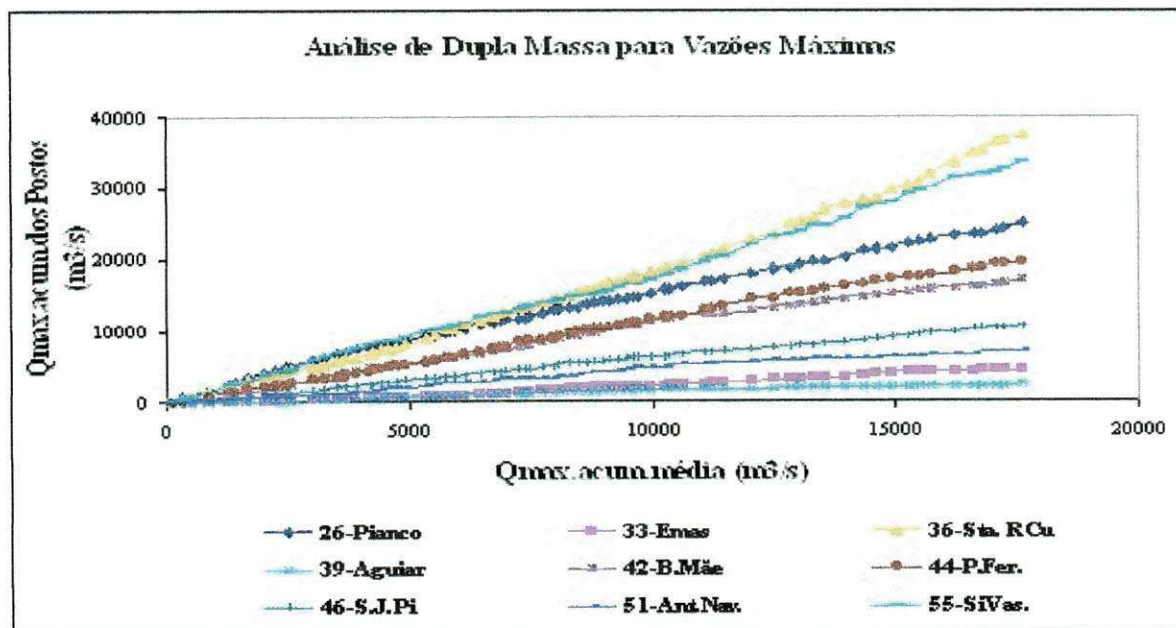


Figura 6.31. Análise de Dupla Massa das séries de Vazões Máximas Simuladas

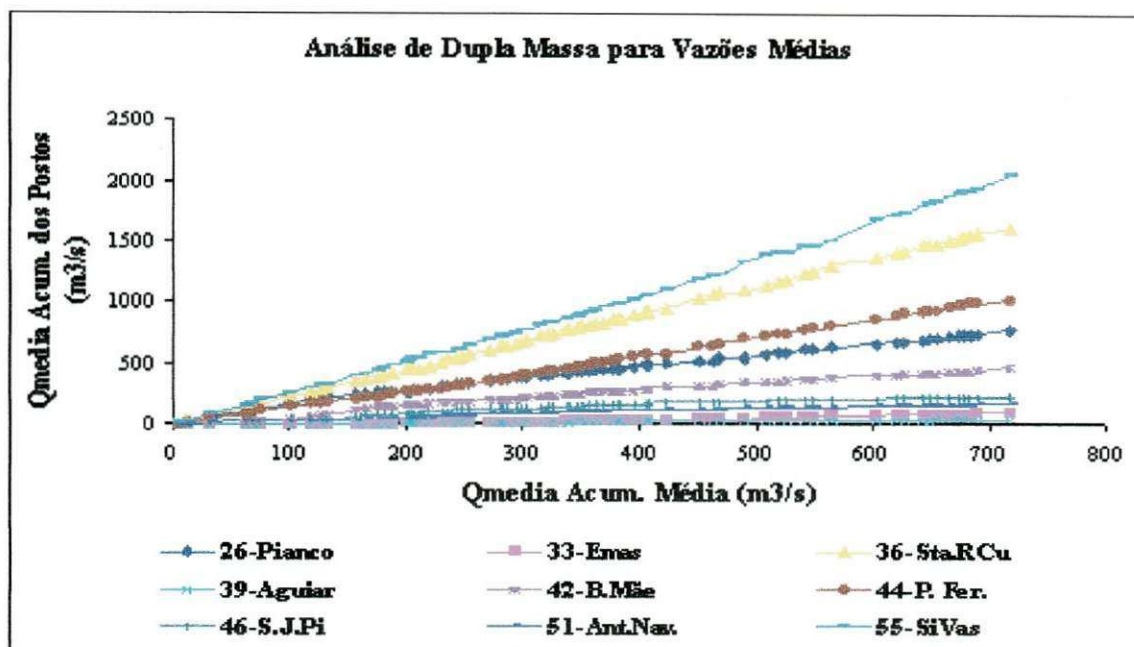


Figura 6.32. Análise de Dupla Massa das séries de Vazões Médias Simuladas

6.6. Comentários Finais

As simulações realizadas pelo modelo NAVMO geraram duas séries de longo período, uma série de vazão máxima e outra de vazão média. Em geral os resultados foram razoáveis. No posto de Aguiar não se pode fazer uma análise mais profunda, devido aos poucos dados dos seus dois anos da série. Nas bacias de Piancó, Emas, Boqueirão de Mãe D'Água e Sítio Vassouras as simulações foram boas tanto para as vazões máximas quanto para as vazões médias. Já nas bacias de Santa Rita do Coremas obteve-se melhor simulação para a vazão média. Em Pau Ferrado a melhor simulação foi para a vazão máxima. Em São Jose de Piranhas não se obteve uma boa simulação para nenhuma das duas séries. Para o período com dados, os resultados das simulações foram melhores para os períodos recentes. Para o período sem dados, os resultados se mostraram consistentes, porém com alguns valores destacados dos demais. Os diagramas de dupla massa mostraram que as séries simuladas apresentaram homogeneidade razoável.

CAPÍTULO 7

REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA NO ALTO RIO PIRANHAS

7.1. Variáveis

Esta etapa da pesquisa consistiu em investigar relações capazes de estimar variáveis hidrológicas, em locais sem dados, com base em características fisiográficas e climáticas na região do alto Rio Piranhas – PB.

Dentre as variáveis físicas da bacia que governam os processos hidrológicos, as mais são importantes a área de drenagem (A), o comprimento do rio principal (L), a declividade da bacia (S_b) e a densidade de drenagem (D_d). E dentre as variáveis climáticas a mais importante é a precipitação. No presente estudo optou-se por investigar três precipitações: a precipitação média anual (P_{med}), a precipitação máxima anual ($P_{max.annual}$) e a precipitação diária máxima anual ($P_{max.diária}$), mostradas na tabela 3.3 no capítulo 3.

7.2. Séries Temporais

Das séries simuladas com o modelo NAVMO, foram escolhidas as séries de vazões máximas anuais, médias de longo período (1913 a 1985) e vazões com 95% de garantia ($Q_{95\%}$) para as nove bacias. Na região do estudo, que possui longos períodos de estiagem, a vazão mínima é igual a zero. Como não se pode utilizar este valor, decidiu-se a vazão $Q_{95\%}$, que é freqüentemente usada como um índice representativo de vazão mínima explorável. As vazões $Q_{95\%}$ foram obtidas das análises de freqüências (vazões médias) que serviram de base para testar, também, o ajustamento de distribuições de probabilidade. Para facilidade computacional, foram estabelecidas funções para calcular a vazão $Q_{95\%}$ (Tabela 7.1). Assim, para se determinar $Q_{95\%}$ para uma dada bacia substitui-se o nível de garantia $N_G = 0,95$ na equação. Depois de constituídas, as séries anuais de vazões máximas e médias foram submetidas às análises de estacionariedade, homogeneidade e estatística para identificação do modelo probabilístico que melhor se ajustava as freqüências dos dados.

Tabela 7.1. Curvas de Permanência das Nove Sub-bacias

Sub-Bacia	Var. Dependente	Var. Independente	Curva de Permanência	R ²
Piancó	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 3,0053 N _G ^{-0,897}	0,7940
Emas	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 0,0596 N _G ^{-1,7637}	0,8331
S.R.do Coremas	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 7,8035 N _G ^{-0,7746}	0,7809
Aguiar	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 0,2076 N _G ^{-0,7549}	0,8249
B.de M. D'Água	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 1,3279 N _G ^{-1,0775}	0,7359
P. Ferrado	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 5,0904 N _G ^{-0,7551}	0,8739
S.J.do Piranhas	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 0,7315 N _G ^{-1,0177}	0,8089
A. Navarro	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 0,624 N _G ^{-0,9508}	0,5563
S.Vassouras	Q _i (m ³ /s)	N _G	Q _i = 8,7346 N _G ^{-0,8498}	0,9032

Q_i é a vazão com garantia i; N_G é o nível de garantia (-).

7.3. Distribuição de Probabilidade

A seleção da distribuição de probabilidade a ser adotada é comumente baseada em resultado de teste de aderência, já que, a priori, não se pode definir a distribuição populacional da amostra. A seleção da distribuição de probabilidade foi efetuada utilizando-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov e o ajuste dos parâmetros da cada distribuição realizado pelo método dos momentos.

Para as vazões máximas foram testadas as distribuições de probabilidade de Pearson III, Gama e a distribuição de extremos tipo I (Gumbel), as quais foram testadas com as frequências das vazões máximas anuais. Para as vazões médias de longo período foram testadas as distribuições de probabilidade de Pearson III, Gama, Normal e Log-Normal.

Neste estudo foi utilizada a planilha eletrônica EXCEL como ferramenta computacional, tanto para as distribuições quanto para as análises de correlações e regressões entre as variáveis explicativas e as hidrológicas. O programa apresentado por Kite (1977) também foi utilizado para checar os resultados com as estimativas dos parâmetros das distribuições. O teste de ajustamento utilizado foi o de Kolmogorov e Smirnow com nível de significância de 5%.

7.4. Análise de Estacionariedade

Segundo Koch & Rego (1985), os dados hidrometeorológicos apresentam muitas vezes não-homogeneidades em suas séries, que podem ser causadas por influências naturais ou artificiais. Costuma-se, na bibliografia, chamar os dados de consistentes quando não são influenciados por erros de medição e de homogêneos quando o regime hidrológico representado pelos dados não é perturbado por influências naturais ou artificiais. Em ambos os casos, quando erros e perturbações ocorrem, as estatísticas das séries são afetadas causando não estacionariedades. No presente estudo testes paramétricos e não paramétricos foram utilizados para investigar a não estacionariedade das séries, enquanto o teste de dupla massa foi utilizado para investigar a homogeneidade regional das séries.

Os testes abaixo foram realizados com um programa utilizando a planilha EXCEL, o qual foi desenvolvido por Tröger, da Superintendência de Usos Múltiplos – ANA, para testar as características das séries. O programa divide automaticamente a série investigada em dois períodos, para os quais as estatísticas são testadas.

7.4.1. Testes Paramétricos

Esta metodologia é aplicada quando há indícios de mudanças no comportamento das estatísticas de uma série a partir de um determinado período. Os testes usualmente empregados são o de *Student* para a média e o de *Snedecor* para a variância segundo Freitas et al. (2002). Os resultados desses testes para 5% de nível de significância (α) encontram-se nas Tabelas 7.2 a 7.5.

a) Teste de Student:

Conforme se vê nas Tabelas 7.2. e 7.3, as médias das séries de vazões máximas das sub-bacias de Emas e Santa Rita do Coremas diferem ao nível de significância de 5%. No entanto, para as vazões médias a hipótese nula (H_0) foi rejeitada apenas para a sub-bacia de Emas. De um modo geral as séries de vazões máximas podem ser aceitas, inclusive as séries de Emas e Santa Rita do Coremas, porém com ressalvas.

Tabela 7.2. Teste de Student para Vazões Máximas ($\alpha = 5\%$)

Bacia	t_{amostra}	t_{critico}	Resultado*	H₀
Piancó	0,844	1,994	Médias são iguais	Aceita
Emas	-2,808	1,994	Médias são diferentes	Rejeitada
S. R. do Coremas	-2,996	1,994	Médias são diferentes	Rejeitada
Aguiar	1,206	1,994	Médias são iguais	Aceita
B. de M.D'Água	0,573	1,994	Médias são iguais	Aceita
Pau Ferrado	-0,693	1,994	Médias são iguais	Aceita
S.J.do Piranhas	0,017	1,994	Médias são iguais	Aceita
A.Navarro	-0,420	1,994	Médias são iguais	Aceita
S.Vassouras	-1,614	1,994	Médias são iguais	Aceita

*(Tröger, F.H. - Superintendência de Usos Múltiplos - ANA).

Tabela 7.3. Teste de Student para Vazões Médias ($\alpha = 5\%$)

Bacia	t_{amostra}	t_{critico}	Resultado*	H₀
Piancó	0,646	1,994	Médias são iguais	Aceita
Emas	-2,728	1,994	Médias são diferentes	Rejeitada
S. R. do Coremas	1,809	1,994	Médias são iguais	Aceita
Aguiar	-1,020	1,994	Médias são iguais	Aceita
B. de M.D'Água	-0,030	1,994	Médias são iguais	Aceita
Pau Ferrado	-1,576	1,994	Médias são iguais	Aceita
S.J.do Piranhas	1,809	1,994	Médias são iguais	Aceita
A.Navarro	0,398	1,994	Médias são iguais	Aceita
S.Vassouras	-1,630	1,994	Médias são iguais	Aceita

*(Tröger, F.H. - Superintendência de Usos Múltiplos - ANA).

b) Teste de Snedecor:

Conforme se vê nas Tabelas 7.4. e 7.5, as variâncias de duas séries de vazões máximas (Aguiar e Boqueirão Mão D'Água) e de quatro séries de vazões médias (Piancó, Santa Rita do Coremas, Boqueirão Mãe D'Água e São José de Piranhas) diferiram ao nível significância de 5%. Deve-se observar que para as vazões máximas, o teste é discrepante apenas para a bacia de Boqueirão Mão D'Água. Para as vazões médias, o teste mostrou resultados limítrofes para três das quatro séries, isto é, a diferença entre as variáveis de testes e as críticas foram pequenas, exceto para a série da bacia de Piancó que teve valores discrepantes.

Tabela 7.4. Teste de Snedecor para Vazões Máximas ($\alpha = 5\%$)

Bacia	F_{amostra}	F_{critico}	Resultado*	H₀
Piancó	1,190	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
Emas	0,403	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
S. R. do Coremas	0,174	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
Aguiar	1,754	1,752	Variâncias são diferentes	Rejeitada
B. de M.D'Água	2,581	1,752	Variâncias são diferentes	Rejeitada
Pau Ferrado	0,721	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
S.J.de Piranhas	1,392	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
A.Navarro	1,310	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
S.Vassouras	0,375	1,752	Variâncias são iguais	Aceita

*(Tröger, F.H. - Superintendência de Usos Múltiplos-ANA).

Tabela 7.5. Teste de Snedecor para Vazões Médias ($\alpha = 5\%$)

Bacia	F_{amostra}	F_{critico}	Resultado*	H₀
Piancó	2,349	1,752	Variâncias são diferentes	Rejeitada
Emas	0,156	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
S. R. do Coremas	1,865	1,752	Variâncias são diferentes	Rejeitada
Aguiar	0,671	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
B. de M.D'Água	1,994	1,752	Variâncias são diferentes	Rejeitada
Pau Ferrado	0,571	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
S.J.do Piranhas	1,865	1,752	Variâncias são diferentes	Rejeitada
A.Navarro	0,985	1,752	Variâncias são iguais	Aceita
S.Vassouras	0,332	1,752	Variâncias são iguais	Aceita

*(Tröger, F.H. - Superintendência de Usos Múltiplos-ANA).

7.4.2. Testes não Paramétricos

A vantagem desta metodologia é sua aplicabilidade mesmo quando as séries observadas não se ajustam à distribuição normal, critério exigido na utilização dos testes paramétricos. Isso poderá ser aplicado a vazões máximas e mínimas que geralmente não se distribuem normalmente. Existem vários testes não paramétricos, sendo utilizado a seguir apenas o de Wilcoxon com nível de significância (α) de 5%.

a) Teste de Wilcoxon:

Conforme se vê nas Tabelas 7.6. e 7.7, duas séries de vazões máximas (Emas e Santa Rita do Coremas) e três séries de vazões médias (Emas, Santa Rita do Coremas e São José de Piranhas) apresentam resultados em que a hipótese nula foi rejeitada. No entanto, apenas no caso da bacia de Emas o resultado do teste é discrepante.

Tabela 7.6. Teste de Wilcoxon para Vazões Máximas ($\alpha = 5\%$)

Bacia	$Z_{amostra}$	$Z_{critico}$	Resultado*	H_0
Piancó	-0,861	1,960	Não há tendência	Aceita
Emas	-2,736	1,960	Há tendência	Rejeitada
S. R.do Coremas	-1,975	1,960	Há tendência	Rejeitada
Aguiar	-1,103	1,960	Não há tendência	Aceita
B.de M. D'Água	-0,143	1,960	Não há tendência	Aceita
Pau Ferrado	-0,684	1,960	Não há tendência	Aceita
S.J.de Piranhas	-0,177	1,960	Não há tendência	Aceita
A.Navarro	-0,657	1,960	Não há tendência	Aceita
S.Vassouras	-0,866	1,960	Não há tendência	Aceita

*(Tröger, F.H. - Superintendência de Usos Múltiplos-ANA).

Tabela 7.7. Teste de Wilcoxon para Vazões Médias ($\alpha = 5\%$)

Bacia	$Z_{amostra}$	$Z_{critico}$	Resultado*	H_0
Piancó	-0,342	1,960	Não há tendência	Aceita
Emas	-3,321	1,960	Há tendência	Rejeitada
S. R. do Coremas	-1,986	1,960	Há tendência	Rejeitada
Aguiar	-1,192	1,960	Não há tendência	Aceita
B.de M.D'Água	-0,651	1,960	Não há tendência	Aceita
Pau Ferrado	-1,600	1,960	Não há tendência	Aceita
S.J.de Piranhas	-1,986	1,960	Há tendência	Rejeitada
A.Navarro	-0,734	1,960	Não há tendência	Aceita
S.Vassouras	1,319	1,960	Não há tendência	Aceita

*(Tröger, F.H. - Superintendência de Usos Múltiplos-ANA).

7.4.3. Verificação da Homogeneidade das Séries (Dupla Massa)

As Figuras 6.31 e 6.32 introduzidas no capítulo 6 mostraram que os resultados das simulações para as vazões máximas e médias, respectivamente, apresentam razoável homogeneidade conforme o teste de dupla massa empregado em todas as séries. Assim

sendo, as poucas restrições dos testes paramétricos não apresentam empecilho na utilização das séries simuladas. Ademais, os testes de distribuições servirão de base e verificação.

7.5. Teste de Ajustamento de Distribuições de Probabilidade

7.5.1. Teste K-S

a) Distribuição Log-Normal:

Conforme se vê na Tabela 7.8., a distribuição probabilística Log-Normal não foi ajustada às frequências dos dados médios, nas sub-bacias da Aguiar, Pau Ferrado e Antenor Navarro. No entanto, as diferenças entre os valores de teste e críticos foram insignificantes para as sub-bacias de Aguiar e Pau Ferrado. De um modo geral a distribuição pode ser adotada para a estimativa das vazões médias, exceto para Antenor Navarro.

Tabela 7.8. Teste de Kolmogorov-Smirnov para distribuição Log-Normal (Q_{med})

	Piancó	Emas	SRCurema	Aguiar	BMD'água	Pferrado	SJPiranhas	A Navarro	S Vass
D_t	0,0791	0,0589	0,0520	0,1039	0,0798	0,1005	0,0670	0,3700	0,0556
$D_{c,n,5\%}$	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
Teste H_0 :	Accepta	Accepta	Accepta	Rejeitada	Accepta	Rejeitada	Accepta	Rejeitada	Accepta

onde: D_t é a variável de teste; $D_{c,n,5\%}$ é variável crítica para n dados e significância (α) de 5%; H_0 é a hipótese nula.

b) Distribuição de Gumbel:

O teste da distribuição de Gumbel às frequências das vazões máximas (Tabela 7.9), não passou em duas sub-bacias, Emas e Sitio Vassouras, no entanto as diferenças não foram marcantes. Assim, a distribuição pode ser adotada para a estimativa das vazões máximas.

Tabela 7.9. Teste de Kolmogorov-Smirnov para distribuição de Gumbel (Q_{max})

	Piancó	Emas	SRCurema	Aguiar	BMD'água	Pferrado	S J Piranhas	A Navarro	S Vass
D_t	0,0901	0,1493	0,0463	0,0968	0,0637	0,0503	0,0700	0,0798	0,1119
$D_{c,n,5\%}$	0,1110	0,1110	0,1110	0,1110	0,1110	0,1110	0,1110	0,1110	0,1110
Teste H_0 :	Accepta	Rejeitada	Accepta	Accepta	Accepta	Accepta	Accepta	Accepta	Rejeitada

onde: D_t é a variável de teste; $D_{c,n,5\%}$ é variável crítica para n dados e significância (α) de 5%; H_0 é a hipótese nula.

c) Distribuição Gama:

As Tabelas 7.10 e 7.11 mostram os resultados do teste. Como visto, a distribuição foi rejeitada em Emas e Aguiar (vazões médias), mas com pequena diferença em Aguiar.

Tabela 7.10. Teste de Kolmogorov-Smirnov para distribuição Gama (Q_{max}).

	Piancó	Emas	SRCurema	Aguiar	BMD'água	Pferrado	S J Piranhas	A Navarro	S Vass
D_t	0,0772	0,1053	0,0349	0,0666	0,0756	0,0775	0,0858	0,0603	0,0517
$D_{c,n,5\%}$	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410
Teste Ho:	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

onde: D_t é a variável de teste; $D_{c,n,5\%}$ é variável crítica para n dados e significância (α) de 5%; Ho é a hipótese nula.

Tabela 7.11. Teste de Kolmogorov-Smirnov para distribuição Gama (Q_{med}).

	Piancó	Emas	SRCurema	Aguiar	BMD'água	Pferrado	S J Piranhas	A Navarro	S Vass
D_t	0,1154	0,2305	0,0865	0,1641	0,0754	0,1053	0,0906	0,1090	0,1281
$D_{c,n,5\%}$	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410
Teste Ho:	Aceita	Rejeitada	Aceita	Rejeitada	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

onde: D_t é a variável de teste; $D_{c,n,5\%}$ é variável crítica para n dados e significância (α) de 5%; Ho é a hipótese nula.

d) Distribuição Pearson III:

A distribuição de Pearson III não foi rejeitada em nenhuma das bacias e pode, portanto, ser utilizada sem restrições para a estimativa das vazões máximas e médias na região conforme pode ser visto nas Tabelas 7.12 e 7.13.

Tabela 7.12. Teste de Kolmogorov-Smirnov para distribuição Pearson III (Q_{max}).

	Piancó	Emas	SRCurema	Aguiar	BMD'água	P Ferrado	S J Piranhas	A Navarro	S Vass
D_t	0,0781	0,1078	0,0487	0,0687	0,0650	0,0585	0,0729	0,0725	0,0649
$D_{c,n,5\%}$	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410
Teste Ho:	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

onde: D_t é a variável de teste; $D_{c,n,5\%}$ é variável crítica para n dados e significância (α) de 5%; Ho é a hipótese nula.

Tabela 7.13. Teste de Kolmogorov-Smirnov para distribuição Pearson III (Q_{med}).

	Piancó	Emas	SRCurema	Aguiar	BMD'água	P Ferrado	S J Piranhas	A Navarro	S Vass
D_t	0,0781	0,1078	0,0487	0,0687	0,0650	0,0585	0,0729	0,0725	0,0649
$D_{c,n,5\%}$	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410	0,1410
Teste Ho:	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

onde: D_t é a variável de teste; $D_{c,n,5\%}$ é variável crítica para n dados e significância (α) de 5%; Ho é a hipótese nula.

7.6. Relações entre Vazões, Período de Retorno e Área da Bacia

Para as várias distribuições de probabilidade investigadas, relações entre as vazões e a área da bacia foram estabelecidas para diferentes períodos de retorno. As Tabelas 7.14 a 7.19 mostram os resultados. Como pode ser visto, os melhores resultados foram obtidos com as estimativas feitas com as distribuições Pearson III, similares aos da distribuição Gama. As equações obtidas para a vazão máxima a partir dos valores estimados com Gumbel também se mostraram boas. Para a vazão média as vazões estimadas com Log-Normal não se correlacionaram bem com a área da bacia. De um modo geral a função de regressão logaritma foi mais representativa do que a função exponencial.

a) Distribuição Log-Normal:

Tabela 7.14. Regressões entre vazões máximas e área para diferentes Períodos de Retorno - distribuição Log-Normal (Q_{med})

P. Retorno	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
2	Q ₂ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂ = 4,2073 ln A – 26,1736	0,5978	Q ₂ = -5,6920 A ^{0,8761}	0,6640
5	Q ₅ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅ = 7,9380 ln A – 48,2745	0,5565	Q ₅ = -3,7193 A ^{0,7259}	0,5339
10	Q ₁₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀ = 11,0239 ln A – 65,8853	0,5329	Q ₁₀ = -2,6701 A ^{0,6451}	0,4361
50	Q ₅₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀ = 19,1184 ln A – 109,0062	0,4814	Q ₅₀ = -0,8353 A ^{0,5027}	0,2543
100	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀₀ = 23,0594 ln A – 128,1090	0,4565	Q ₁₀₀ = -0,1732 A ^{0,4511}	0,1959
200	Q ₂₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂₀₀ = 27,0386 ln A – 145,7951	0,4299	Q ₂₀₀ = -0,4156 A ^{0,4051}	0,1502
500	Q ₅₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀₀ = 32,5380 ln A – 166,7217	0,3883	Q ₅₀₀ = 1,1502 A ^{0,3476}	0,1026

b) Distribuição de Gumbel:

Tabela 7.15. Regressões entre vazões máximas e área para diferentes Períodos de Retorno - distribuição Gumbel (Q_{max})

P. Retorno	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
2,33	Q _{2,33} (m ³ /s)	A(km ²)	Q _{2,33} = 105,5720 ln A – 593,6385	0,8124	Q _{2,33} = 0,3177 A ^{0,6158}	0,7141
5	Q ₅ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅ = 162,5221 ln A – 916,8510	0,8191	Q ₅ = 0,8234 A ^{0,6063}	0,7297
10	Q ₁₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀ = 208,9072 ln A – 1180,1029	0,8178	Q ₁₀ = 1,1010 A ^{0,6028}	0,7353
50	Q ₅₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀ = 310,9933 ln A – 1759,4784	0,8135	Q ₅₀ = 1,5268 A ^{0,5990}	0,7410
100	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀₀ = 354,1508 ln A – 2004,4125	0,8120	Q ₁₀₀ = 1,6633 A ^{0,5981}	0,7422
200	Q ₂₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂₀₀ = 397,1508 ln A – 2248,4528	0,8106	Q ₂₀₀ = 1,7829 A ^{0,5974}	0,7432
500	Q ₅₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀₀ = 453,8811 ln A – 2570,4178	0,8091	Q ₅₀₀ = 1,9215 A ^{0,5967}	0,7442

c) Distribuição de Gama:

Tabela 7.16. Regressões entre vazões máximas e área para diferentes Períodos de Retorno - distribuição Gama (Q_{max})

P. Retorno	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
2	Q ₂ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂ = 87,6386 ln A - 491,3043	0,7935	Q ₂ = 0,0199 A ^{0,6293}	0,6958
5	Q ₅ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅ = 155,1059 ln A - 874,3257	0,8197	Q ₅ = 0,7355 A ^{0,6114}	0,7256
10	Q ₁₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀ = 201,6877 ln A - 1139,1486	0,8190	Q ₁₀ = 1,0508 A ^{0,6046}	0,7345
50	Q ₅₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀ = 303,3820 ln A - 1717,8454	0,8080	Q ₅₀ = 1,5276 A ^{0,5957}	0,7433
100	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀₀ = 346,9438 ln A - 1965,8886	0,8026	Q ₁₀₀ = 1,6813 A ^{0,5991}	0,7451
200	Q ₂₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂₀₀ = 388,9488 ln A - 2205,1867	0,7975	Q ₂₀₀ = 1,8113 A ^{0,5909}	0,7461
500	Q ₅₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀₀ = 445,8641 ln A - 2529,3728	0,7911	Q ₅₀₀ = 1,9654 A ^{0,5886}	0,7470

Tabela 7.17. Regressões entre vazões máximas e área para diferentes Períodos de Retorno - distribuição Gama (Q_{med})

P. Retorno	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
2	Q ₂ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂ = 5,1547 ln A - 32,1624	0,8310	Q ₂ = -6,6385 A ^{1,0263}	0,7968
5	Q ₅ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅ = 10,4285 ln A - 64,3120	0,8263	Q ₅ = -4,6765 A ^{0,8890}	0,8057
10	Q ₁₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀ = 14,2412 ln A - 87,3182	0,8172	Q ₁₀ = -3,9717 A ^{0,8465}	0,7912
50	Q ₅₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀ = 22,8353 ln A - 138,7270	0,7984	Q ₅₀ = -3,0191 A ^{0,7949}	0,7597
100	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀₀ = 26,5942 ln A - 161,0715	0,7915	Q ₁₀₀ = -2,7347 A ^{0,7808}	0,7484
200	Q ₂₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂₀₀ = 30,2521 ln A - 182,7531	0,7854	Q ₂₀₀ = -2,5016 A ^{0,7697}	0,7386
500	Q ₅₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀₀ = 35,2489 ln A - 212,2846	0,7779	Q ₅₀₀ = -2,2329 A ^{0,7574}	0,7269

d) Distribuição de Pearson III:

Tabela 7.18. Regressões entre vazões máximas e área para diferentes Períodos de Retorno - distribuição Pearson III (Q_{max})

P. Retorno	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
2	Q ₂ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂ = 87,8017 ln A - 489,9397	0,8064	Q ₂ = 0,0583 A ^{0,6267}	0,6903
5	Q ₅ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅ = 155,4118 ln A - 874,0839	0,8232	Q ₅ = 0,7572 A ^{0,6099}	0,7226
10	Q ₁₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀ = 201,9008 ln A - 1140,2148	0,8191	Q ₁₀ = 1,0530 A ^{0,6045}	0,7344
50	Q ₅₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀ = 303,0369 ln A - 1722,2472	0,8063	Q ₅₀ = 1,4905 A ^{0,5986}	0,7491
100	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₁₀₀ = 346,2479 ln A - 1971,7929	0,8011	Q ₁₀₀ = 1,6296 A ^{0,5971}	0,7529
200	Q ₂₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₂₀₀ = 388,8746 ln A - 2212,5501	0,7964	Q ₂₀₀ = 1,7466 A ^{0,5960}	0,7558
500	Q ₅₀₀ (m ³ /s)	A(km ²)	Q ₅₀₀ = 444,1863 ln A - 2538,7099	0,7907	Q ₅₀₀ = 1,8847 A ^{0,5949}	0,7588

Tabela 7.19. Regressões entre vazões máximas e área para diferentes Períodos de Retorno - distribuição Pearson III (Q_{med})

P. Retorno	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
2	Q_2 (m ³ /s)	A(km ²)	$Q_2 = 4,8054 \ln A - 29,9610$	0,8172	$Q_2 = -6,5525 A^{1,0082}$	0,8079
5	Q_5 (m ³ /s)	A(km ²)	$Q_5 = 9,7826 \ln A - 60,2769$	0,8283	$Q_5 = -4,6253 A^{0,8759}$	0,8030
10	Q_{10} (m ³ /s)	A(km ²)	$Q_{10} = 13,7991 \ln A - 84,5745$	0,8225	$Q_{10} = -3,9453 A^{0,8399}$	0,7885
50	Q_{50} (m ³ /s)	A(km ²)	$Q_{50} = 23,6092 \ln A - 143,6217$	0,7960	$Q_{50} = -3,0105 A^{0,7972}$	0,7654
100	Q_{100} (m ³ /s)	A(km ²)	$Q_{100} = 28,1329 \ln A - 170,7609$	0,7841	$Q_{100} = -2,7289 A^{0,7857}$	0,7579
200	Q_{200} (m ³ /s)	A(km ²)	$Q_{200} = 32,6385 \ln A - 197,7609$	0,7731	$Q_{200} = -2,4975 A^{0,7766}$	0,7517
500	Q_{500} (m ³ /s)	A(km ²)	$Q_{500} = 38,9321 \ln A - 235,4043$	0,7595	$Q_{500} = -2,2303 A^{0,7667}$	0,7443

7.7. Relações entre Índice Regional, Período de Retorno e Características da Bacia

Os indicadores regionais mais usuais são:

$$a_T = \frac{Q_T}{Q_{2,33}}; a_T = \frac{Q_T}{Q_2}; a_T = \frac{Q_T}{Q_{mlp}} \text{ e } a_{95\%} = \frac{Q_{95\%}}{Q_{mlp}}$$

onde: o primeiro se aplica nas estimativas das vazões máximas, com período de retorno T, com base na estimativa da vazão máxima média da distribuição de Gumbel, que corresponde no período de retorno de 2,33anos. O segundo se aplica na estimativa das vazões máximas com período de retorno T, com base na estimativa da vazão máxima com período de retorno de 2 anos. O terceiro se aplica na estimativa das vazões, com período de retorno T, com base na vazão média de longo período. O quarto se aplica na estimativa da vazão com 95% de garantia.

Em todos os casos, adota-se o seguinte procedimento:

- I. Correlaciona-se a_T com o período de retorno e define-se uma função de regressão $a_T = f(T)$;
- II. Correlaciona-se $Q_{2,33}$, Q_2 ou Q_{mlp} com as características da bacia (A, L, etc) e define-se uma função de regressão $Q_i = f(A, L, etc)$ onde i indica o índice da vazão;

- III. Para a aplicação escolhe-se o período de retorno (T) desejado e calcula-se o índice a_T ;
- IV. Para o local sem dados define-se as características da bacia e calcula-se $Q_{2,33}$, Q_2 , Q_{mip} com as funções de regressão;
- V. Em seguida determina-se $Q_T = a_T Q_{2,33}$, $Q_T = a_T Q_2$, $Q_T = a_T Q_{mip}$ e $Q_{95\%} = a_{95\%} Q_{mip}$.

Na Tabela 7.20 são mostrados os indicadores de regionalização que foram utilizados nesta pesquisa, como: a vazão média de longo período (Q_{mip}), a vazão com 95% de garantia ($Q_{95\%}$) e vazão com 2,33 anos de período de retorno ($Q_{2,33}$) específica da distribuição de Gumbel.

Tabela 7.20. Indicadores Regionais

Sub-Bacia	A (km ²)	Q _{mip} (m ³ /s)	Q _{95%} (m ³ /s)	Vazões Máximas (m ³ /s)			Vazões Médias (m ³ /s)		
				Q _{2,33} Gumbel	Q ₂ Gama	Q ₂ Pearson III	Q ₂ Log-Normal	Q ₂ Gama	Q ₂ Pearson III
Piancó	4550	10,565	3,147	286,9606	239,0367	246,3012	7,1846	7,6094	7,1132
Emas	530	1,292	0,065	50,9955	35,9119	36,2261	0,3308	0,3039	0,3703
S R do Coremas	6869	22,055	8,12	419,4828	374,6105	363,9059	16,5637	17,9321	17,7995
Aguiar	495	0,578	0,216	25,8488	20,6857	20,8057	0,4322	0,4297	0,3813
B. de M. D'água	1063	6,438	1,403	196,6519	160,9460	169,1954	3,7831	4,1816	3,5903
P. Ferrado	8050	13,922	5,291	255,2759	217,1150	224,6680	2,3610	11,0255	10,3620
S. J. de Piranhas	475	3,175	0,771	129,7993	116,2126	119,1736	1,9662	2,1445	2,0478
A. Navarro	1580	2,41	0,655	92,389	77,9371	80,3081	1,4677	1,5108	1,3630
S. Vassouras	14850	28,157	9,124	466,5397	368,1134	373,4922	19,9441	20,2052	18,0851

onde: Q_{mip} é a vazão média de longo período; $Q_{95\%}$ é a vazão com 95% de garantia; $Q_{2,33}$ é a vazão com 2,33 anos de período de retorno; Q_2 é a vazão com 2 anos de período de retorno.

7.7.1. Regionalização I, para Q_{mip} com regressões simples

As Tabelas 7.21 a 7.23 mostram os resultados obtidos para a Q_{mip} considerando duas funções de regressão simples, uma logarítmica e outra potencial. Pode-se notar que os resultados para as equações logarítmicas são melhores do que as equações potenciais para todas as distribuições. Pode-se dizer que, em geral, os resultados são bastante razoáveis, principalmente com as estimativas de Pearson III.

Tabela 7.21. Equações de Regressões Simples para a_T (Q_{max})

Distribuição	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
Gumbel	a_T	T(anos)	$a_T = 0,6703 \ln T + 0,3094$	0,9938	$a_T = 0,3707 T^{0,4527}$	0,7865
Gama	a_T	T(anos)	$a_T = 0,6218 \ln T + 0,4885$	0,9912	$a_T = 0,6597 T^{0,3303}$	0,8994
Pearson III	a_T	T(anos)	$a_T = 0,5985 \ln T + 0,5157$	0,9898	$a_T = 0,667 T^{0,3236}$	0,8876

Tabela 7.22. Equações de Regressões Simples para a_T (Q_{med})

Distribuição	Var. Dep.	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
Gumbel	a_T	T(anos)	$a_T = 7,1050 \ln T - 1,9581$	0,9615	$a_T = 0,7338 T^{0,5305}$	0,9526
Gama	a_T	T(anos)	$a_T = 1,0833 \ln T + 0,0531$	0,9917	$a_T = 0,4636 T^{0,4777}$	0,8829
Pearson III	a_T	T(anos)	$a_T = 1,1536 \ln T - 0,0296$	0,9897	$a_T = 0,4666 T^{0,4846}$	0,9222

Tabela 7.23. Equações de Regressões Simples para Q_{mlp}

	Var. Indep.	Equação Logaritma	R ²	Equação Potencial	R ²
Para Q_{max}	A(km)	$Q_{mlp} = 104,14 \ln A - 585,52$	0,8118	$Q_{mlp} = 1,35 A^{0,6162}$	0,7134
Para Q_{med}	A(km)	$Q_{mlp} = 6,6686 \ln A - 41,158$	0,8279	$Q_{mlp} = 0,0059 A^{0,6162}$	0,8094
Para Q_{med} (Logaritmizado)	A(km)	$Q_{mlp} = 1,0167 \ln A - 6,6005$	0,8118	$Q_{mlp}^* = 0,0252 A^{0,5035}$	0,6431

* As bacias de Emas e Aguiar apresentaram valores logaritmizados negativos, com isto não foram incluídas na equação potencial para a vazão média de longo período.

7.7.2. Regionalização II, para Q_{mlp} com regressões múltiplas

A Tabela 7.24 mostra os resultados obtidos para a estimativa de Q_{mlp} . Pode-se notar que todas as regressões apresentaram boas correlações, sendo a área e o comprimento da bacia as variáveis que mais explicaram a vazão; o acréscimo das outras 5 variáveis nas funções linear e exponencial melhoraram um pouco o coeficiente de determinação.

Tabela 7.24. Equações de Regressões Múltiplas para Q_{mlp}

Equação Linear	R ²	Equação Potencial	R ²
$Q_{mlp} = 10,41 \times 10^{-4}A + 0,086L - 1,102$	0,9079	$Q_{mlp} = 7,20 \times 10^{-2} A^{-0,181} L^{1,279} *$	0,8731
$Q_{mlp} = 18,82 \times 10^{-4}A - 0,002Dd + 1,963 *$	0,8898	$Q_{mlp} = 5,90 \times 10^{-4} A^{0,923} Dd^{0,465}$	0,8297
$Q_{mlp} = 18,79 \times 10^{-4}A - 0,002P + 3,830 *$	0,8898	$Q_{mlp} = 1,20 \times 10^{-12} A^{0,947} P^{3,212}$	0,8206
$Q_{mlp} = 19,17 \times 10^{-4}A + 0,123S + 0,174$	0,8911	$Q_{mlp} = 3,50 \times 10^{-4} A^{0,961} S^{0,933}$	0,8379
$Q_{mlp} = 10,76 \times 10^{-4}A + 0,084L - 0,078S - 2,064 *$	0,9084	$Q_{mlp} = 6,01 \times 10^{-29} A^{10,067} L^{-5,088} S^{7,596} *$	0,8418
$Q_{mlp} = 10,38 \times 10^{-4}A + 0,089L + 0,238S - 0,015Dd - 2,801 *$	0,9119	$Q_{mlp} = 2,30 \times 10^{-48} A^{16,801} L^{-15,945} S^{10,654} Dd^{6,801} *$	0,8650
$Q_{mlp} = 6,76 \times 10^{-4}A + 0,137L + 0,393S - 0,020Dd + 0,030P - 33,429 *$	0,9277	$Q_{mlp} = 1,21 \times 10^{-241} A^{16,621} L^{-13,136} S^{14,349} Dd^{6,531} P^{62,798} *$	0,9277

(*) correlação negativa; Q_{mlp} é a vazão com 95% de garantia (m^3/s); A é área da bacia (km^2); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km^2); S é a declividade média da bacia (m/km) e P é a precipitação média anual (mm).

7.7.3. Regionalização III, para $Q_{95\%}$ com regressões múltiplas

A Tabela 7.25 mostra as funções de estimativa da vazão $Q_{95\%}$ com funções de regressão múltipla linear e potencial. Nota-se que todas as regressões apresentaram boas correlações, sendo a área e o comprimento da bacia as variáveis que mais explicaram a vazão; o acréscimo das outras variáveis não melhorou muito o resultado.

Tabela 7.25. Equações de Regressões Múltiplas para $Q_{95\%}$.

Equação Linear	R ²	Equação Potencial	R ²
$Q_{95\%} = 2,54 \times 10^{-4}A + 0,042L - 1,036$	0,9011	$Q_{95\%} = 3,53 \times 10^{-4} A^{-0,237} L^{2,458} *$	0,9434
$Q_{95\%} = 6,60 \times 10^{-4}A - 0,002Dd + 0,525 *$	0,8679	$Q_{95\%} = 2,20 \times 10^{-6} A^{1,193} Dd^{0,946}$	0,8503
$Q_{95\%} = 6,57 \times 10^{-4}A - 0,002P + 2,421 *$	0,8682	$Q_{95\%} = 3,40 \times 10^{15} A^{1,013} P^{-6,356} *$	0,8255
$Q_{95\%} = 6,68 \times 10^{-4}A + 0,018S + 0,124$	0,8677	$Q_{95\%} = 4,50 \times 10^{-8} A^{1,341} S^{2,828}$	0,9593
$Q_{95\%} = 2,57 \times 10^{-4}A + 0,042L - 0,004S - 0,983 *$	0,9011	$Q_{95\%} = 1,68 \times 10^{-10} A^{3,463} L^{-1,608} S^{2,362} *$	0,8494
$Q_{95\%} = 2,37 \times 10^{-4}A + 0,044L + 0,060S - 0,006Dd - 1,277 *$	0,9054	$Q_{95\%} = 2,41 \times 10^{-16} A^{5,490} L^{-4,876} S^{3,283} Dd^{2,047} *$	0,8659
$Q_{95\%} = 1,00 \times 10^{-4}A + 0,062L + 0,118S - 0,008Dd + 0,011P - 12,833 *$	0,9176	$Q_{95\%} = 1,52 \times 10^{-79} A^{5,431} L^{-3,957} S^{4,491} Dd^{1,959} P^{20,535} *$	0,9128

(*) correlação negativa; $Q_{95\%}$ é a vazão com 95% de garantia (m^3/s); A é área da bacia (km^2); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km^2); S é a declividade média da bacia (m/km) e P é a precipitação média anual (mm).

7.7.4. Regionalização IV, regressões múltiplas entre vazões médias das distribuições e características das bacias

a) Distribuição Log-Normal

A Tabela 7.26 mostra os resultados obtidos para a estimativa da vazão com 2 anos de período de retorno, extraída da distribuição Log-Normal, com duas funções de regressão múltipla, sendo uma linear e outra potencial. Observa-se que todas as regressões obtiveram resultados razoáveis, com valores do coeficiente de determinação semelhantes, sendo melhores com as equações potenciais. A área e o comprimento do rio foram as variáveis mais explicativas; porém, com a inclusão das outras 5 variáveis na função potencial, houve um pequeno aumento no coeficiente de determinação.

Tabela 7.26. Equações de Regressões Múltiplas para Q₂ da distribuição Log-Normal (Q_{med}).

Equação Linear	R ²	Equação Potencial	R ²
Q ₂ = 0,0010A + 0,0198L + 0,0626	0,6929	Q ₂ = 0,0046 A ^{-0,1943} L ^{1,9301} *	0,7866
Q ₂ = 0,0012A + 0,0063Dd + 0,0967	0,6930	Q ₂ = 3,4 x 10 ⁻³ A ^{0,9415} Dd ^{0,9266}	0,7321
Q ₂ = 0,0012A - 0,0061P + 6,3128 *	0,6925	Q ₂ = 1,05 x 10 ⁸ A ^{0,8142} P ^{-3,4829} *	0,6751
Q ₂ = 0,0013A + 0,1399S - 1,0950	0,6943	Q ₂ = 8,09 x 10 ⁻⁶ A ^{1,0274} S ^{1,9903}	0,7734
Q ₂ = 10,97 x 10 ⁻⁴ A + 0,017L + 0,131S - 1,555	0,6956	Q ₂ = 0,2707 A ^{0,227} L ^{1,293} S ^{0,899}	0,7956
Q ₂ = 10,99 x 10 ⁻⁴ A + 0,017L + 0,120S - 0,001Dd - 1,505 *	0,6957	Q ₂ = 0,6673 A ^{0,091} L ^{1,513} S ^{0,837} Dd ^{-0,137} *	0,7960
Q ₂ = 11,06 x 10 ⁻⁴ A + 0,016L + 0,117S - 0,001Dd + 0,001P - 0,977 *	0,6957	Q ₂ = 5,597 x 10 ⁻¹³ A ^{0,080} L ^{1,688} S ^{1,068} Dd ^{-0,154} P ^{3,924} *	0,8061

(*) correlação negativa; Q₂ é a vazão c/ 2 anos de período de retorno (m³/s); A é área da bacia (km²); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km²); S é a declividade média da bacia (m/km) e P é a precipitação média anual (mm).

b) Distribuição de Gumbel:

A Tabela 7.27 mostra os resultados obtidos para a estimativa da vazão com 2,33 anos de período de retorno, oriunda da distribuição de Gumbel, com as funções de regressão múltipla, sendo estas linear e potencial. Os resultados mostram boas correlações, tanto para as equações lineares quanto potenciais. A área e o comprimento do rio foram as variáveis mais explicativas. A inclusão das outras 5 variáveis melhorou o coeficiente de determinação. As equações potenciais mostraram melhores resultados no geral.

Tabela 7.27. Equações de Regressões Múltiplas para Q_{2,33} da distribuição de Gumbel (Q_{max}).

Equação Linear	R ²	Equação Potencial	R ²
Q _{2,33} = -0,0009A + 2,9284L - 4,5181	0,8499	Q _{2,33} = 1,6849 A ^{-0,1046} L ^{1,2990} *	0,8349
Q _{2,33} = 0,0281A + 0,0856Dd + 85,6403	0,7674	Q _{2,33} = 0,0998 A ^{0,6531} Dd ^{0,5288}	0,7623
Q _{2,33} = 0,0280A + 1,4433 P - 127,5390	0,7820	Q _{2,33} = 0,1537 A ^{0,6157} P ^{0,4354}	0,7158
Q _{2,33} = 0,029078A + 4,288222 S ₂ + 38,2740	0,7730	Q _{2,33} = 0,0940 A ^{0,6830} S ^{0,8847}	0,7611
Q _{2,33} = 0,0274A - 0,0626 P + 202,2578 *	0,7789	Q _{2,33} = 430,279 A ^{0,5969} P ^{-0,7551} *	0,7261
Q _{2,33} = -3,3 x 10 ⁻⁴ A + 2,876L + 2,721S - 38,241	0,8524	Q _{2,33} = 8.742,280 A ^{-0,350} L ^{1,670} S ^{-0,524} *	0,8416
Q _{2,33} = -3,64 x 10 ⁻⁴ A + 2,963L + 5,612S - 0,273Dd - 51,552 *	0,8568	Q _{2,33} = 658.621,68 A ^{-1,001} L ^{2,720} S ^{-0,820} Dd ^{-0,657} *	0,8635
Q _{2,33} = -0,008A + 4,022L + 14,093S - 0,339Dd + 0,128P _a - 412,744 *	0,8738	Q _{2,33} = 5,119 x 10 ⁻⁶ A ^{-1,092} L ^{3,160} S ^{0,191} Dd ^{1+0,610} P _a ^{2,937} *	0,9158
Q _{2,33} = -0,001A + 2,896L - 2,082S + 0,148Dd + 1,781P _d - 264,705 *	0,8660	Q _{2,33} = 13,901 A ^{-1,253} L ^{3,082} S ^{-1,759} Dd ^{-0,364} P _d ^{2,428} *	0,9018

(*) correlação negativa; Q₂ é a vazão c/2 anos de período de retorno (m³/s); A é área da bacia (km²); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km²); S é a declividade média da bacia (m/km); P_a é a precipitação máxima média anual (mm) e P_d é a precipitação máxima média diária anual (mm).

c) Distribuição Gama:

As Tabelas 7.28 e 7.29 mostram os resultados para a estimativa da vazão com 2 anos de recorrência, da distribuição Gama, com as funções de regressão múltiplas linear e potencial. Os valores de R^2 indicam que a área e o comprimento do rio foram as variáveis mais explicativas. O acréscimo das outras variáveis aumentou um pouco R^2 . Para Q_{max} os resultados foram melhores com a introdução da precipitação máxima média anual.

Tabela 7.28. Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Gama (Q_{max})

Equação Linear	R^2	Equação Potencial	R^2
$Q_2 = -0,0069A + 2,9937L - 18,6772$	0,8341	$Q_2 = 1,2985 A^{-0,2231} L^{1,5370} *$	0,8536
$Q_2 = 0,0228A + 0,0955 Dd + 72,6904$	0,7121	$Q_2 = 0,0437 A^{0,6741} Dd^{0,6351}$	0,7607
$Q_2 = 0,0226A + 1,3281P - 121,7850$	0,7292	$Q_2 = 0,0879 A^{0,6293} P^{0,4873}$	0,6977
$Q_2 = 0,0236A + 3,8330S + 32,2575$	0,7180	$Q_2 = 0,0359 A^{0,7132} S^{1,1037}$	0,7641
$Q_2 = 0,0221A - 0,0604P + 186,5034 *$	0,7270	$Q_2 = 5236,99 A^{0,6012} P^{-1,1226} *$	0,7206
$Q_2 = -0,006A + 2,951L + 2,225S - 46,251$	0,8365	$Q_2 = 5,8469 A^{-0,4471} L^{1,8765} S^{-0,479} *$	0,8588
$Q_2 = -0,006A - 3,024L + 4,676S - 0,231Dd - 57,539 *$	0,8410	$Q_2 = 644,9372 A^{-1,1561} L^{3,018} S^{-0,801} Dd^{0,715} *$	0,8830
$Q_2 = -0,014A + 4,093L + 13,235S - 0,299Dd + 0,13P_a - 422,04 *$	0,8654	$Q_2 = 8,5957 \times 10^{-9} A^{-1,245} L^{3,449} S^{0,189} Dd^{-0,669} P_a^{2,875} *$	0,9298
$Q_2 = -0,007A + 2,957L - 3,083S + 0,193Dd + 1,796P_d - 272,516 *$	0,8554	$Q_2 = 0,011 A^{-1,412} L^{3,387} S^{-1,755} Dd^{-0,417} P_d^{2,469} *$	0,9024

(*): correlação negativa; Q_2 é a vazão c/ 2 anos de período de retorno (m^3/s); A é área da bacia (km^2); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km^2); S é a declividade média da bacia (m/km); P_a é a precipitação máxima média anual (mm) e P_d é a precipitação máxima média diária anual (mm).

Tabela 7.29. Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Gama (Q_{med})

Equação Linear	R^2	Equação Potencial	R^2
$Q_2 = 0,0005A + 0,0922L - 1,9435$	0,8907	$Q_2 = 0,0018 A^{-0,1538} L^{2,1280} *$	0,9271
$Q_2 = 0,0014A - 0,0028Dd + 1,4450 *$	0,8557	$Q_2 = 2,6 \times 10^{-5} A^{1,0821} Dd^{0,7917}$	0,8403
$Q_2 = 0,001411A - 0,0054P + 6,0767 *$	0,8563	$Q_2 = 15340,4 A^{0,9845} P^{-2,3464} *$	0,8012
$Q_2 = 0,0014A + 0,0840S + 0,0693$	0,8564	$Q_2 = 1,7 \times 10^{-6} A^{1,1930} S^{2,1939}$	0,9131
$Q_2 = 5,33 \times 10^{-4}A + 0,092L + 0,034S - 2,366$	0,8909	$Q_2 = 0,0814 A^{-0,3101} L^{1,427} S^{-0,990} *$	0,9367
$Q_2 = 4,95 \times 10^{-4}A + 0,096L + 0,190S - 0,015Dd - 3,085 *$	0,8964	$Q_2 = 37,7388 A^{-0,6142} L^{2,918} S^{0,570} Dd^{0,934} *$	0,9544
$Q_2 = 1,8 \times 10^{-4}A + 0,138L + 0,324S - 0,019Dd + 0,026P - 29,472 *$	0,9099	$Q_2 = 3,19 \times 10^{-19} A^{-0,633} L^{3,210} S^{0,954} Dd^{-0,962} P^{6,522} *$	0,9789

(*): correlação negativa; Q_2 é a vazão c/ 2 anos de período de retorno (m^3/s); A é área da bacia (km^2); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km^2); S é a declividade média da bacia (m/km) e P é a precipitação média anual (mm).

d) Distribuição Pearson III

As Tabelas 7.30 e 7.31 mostram os resultados obtidos para a estimativa da vazão com 2 anos de recorrência, da distribuição Pearson III, com as funções de regressão

múltipla do tipo linear e potencial. Todas as regressões apresentaram bons valores de R^2 . Em ambos os tipos de equações, a área e o comprimento do rio foram as variáveis mais explicativas, porém com o acréscimo das 5 variáveis na função potencial houve um pequeno aumento no coeficiente de determinação, podendo-se notar que na regressão para Q_{max} nas equações lineares e nas potenciais os resultados foram melhores com a introdução da precipitação máxima média diária.

Tabela 7.30. Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Pearson III (Q_{max})

Equação Linear	R^2	Equação Potencial	R^2
$Q_2 = -0,0066A + 2,9756L - 15,7650 *$	0,8475	$Q_2 = 1,3547 A^{-0,2396} L^{1,5621} *$	0,8534
$Q_2 = 0,0229A + 0,1011Dd + 74,4316$	0,7257	$Q_2 = 0,0444 A^{0,6719} Dd^{0,6398}$	0,7562
$Q_2 = 0,0227A + 1,3447P - 122,0360$	0,7433	$Q_2 = 0,1030 A^{0,6267} P^{0,4634}$	0,6921
$Q_2 = 0,0238A + 4,2824S + 28,6983$	0,7180	$Q_2 = 0,0345 A^{0,7126} S^{1,1296}$	0,7619
$Q_2 = 0,0221A - 0,0654P + 197,3449 *$	0,7434	$Q_2 = 8544,77 A^{0,5972} P^{-1,1818} *$	0,7178
$Q_2 = -0,005A + 2,923L + 2,689S - 49,091$	0,8511	$Q_2 = 5,879,573 A^{-0,458r} L^{1,893} S^{-0,467}$	0,8584
$Q_2 = -0,006A - 3,003L + 5,324S - 0,248Dd - 61,224 *$	0,8563	$Q_2 = 774.605,032 A^{-1,194} L^{3,078} S^{-0,801} Dd^{-0,743} *$	0,8845
$Q_2 = -0,013A + 4,016L + 13,435S - 0,312Dd + 0,123P - 406,672 *$	0,8785	$Q_2 = 1,9235 \times 10^{-5} A^{-1,280} L^{3,499} S^{0,164} Dd^{-0,697} P_a^{2,803} *$	0,9289
$Q_2 = -0,006A + 2,941L - 1,828S + 0,142Dd + 1,655P - 259,351 *$	0,8677	$Q_2 = 24,522 A^{-1,436r} L^{3,427} S^{-1,703} Dd^{-0,460} P_d^{2,336} *$	0,9018

(* correlação negativa; Q_2 é a vazão c/ 2 anos de período de retorno (m^3/s); A é área da bacia (km^2); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km^2); S é a declividade média da bacia (m/km); P_a é a precipitação máxima média anual (mm) e P_d é a precipitação máxima média diária anual (mm).

Tabela 7.31. Equações de Regressões Múltiplas para Q_2 da distribuição Pearson III (Q_{med})

Equação Linear	R^2	Equação Potencial	R^2
$Q_2 = 2,98 \times 10^{-4}A + 0,1025L + 2,2576$	0,8637	$Q_2 = 0,0019 A^{-0,0645} L^{1,9342} *$	0,9211
$Q_2 = 0,0013A - 0,0036Dd + 1,5671 *$	0,8149	$Q_2 = 3,9 \times 10^{-5} A^{1,0594} Dd^{0,7264}$	0,8464
$Q_2 = 0,0013A + 0,0055P + 6,2462$	0,8154	$Q_2 = 0,0842 A^{0,9977} P^{-0,5878} *$	0,8082
$Q_2 = 0,0013A + 0,0385S + 0,6972$	0,8145	$Q_2 = 5,3 \times 10^{-6} A^{1,1487} S^{1,8490}$	0,8947
$Q_2 = 0,79 \times 10^{-4}A + 0,103L + 0,018S - 2,040$	0,8638	$Q_2 = 0,3545 A^{0,188r} L^{1,552} S^{0,540}$	0,9240
$Q_2 = 2,54 \times 10^{-4}A + 0,107L + 0,130S - 0,014Dd - 2,720 *$	0,8694	$Q_2 = 134,1671 A^{-0,706r} L^{2,994} S^{0,134} Dd^{-0,903} *$	0,9415
$Q_2 = 2,89 \times 10^{-4}A + 0,152L + 0,273S - 0,019Dd + 0,028P - 30,920 *$	0,8868	$Q_2 = 2,4217 \times 10^{-22} A^{-0,728r} L^{3,339} S^{0,588} Dd^{-0,936} P^{7,714} *$	0,9774

(* correlação negativa; Q_2 é a vazão c/ 2 anos de período de retorno (m^3/s); A é área da bacia (km^2); L é o comprimento do rio principal (km); D_d é a densidade de drenagem (m/km^2); S é a declividade média da bacia (m/km) e P é a precipitação média anual (mm).

7.8. Comentários Finais

Os testes de estacionariedade realizados para as nove séries geradas, mostraram que as características das séries (médias e variâncias) em alguns locais diferiram ao nível de significância de 5%, embora com pequenas diferenças na maioria dos casos. Os testes de dupla massa demonstraram razoável homogeneidade das séries simuladas. Isto foi evidenciado posteriormente pelos testes de ajustamento das distribuições.

A distribuição aceita pelo teste K-S para a vazão máxima e média em todas as bacias foi a de Pearson III. As outras distribuições tiveram rejeições, mas de um modo geral podem ser utilizadas, principalmente a distribuição Gama.

Funções de regressão logarítmica e potencial (simples e múltiplas) foram estabelecidas entre as vazões com certos períodos de retorno, extraídas das distribuições, e as áreas das bacias (regressão simples), e demais características. Os melhores resultados foram obtidos com as estimativas das distribuições Pearson III e Gama. Tanto a função logarítmica quanto a linear podem ser utilizadas para a estimativa das variáveis hidrológicas em virtude dos bons resultados.

Os valores de R^2 das regressões foram em geral bons, mostrando forte correlação entre a variável hidrológica e área da bacia. Quando outras variáveis foram introduzidas, o coeficiente de determinação melhorou, mas não muito. As regressões múltiplas, para a estimativa das vazões Q_{mlp} , Q_2 , $Q_{2,33}$ e Q_{95} , mostraram-se fortes com a área e o comprimento da bacia. A inclusão das outras cinco variáveis melhorou um pouco os resultados.

CAPÍTULO 8

ANÁLISES DE RESULTADOS

Esta pesquisa teve como objetivo a regionalização hidrológica do Alto Rio Piranhas, com séries simuladas com o modelo distribuído NAVMO, que teve as seguintes etapas: calibração do modelo; simulação e validação do modelo; verificação da homogeneidade das séries; análise da estacionariedade das séries; teste de ajustamento de distribuições de probabilidade; regionalização relacionada ao tempo de retorno; regionalização utilizando regressões simples e múltiplas, lineares ou não-lineares, entre vazões máximas Q_T , Q_2 , $Q_{2,33}$, $Q_{95\%}$ e Q_{mp} , extraídas de diferentes distribuições para diferentes períodos de retorno, e características da bacia (físicas e climáticas). A análise dos resultados mostrou o seguinte:

1. Calibração: De um modo geral pode-se dizer que do modelo foi bem calibrado, obtendo-se um bom coeficiente de correlação (R^2), sendo que este apresentou melhores resultados para a calibração dos volumes anuais ($R^2 = 0,9854$) do que para os picos ($R^2 = 0,8983$);

2. Simulação: O modelo NAVMO gerou duas séries de longo período, uma série de vazão máxima e outra de vazão média. De um modo geral os resultados foram razoáveis quando comparados com aqueles observados, pois apresentaram resultados homogêneos segundo o método da dupla massa. Para o período sem dados, os resultados não mostraram grandes anomalias visualmente;

3. Validação: A validação da simulação foi feita com diferentes bancos de dados, em termos da precipitação, em duas etapas: uma com a comparação dos valores observados com os simulados e outra com a verificação da homogeneidade (teste de dupla massa). Pode-se notar que para a simulação com 25 e 40 postos foram obtidos bons resultados na validação, porém as simulações com 7 postos não foram boas, demonstrando a necessidade de uma boa densidade de postos em grandes regiões;

4. Testes de estacionariedade: Os testes de estacionariedade, paramétricos e não paramétricos, realizados para as nove séries geradas, mostraram que as médias e as variâncias das séries diferiram, em alguns casos, ao nível de 5% de significância. No entanto, as diferenças entre as variáveis de testes e as críticas foram pequenas na maioria dos casos;

5. Teste K-S para distribuições de probabilidade: A distribuição que não apresentou nenhuma rejeição pelo teste foi a de Pearson III. As outras distribuições tiveram algumas rejeições, mas de um modo geral podem ser utilizadas devido as pequenas diferenças entre as variáveis de testes e as críticas, principalmente as distribuições Gama, que só apresentou uma rejeição para a série de vazões médias, e a de Gumbel, típica de vazões máximas, e apresentou duas rejeições que podem ser desconsideradas pelas pequenas diferenças entre as variáveis de testes em duas bacias;

6. Regionalização de vazões: Foram estabelecidas com base nas vazões para diferentes períodos de retorno, extraídas das distribuições de probabilidade estudadas, as quais foram correlacionadas com variáveis físicas e climáticas das bacias através de funções de regressão simples (logarítmicas e potenciais) e múltiplas (lineares e potenciais). Para as regressões simples, a função logarítmica mostrou os melhores resultados; Para $Q_T \times \text{Área da bacia}$, $0,39 < R^2 < 0,83$; para a correlação do índice de cheia (a_T) com T, $R^2 > 0,96$; para $Q_{mlp} \times \text{Área}$, $R^2 > 0,81$. Para as regressões múltiplas, a função linear mostrou os melhores resultados em geral. Para as vazões Q_{mlp} e $Q_{95\%}$, $R^2 > 0,86$, exceto em dois casos para $Q_{95\%}$ em que a função potencial foi melhor ($R^2 > 0,94$); para as vazões $Q_{2,33}$ de Gumbel os valores de $R^2 > 0,76$ (função potencial) e para Q_2 (qualquer distribuição) $R^2 > 0,67$ (função potencial);

7. Variáveis explanatórias: Conforme os resultados, pode-se notar que a área e o comprimento do rio principal da bacia foram as variáveis que melhor explicaram as vazões; a inclusão de outras variáveis resultou em melhores valores de R^2 no entanto deve-se notar que várias funções apresentaram correlação negativa com a introdução de certas variáveis.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nesta pesquisa pode-se concluir que:

- ❖ O modelo NAVMO calibrado representou bem as vazões observadas, porém foram influenciados pelo número de postos de precipitação;
- ❖ As séries geradas pelo modelo para os períodos sem dados observados foram, em geral, razoáveis e os resultados mostraram-se consistentes e homogêneos conforme os testes paramétricos, não paramétricos e de dupla massa;
- ❖ Para as séries geradas, a distribuição aceita sem restrições pelo teste K-S foi a de Pearson III.
- ❖ As distribuições Gama e de Gumbel foram aceitas com poucas restrições;
- ❖ As regressões simples do tipo logarítmica entre $Q_T \times A$ e $a_T \times T$ foram satisfatórias, podendo ser adotadas para o cálculo da vazão de cheia em locais sem dados;
- ❖ Várias regressões múltiplas entre vazão e características da bacia, e.g., $Q_{mlp} = f(A, L, S_b, D_d, P)$ e $Q_{95\%} = f(A, L, S_b, D_d, P)$, do tipo linear mostraram correlação negativa, mas aquelas com variáveis positivamente correlacionadas podem ser escolhidas para o seu cálculo em locais sem dados;
- ❖ Várias regressões múltiplas, e.g., $Q_{2,33} \text{ (Gumbel)} = f(A, L, S_b, D_d, P)$ e $Q_2 = f(A, L, S_b, D_d, P)$, do tipo potencial mostraram correlação negativa, mas aquelas com variáveis positivamente correlacionadas, para qualquer distribuição, podem ser escolhidas para o cálculo da vazão de cheia ($Q_T = a_T Q_{2,33}$ ou $Q_T = a_T Q_2$) em locais sem dados;
- ❖ A **área (A) e comprimento do rio principal (L)** foram as variáveis que melhor explicaram as vazões investigadas.

Com base nos estudos realizados, pode-se recomendar:

- ❖ Uma análise do efeito da divisão da região estudada sobre os resultados da regionalização;
- ❖ Estender o estudo até a região do médio e baixo rio Piranhas;
- ❖ Realizar uma regionalização com os parâmetros obtidos com o Modelo NAVMO;
- ❖ Fazer uma comparação da metodologia apresentada com análise de frequência regional clássica, sem o uso de modelagem hidrológica, como forma de validação desta pesquisa;
- ❖ Fazer uma análise da correlação entre as bacias vizinhas;
- ❖ Realizar um estudo de incertezas na regionalização;
- ❖ Fazer uma nova regionalização observando-se a influência de reservatórios existentes após alguns anos de implantação.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre, A. M. e Martins, E. S. P.R. (2004), **Regionalização dos Parâmetros da Distribuição GEV de Séries de Vazões Máximas Anuais**, Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luis, MA. CD – ROM.
- Amorim, M. C., Rossato, L. e Tomasella, J. (1999), **Determinação da evaporação potencial do Brasil aplicando o modelo de Thornthwaite a um sistema de informações geográficas**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 4., n. 3, p.83-90.
- Andrade, E. M., Costa, R. N. T., Souza, I. H., Aquino, L. C. e Oliveira M. S. (2001), **Regionalização de bacias hidrográficas na região litorânea do Estado do Ceará**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos XIV, Aracaju, art. 238, 11p CD – ROM.
- Andrade E. M e Hawkins R. H. (2000), **Aplicação da função de Andrews na avaliação da regionalização de bacias em regiões áridas e semi-áridas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, V. 5, N. 4. p. 17-24.
- Aragão, R., Figueiredo, E. E., Srinivasan, V.S. e Góis, R. S. S. (1998), **Chuvas Intensas no Estado da Paraíba**. Anais V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Vol 2, Sessão II, Art. 018, pg. 74-85.
- Araújo Filho, P. F. e Cirilo, J. A. (1994), **Regionalização da evapotranspiração para o Estado de Pernambuco**. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza.
- Barbosa, J. M. S. G., Barbosa, D. L., Almeida, M. A., Costa, C. F. L., Braga, A. C. F. M. e Figueiredo, E. E. (2000), **Calibração e validação do modelo SMAP para uma bacia do semi-árido da Paraíba**. In: V Simpósio de Recurso Hídricos do Nordeste, Natal, 10 p, CD-ROM
- Braga, A. C. F. M. (2001). **Efeitos de Fatores Climáticos e do Uso do Solo sobre o Escoamento em uma Região Semi-Árida da Paraíba**. Tese de mestrado, Depto. Eng^a. Civil, CCT/UFPB, ~~Campina Grande~~ PB.

- 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.
- Chow, V. T. (1964), **Hanbook of Applied Hydrology**, McGraw Hill Book Company, New York, USA.
- Cirilo, J. A., Azevedo, J. R. G. e Montenegro, S. M. G. L. (1992), **Modelos de simulação hidrológica aplicados à bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco**. In: I Simpósio de Recurso Hídricos do Nordeste, Recife.
- 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.
- Elesbon, A. A. A., Fiorot, P., Cesconeto, E., Coser M. e Mendonça A. S. F. (2001) **Regionalização de vazões máximas utilizando Momentos-L**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos XIV, Aracaju, art. 375, 14p CD – ROM.
- Eletrobrás (1985). Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para Regionalização de Vazões**. Rio de Janeiro.
- Euclides, H.P., Ferreira, P. A., Rubert, O. A. V. e Santos, R. M. (2001) **Regionalização hidrológica na bacia do alto São Francisco à montante da barragem de Três Marias, Minas Gerais**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 6, n. 2, p.81-105.
- Euclides, H. P., Ferreira P. A., Filho, R. F. F. e Silva, M. V. J. (2003), **Regionalização Hidrológica na Bacia do Rio Paranaíba, Minas Gerais**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos XV, Curitiba, art. 164, 20p CD – ROM.
- Figueiredo, E.E., Overland, H. e Kleeberg, H.B. (1991). **O Modelo NAVMO de Simulação do Escoamento Superficial**. IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, pp 337-346, Rio de Janeiro.

- Figueiredo, E. E., Braga, A. C. M. F. (2002). **Modelling the rainfall-runoff relationship for the Piranhas river basin in the semiarid region of Brazil.** *Flood Defence '2002, Wu et al. (eds)© 2002 SciencePress, New York Ltd., ISBN 7-03-008310-5.*
- Figueiredo, E.E. e Srinivasan, V.S. (1999) **Avaliação dos Impactos do Uso do Solo e da Influência dos Açudes sobre o Escoamento para o Açude Sumé - PB.** CDRom do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG.
- Finzi, C.M. Q., Righi, I. A. e Versiani, B. R. (2001), **Regionalização de Vazões para as bacias hidrográficas dos rios Carinhanha e Corrente (Sub-Bacia 45).** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos XIV, Aracaju, art. 276, 19p CD – ROM.
- Finzi, C.M. Q., Righi, I. A. e Versiani, B. R. (2002), **Regionalização Hidrológica utilizando o Método TCEV com apoio de um Sistema de Informações Geográficas.** Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste VI, Alagoas, art 23, 18p. CD – ROM.
- Finzi, C.M. Q., Righi, I. A. e Versiani, B. R. (2003), **Regionalização Hidrológica utilizando o Método TCEV com apoio de um Sistema de Informações Geográficas: resultados finais.** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos XV, Curitiba, art. 272, 21p. CD – ROM.
- Fonseca, J. S., Martins, G. A. e Toledo, G. L. (1978), **Estatística Aplicada**, Editora Atlas S.A. – São Paulo – 2ª edição, 273 p.
- Franchini, M. e Suppo, M. (1996), **Regional analysis of flow duration curves for a limestone region.** *Water Resource Management*. Vol 10, pp. 199-218.
- Freitas, V. A. L., Barbosa, I. M. B. R., Vieira, H. B. G., Asfora, M. G. e Cirilo, J. A. (2002), **Regionalização Hidrológica na bacias 46, 47, 48 e 49 do Rio São Francisco.** Anais VI Simpósio de Recursos Hídricos de Nordeste.
- Fortunato, O. M. (2004), **Simulação hidrológica na bacia do Alto Paraíba com efeito da variabilidade do clima.** Tese de mestrado, Depto. Eng^a. Civil, CCT/UFCG, Campina Grande- PB.

- Fread, D. L. (1985). Channel Routing. In: *Hydrological Forecasting*. Anderson, M. G., Burts, T. P. (editors). John Willey & Sons. Londres. U. K.
- Garcez, L. N. e Alvarez, G. A. (1988), **Hidrologia**. 2ª ed. Editora Edgard Blücher. São Paulo.
- Góes V. C. e Campana N. A. (2001), **Regionalização de Vazões no Distrito Federal**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos XIV, Aracaju, art. 144, 16p CD – ROM.
- Guimarães Jr, J. A., Righetto, A. M. e Melo, J. M. B. G. (2001), **Aplicação do modelo MODHISA para a geração de vazões médias mensais em rios do semi-árido nordestino**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Aracaju. Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática. 10 p, CD-ROM.
- <http://www.ufcg.edu.br>. Dados climatológicos do Estado da Paraíba. Disponível on-line. Em 30/01/2005.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R (1993). **Some statistics useful in regional frequency analysis**. In: Water Resources Research, American Geophysical Union. V.29, n.1, p. 271-281.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R (1995). Correction to “**Some statistics useful in regional frequency analysis**”. In: Water Resources Research, American Geophysical Union. V.31, n.1, p. 251.
- IAHS (2002), Pub Kick-off Workshop of the IAHS **Decade on prediction in unpaged Basin – Hydrological Sciences on Mission – Communications** (ed; Hubert, P., Schertz, D., Taken chit, T., Koide, S.), Brasília, Brazil. (www.cig.ensmp.fr/~iahs/Pubs/Brasilia-Papers/Bra-Pap.htm).
- Institute of Hidrology (1980), Low Flow studies, research report n° 1 Institute of Hydrology, Wallinford, Oxon.
- Kite, G. W. (1977), **Frequency and Risk Analysis in Hydrology**, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA.

Kleeberg, H. B., Overland, H. e Paus, B. (1989). NAVMO, Version 1.1, Nieveschlag – Abfluss – Verdungstung Modell. Documentation. Universität der Bundeswehr München, Alemanha.

Koch, U. e Rego, J. C. (1985), **Aplicação de Testes não Paramétricos para verificar a Homogeneidade de Séries Hidrometeorológicas**. Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 3 (1):47-67.

Lacerda Júnior, H. B. L. (1994). **Um estudo dos efeitos de escala e uso do solo na parametrização do modelo NAVMO com dados de bacias do Cariri paraibano**. 2002. 104f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

Lanna, A. E., Silveira, G. e Tucci, C. E. M. (1983), **Regionalização de vazões mínimas na bacia do rio Jacuí**. Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau.

Lanna, A. E., Beltrame, L., Aguinisky, S., Farias, F. e Froes, F. (1989), **Estudos de disponibilidade de águas fluviais e solo na região Sul do Brasil**, IPH/UFGS. 2v. (Relatório final).

Lopes, P. L. (1994). **Avaliação do Escoamento Superficial da Bacia do Rio Piancó Utilizando o Modelo NAVMO**. Tese de Mestrado, Dept. Eng. Civil, CCT/UFPB, Campina Grande, Pb.

McCuen, R.H. (1982). A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods, Univ. of Maryland, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Obregon, E., Tucci, C. E. M. e Goldenfum, J. A. (1999), **Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à Lagoa Mirim, RS**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 4, n. 1, p.57-75, jan/mar.

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.

Pinto, N. L. S., Holtz, A. C. T., Martins, J.A. e Gomide, F. L. S. (1976), **Hidrologia Básica**. Editora Edgard Blücher. São Paulo.

Pinto, E. J. A. e Naghettini, M. C. (2000), **Caracterização pluviométrica da bacia do alto São Francisco – Sub-bacia 40**: Definição de regiões homogêneas e a regionalização de precipitações máximas diárias, Belo Horizonte, CPRM.

Ramos, A. M. e Galvão, C. O. (2001), **Estabilidade de redes neurais em modelagem hidrometeorológica**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Aracaju. Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática. 20 p, CD-ROM.

Rego, J. C., Figueiredo, E. E., Koch, U. (1989), **Regionalização de Cheias numa Bacia do Nordeste do Brasil**. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu-Pr, pp. 621-632.

Silva, L. P., Ewen, J. (2000). **Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias Hidrográficas: a Necessidade de Novas metodologias**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol 5. n. 2.

Silva, J. F. R. e Araújo, L. M. N. (2002), **Regionalização de Vazões no Estado do Maranhão**. Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste VI, Alagoas, art 183, 20p. CD – ROM.

Silveira, G. L., Tucci, C. E. M. e Silveira, A. L. L. (1998), Quantificação de vazões em pequenas bacias sem dados. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 3, n. 3, p.111-131, jul/set.

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.

Soong, T. T. (1986). **Modelos Probabilísticos em Engenharia e Ciências**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1986, 236p.

- Sorooshian, S., Gupta, V. K. (1995). Model Calibration. In: Singh, V. P. (editor). **Computer Models of Watershed Hydrology**. Water Resources Publications. Louisiana.
- SUDENE. (1990). Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado do Rio Grande do Norte. Série pluviométrica 4. Recife – PE. Brasil.
- SUDENE. (1990). Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado da Paraíba. Série pluviométrica 5. Recife – PE. Brasil.
- SUDENE. (1990). Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado de Pernambuco. Série pluviométrica 6. Recife – PE. Brasil.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., Foufulageorgiou, E. (1992), Chap. 18.5 – **Regionalization, in Maidment, D.R. (ed.): Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, New York, p. 18.33-18.66.
- Thomas, D. M. e Benson, M. A. (1975), **Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics**, US Geological Survey, Water Supply Paper # 1970,1975.
- Tucci, C. E. M. (1993). Ciclo Hidrológico. In: **Hidrologia, Ciência e Aplicação**. Tucci, C. E. M. (editor) Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p 35-40.
- Tucci, C. E. M. (1997). **Hidrologia - Ciência e Aplicação**. Editora da Universidade UFRGS – 2º edição, Porto Alegre. 943 p.
- Tucci, C. E. M. (1998). **Modelos hidrológicos**. Ed. da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 668p.
- Tucci, C. E. M. (2002). **Regionalização de vazões** – ABRH, Editora da Universidade – UFRGS. 1ª Edição. RS.
- Tucci, C. E. M.; Clarker, R. T. (2001). **Hidrologia Aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas** – ABRH, Projeto RECOPE – FINEP. Porto Alegre - RS.

Viessman Jr, W., Harbaugh, T.E, Knapp, J.W. (1972), Introduction to Hydrology. New York, Intext Education.

Villela, S. M. (1975) **Hidrologia Aplicada**. Editora McGraw-Hill do Brasil. São Paulo.

Wallims, J. (1969), **Multivariate statistical methods in hydrology** – A comparison using data of known functional relationship. Water Resour. Res., I(4), 447-461.

Wright (1970), **Catchment characteristics influencing low flows**. Water and Water Engineering, novembro, 468-471.

ANEXOS

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

Anexo B: Diagrama de barras e detalhamento das falhas

Anexo C: Mapas da Região do Alto Piranhas com a distribuição dos postos pluviométricos

Anexo A

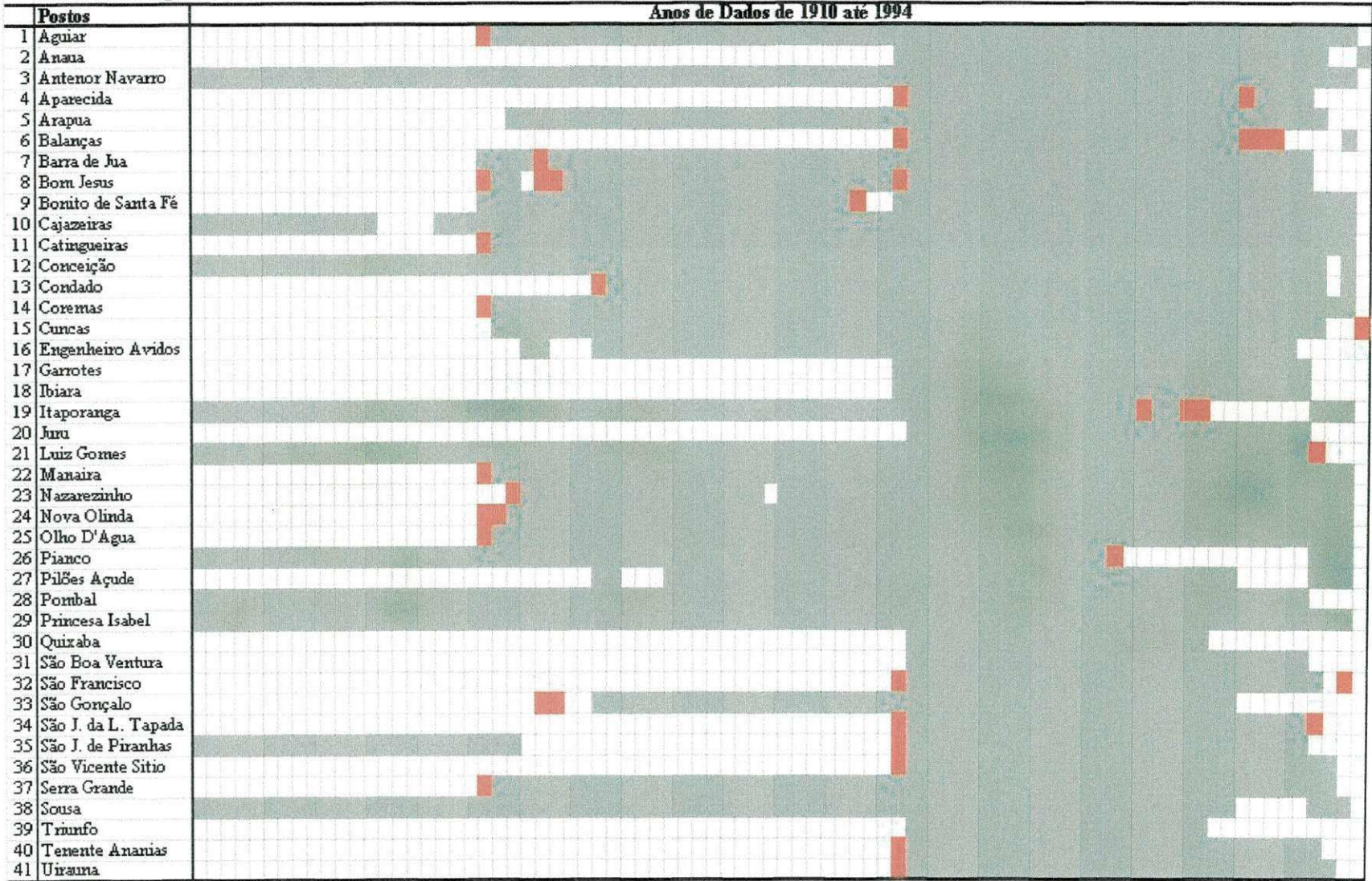
Sub-bacias	Ordem	Área (km ²)	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
1	100	171.0	33.8	650.000	400.000	545.000	9156.500	1
1	170371	170370						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	50.00	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	50.00	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	180.00	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	200.00	200.000	2
13	4.0	100.0	100.00	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	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						
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	70.000	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	300.000	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	300.000	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	624.500	9220.000	1
36	50280	40280	0.00200	8.000	250.000	300.000	300.000	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	350.000	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	100.000	100.000	2
39	2.0	50.0	50.000	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	150.000	150.000	2
40	4.0	100.0	100.000	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

Tabela B.1. Diagrama de Barras dos Postos Pluviométricos da Bacia do Alto Piranhas



Anexo B

Tabela B.2. Detalhamento das Falhas

	Detalhamento das Falhas							
	Ano	Meses	Ano	Meses	Ano	Meses	Ano	Meses
Aguiar	1933	02 ao 10						
Anaua								
Antenor Navarro								
Aparecida	1962	01 ao 06	1986	04 ao 12				
Arapua								
Balanças	1962	01 ao 06	1987	07 ao 12	1987	01 e 02; 05 ao 11	1988	08 ao 11
Barra de Jua	1937	12						
Bom Jesus	1933	01 ao 09	1937	01 ao 09	1938	01 e 02	1962	01 ao 06
Bonito de Santa Fé	1959	04 ao 12						
Cajazeiras	1910	01 ao 10						
Catingueiras	1932	01 ao 07						
Conceição	1910	01 ao 09						
Condado	1941	01 ao 09						
Coremas	1933	01 ao 05						
Cuncas	1994	09 ao 12						
Engenheiro Avidos								
Garrotes								
Ibiara								
Itaporanga	1910	01 ao 09	1979	05 ao 12	1982	01 ao 06	1983	08 ao 12
Juru								
Luiz Gomes	1910	01 ao 09	1991	07 ao 12				
Manaira	1933	01 ao 09						
Nazarezinho	1935	01 ao 09						
Nova Olinda	1933	01 ao 09	1934	09 e 10				
Olho D'Água	1933	01 ao 05						
Pianco	1910	01 ao 11	1977	05 ao 12				
Pilões Açude	1985	09 ao 12						
Pombal	1910	01 ao 11						
Princesa Isabel								
Quixaba								
São Boa Ventura	1990	05 ao 12						
São Francisco	1962	01 ao 06	1993	10 ao 12				
São Gonçalo	1937	01 ao 11	1938	1 a 4, 7 a 12				
São J. da Lagoa Tapada	1962	01 ao 07	1991	08 ao 12				
São J. de Piranhas	1962	01 ao 06						
São Vicente Sítio	1962	01 ao 06						
Serra Grande	1933	01 ao 09						
Sousa	1910	01 ao 11						
Triunfo								
Tenente Ananias	1962	01 ao 06						
Uirauna	1962	01 ao 06						

Anexo C

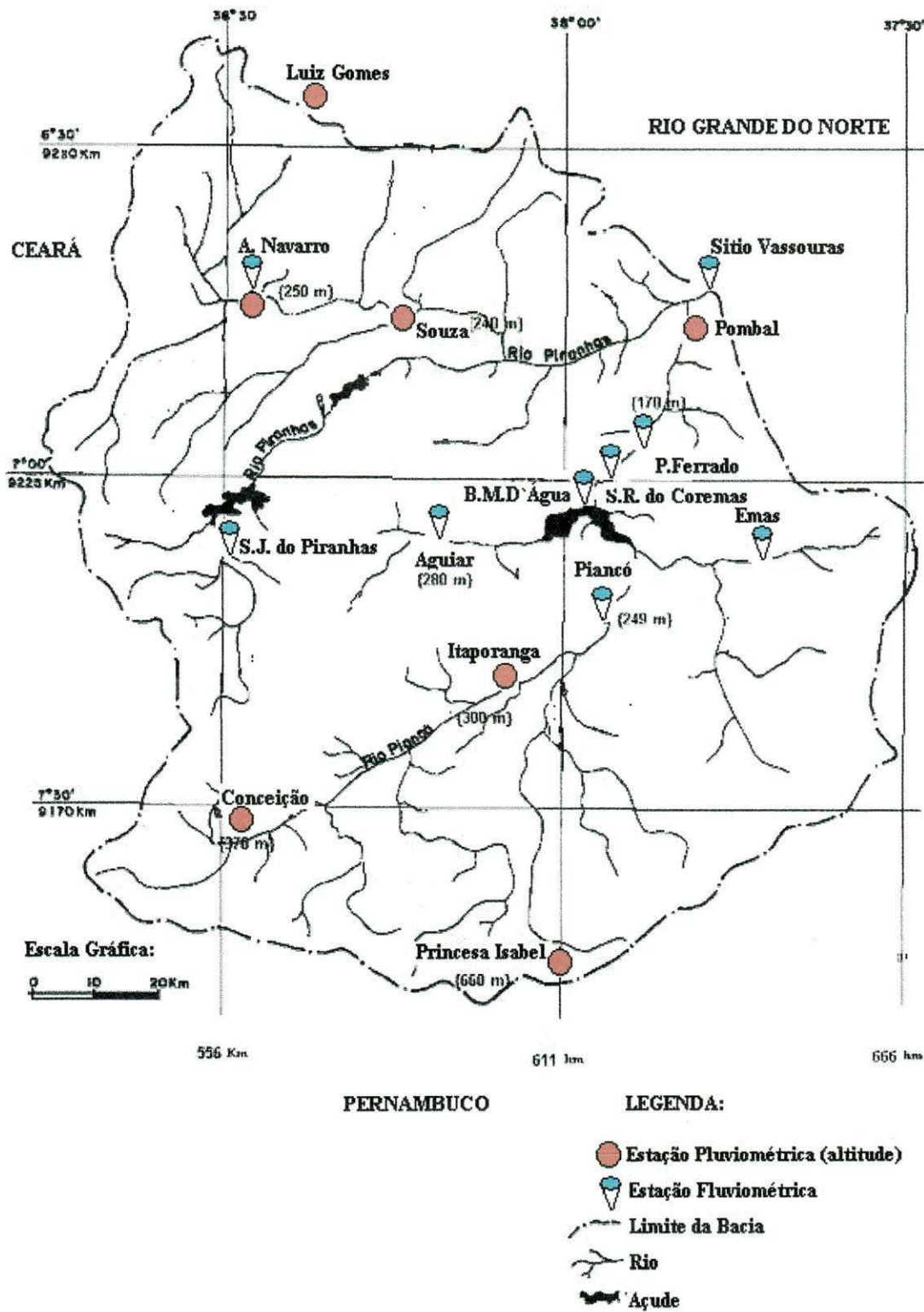


Figura C.1. Bacia Hidrográfica do Alto Piranhas com 7 postos pluviométricos.

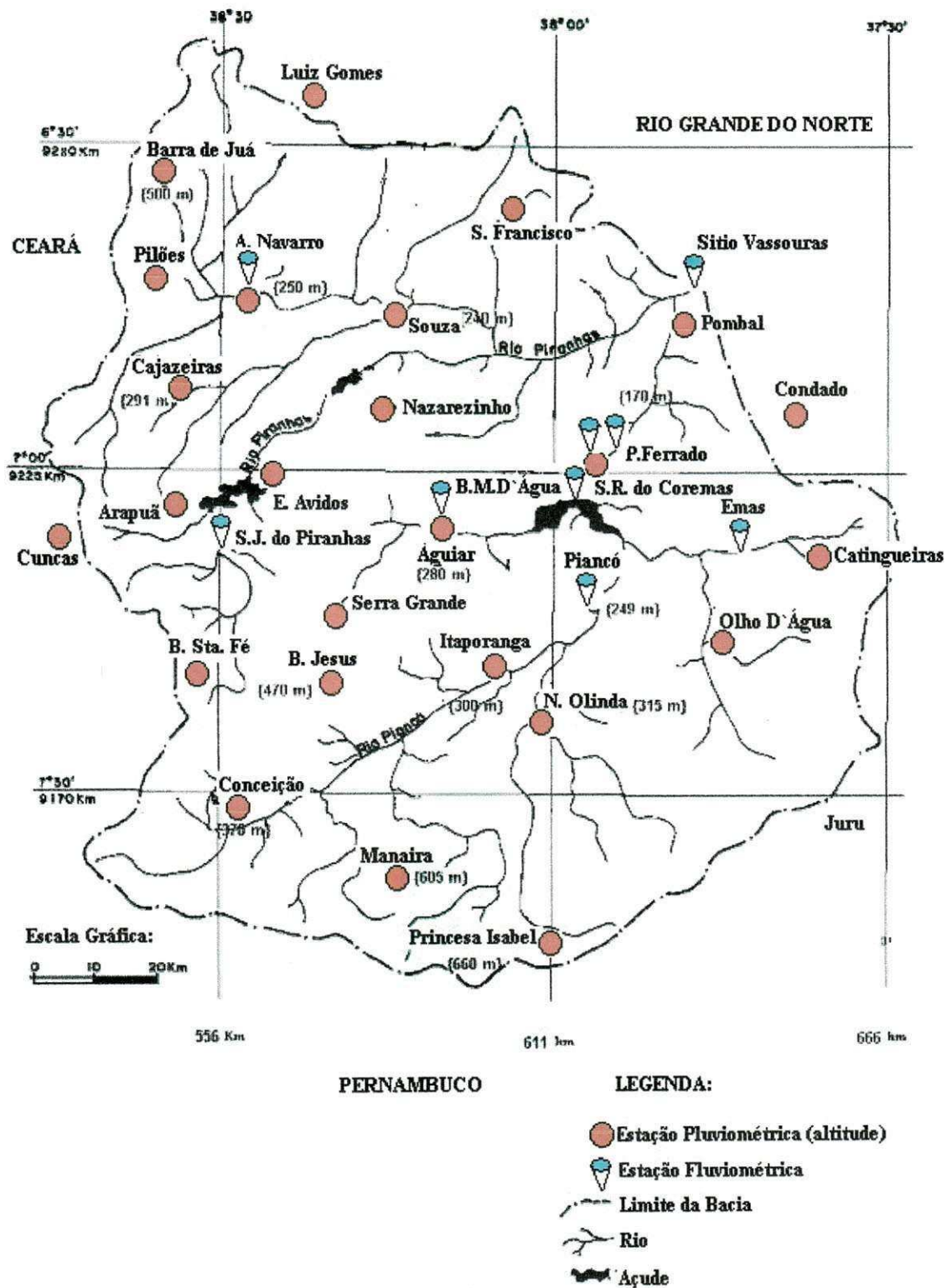


Figura C.2. Bacia Hidrográfica do Alto Piranhas com 25 postos pluviométricos.

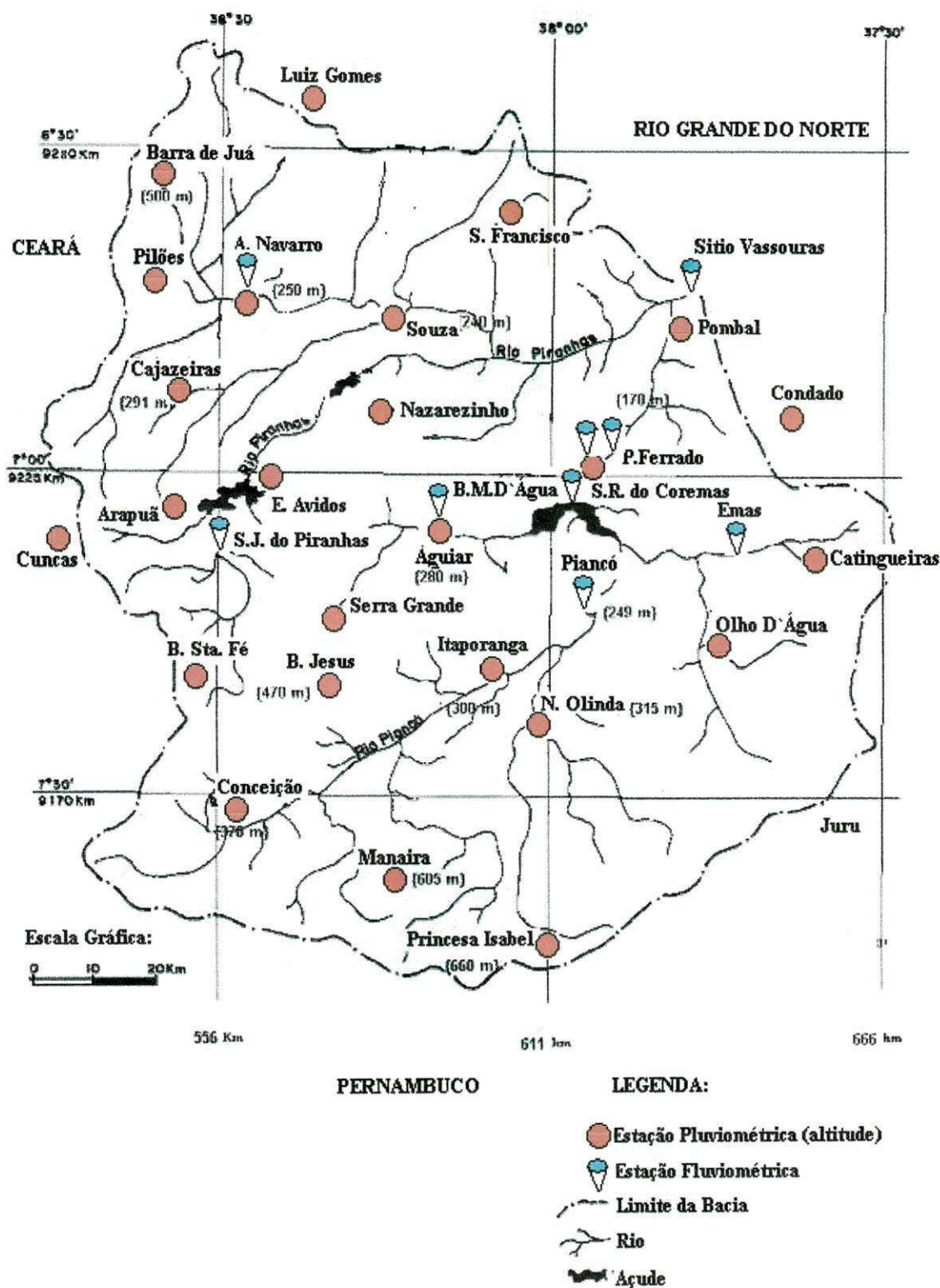


Figura C.3. Bacia Hidrográfica do Alto Piranhas com 40 postos pluviométricos.