



GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS
SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E MEIO AMBIENTE - SEPLAN



**ESTUDO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS DA MARGEM DIREITA DO RIO
TOCANTINS**

VOLUME 1

RELATÓRIO FINAL

Edição Final



Abril/2007

EQUIPE EXECUTORA

COORDENAÇÃO GERAL

Consórcio ENGEPLUS/ACL

Jairo Faermann Barth

Engenheiro Civil, Esp. em Hidráulica

Fernando R. F. Fagundes

Engenheiro Civil

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Joel Avruch Goldenfum

Engenheiro Civil, PhD (Doutor) em Hidrologia

André Luiz Lopes da Silveira

Engenheiro Civil, Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Daniel Allasia

Engenheiro Civil, Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Fernando Dornelles

Engenheiro Civil, mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Ronnie Wallace Vieira Araujo

Engenheiro Civil, doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

SOFTWARE E GEOPROCESSAMENTO

Alfonso Risso

Engenheiro Civil, Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Carlos Ruberto Fragoso Junior

Engenheiro Civil, Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Cláudio Ruschell

Engenheiro Civil, Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

INDICE DOS VOLUMES

INDICE DOS VOLUMES

VOLUME 1 RELATÓRIO FINAL

VOLUME 2 ANEXOS

**VOLUME 3 MANUAL DE UTILIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE
REGIONALIZAÇÃO E DO SOFTWARE**

INDICE

RELATÓRIO FINAL

INDICE

1	ASPECTOS GERAIS	1
1.1	Principais Características do Contrato	2
1.2	Identificação da Área de Abrangência do Trabalho	3
1.2.1	Localização, Delimitação da Área de Estudo e Acessos.....	3
1.2.2	Abrangência Municipal	3
1.3	Objetivos e Escopo do Trabalho.....	6
1.4	Conteúdo do Presente Relatório	7
2	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO	9
2.1	Introdução.....	10
2.2	Delimitação e Abrangência Municipal da Área de Estudo	10
2.3	Hidrografia	12
2.4	Geomorfologia.....	12
2.5	Clima	15
2.6	Solos.....	16
2.7	Declividade.....	21
2.8	Vegetação e Ocupação do Solo	23
2.9	Aspectos Sócio-Econômicos e Demográficos.....	24
3	RECONHECIMENTO DE CAMPO	27
3.1	Introdução.....	28
3.2	Atividades de Planejamento Preliminar para as Vistorias	28
3.3	Período de Execução, Equipe Técnica e Equipamento Utilizado.....	31
3.4	Roteiro de Viagem Executado.....	31
3.5	Procedimentos para Avaliação dos Postos Visitados.....	34
3.6	Reconhecimento das Principais Bacias e Sub-bacias	34
3.7	Considerações Gerais	35
4	SELEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS	36
4.1	Introdução.....	37
4.2	Postos Selecionados	37

4.2.1	Seleção dos Postos	37
4.2.2	Análise dos Postos Selecionados	39
4.3	Considerações Gerais	47
5	SELEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS	49
5.1	Introdução.....	50
5.2	Postos Selecionados	50
5.2.1	Seleção dos Postos	50
5.2.2	Análise dos Postos Selecionados	53
5.3	Considerações Gerais	54
6	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS FISIAGRÁFICOS	57
6.1	Introdução.....	57
6.2	Estimativa dos Parâmetros Fisiográficos das Sub-Bacias de Referência.....	57
7	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÉDIAS	66
7.1	Vazão Média.....	66
7.2	Vazão Média de Longo Período	66
7.3	Regionalização da Vazão Média.....	67
7.4	Regressão da Vazão Média de Longo Período.....	67
7.4.1	Região 1 – Cabeceiras dos Rios (Bacia Sedimentar do São Francisco).....	77
a)	Regressão com Variáveis Físicas – Região 1	77
b)	Curva Adimensional Média da Região 1	81
7.4.2	Região 2 – Cursos Médio e Inferior dos Rios.....	81
a)	Regressão com Variáveis Físicas – Região 2	82
b)	Curva Adimensional Média da Região 2	86
7.5	Roteiro de Cálculo da Vazão Média Anual para um Período de Retorno T	87
7.5.1	Roteiro de Cálculo para a Região 1:.....	88
7.5.2	Roteiro de Cálculo para a Região 2.....	88
7.6	Limitações	89
7.7	Exemplo de Aplicação	89
8	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS.....	90
8.1	Vazão Máxima.....	91
8.2	Vazão Média de Cheia	92

8.3	Curvas Adimensionais de Probabilidade da Vazão Máxima	93
8.4	Regionalização da Vazão Máxima.....	100
8.5	Regressão da Vazão Média de Cheia.....	100
8.6	Curva Adimensional de Probabilidade para a Vazão Máxima.....	105
8.7	Vazão Máxima Instantânea	106
8.8	Limitações	107
8.9	Procedimento de Cálculo das Vazões Máximas Regionalizadas	107
8.10	Exemplo de Aplicação	108
9	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS.....	109
9.1	Vazão Mínima de Duração d	110
9.2	Vazão Mínima Média de Longo Período de Duração t	111
9.3	Regionalização da Vazão Mínima	111
9.4	Regressão da Vazão Mínima de Longo Período.....	112
9.4.1	Região 1 – Cabeceiras dos Rios.....	118
a)	Região 1 - Regressão com Variáveis Físicas	118
b)	Curvas Adimensionais Médias da Região 1	121
9.4.2	Região 2 – Cursos Médio e Inferior dos Rios.....	122
a)	Regressão com Variáveis Físicas	123
b)	Curva Adimensional Média da Região 2	126
9.5	Roteiro de Cálculo da Vazão Mínima Média Anual - Período de Retorno T ...	127
9.5.1	Roteiro de Cálculo para a Região 1:.....	127
9.5.2	Roteiro de Cálculo para a Região 2.....	128
9.6	Limitações	128
9.7	Exemplo de Aplicação	129
10	REGIONALIZAÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA.....	130
10.1	Conceitos	131
10.2	Curva de Permanência Observada	132
10.3	Modelo da Curva de Permanência	133
10.4	Regionalização da Curva de Permanência	134
10.5	Regionalização da Curva de Permanência Anual.....	140
10.5.1	Região 1 - Cabeceiras.....	141
10.5.2	Região 2 – Trecho Médio dos Rios.....	143

10.5.3	Região 3 – Trecho Inferior dos Rios da Margem Direita.....	145
10.6	Regionalização da Curva de Permanência para o Período Seco.....	146
10.6.1	Região 1 - Cabeceiras.....	146
10.6.2	Região 2 – Trecho Médio dos Rios.....	148
10.6.3	Região 3 – Trecho Inferior dos Rios da Margem Direita.....	150
10.7	Regionalização da Curva de Permanência para o Período Úmido	154
10.7.1	Região 1 - Cabeceiras.....	154
10.7.2	Região 2 – Trecho Médio dos Rios.....	156
10.7.3	Região 3 – Trecho Inferior dos Rios da Margem Direita.....	158
10.8	Limitações	160
10.9	Procedimento de Cálculo da Curva de Permanência Regionalizada	160
10.10	Exemplo de Aplicação	161
11	REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE REGULARIZAÇÃO	162
11.1	Curva de Regularização	163
11.2	Modelo de Regularização.....	164
11.3	Curva de Regularização Adimensional.....	165
11.4	Regionalização da Curva de Regularização Adimensional.....	165
11.5	Limitações	168
11.6	Procedimento de Cálculo da Curva de Permanência	168
11.7	Exemplo de Aplicação	170
12	MAPEAMENTO DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS.....	171
12.1	Vazão Média Específica de Longo Período (qLP)	174
12.2	Vazão Média de Cheia Específica (qmáx)	177
12.3	Vazão Mínima Média Específica de 7 dias.....	179
12.4	Vazão Específica de Permanência de 90%.....	180
13	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189

RELAÇÃO DE QUADROS

Quadro 2.1 - Abrangência municipal da área de estudo.....	11
Quadro 2.2 - Percentual de ocorrência de tipos de solo nas sub-bacias contribuintes à área de estudo	18
Quadro 2.3 - Percentual de ocorrência da declividade nas sub-bacias contribuintes à área de estudo.....	23
Quadro 2.4 - Percentual de ocorrência de vegetação nas sub-bacias contribuintes à área de estudo	23
Quadro 3.1 - Postos visitados	32
Quadro 4.1 - Postos pluviométricos identificados na região em estudo.....	38
Quadro 4.2 - Localização dos postos pluviométricos selecionados	39
Quadro 4.3 - Postos utilizados para preenchimento de falhas nos postos pluviométricos selecionados	44
Quadro 4.4 - Precipitações médias mensais no postos pluviométricos selecionados.....	45
Quadro 4.5 - Precipitações mínimas mensais no postos pluviométricos selecionados	46
Quadro 4.6 - Precipitações máximas mensais no postos pluviométricos selecionados.....	47
Quadro 5.1 - Postos fluviométricos identificados na região em estudo	51
Quadro 5.2 - Localização dos postos fluviométricos selecionados.....	53
Quadro 5.3 - Caracterização dos postos selecionados mediante um escore	54
Quadro 6.1 - Localização dos postos fluviométricos e parâmetros morfométricos	61
Quadro 6.2 - Parâmetros fisiográficos associados à drenagem.....	62
Quadro 6.3 - Parâmetros fisiográficos associados à hipsometria.....	63
Quadro 7.1 - Vazão média de longo período e índices fisiográficos na região estudada	68
Quadro 7.2 - Regressões das vazões médias de longo período – Região 1	78
Quadro 7.3 - Valores observados e calculador das vazões médias de longo período – Região 1	78
Quadro 7.4 - Regressões das vazões médias de longo período – Região 2	82
Quadro 7.5 - Valores observados e calculados das vazões médias de longo período – Região 2.....	84
Quadro 8.1 - Vazão média de cheia e índices fisiográficos na região estudada.....	92
Quadro 8.2 - Regressões das vazões médias de cheia.....	102
Quadro 8.3 - Vazões médias de cheia observadas e calculadas.....	102
Quadro 9.1 - Índices fisiográficos na região estudada	113
Quadro 9.2. - Vazão mínima de longo período para as diferentes durações consideradas– período anual/seco..	113
Quadro 9.3. - Vazão mínima de longo período para as diferentes durações consideradas – período úmido.....	114
Quadro 9.4 - Regressões das vazões mínimas de longo período – Região 1 – período anual/seco.....	118
Quadro 9.5 - Regressões das vazões mínimas de longo período – Região 1 – período úmido.....	118
Quadro 9.6 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações–Região 1– período anual/seco.....	119
Quadro 9.7 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações–Região 1–período úmido.....	120
Quadro 9.8 - Regressão das vazões mínimas de longo período com diferentes durações – Região 2 – período anual e seco.....	123
Quadro 9.9 - Regressões das vazões mínimas de longo período com diferentes durações – Região 2 – período úmido.....	123

Quadro 9.10 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações–Região 2 - período anual e seco.....	124
Quadro 9.11 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações–Região 2 – período úmido.....	125
Quadro 10.1 - Vazões médias de longo período para os períodos anual, úmido e seco	134
Quadro 10.2 - Vazão diárias características da curva de permanência-anual.....	135
Quadro 10.3 - Vazões diárias características da curva de permanência-úmido.....	135
Quadro 10.4 - Vazões diárias características da curva de permanência-seco	136
Quadro 10.5 - Resumo de utilização dos dados para as curvas de permanência	136
Quadro 10.6 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 1 – período anual.....	141
Quadro 10.7 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 2 – período anual.....	143
Quadro 10.8 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 3 – período anual.....	145
Quadro 10.9 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 1 – período seco	146
Quadro 10.10 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 2 – período seco	148
Quadro 10.11 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 3 – período seco	150
Quadro 10.12 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 1 – período úmido	154
Quadro 10.13 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 2 – período úmido	156
Quadro 10.14 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 3 – período úmido	158
Quadro 11.1 - Postos e regiões.....	166
Quadro 12.1 - Regressões das Vazões Específicas Médias de Longo Período.....	174
Quadro 12.2 - Regressão das Vazões Médias de Cheia Específicas.....	177
Quadro 12.3 - Regressão das Vazões Mínimas Específicas período anual e seco	180
Quadro 12.3 - Regressão das Vazões Mínimas Específicas período úmido.....	180
Quadro 12.4 - Regressão das Vazões Específicas de Permanência de 90% período anual	184
Quadro 12.5 - Regressão das Vazões Específicas de Permanência de 90% período seco.....	184
Quadro 12.6 - Regressão das Vazões Específicas de Permanência de 90% período úmido.....	184

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1.1 - Área de abrangência dos estudos, hidrografia e acessos	4
Figura 1.2 - Mapa com a divisão municipal da margem direita do rio Tocantins.....	5
Figura 2.1 - Área de estudo e sub-bacias selecionadas	13
Figura 2.2 - Ambientes geológicos da área de estudo.....	14
Figura 2.3 - Regionalização climática	15
Figura 2.4 - Precipitação média anual.....	15
Figura 2.5 - Temperatura média anual do ar da área de estudo	16
Figura 2.6 - Solos da área de estudo	17
Figura 2.7 - Declividade da área de estudo	22
Figura 2.8 - Cobertura e uso da terra da área de estudo	24
Figura 3.1 - Percorso da visita de campo	33
Figura 4.1 - Localização das sub-bacias e postos pluviométricos selecionados	40
Figura 4.2 - Matriz de correlação dos postos pluviométricos selecionados	42
Figura 4.3 - Matriz das distâncias euclidianas entre os postos pluviométricos selecionados	43
Figura 5.1 - Localização das sub-bacias e postos pluviométricos selecionados.....	52
Figura 6.1 - Modelo digital de elevações utilizado.....	60
Figura 7.1 - Curvas adimensionais de vazões médias.....	71
Figura 7.2 - Declividade das retas de probabilidades de vazão média (tamanho dos círculos) e regiões climáticas segundo Köppen	72
Figura 7.3 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazão média e declividade do terreno....	73
Figura 7.4 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazão média e ambientes geológicos da bacia.....	74
Figura 7.5 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazão média (tamanho dos círculos) e tipo de solo.....	75
Figura 7.6 - Regiões homogêneas para as vazões médias	76
Figura 7.7 - Região 1 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da área com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=(1,714*10^{-15})*A^{1,04} P^{4,05}$	79
Figura 7.8 - Região 1 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da precipitação com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=(1,714*10^{-15})*A^{1,04} P^{4,05}$	79
Figura 7.9 - Região 1 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da área com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=0,077A^{0,853}$	80
Figura 7.10 - Região 1 - Valores estimativa da vazão média em função da precipitação com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}= 0,0269 A$	80
Figura 7.11 - Curva de probabilidade adimensional da vazão média – Região 1 – Clima Seco.....	81
Figura 7.12 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da área com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=(1,128.10^{-8}).A^{0,973}.P^{1,95}$	84
Figura 7.13 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da precipitação com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=(1,128.10^{-8}).A^{0,973}.P^{1,95}$	85

Figura 7.14 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=0,0268.A^{0,941}$	85
Figura 7.15 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=0,0137.A$	86
Figura 7.16 - Região 2 - Curva de probabilidade adimensional da vazão média.....	87
Figura 8.1 - Curvas adimensionais das vazões máximas para os postos obtidos do site da ANA	94
Figura 8.2 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho dos círculos) e regiões climáticas segundo Köppen.....	95
Figura 8.3 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho do círculo) e declividade do terreno.....	96
Figura 8.4 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho dos círculos) e ambientes geológicos.....	97
Figura 8.5 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho do círculo) e tipos de solo	98
Figura 8.6 - Região única identificada para regionalização das vazões máximas.....	99
Figura 8.7 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função da área mediante a equação $Q_{max}=0,147.A^{0,867}.Kc^{0,833}$	103
Figura 8.8 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função do coeficiente de compacidade mediante a equação $Q_{max}=0,147.A^{0,867}.Kc^{0,833}$	103
Figura 8.9 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função da área da bacia mediante a equação $Q_{max}=0,2385.A^{0,892}$	104
Figura 8.10 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função da área da bacia mediante a equação $Q_{max}=0,080.A$	104
Figura 8.11 - Curva de probabilidade adimensional da vazão média de cheia	106
Figura 9.1 - Curvas adimensionais de vazões mínimas para o período anual/seco.....	116
Figura 9.2 - Curvas adimensionais de vazões mínimas para o período úmido	116
Figura 9.3 - Regiões homogêneas para as vazões mínimas.....	117
Figura 9.4 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 1 - período anual/seco	121
Figura 9.5 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 1 - período úmido	121
Figura 9.6 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 2 -período anual/seco	126
Figura 9.7 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 2 - período úmido	126
Figura 10.1 - Curvas de permanência adimensionais para o período anual.....	137
Figura 10.2 - Curvas de permanência adimensionais para o período seco	138
Figura 10.3 - Curvas de permanência adimensionais para o período úmido	138
Figura 10.4 - Regiões homogêneas para as curvas de permanência	139
Figura 10.5 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período anual – Região 1.....	142
Figura 10.6 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período anual – Região 1.....	142

Figura 10.7 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período anual – Região 2.....	144
Figura 10.8 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período anual – Região 2.....	144
Figura 10.9 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período anual – Região 3.....	145
Figura 10.10 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período anual – Região 3.....	146
Figura 10.11 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco – Região 1	147
Figura 10.12 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período seco – Região 1	148
Figura 10.13 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco – Região 2	149
Figura 10.14 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período seco – Região 2	149
Figura 10.15 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da área com a equação $Q_{50}= 1,59967E-27.A^{1.15}.P7^{.45}$ – Região 3	151
Figura 10.16 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da precipitação com a equação $Q_{50}= 1,59967E-27.A^{1.15}.P7,45$ – Região 3	151
Figura 10.17 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da área com a equação $Q_{50}= 0,0055.A^{0.996}$ – Região 3.....	152
Figura 10.18 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da área com a equação $Q_{90}= 1,984E-33.A^{1.27}.P^{9,08}$ – Região 3.....	152
Figura 10.19 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da precipitação com a equação $Q_{50}= 1,59967E-27.A^{1.15}.P7,45$ – Região 3.....	153
Figura 10.20 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da área com a equação $Q_{50}= 0,0055A^{0.996}$ – Região 3	153
Figura 10.21 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período úmido – Região 1	155
Figura 10.22 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} em função do perímetro para o período úmido – Região 1	155
Figura 10.23 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} em função da área para o período úmido - Região 1.....	156
Figura 10.24 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período úmido - Região 2	157
Figura 10.25 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período úmido – Região 2.....	157
Figura 10.26 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período úmido – Região 3.....	159

Figura 10.27 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} em função da área para o período úmido – Região 3.....	159
Figura 11.1 - Curvas de volume adimensional ajustadas para as regiões 1 e 2	166
Figura 11.2 - Regiões homogêneas para curvas de regularização	167
Figura 12.1 - Pontos de amostragem selecionados para o mapeamento das variáveis hidrológicas.	173
Figura 12.2 - Regiões homogêneas para as vazões médias.	175
Figura 12.3 - Isolinhas das vazões médias específicas de longo período (qLP).	176
Figura 12.4 - Isolinhas das vazões médias de cheia específicas ($q_{máx}$).....	178
Figura 12.5 - Regiões homogêneas para as vazões mínimas.....	179
Figura 12.6 - Isolinhas das vazões mínimas médias específicas de 7 dias períodos anual e seco ($q7a/s$).	181
Figura 12.7 - Isolinhas das vazões mínimas médias específicas de 7 dias período úmido ($q7u$).....	182
Figura 12.8 - Regiões homogêneas para as curvas de permanência.....	183
Figura 12.9 - Isolinhas das vazões específicas de permanência de 90% anuais ($q90a$).	185
Figura 12.10 - Isolinhas das vazões específicas de permanência de 90% período seco ($q90s$).	186
Figura 12.11 - Isolinhas das vazões específicas de permanência de 90% período úmido ($q90u$).....	187

1 ASPECTOS GERAIS

1 ASPECTOS GERAIS

Este Relatório Técnico descreve as atividades desenvolvidas para elaboração do ESTUDO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA MARGEM DIREITA DO RIO TOCANTINS.

Inicialmente, são descritas as características principais do contrato, a área de abrangência dos trabalhos, os objetivos e o escopo dos estudos, bem como os conteúdos do presente Relatório Técnico.

1.1 Principais Características do Contrato

O Relatório que segue está de acordo com os ditames da Proposta Técnica apresentada pela CONTRATANTE no certame licitatório de que tratou a Solicitação de Proposta SDP N° 003/GOP-SEPLAN/2006 promovida pela Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente do Estado do Tocantins – SEPLAN/TO, por meio da Comissão Permanente de Licitação – COLIC/SEINF/TO. Ainda, está plenamente aderente ao Termo de Referência emitido pela SEPLAN/TO, anexo ao Edital, cujo título é: “Estudo de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas da Margem Direita do Rio Tocantins”.

Os principais dados e informações que permitem caracterizar o referido contrato de prestação de serviços de consultoria são os seguintes:

- Modalidade/Identificação da Licitação: Solicitação de Proposta SDP 003/GOP-SEPLAN;
- Data da Licitação: 11/05/2006;
- Data da Assinatura do Contrato: 06/11/2006;
- Data da Ordem de Serviço: 06/11/2006;
- Prazo de Execução: 180 dias;
- Valor do Contrato: R\$ 299.775,63 (duzentos e noventa e nove mil setecentos e setenta e cinco reais e sessenta e três centavos);
- Origem dos Recursos: Acordo de Empréstimo BIRD/TO n° 7208-BR com contrapartida do Tesouro do Estado do Tocantins

1.2 Identificação da Área de Abrangência do Trabalho

A presente área de estudo corresponde às bacias da margem direita do Rio Tocantins nos limites do Estado do Tocantins. A partir da observação do material cartográfico disponível para a região de interesse do estudo, referenciada às informações obtidas com a coleta e sistematização de dados existentes, foi estabelecida a área de abrangência do trabalho. Esta área de abrangência foi definida a partir da hidrografia afluente ao rio Tocantins pela sua margem direita, em grande parte coincidente com o território do Estado do Tocantins, incluindo cursos d'água cujas nascentes estão fora do Estado, porém com segmentos expressivos no território tocantinense.

1.2.1 Localização, Delimitação da Área de Estudo e Acessos

A área de estudo está localizada na margem direita do rio Tocantins e cobre uma vasta porção do território tocantinense. A delimitação da área de estudo permitiu o planejamento da coleta dos dados que foram utilizados para a confecção dos estudos objeto do Contrato firmado entre a SEPLAN e o Consórcio.

A Figura 1.1 apresenta a área de abrangência dos estudos, incluindo um detalhamento da malha rodoviária, além de apresentar a hidrografia e a localização das principais estações pluviométricas e fluviométricas. Assim estabeleceram-se as informações que propiciaram a busca eficiente pelos dados indispensáveis aos procedimentos de regionalização de vazões.

1.2.2 Abrangência Municipal

É interessante observar qual a densidade de municípios cobertos pela área de estudo. Desta forma, apresenta-se o mapa da margem direita do Tocantins com a sua divisão municipal. Esta ilustração está na Figura 1.2, apresentada em continuação.

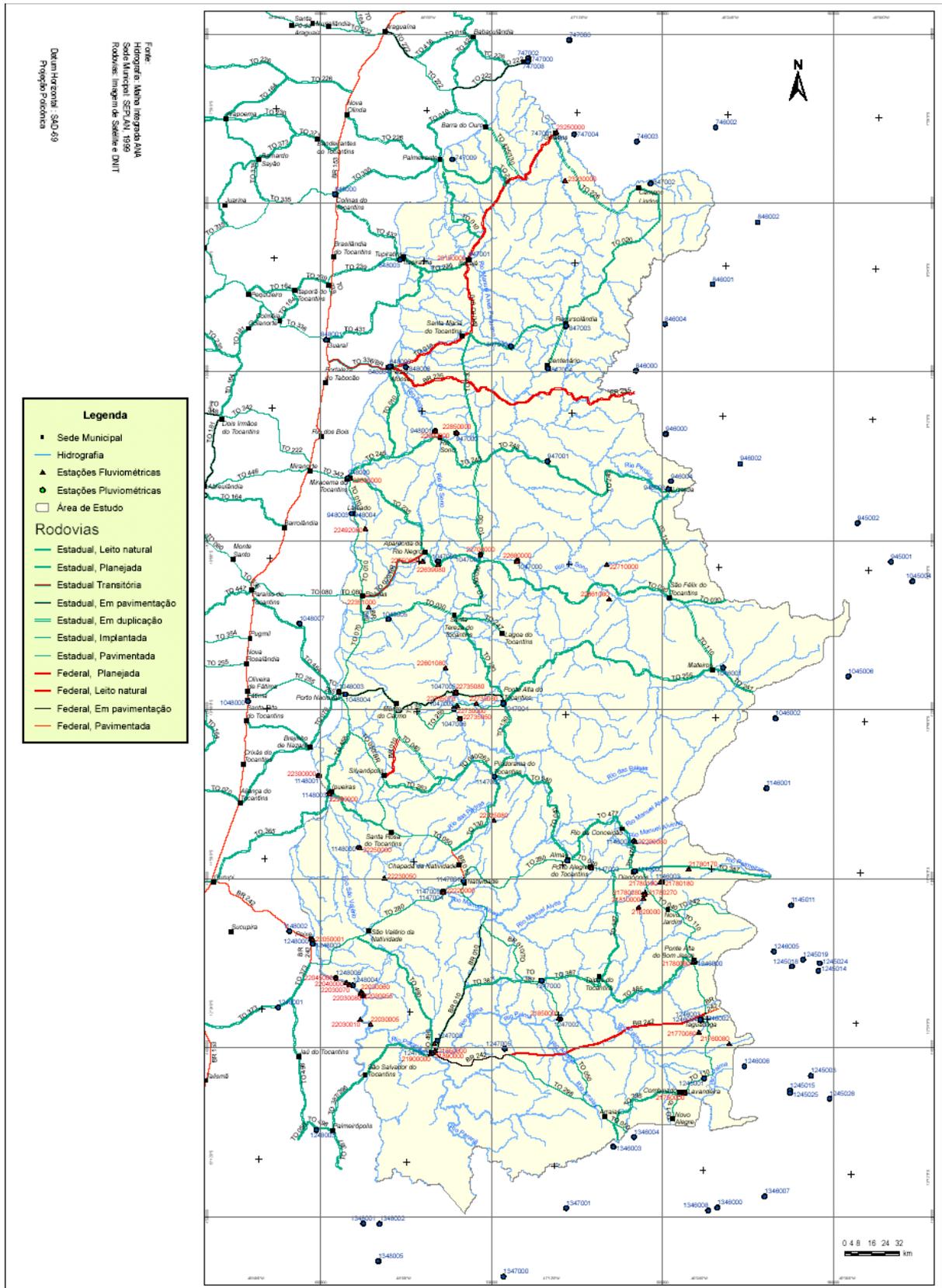


Figura 1.1 - Área de abrangência dos estudos, hidrografia e acessos

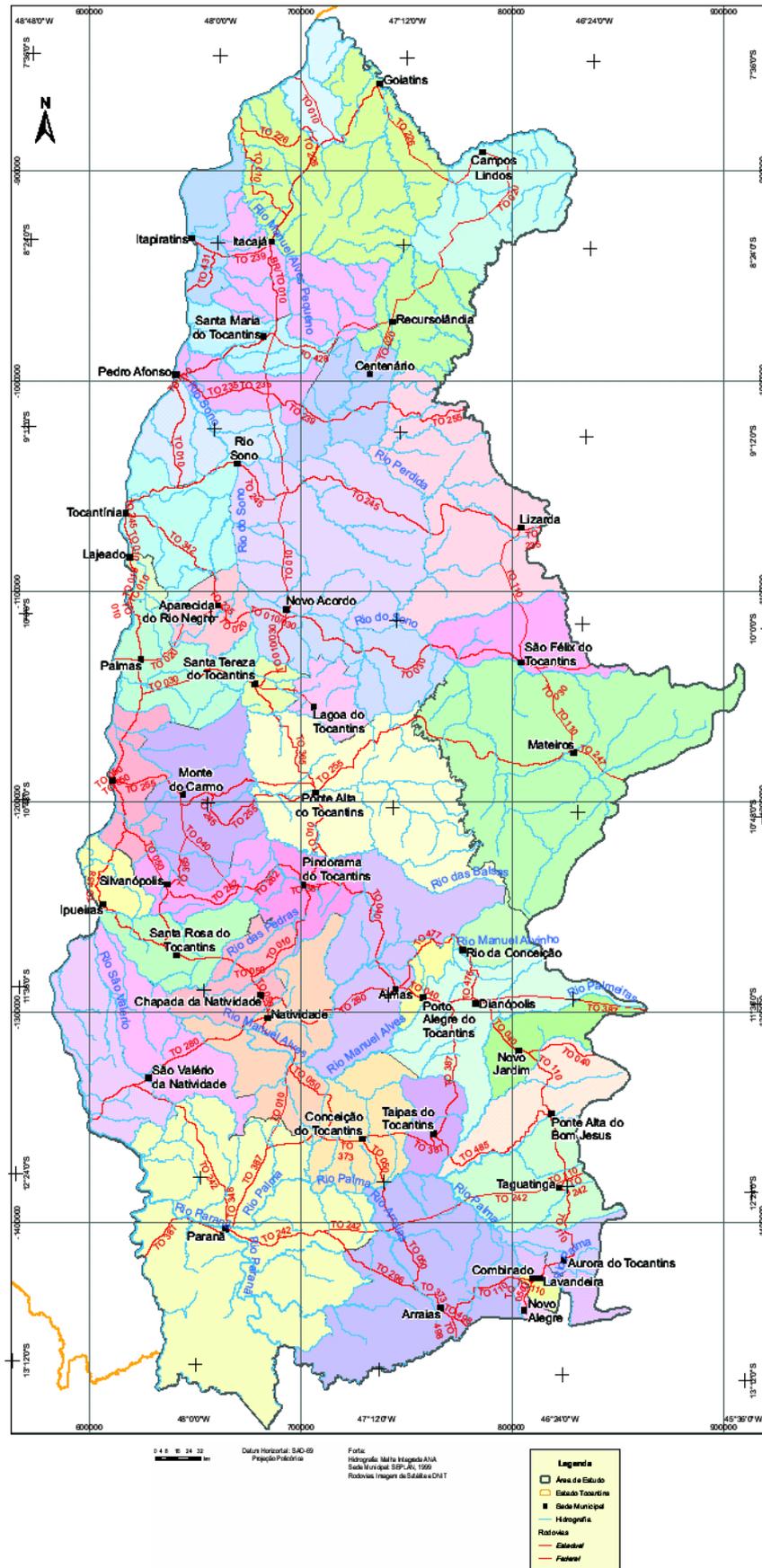


Figura 1.2 - Mapa com a divisão municipal da margem direita do rio Tocantins

1.3 Objetivos e Escopo do Trabalho

O presente trabalho está inserido no contexto do Projeto de Desenvolvimento Regional Sustentável do Tocantins (PDRS), que tem como macrocomponentes:

- (i) o planejamento e gestão do desenvolvimento regional e local - onde se buscam elementos para promover o planejamento e a gestão regional e municipal dos programas públicos utilizando critérios técnicos, econômicos e ambientais, bem como envolvendo a participação das comunidades;
- (ii) a consolidação do sistema de proteção ambiental e gestão territorial - objetiva-se a definição, formulação e implementação de políticas de gestão territorial que contemplem a preservação/conservação dos recursos naturais, planos alternativos de uso dos recursos naturais, incentivos e regulamentação do uso dos recursos naturais, sobretudo, de programas de ampliação de ações para a participação e inclusão social no processo de desenvolvimento sustentável do Tocantins;
- (iii) o melhoramento e conservação de rodovias estaduais e municipais (vicinais) – buscam-se elementos para executar melhorias nos acessos às áreas produtivas, principalmente nas regiões do Projeto, visando interligar essas áreas com o sistema rodoviário principal (ou a terminais intermodais da Ferrovia Norte-Sul), melhorar a competitividade dos seus produtos, fortalecer a capacidade institucional de planejamento do setor rodoviário, com desconcentração de atividades, apoiar a capacidade de gestão de novas residências rodoviárias, pavimentar e implantar até 200km de rodovias estaduais prioritárias, otimizar a aplicação dos recursos do Estado no setor rodoviário, incluindo a introdução de um contrato-piloto de restauração e manutenção de estradas estaduais pavimentadas e não pavimentadas, implantar um programa de ação ambiental e comunicação social para as comunidades impactadas pelo componente.

Neste sentido, a regionalização hidrológica possibilita a transferência de informações das estações pluvio e fluviométricas para locais sem observações e se constitui em um instrumento eficaz em estudos de planejamento e administração de recursos hídricos, possibilitando a obtenção de variáveis hidrológicas básicas de maneira simples e rápida, de acordo com a agilidade que a administração dos recursos hídricos requer para suas decisões. Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal a regionalização de vazões características de longo termo, visando disponibilizar informações espacializadas e de boa

qualidade para atender às necessidades dos órgãos gestores de recursos hídricos do Estado e demais usuários.

Os objetivos específicos são:

- ❑ Facilitar o processo de tomada de decisão e apoiar o gerenciamento e controle de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado do Tocantins;
- ❑ Gerar informações para o dimensionamento de projetos de demanda e disponibilidade hídrica em setores como abastecimento público, irrigação, agropecuária, viário, geração de energia, aqüicultura, etc.;
- ❑ Transpor informações de vazão de uma bacia com dados para outra sem dados;
- ❑ Estimar vazões para ações de planejamento de recursos hídricos, principalmente para:
 - ❑ dimensionar obras tais como canais, pontes, vertedouros, ensecadeiras, etc.;
 - ❑ definir locais de aproveitamentos;
 - ❑ avaliar riscos de inundação de áreas ribeirinhas;
- ❑ Identificar regiões com carência de postos e estações hidrometeorológicas.

1.4 Conteúdo do Presente Relatório

O presente Relatório Técnico apresenta as atividades e os produtos desenvolvidos no Estudo de Regionalização de Vazões nas bacias hidrográficas da margem direita do rio Tocantins, incluindo:

- ❑ caracterização da região de estudo;
- ❑ atividades desenvolvidas na viagem de reconhecimento de campo;
- ❑ seleção dos postos pluviométricos e fluviométricos;
- ❑ análise da qualidade dos dados disponíveis;
- ❑ determinação das variáveis fisiográficas;
- ❑ determinação e análise da probabilidade de ocorrência de vazões máximas e médias;
- ❑ análise das características regionais das vazões médias, máximas e mínimas;
- ❑ análise das características regionais das curvas de permanência e das curvas de regularização;
- ❑ estabelecimento de equações de regressão das variáveis regionalizadas;
- ❑ mapeamento de variáveis hidrológicas;

- exemplos de utilização;
- determinação das limitações da regionalização;
- comentários gerais e recomendações.

2 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

2 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

2.1 Introdução

A seguir são descritos os elementos para caracterização da região em estudo, compreendendo descrições da delimitação e abrangência municipal, da hidrografia, da geomorfologia, do clima, dos solos, da declividade, da vegetação e da ocupação do solo, além de aspectos sócio-econômicos e demográficos. A apresentação destes elementos tem como objetivo promover uma visão geral da área de estudo, facilitando, assim, a compreensão do comportamento das variáveis hidrológicas envolvidas na Regionalização de Vazões.

Deve-se destacar que há uma diferença entre a área de estudo (conforme definida no Termo de Referência emitido pela SEPLAN/TO, cujo título é: “Estudo de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas da Margem Direita do Rio Tocantins”) e a área das bacias contribuintes à área de estudo. Esta diferença ocorre porque o Edital de que tratou a Solicitação de Proposta SDP N^o 003/GOP-SEPLAN/2006 abrange apenas a área do estado do Tocantins, enquanto que as bacias contribuintes da Margem Direita do rio Tocantins também ocupam áreas de outros estados da União.

2.2 Delimitação e Abrangência Municipal da Área de Estudo

A área de estudo corresponde às bacias da margem direita do Rio Tocantins nos limites do Estado e possui uma configuração alongada no sentido norte-sul que se estende por uma superfície contínua de cerca de 120.000 km². Compreende todos os municípios pertencentes às bacias da margem direita do rio Tocantins, dentro dos limites do estado do Tocantins, conforme mostra a Figura 1.2 do item 1.2.

O rio Tocantins corta o estado de sul a norte, entre os paralelos 07°20' e 13°27' de latitude sul e os meridianos 45°40' e 48°47' de longitude oeste. Os municípios inseridos total ou parcialmente na área de estudo encontram-se no Quadro 2.1, sendo que Tupiratins, Palmeirópolis, Gurupi, Rio dos Bois e Aliança do Tocantins foram desconsiderados por apresentarem menos de 0,1% de área dentro da área de estudo.

A área de estudo limita-se ao sul com Goiás, a leste com a Bahia, Maranhão e Piauí e, a oeste e norte pelo leito do rio Tocantins. Os principais rios podem ser observados na Figura 1.1 apresentada anteriormente. De acordo com a classificação adotada pela Agência Nacional de Águas–ANA para as grandes bacias brasileiras, a área encontra-se na Bacia do Tocantins compreendida entre as bacias do Atlântico Norte, do São Francisco e a direita do eixo do rio Tocantins.

Quadro 2.1 - Abrangência municipal da área de estudo

Município	Região Administrativa	Área do Município (km ²)	Área do município dentro da área de estudo (km ²)	% do Município na Margem direita do Rio Tocantins
Santa Tereza do Tocantins	Novo Acordo	540,98	540,98	100%
Taipas do Tocantins	Dianópolis	1.110,54	1.110,54	100%
Lagoa do Tocantins	Novo Acordo	920,08	920,08	100%
Pindorama do Tocantins	Natividade	1.565,09	1.565,09	100%
Itacajá	Pedro Afonso	3.060,61	3.060,61	100%
Silvanópolis	Natividade	1.294,63	1.294,63	100%
Almas	Dianópolis	4.025,29	4.025,29	100%
Centenário	Pedro Afonso	1.956,79	1.956,79	100%
Conceição do Tocantins	Arraias	2.541,44	2.541,44	100%
Chapada da Natividade	Natividade	1.677,43	1.677,43	100%
Novo Acordo	Novo Acordo	2.674,38	2.674,38	100%
Rio Sono	Novo Acordo	6.383,97	6.383,97	100%
Ponte Alta do Tocantins	Novo Acordo	6.515,02	6.515,02	100%
Aparecida do Rio Negro	Palmas	1.165,55	1.165,55	100%
Natividade	Natividade	3.199,20	3.199,20	100%
Monte do Carmo	Palmas	3.349,23	3.349,23	100%
Porto Alegre do Tocantins	Dianópolis	504,83	504,83	100%
Dianópolis	Dianópolis	3.290,37	3.290,35	100%
São Félix do Tocantins	Novo Acordo	1.915,20	1.915,15	100%
Rio da Conceição	Dianópolis	793,67	793,64	100%
Santa Rosa do Tocantins	Natividade	1.803,03	1.802,96	100%
Taguatinga	Taguatinga	2.501,72	2.501,62	100%
Lizarda	Novo Acordo	5.715,51	5.715,19	100%
Ponte Alta do Bom Jesus	Taguatinga	2.149,54	2.149,37	100%
Mateiros	Novo Acordo	9.722,93	9.722,12	100%
Arraias	Arraias	5.890,09	5.889,49	100%
Recursolândia	Pedro Afonso	2.214,67	2.214,41	100%
Campos Lindos	Goiatins	3.260,16	3.259,76	100%
Novo Jardim	Dianópolis	1.387,89	1.387,72	100%
Aurora do Tocantins	Taguatinga	812,03	811,88	100%
Combinado	Arraias	208,73	208,68	100%
São Valério da Natividade	Natividade	2.540,44	2.539,78	100%
Lavandeira	Taguatinga	563,55	563,33	100%
Novo Alegre	Arraias	161,26	161,19	100%
Paraná	Paraná	11.199,83	11.191,34	100%
Goiatins	Goiatins	6.417,10	6.404,03	100%
Palmas	Palmas	2.457,47	2.451,74	100%
Bom Jesus do Tocantins	Pedro Afonso	1.342,80	1.338,47	100%
Tocantínia	Palmas	2.617,53	2.607,82	100%
Ipueiras do Tocantins	Palmas	820,24	817,10	100%
Pedro Afonso	Pedro Afonso	2.017,04	2.007,64	100%
Santa Maria do Tocantins	Pedro Afonso	1.413,44	1.406,26	99%
Barra do Ouro	Goiatins	1.101,63	1.089,82	99%
Itapiratins	Pedro Afonso	1.251,31	1.228,03	98%
Lajeado	Palmas	318,18	307,49	97%
Peixe	Gurupi	5.311,55	2.523,27	48%
Porto Nacional	Palmas	4.457,06	1.443,91	32%
São Salvador do Tocantins	Paraná	1.423,71	26,15	1,84%
Brejinho de Nazaré	Palmas	1.725,67	6,52	0,38%
Miracema do Tocantins	Palmas	2.659,66	2,93	0,11%

2.3 Hidrografia

A bacia do rio Tocantins drena os estados da Bahia, Distrito Federal, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará e Tocantins, em uma extensão de 381 mil km². O rio Tocantins é o principal rio da bacia.

A margem direita da bacia em toda sua extensão representa uma área aproximada de 155 mil km² sendo que 122 mil km² representam a área de estudo e estão no estado do Tocantins, com o restante nos demais estados.

Na Figura 2.1 estão indicadas a área de estudo (margem direita do rio Tocantins, dentro dos limites do estado do Tocantins, delimitada por uma linha vermelha) e as sub-bacias contribuintes adotadas no presente estudo (hachuradas em amarelo), em função dos postos fluviométricos selecionados, conforme detalhado no Capítulo 5, onde são descritos os critérios para seleção destes postos. A região hachurada no detalhe apresentado no canto superior esquerdo da representa a combinação das duas áreas: união da área de estudo com a área das bacias contribuintes que se estendem além do limite do estado do Tocantins, mostrando claramente a diferença entre estas duas regiões, conforme comentado no item 2.1.

2.4 Geomorfologia

Na margem direita do rio Tocantins identificam-se cinco unidades geomorfológicas – a Depressão do Médio Rio Tocantins, a Depressão do Alto Rio Tocantins, Patamares do Rio Tocantins, Planalto Central Brasileiro e Chapada do Meio Norte. Além destas unidades geomorfológicas, ocorrem, ao longo dos principais rios da bacia, Planícies Fluviais, consideradas como compartimentos azonais por ocorrerem em meio às unidades.

Geologicamente, são encontrados terrenos pertencentes: à Faixa de Dobramentos do Proterozóico Médio e Superior; à Bacia Sedimentar do Parnaíba; à Bacia Sedimentar do São Francisco, que pertence à Formação Urucuaia; às Coberturas Cenozóicas e aos Complementos Metamórficos e Seqüência Vulcano-Sedimentar do Arqueano e Proterozóico Inferior, conhecido como Complexo Goiano. A Figura 2.2 mostra estes ambientes geológicos.

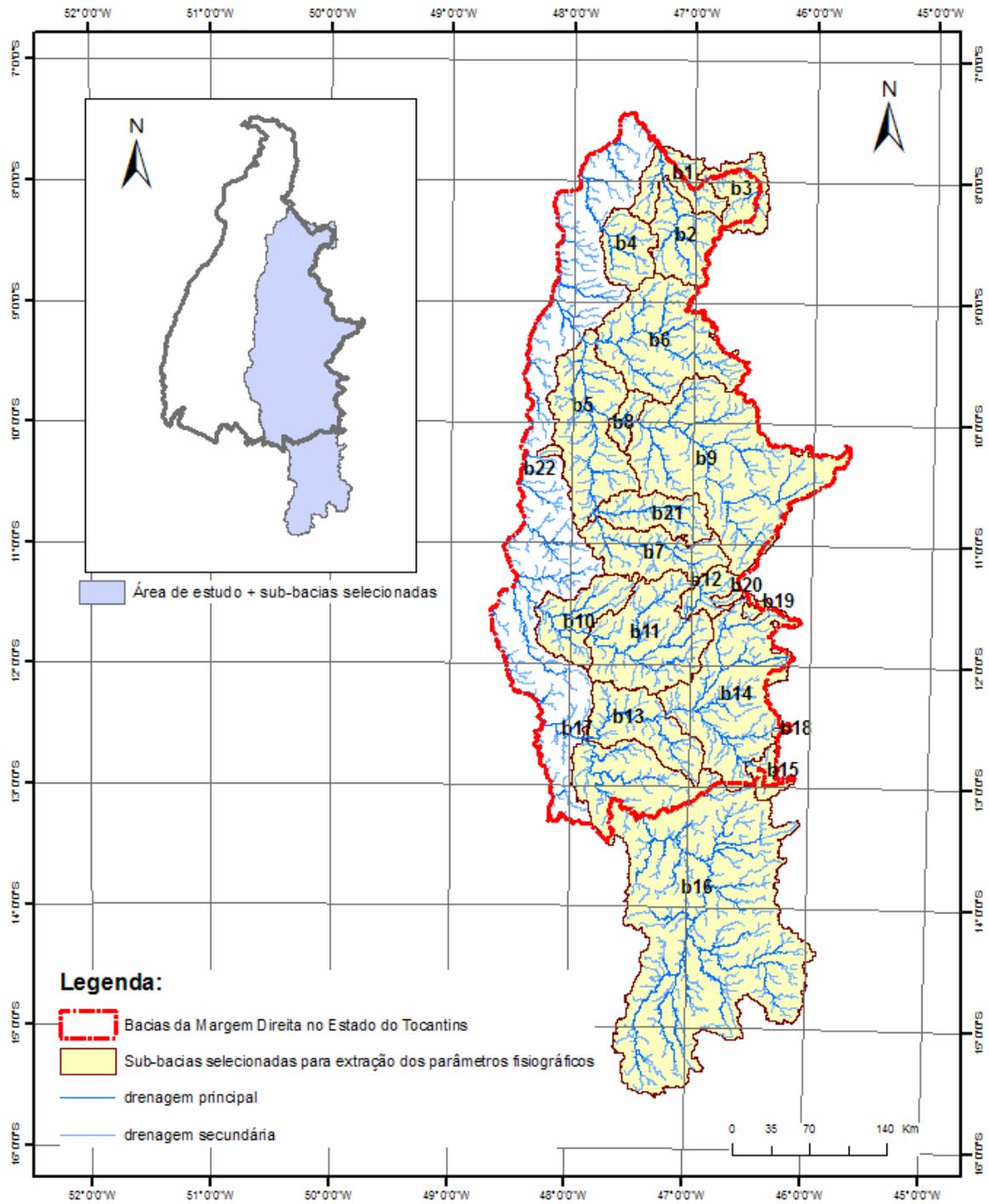


Figura 2.1 - Área de estudo e sub-bacias selecionadas

2.5 Clima

O clima da área de estudo caracteriza-se por três faixas climáticas, de acordo com a regionalização climática realizada para o estado do Tocantins (Atlas do Tocantins – SEPLAN, 2003) pelo Método de Thornthwaite, conforme apresentado na Figura 2.3. A faixa mais a oeste da área apresenta clima do tipo B1wA'a', clima úmido. A faixa central que se estende de norte a sul e ocupa a maior parte da área, apresenta clima C2wA'a', que é um clima úmido subúmido. Já a faixa mais a leste apresenta clima do tipo C1da'a', com clima subúmido seco. De modo geral, a área de estudo apresenta moderada deficiência hídrica no inverno. A precipitação média na área de estudo decresce de norte a sul, variando de 1.700 a 1.200 mm. A Figura 2.4 apresenta a distribuição da precipitação média na região.

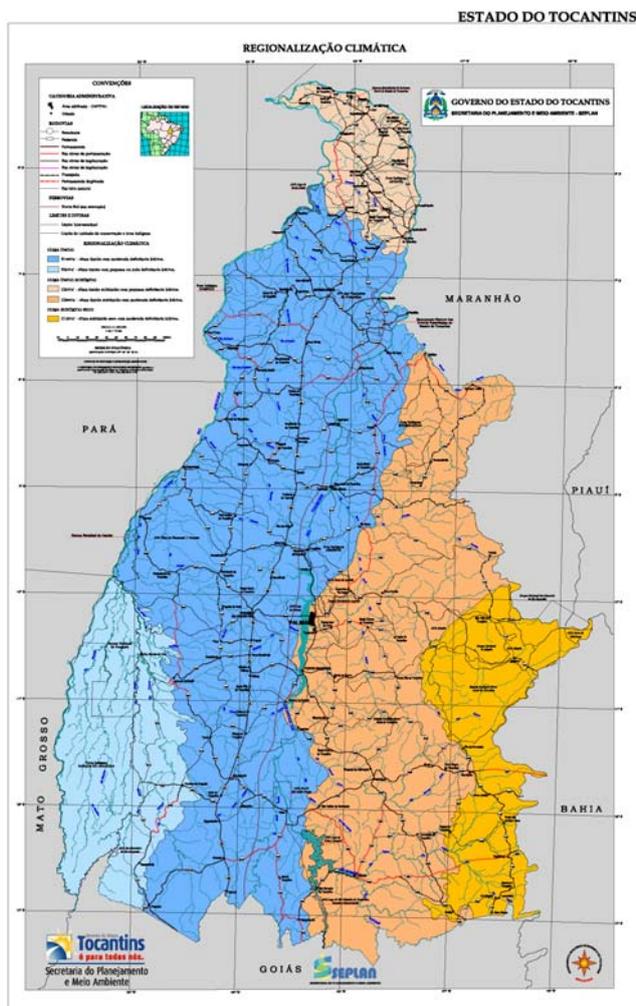


Figura 2.3 - Regionalização climática

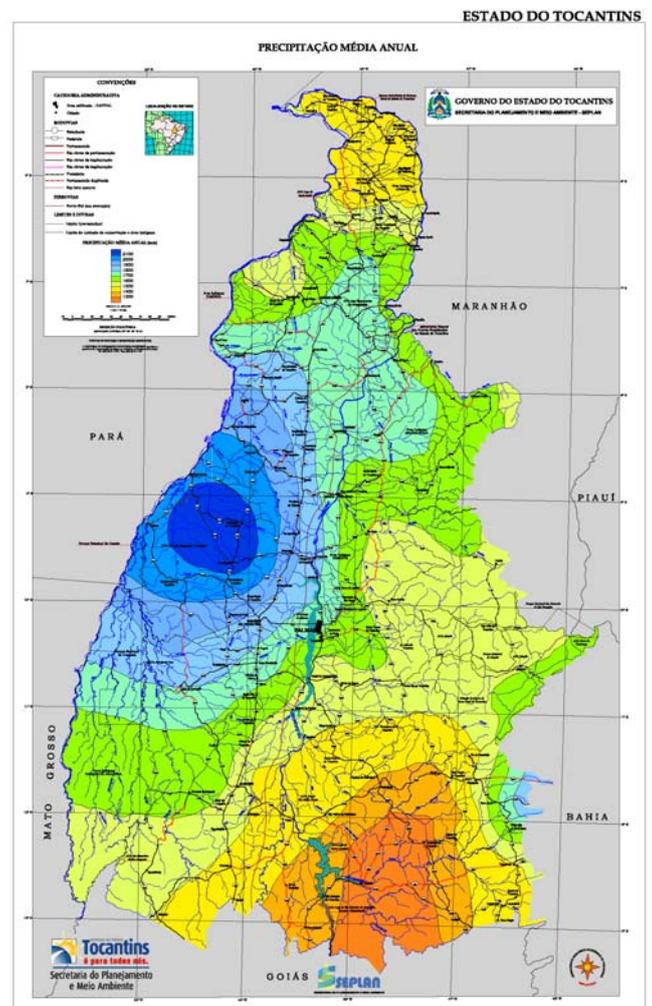


Figura 2.4 - Precipitação média anual

A Figura 2.5 apresenta a distribuição da temperatura média anual do ar da área de estudo. Observa-se haver pequena variabilidade deste parâmetro.

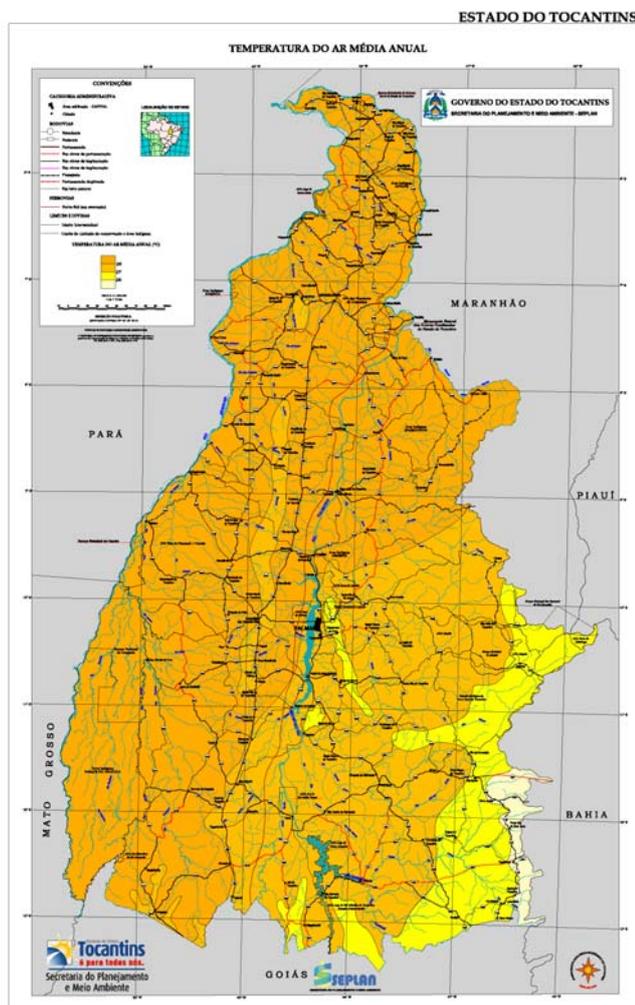


Figura 2.5 - Temperatura média anual do ar da área de estudo

2.6 Solos

Quanto aos tipos de solos presentes na área de estudo destacam-se, com áreas mais representativas, os solos arenoquartzosos profundos (Areias Quartzosas), Solos Concrecionários lateríticos, Latossolo Vermelho-Amarelo, Podzólico Vermelho-Amarelo, Solos Litólicos, Plintossolos e Cambissolos.

No Estado do Tocantins, os Latossolos Roxos, as Terras Roxas Estruturadas, os Latossolos Vermelho-Amarelo, Vermelho-Amarelo-Escuro e os Solos Aluviais cobrem cerca de 35% do Estado, constituindo as melhores alternativas para o uso agrícola intensivo.

Os solos Podzólicos Vermelho-Amarelo, os Concrecionários e os Brunizém Avermelhados compreendem cerca de 18% da área estadual, apresentando restrições em vários níveis de aplicação de tecnologias para a utilização agrícola.

Quadro 2.2 - Percentual de ocorrência de tipos de solo nas sub-bacias contribuintes à área de estudo

Tipo de Solo	Percentual de ocorrência
Solos podzólicos	23,10%
Solos arenoquartzosos profundos	21,50%
Latossolos	17,15%
Solos concrecionários lateríticos	12,74%
Solos litólicos	9,04%
Cambissolos	5,63%
Terras roxas estruturadas	5,48%
Lateritas hidromórficas	5,37%

As principais classes de solos existentes nas bacias de interesse estão a seguir resumidamente descritas, de acordo com o Projeto RADAM.

- Areias Quartzosas

São solos que apresentam um perfil pouco evoluído, com baixa atividade de argila, saturação de bases baixa e soma de bases freqüentemente bastante baixa. São permeáveis e de textura grosseira, com um conteúdo de argila que não ultrapassa a 15 % no horizonte B. Possuem coloração nos matizes 10YR e 5YR, com fraca diferenciação morfológica entre os horizontes.

Podem apresentar perfil com A muito fracamente diferenciado em A1 e A3 ou A1 e A2, com uma espessura bastante variável, sobrejacente ao horizonte C.

Geralmente trata-se de solos profundos, com perfil em média acima de 200 cm, que aparecem fortemente drenados, porosos e com consistência muito friável ou mesmo solto em todo o perfil.

Ocorrem em relevo plano e suave ondulado, sob vegetação de floresta, tendo arenitos como material originário.

- Latossolo Vermelho-Amarelo

Esta classe de solos possui horizontes A ócrico e B óxico (latossólico), são profundos, com relação textural em torno de 1,0 e baixas fertilidade natural e saturação de bases.

Tratam-se de solos com coloração variando de bruno a bruno amarelado, nos matizes 10YR e 7,5YR no horizonte A e bruno forte a vermelho-amarelado, principalmente no matiz 7,5YR, no horizonte B.

O seu perfil é do tipo A, B e C, friável, bastante poroso, permeável, com estrutura pouco desenvolvida, sendo esta uma das características morfológicas de classificação desta unidade.

São fasados em textura média e argilosa, os primeiros com teor de argila de 15 a 35 % e os últimos com teor de argila superior a 35 %.

São encontrados em relevo plano ou suave ondulado, sob vegetação de floresta.

O horizonte A apresenta uma espessura média de aproximadamente 40 cm, coloração 10YR principalmente, com cromas variando de 2 a 3 e valores de 3 a 5. A textura pode variar de areia franca a argila, de consistência friável, não plástico a plástico e não pegajoso a pegajoso. A estrutura apresenta-se quase sempre maciça, porém, pode ocorrer também fraca, pequena subangular e granular.

O horizonte B, cuja espessura média é superior a 150 cm, possui coloração nos matizes 10YR e 2,5YR, com cromas e valores bastante altos. A textura pode variar de franco-arenosa a argila, a consistência de friável a firme, de ligeiramente plástico a plástico e de ligeiramente pegajoso a pegajoso, sendo a estrutura dominante a maciça.

O horizonte C, de profundidade não determinada, apresenta-se mais friável e de textura mais leve do que o horizonte superior.

As unidades de mapeamento encontradas nas bacias são:

- Solos Litólicos

Esta classe é constituída por solos onde o horizonte A pode repousar diretamente sobre a rocha R, com perfil pouco evoluído, bastante raso, de textura e fertilidade variável dependendo do material originário.

São encontrados em áreas de relevo ondulado a montanhoso, geralmente sob vegetação arbórea.

Apresentam horizonte A com espessura de 15 a 20 cm, fracamente desenvolvido, constituindo em alguns casos perfis do tipo AC e mais freqüentemente do tipo AR, podendo também aparecer A11 e A12 sobre R.

As suas cores são nos matizes 10YR e 5YR com valores de 3 a 4 e cromas de 2 a 4, textura franco-argilosa a argilosa, freqüentemente com cascalho, estrutura fracamente desenvolvida, geralmente subangular, e consistência ligeiramente pegajoso a pegajoso. O horizonte A transiciona para a rocha de maneira abrupta ou clara e plana ou ondulada.

As unidades de mapeamento encontradas nas bacias são:

- Podzólico Vermelho-Amarelo

Os solos desta classe são ácidos, bem desenvolvidos, com um horizonte A fraco (ócrico) e B argílico. O horizonte A1 está assentado sobre um A2 ligeiramente descolorido e muito pouco desenvolvido ou sobre um A3, o qual, por sua vez, assenta-se sobre o horizonte B vermelho-

amarelado, nos matizes 7,5YR ou 5YR, de textura relativamente argilosa, havendo boa diferença textural entre o A e o B.

Em sua maioria, são solos de fertilidade baixa e textura argilosa, que apresentam seqüência de horizontes do tipo A, B e C, cuja espessura não excede a 200 cm, e com pronunciada diferenciação entre o A e o B. Relativamente em menor proporção, são encontrados solos de fertilidade média e alta e de textura média (percentagem de argila entre 15 e 35 %).

Entre as características utilizadas para a sua classificação estão aquelas a seguir relacionadas:

- ❑ diferença textural marcante entre o A e o B;
- ❑ presença de A2 pouco evoluído ou não;
- ❑ transição clara e gradual entre os horizontes A e B;
- ❑ horizonte B estruturado;
- ❑ presença de cerosidade no horizonte B e argila de baixa capacidade de troca.

Como variação da unidade modal podem ocorrer áreas de Podzólico Vermelho-Amarelo cascalhento, Podzólico Vermelho-Amarelo concrecionário plíntico, Podzólico Vermelho-Amarelo plíntico e Podzólico Vermelho-Amarelo Equivalente eutrófico.

Os solos que constituem esta unidade apresentam-se bem drenados, ácidos e com erosão variando de laminar ligeira a moderada. A vegetação original destes solos é a de floresta mista de babaçu, em relevo predominantemente suave ondulado e ondulado, com morros em “meia laranja” de pendentes curtas.

O horizonte A apresenta espessura variável entre 20 e 30 cm; cores de brunoacinzentado muito escuro a bruno avermelhado, matizes 10YR e 5YR, valores de 3 a 5 e cromas de 2 a 4; textura entre areia franca e franco-argilo-arenosa; estrutura variando de grãos simples a fraca pequena granular e subangular; consistência úmida entre solto a firme e não plástico e não pegajoso a pegajoso para o solo molhado; com transição plana ou ondulada e gradual ou clara para o horizonte B.

O horizonte B possui espessura variando de 80 cm a 150 cm; coloração entre bruno escuro a vermelho, nos matizes 10YR e 2,5YR, com valores entre 4 e 5 e cromas entre 3 e 6; textura variando de franco-argilo-arenosa a argila; estrutura comumente fraca e moderada, pequena e média em blocos subangulares; consistência úmida variando de friável a firme, sendo que a consistência molhada varia de ligeiramente plástico a plástico e de ligeiramente pegajoso a pegajoso. Aparece também neste horizonte cerosidade de fraca a moderada, recobrando os elementos estruturais.

2.7 Declividade

Devido à necessidade de uniformização de critérios com futuros trabalhos do mesmo gênero no Estado do Tocantins, foram adotadas as classes de declividade estabelecidas no Zoneamento Agroecológico (ZAE) do Estado, executado pela EMBRAPA/Monitoramento por Satélite, em parceria com a Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico (DZE), da Secretaria Estadual de Planejamento.

No referido Zoneamento, são seis as classes de declividade, discriminadas em função das limitações oferecidas para o trabalho das máquinas agrícolas, da seguinte maneira:

- ❑ A - (declive igual ou inferior a 5 %): Compreende áreas com declives suaves, nos quais, na maior parte dos solos, o escoamento superficial é lento ou médio. O declive, por si só, não impede ou dificulta o trabalho de qualquer tipo de máquina agrícola mais usual. A erosão hídrica não oferece maiores problemas. Em alguns tipos de solos, práticas mais simples de conservação são recomendáveis. Para aqueles muito erodíveis e com comprimentos de rampa muito longos, práticas complexas podem ser necessárias, tais como sistemas de terraços e faixas de retenção.
- ❑ B - (declive maior do que 5 % e igual ou menor do que 10 %): Áreas com superfícies inclinadas, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial, para a maior parte dos solos, é médio ou rápido. O declive, por si só, normalmente não prejudica o uso de máquinas agrícolas. Em alguns casos, a erosão hídrica oferece pequenos problemas que podem ser controlados com práticas simples, mas na maior parte das vezes, práticas complexas de conservação do solo são necessárias, para que terras com esse declive possam ser cultivadas intensivamente.
- ❑ C - (declive maior do que 10 % e igual ou menor do que 15 %): Compreende áreas inclinadas ou colinosas, onde o escoamento superficial é rápido na maior parte dos solos. A não ser que o declive seja muito complexo, a maior parte das máquinas agrícolas pode ser usada. Solos dessa classe são facilmente erodíveis, exceto aqueles muito permeáveis e não muito arenosos, como alguns Latossolos. Em todas essas situações, práticas de conservação são recomendadas e necessárias.
- ❑ D - (declive maior do que 15 % e igual ou menor do que 30 %): Representada por áreas inclinadas, cujo escoamento superficial é rápido a muito rápido na maior parte dos solos. Podem ser trabalhados mecanicamente apenas em curvas de nível por

- máquinas simples de tração animal ou, com limitações e cuidados especiais, por tratores de esteira. Em terras nessa situação não é recomendável a prática de agricultura intensiva. São mais indicadas para pastagem natural e/ou silvicultura.
- ❑ E - (declive maior do que 30 % e igual ou menor do que 45 %): Áreas fortemente inclinadas, cujo escoamento superficial é muito rápido. Podem ser trabalhadas mecanicamente somente por máquinas simples de tração animal, assim mesmo com sérias limitações.
 - ❑ F - (declive maior do que 45 %): Constituída por áreas íngremes de regiões montanhosas, onde nenhum tipo de máquina agrícola pode trafegar. O escoamento superficial é sempre muito rápido e os solos extremamente suscetíveis à erosão hídrica. Não podem ser trabalhados mecanicamente, nem mesmo pelas máquinas simples de tração animal; somente trabalháveis com instrumentos e ferramentas manuais. Terras nessa situação são inadequadas para uso agrícola.

A Figura 2.7 e o Quadro 2.3 apresentam a distribuição da declividade na área de estudo

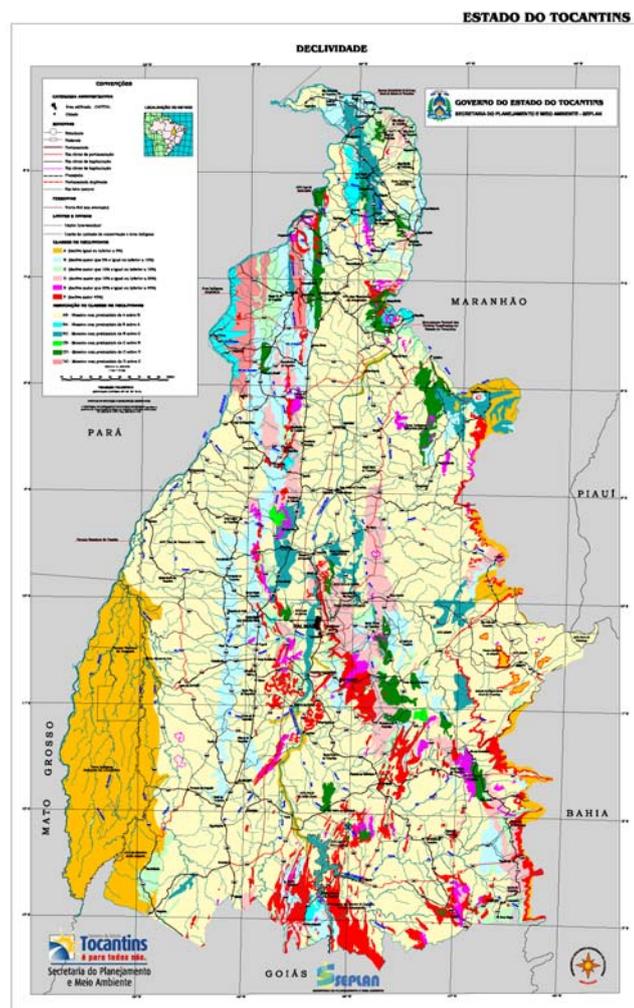


Figura 2.7 - Declividade da área de estudo

Quadro 2.3 - Percentual de ocorrência da declividade nas sub-bacias contribuintes à área de estudo

Declividade %	Percentual de ocorrência
0 – 5	63,41%
5 – 10	20,19%
10 – 15	6,10%
15 – 30	6,84%
30 – 45	2,27%
> 45	1,19%

2.8 Vegetação e Ocupação do Solo

O bioma característico da área de estudo é o Cerrado, que apresenta um mosaico composto por várias formas fisionômicas, dentre as quais predominam, na área de estudo, a Savana Arbórea Aberta (Campo Cerrado) e a Savana Parque. No que se refere ao uso do solo, a região, de maneira geral, apresenta vegetação em bom estado de conservação, no entanto, é visível o uso de áreas de tensão ecológica (áreas com atividades agropecuárias, agricultura, pecuária intensiva e extensiva, áreas de cerrado sendo utilizadas para a implantação de pastagens). O Quadro 2.4, a seguir, mostra a distribuição da vegetação na área de estudo.

Quadro 2.4 - Percentual de ocorrência de vegetação nas sub-bacias contribuintes à área de estudo

Tipo de Vegetação	Percentual de ocorrência
Savana	77,15%
Áreas de tensão ecológica	15,09%
Floresta estacional semidecidual	4,38%
Floresta estacional decidual	3,37%

A cobertura predominante estudo da área de estudo é o cerrado. A região possui ainda áreas de pastagem, terras agriculturadas e formações florestais. A Figura 2.8 apresenta a cobertura e o uso da terra na área em estudo.

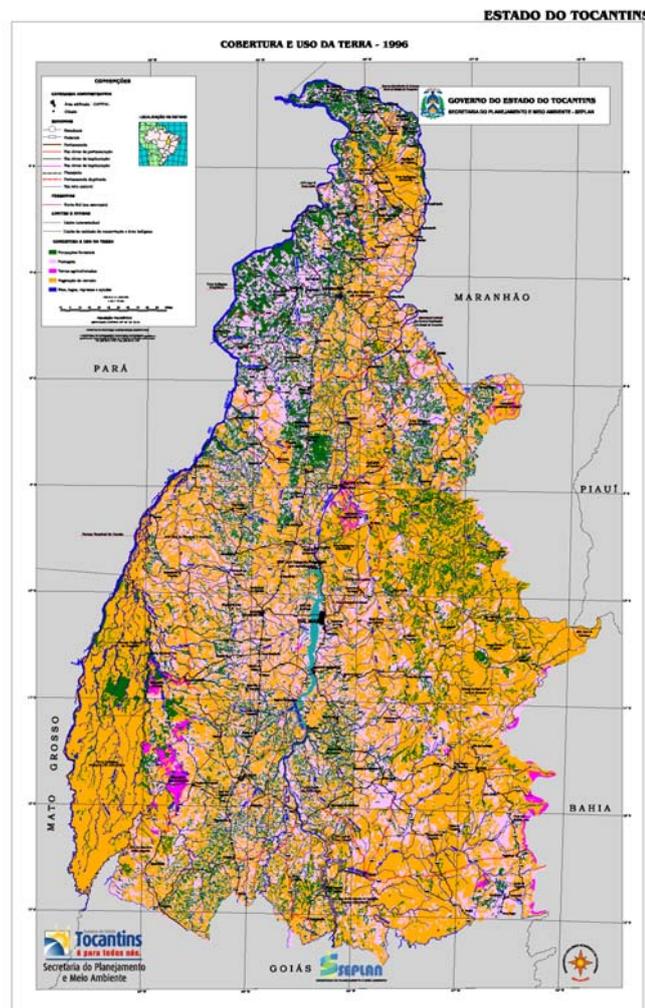


Figura 2.8 - Cobertura e uso da terra da área de estudo

2.9 Aspectos Sócio-Econômicos e Demográficos

Baseado nos dados contidos no Anuário Estatístico do Estado de Tocantins (IBGE), observou-se que o contingente demográfico dos municípios localizados na margem direita do Rio Tocantins representa, atualmente, 35% da população do Estado do Tocantins, dos quais 34,2% estão concentrados em Palmas e 11,2% em Porto Nacional, sendo o contingente restante distribuído entre os demais municípios abrangidos por este estudo.

Com uma taxa de urbanização de 73,24%, em 2000, a área teve um crescimento populacional de 3,95% ao ano, no período de 1996/2000 e de 4,41% ao ano no período de 1991/1996, enquanto a média do estado foi de 2,49% e 2,66% ao ano, respectivamente. Observa-se que os municípios inseridos na bacia apresentaram, em geral, um declínio na taxa de crescimento anual, a partir de 1996, passando de 4,41% para 3,95% ao ano, respectivamente, nos períodos de 1991/1996 e 1996/2000.

Os municípios da bacia ocupam, atualmente, uma área em torno de 120.000 km², correspondente a cerca de 40% do total da área do Estado. Com uma população total de 277.405 habitantes, os municípios que compõem a bacia apresentam uma baixa densidade demográfica média, com 3,58 hab/km², abaixo, portanto, da média do Estado que é de 4,17 hab/km². O município mais densamente povoado é o de Palmas, a capital, com uma densidade de 56,02 hab/km², seguido por Porto Nacional (31,16 hab/km²) e Combinado (21,65 hab/km²).

Quanto à situação dos domicílios, verifica-se que, em 2000, a população residente nas áreas urbanas representava cerca de 73% da população total da área, destaque especial para Palmas com cerca de 97% de urbanização, e também para os municípios de Porto Nacional, Rio da Conceição, Combinado, Pedro Afonso e Dianópolis, com mais de 80% da população concentrada na zona urbana.

Considerando o desempenho do PIB per capita na região, destacam-se os municípios de Monte do Carmo, Lajeado, Palmas, Pedro Afonso, Mateiros, Arraias, Campos Lindos e Dianópolis, todos estes com índices acima da média estadual, assim confirmando as primeiras posições na classificação geral do PIB per capita no Estado.

Analisando-se a utilização do solo, observou-se um claro predomínio da pecuária, ocupando cerca de 61% das áreas exploradas. As áreas de matas e florestas recobrem em torno de 18% e as áreas com atividades agrícolas correspondem a 4%, restando um percentual significativo de áreas não aproveitadas, em torno de 11%.

Segundo dados do DNIT, o sistema viário da região é composto basicamente por rodovias estaduais, que fazem a ligação dos municípios da área de estudo, em geral estas ligações são basicamente constituídas por rodovias em leito natural ou com revestimento primário. Apenas entre as cidades de maior porte existem estradas pavimentadas. A rede de estradas municipais ainda é pequena e de trânsito precário.

O consumo de energia é considerado um dos mais importantes e significativos indicadores de desenvolvimento sócio-econômico e humano. A partir desta premissa, observou-se que em 2003 o número de unidades consumidoras na região correspondia a 33% do total de consumidores de energia elétrica do Estado, os quais foram responsáveis por um consumo, neste ano, de 246.430 MWh, ou 36% do consumo do Estado.

Sobre o saneamento básico, observa-se que o abastecimento de água dá-se, em sua maioria, a partir de rede geral de distribuição, mas há ocorrência de algumas unidades consumidoras abastecidas por poço ou nascentes no meio urbano, enquanto que no meio rural, a situação se inverte. Referente ao esgotamento sanitário, no âmbito urbano observa-se a precariedade do sistema de coleta de esgoto através de rede geral, havendo uma predominância da

disposição em fossa rudimentar, vala, rio, lago ou outro escoadouro. No meio rural, constata-se o alto percentual de unidades sem qualquer instalação sanitária.

A respeito da limpeza urbana, a situação exige atenção, devido ao grande número de municípios sem um sistema apropriado de coleta de lixo, assim como é um grande problema o destino final dos resíduos coletados que, via de regra, são lançados em áreas a céu aberto (lixões), onde são eventualmente queimados ou recobertos por terra, constituindo locais de proliferação de roedores e insetos que podem contribuir para a disseminação de doenças em animais e até seres humanos. Outro aspecto a ser considerado é que, devido à escolha aleatória dos locais de deposição, bem como ao manejo inadequado, tais áreas podem causar contaminação do solo e do lençol freático.

Sobre a infra-estrutura de saúde, pode-se dizer, excluindo a situação na capital Palmas, que esta se apresenta de forma precária na região, pois conta com leitos hospitalares em maior número apenas nos municípios adjacentes ao rio Tocantins, exceto por alguns hospitais localizados ao sul do estado na divisa com os estados de Goiás e Bahia, nos demais havendo apenas centros e postos de saúde. Assim, a população acaba sendo atendida através dos Programas da Saúde da Família, implantados ou em fase de implantação em todos os municípios da área de estudo, ou então essa população precisa se deslocar para a capital do estado, que conta com a infra-estrutura necessária para um atendimento de qualidade.

Em 2004 os municípios inseridos na bacia alcançavam o índice de analfabetismo de 28,5%, contanto com aproximadamente 256.400 habitantes alfabetizados, um resultado baixo, porém estes vêm concentrando esforços no ensino fundamental, com o intuito de reverter este quadro. Os municípios da bacia apresentam índices de desenvolvimento humano municipal (IDH-M) que os colocam entre a 1ª e 138ª posição na classificação estadual, sendo a capital Palmas a melhor classificada no Estado, seguida pelos municípios de Porto Nacional e Pedro Afonso, com a 5ª e a 10ª posições, respectivamente, sendo que Palmas encontra-se na 561ª posição no Brasil.

3 RECONHECIMENTO DE CAMPO

3 RECONHECIMENTO DE CAMPO

3.1 Introdução

A identificação dos dados utilizados na regionalização envolve a determinação das variáveis e a avaliação da qualidade da informação que permita dar confiabilidade aos seus resultados. Para tanto, a Seleção e Análise dos Dados Básicos foi complementada com uma visita à região, para efetuar um Reconhecimento de Campo e com isto conhecer, de forma global, as bacias além de vistoriar os postos hidrológicos relevantes.

A atividade de reconhecimento de campo envolveu uma preparação em escritório, com levantamento dos postos existentes e de seus cadastros junto às instituições responsáveis, seleção das estações a serem vistoriadas e elaboração de um roteiro de visita. Estas atividades preliminares são descritas a seguir, bem como os procedimentos de campo, incluindo descrição da equipe técnica e equipamentos utilizados, procedimentos de avaliação dos postos visitados e de reconhecimento das principais bacias da região.

3.2 Atividades de Planejamento Preliminar para as Vistorias

Os cadastros dos postos hidrológicos selecionados foram solicitados à Agência Nacional de Águas – ANA, além de ANEEL, INMET, CPRM, CELTINS, INVESTCO e outras instituições com reconhecida atuação na área. No Anexo 1 é apresentada a disponibilidade temporal dos dados pluviométricos dos postos identificados. No Anexo 2 é apresentada a disponibilidade temporal dos dados fluviométricos. Foram selecionadas todas as estações com disponibilidade mínima de cinco anos de dados completos. Além disto, foram descartados os postos que não estão mais em funcionamento.

Esta análise de escritório permitiu efetuar um planejamento preliminar para as vistorias das estações, com a previsão de um período de 7 dias para completar a tarefa. Foi elaborada uma lista preliminar de postos, compondo um total de 15 postos fluviométricos e 22 postos pluviométricos, e foi proposto um roteiro de visita. O roteiro proposto preliminarmente incluía as cidades principais visitadas, uma estimativa da distância total percorrida em cada dia e detalhava quantos pontos seriam visitados. Deve-se destacar que, em cada ponto a ser visitado, existe pelo menos um posto fluviométrico ou pluviométrico, sendo, que na, maioria dos casos existem ambos.

Roteiro de visita proposto:

1º DIA:

PALMAS
↓ (100km)
TOCANTÍNIA
22500000_Miracema do Tocantins
948000_Miracema do Tocantins
↓ (133km)
GUARAÍ
↓ (87km)
COLINAS DO TOCANTINS
↓ (67km)
PALMEIRANTE
747009_Palmeirante
↓ (100km)
CAROLINA

2º DIA:

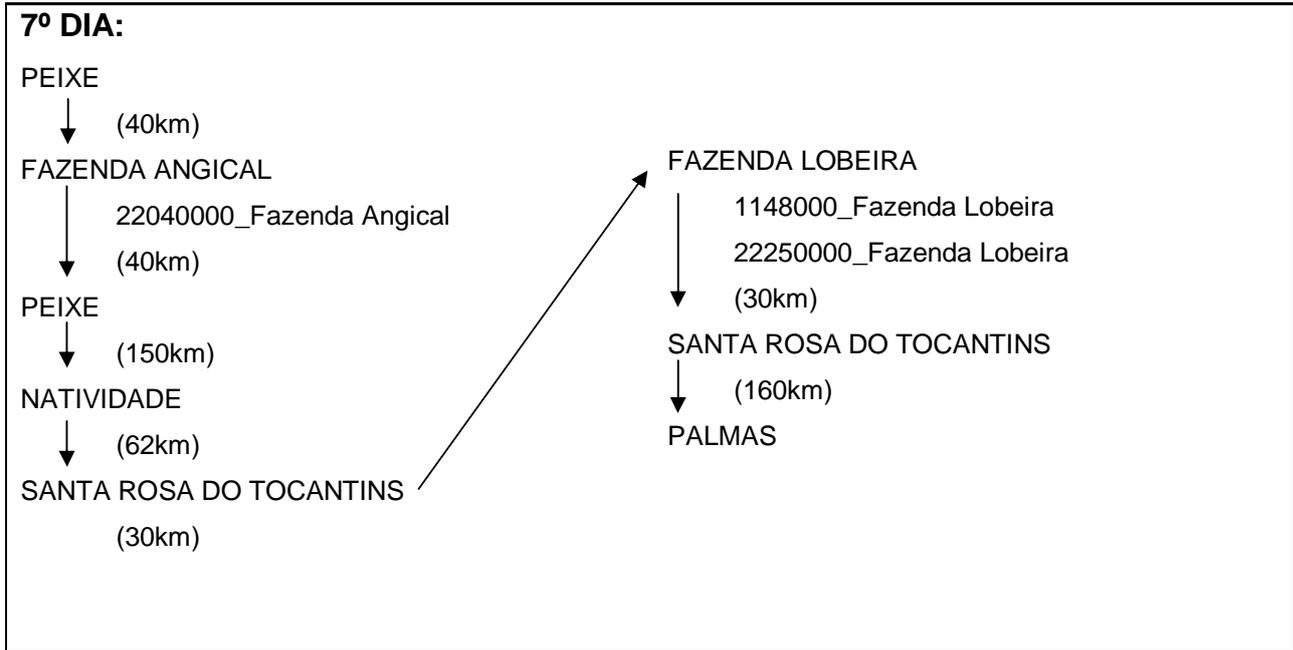
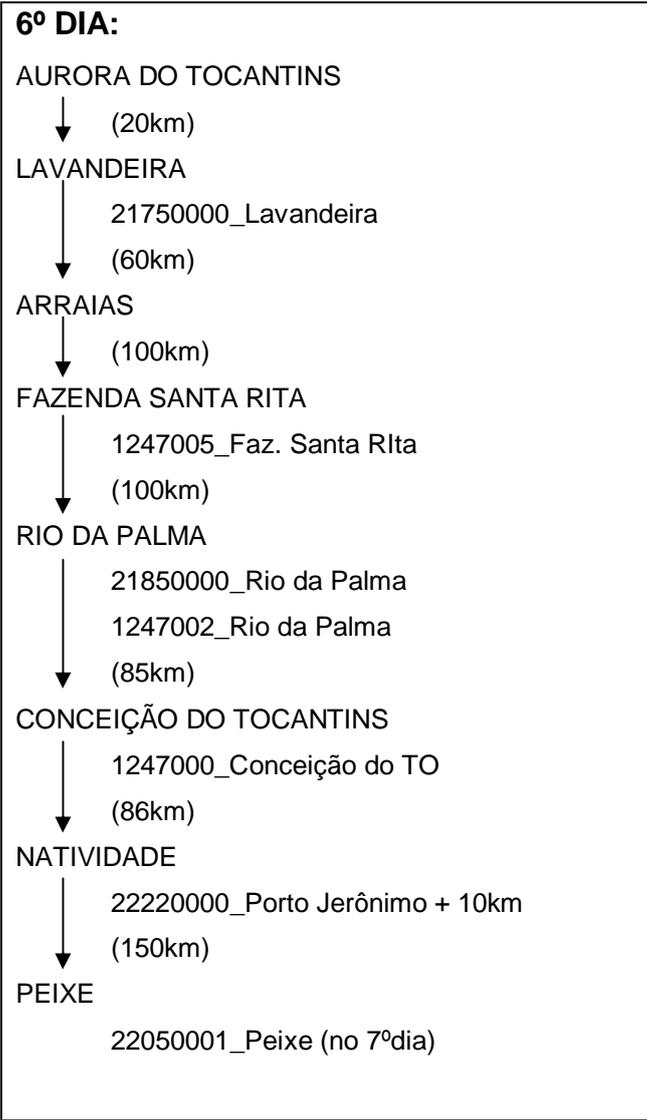
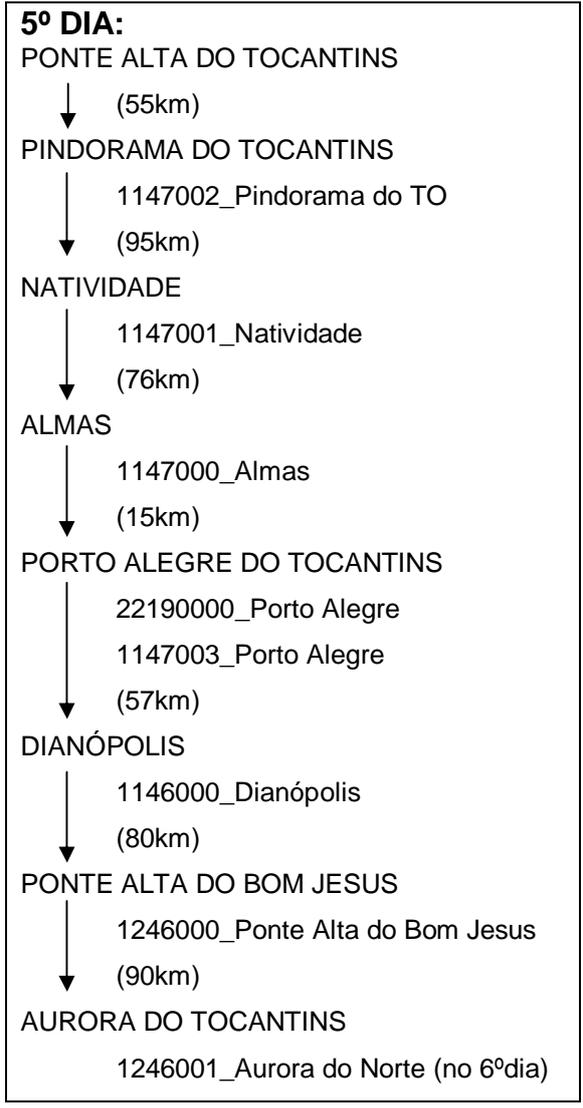
CAROLINA
↓ (100km)
GOIATINS
747001_Goiatins
23250000_Goiatins
↓ (86km)
CAMPOS LINDOS
847002_Campos Lindos
23220000_Cachoeira Montes Lindos
(??coordenadas)
↓ (250km)
ITACAJÁ
23150000_Itacajá
↓ (45km)
SANTA MARIA DO TOCANTINS

3º DIA:

SANTA MARIA DO TOCANTINS
↓ (60km)
BOM JESUS DO TOCANTINS
↓ (94km)
RIO DO SONO
22900000_Porto Real
22850000_Dois Irmãos
948001_Porto Real
↓ (86km)
MANSINHA (difícil acesso!?)
947001_Mansinha
↓ (89km)
LIZARDA (difícil acesso!?)
946003_Lizarda
↓ (150km)
NOVO ACORDO
22700000_Novo Acordo (no 4ºdia)
1047001_Novo Acordo (no 4ºdia)

4º DIA:

NOVO ACORDO
↓ (30km)
FAZENDO BOA NOVA
22680000_Jatobá (30km)
NOVO ACORDO
↓ (106km)
PALMAS
↓ (34km)
TAQUARUSSU GRANDE
1048005_Taquarussu Grande
↓ (68km)
PORTO NACIONAL – MONTE CARMO
↓ (120km)
PORTO GILÂNDIA
1047002_Porto Gilândia
↓ (60km)
PONTE ALTA DO TOCANTINS 1047004_Ponte
Alta do TO (no 5ºdia)



3.3 Período de Execução, Equipe Técnica e Equipamento Utilizado

PERÍODO

A visita de campo foi realizada em 7 dias contínuos, de 16/11/2006 a 22/11/2006.

EQUIPE

Foi montada uma equipe técnica para efetuar as visitas, composta por dois técnicos da Consultora e um técnico do Cliente. O técnico do cliente foi Sérgio Makim Leal Barros (Assistente, NATURATINS / COUAg). Os membros da Consultora que tomaram parte nesta equipe são:

Daniel Allasia: Engenheiro de Recursos Hídricos formado pela Universidad Nacional Del Nordeste, na Argentina, com Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS) e atualmente em fase de conclusão do Curso de Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH-UFRGS.

Fernando Dornelles: Engenheiro Civil formado pela UFRGS e atualmente em fase de conclusão do Curso de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH-UFRGS.

EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado nas atividades de reconhecimento de campo foi composto por um veículo para deslocamento na região, elementos para apoio à navegação e aparelho para registro fotográfico, conforme especificado a seguir:

- ❑ Veículo: Automóvel GM - Celta 1.0 (3 primeiros dias) e FIAT - Palio 1.0 (demais dias de visita);
- ❑ Apoio à Navegação: Aparelho GPS Garmin III PLUS, notebook TOSHIBA Pentium IV, imagens de satélite LANDSAT, mapa rodoviário e fichas descritivas dos postos fornecidas pela ANA e CPRM;
- ❑ Registro fotográfico: câmera fotográfica digital, Sony Cyber-Shot 5 MPixel.

3.4 Roteiro de Viagem Executado

O roteiro de visita proposto, conforme apresentado no item 3.2, incluía um total de 37 postos (15 postos fluviométricos e 22 postos pluviométricos). Porém, em virtude de condições climáticas e de limitação de capacidade de acesso, foi possível acessar 33 postos, conforme apresentado no Quadro 3.1, mas sem prejuízo aos objetivos do reconhecimento de campo.

Quadro 3.1 - Postos visitados

Postos Pluviométricos	Postos Pluviométricos
0948000 – Miracema do Tocantins	22500000 – Miracema do Tocantins
0747009 – Palmeirante	23250000 – Goiatins
0948001 – Porto Real	23220000 – Cachoeira Montes Lindos
1047001 – Novo Acordo	23150000 - Itacajá
0747001 – Goiatins	22900000 – Porto Real
0847002 – Campos Lindos	22850000 – Dois Irmãos
1048005 – Taquarussu Grande	22700000 – Novo Acordo
1047002 – Porto Gilândia	22190000 – Porto Alegre
1047004 – Ponte Alta do Tocantins	21750000 – Lavandeira
1147002 – Pindorama do Tocantins	21850000 – Rio da Palma
1147001 – Natividade	22220000 – Porto Jerônimo
1147000 – Almas	22050001 – Peixe
1147003 – Porto Alegre	22250000 – Fazenda Lobeira
1146000 – Dianópolis	
1246000 – Ponte Alta do Bom Jesus	
1246001 – Aurora do Norte	
1247005 – Fazenda Santa Rita	
1247002 – Rio da Palma	
1247000 – Conceição do Tocantins	
1148000 – Fazenda Lobeira	
Total: 20 postos	Total: 13 postos

Assim, o percurso da visita de campo efetuada abrangeu praticamente toda a área de estudo (margem direita do rio Tocantins) com exceção da região do Jalapão, que continha dois postos pluviométricos (0947001 – Mansinha; 0946003 – Lizarda) e um posto fluviométrico (22680000 – Jatobá) e não foi visitada devido ao difícil acesso e às condições meteorológicas desfavoráveis. Também não foi visitado um posto fluviométrico que se localizava no rio Tocantins (22040000 – Fazenda Angical), por não fazer parte do objeto do presente estudo. Deve-se destacar ainda que, dos 33 postos visitados, apenas dois não foram encontrados nas coordenadas indicadas em suas fichas descritivas: os postos 22850000 – Dois Irmãos e 1247005 – Fazenda Santa Rita.

No total, foram percorridos 3.796km. O percurso completo efetuado, com a navegação registrada no GPS está apresentado na Figura 3.1.

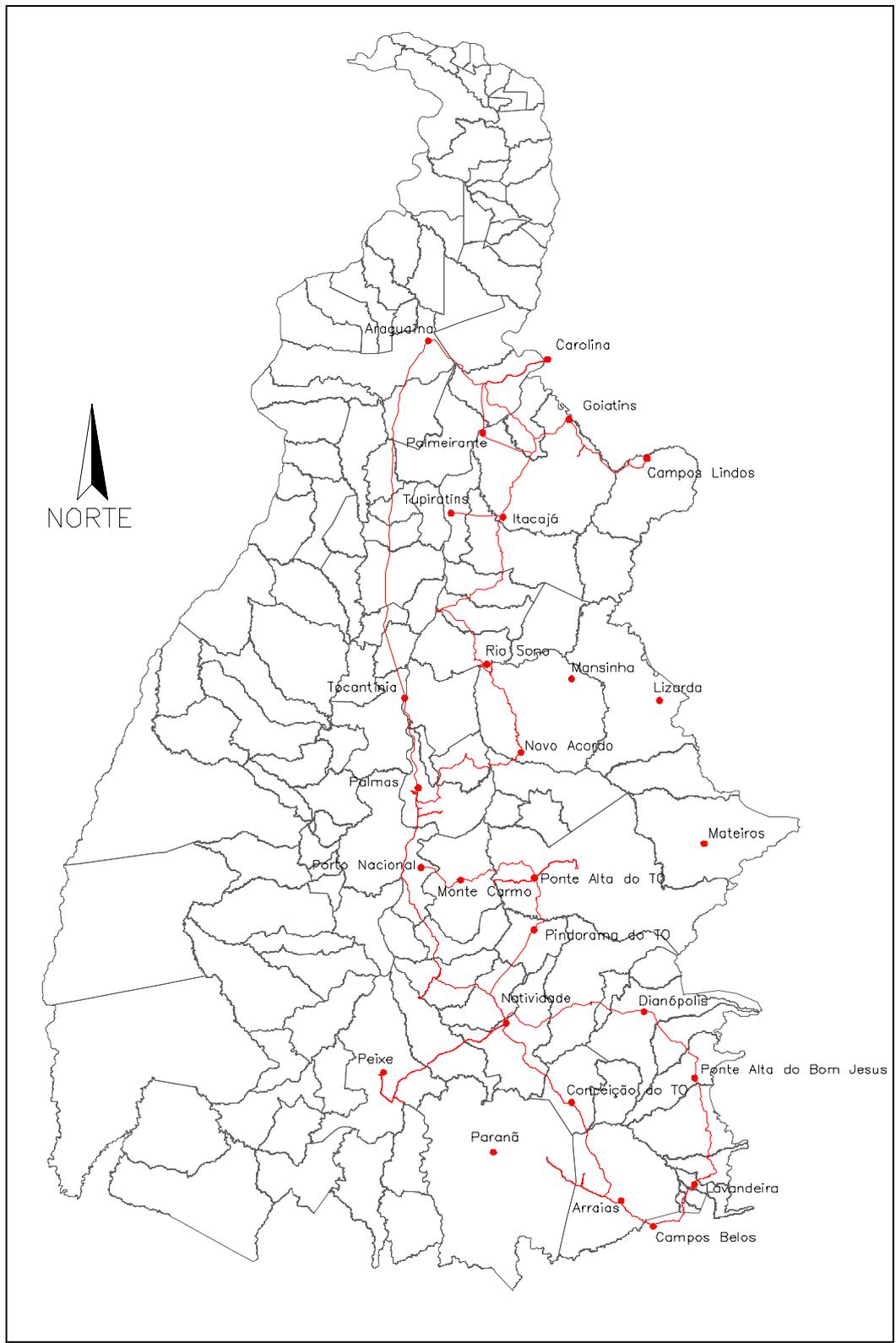


Figura 3.1 - Percurso da visita de campo

3.5 Procedimentos para Avaliação dos Postos Visitados

Para cada uma das estações pluviométricas e fluviométricas vistoriadas foi preenchida uma ficha técnica descritiva. Estas fichas foram construídas a partir das fichas originais dos postos, normalmente disponíveis na formatação utilizada pela Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – CPRM. A estas fichas foram acrescentados:

- o percurso até o posto (“acesso geral”), indicando pontos de interesse e percurso (“way-points”) para sua localização simplificada com GPS;
- fotos ilustrativas do posto, aparelhos e entorno;
- escore criado especificamente para avaliação da extrapolação da curva chave em cada posto. Este escore deverá considerar a estimativas extremas de vazões mínimas que influenciam a estiagem e máximos que influenciam as cheias.

Quando necessário, foram realizadas correções e/ou complementações das fichas existentes. Entre as correções que acrescentadas, podem ser citadas:

- coordenadas geográficas de localização;
- nome da bacia e sub-bacia;
- existência ou não de algum tipo de aparelho de medição e acessibilidade à mesma.

As fichas descritivas dos postos pluviométricos e fluviométricos visitados foram atualizadas e corrigidas quando necessário e estão apresentados em nos Anexos 3 e 4, respectivamente.

3.6 Reconhecimento das Principais Bacias e Sub-bacias

O reconhecimento de campo efetuado a partir destas visitas técnicas, além de permitir efetuar as vistorias nos postos selecionados, possibilitou o conhecimento das principais bacias e sub-bacias envolvidas.

Desta forma, foram registradas características relevantes destas sub-bacias, em pontos com postos hidrológicos e em outros pontos que se mostraram de interesse. Em cada um destes locais, foram registrados:

- Nome da bacia e sub-bacia;
- Coordenadas geográficas de localização;
- Identificação de cobertura, tipo e uso de solo predominantes;

- ❑ Identificação de outros elementos que se mostraram importantes para caracterização do comportamento hidrológico da região;
- ❑ Fotografias ilustrativas.

3.7 Considerações Gerais

O Reconhecimento de Campo constituiu uma atividade complementar à Seleção e Análise dos Dados Básicos, permitindo a visita da maioria dos postos de monitoramento hidrológicos em operação na região de estudo e verificação das atuais condições de manutenção e local de instalação dos instrumentos de medição. Outra grande contribuição obtida com a visita foi a possibilidade de maior familiarização com as características da região, contribuindo assim, para uma melhor interpretação dos dados durante as atividades de escritório.

Em linhas gerais, os postos visitados estão em boas condições. Os problemas mais frequentes observados em campo foram a presença de árvores nas cercanias dos pluviômetros com potencial capacidade de interceptação e vegetação bloqueando a leitura das régua. Por ter leito arenoso, muitas seções de rio apresentam frequentes mudanças no leito do rio, necessitando alterações periódicas das curvas-chave nestes postos.

As fichas descritivas, especialmente de competência da FURNAS Centrais Elétricas S.A, apresentaram algumas coordenadas erradas dos postos e indicações de acesso confusas ou até mesmo incorretas.

Observa-se haver um número razoável de postos pluviométricos, principalmente levando em conta que a variabilidade espacial da precipitação não costuma ser elevada na região em estudo. Já no que se refere a postos fluviométricos, o reduzido número de estações identificadas com séries com mais de cinco anos de dados de boa qualidade faz com que o uso dos resultados de uma regionalização deva ser efetuado com cautela.

A Caracterização da Região e o Reconhecimento de Campo permitiram identificar preliminarmente três regiões dentro da área de estudo com características distintas e bem definidas, principalmente no que se refere a solos, pluviografia e vegetação. Estas características apontam para a definição de três áreas para constituir regiões homogêneas para o Estudo de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas da Margem Direita do Rio Tocantins: uma região homogênea ao Norte, outra a Sudeste e uma terceira na parte mais central da área. Nos estudos de regionalização apresentados adiante será visto que esta expectativa de delineamento das regiões homogêneas não se verificou, porém foram obtidas informações relevantes durante o reconhecimento de campo que auxiliaram e confirmaram algumas das conclusões deste trabalho.

4 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

4 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

4.1 Introdução

A precipitação é uma das principais variáveis explicativas em um estudo de regionalização de vazões (Tucci, 2002). Desta forma, a seleção dos postos pluviométricos a serem utilizados e a análise de seus dados define uma das etapas iniciais do processo de regionalização e caracteriza-se pela filtragem de dados vinculada à real disponibilidade da informação.

Para o Estudo de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas da Margem Direita do rio Tocantins foram analisados os dados consistidos das estações da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas – ANA, além de ANEEL, INMET, CPRM, CELTINS, INVESTCO e demais dados gerados por outras instituições com reconhecida atuação na área.

A seguir, são apresentados os postos pluviométricos disponíveis identificados na região em estudo e são avaliados seus dados para definir as estações selecionadas para o presente estudo. No caso das estações pluviométricas, foram avaliadas a cobertura dos postos e a consistência das séries. Também é apresentada uma análise de correlação dos postos e o preenchimento de falhas nos dados de precipitação selecionados.

4.2 Postos Selecionados

4.2.1 Seleção dos Postos

Os critérios para seleção de postos pluviométricos a serem utilizados em estudos de regionalização envolvem a extensão e consistência das séries de dados e a cobertura geográfica dos postos. A cobertura geográfica poderá envolver postos localizados fora da área em estudo, para extrapolação das tendências da região em estudo (Tucci, 2002).

Os postos dentro da área de estudo somaram o montante de 34. Os critérios para aceitar a série histórica dos postos pluviométricos foram: possuir mais de 10 anos de dados; apresentar menos de 5% de falhas; e possuir simultaneidade temporal com os demais postos eleitos.

No Anexo 1 é apresentada a disponibilidade temporal dos dados pluviométricos dos postos identificados na região de estudo. O Quadro 4.1 mostra os postos pluviométricos identificados, destacando os postos descartados por não contemplarem os requisitos citados.

Desta forma foram selecionadas 25 estações pluviométricas do total de 34 postos levantados dentro da área de estudo.

Quadro 4.1 - Postos pluviométricos identificados na região em estudo

Código	Nome:	Descartado? SIM / NÃO	Motivo do descarte
747001	Goiatins	NÃO	
747009	Palmeirante	NÃO	
847001	Itacajá	NÃO	
847002	Campos Lindos	NÃO	
847003	Recursolândia	SIM	Série insuficiente, 4,5 anos de dados
847004	Centenário	SIM	Série insuficiente. 2 meses de dados
848003	Tupiratins	NÃO	
848006	Bom Jesus do Tocantins	SIM	Série insuficiente. 2 meses de dados
946003	Lizarda	NÃO	
947000	Dois Irmãos	SIM	Série insuficiente, 4 anos de dados e com falhas
947001	Mansinha	NÃO	
948000	Miracema do Tocantins	NÃO	
948001	Porto Real	NÃO	
1046001	Mateiros	SIM	Série insuficiente, 6,5 anos de dados
1047000	Jatobá	NÃO	
1047001	Novo Acordo	NÃO	
1047002	Porto Gilândia	NÃO	
1047003	Rio das Balsas	SIM	Série suficiente, mas sem simultaneidade
1047004	Ponto Alta do Tocantins	NÃO	
1048002	Porto Nacional	SIM	Série suficiente, mas sem simultaneidade
1048005	Taquarussu Grande	NÃO	
1146000	Dianópolis	NÃO	
1147000	Almas	NÃO	
1147001	Natividade	NÃO	
1147002	Pindorama do Tocantins	NÃO	
1147003	Porto Alegre do Tocantins	NÃO	
1148000	Fazenda Lobeira	NÃO	
1246000	Ponte Alta do Bom Jesus	NÃO	
1246001	Aurora do Norte	NÃO	
1247000	Conceição do Tocantins	NÃO	
1247001	Paraná	SIM	Série suficiente, mas sem simultaneidade
1247002	Rio Palma	NÃO	
1247005	Fazenda Santa Rita	NÃO	
1248004	AHE Peixe	SIM	Série suficiente, mas sem simultaneidade e com falha

4.2.2 Análise dos Postos Selecionados

A distribuição espacial dos postos de precipitação, e a conseqüente cobertura geográfica dos mesmos, consiste em um critério importante para a seleção dos postos pluviométricos. O Quadro 4.2 e a Figura 4.1 apresentam a localização dos postos selecionados. Observa-se haver uma boa distribuição espacial da informação de precipitação para a área em estudo.

Quadro 4.2 - Localização dos postos pluviométricos selecionados

CÓDIGO	NOME	COORDENADAS GEOGRÁFICAS						P Anual (mm)
		Lat			Long			
		Lat(graus)	(decimal)	Long (graus)	(decimal)			
747001	Goiatins	-7 42 51.8	-7,8439	-47 18 54	-47,450		1664	
747009	Palmeirante	-7 51 35	-7,9472	-47 55 43.3	-48,037		1503	
847001	Itacajá	-8 23 30	-8,4667	-47 45 55	-47,903		1919	
847002	Campos Lindos	-7 58 16	-8,0111	-46 48 23.6	-46,866		1577	
848003	Tupiratins	-8 23 53	-8,5306	-48 7 49	-48,253		1684	
946003	Lizarda	-9 35 31	-9,6694	-46 40 50	-46,806		1527	
947001	Mansinha	-9 27 27	-9,5250	-47 19 37	-47,419		1705	
948000	Miracema do Tocantins	-9 33 51	-9,6917	-48 23 15	-48,425		1704	
948001	Porto Real	-9 18 25	-9,3694	-47 55 45	-48,042		1649	
1047000	Jatobá	-9 59 26	-10,0556	-47 28 43	-47,586		1728	
1047001	Novo Acordo	-9 57 38	-10,0556	-47 40 29	-47,747		1496	
1047002	Porto Gilândia	-10 47 8.2	-10,8061	-47 48 0.7	-47,802		1664	
1047004	Ponte Alta do Tocantins	-10 45 3	-10,7583	-47 32 10	-47,561		1495	
1048005	Taquarussu Grande	-10 18 48	-10,4333	-48 9 37.6	-48,254		1812	
1146000	Dianópolis	-11 37 30.4	-11,7011	-46 49 37	-46,919		1502	
1147000	Almas	-11 34 41	-11,6806	-47 10 29	-47,247		1516	
1147001	Natividade	-11 41 46.7	-11,8131	-47 43 40	-47,828		1630	
1147002	Pindorama do Tocantins	-11 8 25	-11,2028	-47 34 36	-47,667		1606	
1147003	Porto Alegre	-11 36 39	-11,7083	-47 2 43	-47,153		1559	
1148000	Fazenda Lobeira	-11 31 51.1	-11,6586	-48 17 39.7	-48,394		1546	
1246000	Ponte Alta do Bom Jesus	-12 5 23	-12,1472	-46 28 48	-46,600		2202	
1246001	Aurora do Norte	-12 42 48.6	-12,8350	-46 24 30.6	-46,485		1756	
1247000	Conceição do Tocantins	-12 13 8	-12,2389	-47 17 48	-47,417		1291	
1247002	Rio Palma	-12 24 54.6	-12,5517	-47 11 57.6	-47,343		1425	
1247005	Fazenda Santa Rita	-12 35 2.3	-12,5897	-47 27 18.7	-47,502		1174	

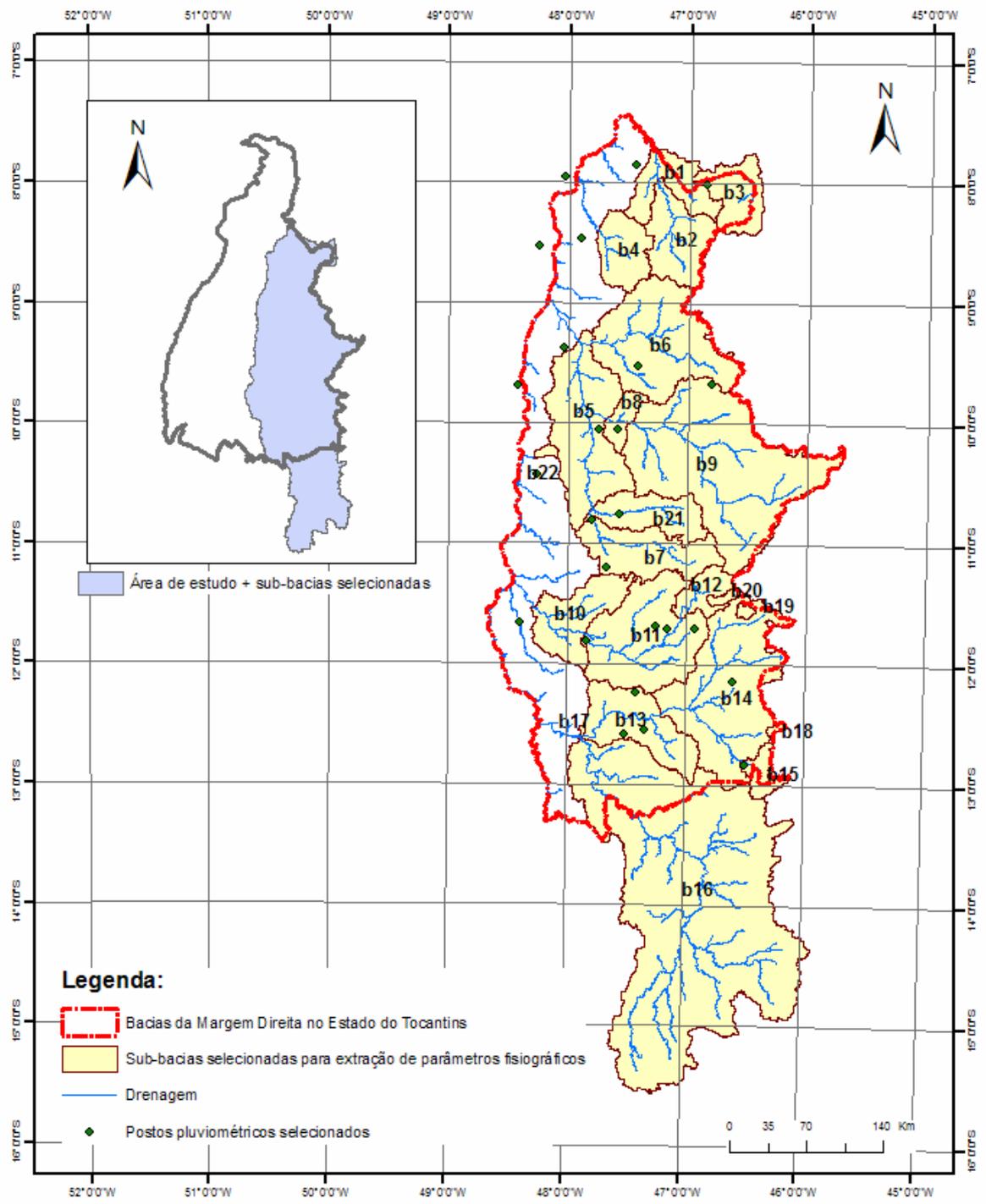


Figura 4.1 - Localização das sub-bacias e postos pluviométricos selecionados

Foi efetuada análise dos dados de precipitação mensal dos postos selecionados, visando identificar a existência de correlação linear entre os diversos postos e efetuar o preenchimento de falhas nas observações. Foi considerado com falha qualquer mês que apresentasse pelo menos um dia sem observação ou com valor discrepante do restante da série e de dados de postos vizinhos.

A Figura 4.2 apresenta a matriz de correlação dos postos pluviométricos selecionados. Observa-se haver uma boa correlação linear entre os diversos postos selecionados, com grande incidência de valores de coeficiente de correlação (R^2) maiores que 0,85. Este resultado ratifica a expectativa de observação de uma distribuição espacial bastante homogênea da chuva na área de estudo.

A Figura 4.3 apresenta a matriz das distâncias euclidianas entre os postos pluviométricos selecionados, visando identificar os postos mais próximos a cada uma das estações analisadas. A partir das correlações apresentadas na Figura 4.2 e das distâncias mostradas na Figura 4.3, foi possível identificar os postos a serem utilizados para preenchimento de falhas das séries mensais de precipitação dos postos selecionados. Conforme recomendações de Tucci (2002) foi utilizado o método da proporção linear entre os três postos com dados que tivessem menor distância e maior correlação com o posto que apresenta falhas a serem preenchidas. Não foram preenchidos períodos com três ou mais meses consecutivos de falhas.

Para o posto Y que apresenta falhas, as mesmas são preenchidas com base na equação 4.1:

$$Y = \frac{1}{3} \left(\frac{x_1}{xm_1} + \frac{x_2}{xm_2} + \frac{x_3}{xm_3} \right) \cdot Y_m \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde Y é o dado a ser preenchido; x_i (x_1, x_2, x_3) são os valores das precipitações nos postos vizinhos no mês com falha; xm_i (xm_1, xm_2, xm_3) são as precipitações médias dos postos vizinhos para o mês com falha; Y_m é a precipitação média no posto com falhas a serem preenchidas.

O Quadro 4.3 mostra os postos utilizados para preenchimento de falhas em cada um dos postos pluviométricos selecionados.

Quadro 4.3 - Postos utilizados para preenchimento de falhas nos postos pluviométricos selecionados

POSTO COM FALHA	POSTOS PARA PREENCHIMENTO DE FALHAS
(747001) Goiatins	Itacaja, Campos Lindos e Tupiratins
(747009) Palmeirante	Goiatins, Itacajá e Tupiratins
(8470014) Itacajá	Goiatins, Palmeirante e Tupiratins
(847002) Campos Lindos	Goiatins, Itacajá e Tupiratins
(848003) Tupiratins	Goiatins, Palmeirante e Itacajá
(946003) Lizarda	Itacaja, Tupiratins e Mansinha
(947001) Mansinha	Lizarda, Jatobá e Novo Acordo
(948000) Miracema do TO	Mansinha, Porto Real e Novo Acordo
(948001) Porto Real	Tupiratins, Miracema do TO e Novo Acordo
(1047000) Jatobá	Porto Real, Novo Acordo e Ponte Alta do TO
(1047001) Novo Acordo	Porto Real, Jatobá e Taquarussu Grande
(1047002) Porto Gilandia	Jatobá, Ponte Alta do TO e Taquarussu Grande
(1047004) Ponte Alta do TO	Jatobá, Novo Acordo e Porto Gilandia
(1048005) Taquarussu Grande	Novo Acordo, Porto Gilandia e Natividade
(1146000) Dianopolis	Almas, Porto Alegre e Ponte Alta do Bom Jesus
(1147000) Almas	Dianopolis, Natividade e Porto Alegre
(1147001) Natividade	Almas, Porto Alegre e Fazenda Lobeira
(1147002) Pindorama do TO	Ponte Alta do TO, Almas e Natividade
(1147003) Porto Alegre	Dianopolis, Almas e Natividade
(1148000) Fazenda Lobeira	Almas, Natividade Pindorama do TO
(1246000) Ponte Alta do Bom Jesus	Dianopolis, Almas e Porto Alegre
(1246001) Aurora do Norte	Ponte Alta do Bom Jesus, Rio Palma e Faz. Santa Rita
(1247000) Conceição do TO	Natividade, Porto Alegre e Rio Palma
(1247002) Rio Palma	Natividade, Aurora do TO e Fazenda Santa Rita
(1247005) Fazenda Santa Rita	Natividade, Ponte Alta do Bom Jesus e Rio Palma

A partir dos dados de precipitação média mensal com preenchimento de falhas dos postos selecionados, foram calculados os valores de precipitações médias, mínimas e máximas mensais para cada posto. As precipitações médias mensais dos postos foram obtidas realizando a média aritmética para cada mês, conforme apresentado no

Quadro 4.4. As precipitações mínimas mensais dos postos pluviométricos foram obtidas selecionando o mínimo volume observado para cada um dos meses, conforme apresentado no

Quadro 4.5. As precipitações máximas mensais dos postos pluviométricos foram obtidas selecionando o máximo volume observado para cada um dos meses, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Pode-se observar uma marcada sazonalidade na distribuição temporal da chuva na região em estudo, com uma estação seca no período de maio a outubro e uma estação chuvosa no período de novembro a abril.

Quadro 4.4 - Precipitações médias mensais no postos pluviométricos selecionados

Código:	Nome:	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
747001	Goiatins	275,6	249,0	271,7	182,7	45,5	17,6	5,5	11,5	53,6	147,5	172,1	232,1
747009	Palmeirante	256,2	198,1	259,7	180,1	71,5	8,9	3,4	5,9	49,9	96,0	185,1	188,4
847001	Itacajá	303,5	284,8	304,2	224,1	67,3	9,9	6,3	9,2	38,2	167,3	236,2	268,1
847002	Campos Lindos	258,5	211,0	250,0	167,2	69,3	8,3	9,3	5,4	32,3	138,3	189,4	238,0
848003	Tupiratins	260,5	235,8	275,4	169,2	52,1	6,5	6,8	11,1	60,1	175,8	197,9	233,2
946003	Lizarda	293,0	225,5	207,8	124,6	43,1	2,1	0,9	5,2	28,1	146,8	198,1	251,5
947001	Mansinha	273,5	271,2	259,0	157,6	51,3	2,5	2,8	4,7	43,0	134,1	215,5	289,7
948000	Miracema do Tocantins	268,8	237,1	273,2	165,8	47,8	5,8	3,2	6,9	49,1	152,7	218,4	275,4
948001	Porto Real	249,3	257,8	244,5	168,1	44,9	14,3	3,5	4,9	61,2	144,0	220,9	235,5
1047000	Jatobá	302,0	243,7	265,5	180,5	40,2	5,2	1,9	2,5	41,7	117,9	239,3	287,3
1047001	Novo Acordo	256,2	229,1	210,8	148,1	45,6	1,9	1,3	3,8	36,9	136,6	181,0	244,6
1047002	Porto Gilândia	258,1	238,4	263,3	153,2	37,9	6,3	2,2	3,3	43,1	153,9	233,1	271,1
1047004	Ponte Alta do Tocantins	313,5	216,6	248,7	128,1	31,8	0,1	2,3	0,7	31,2	84,7	158,6	278,6
1048005	Taquarussu Grande	304,5	261,3	279,0	138,4	49,1	4,8	1,1	5,4	54,5	165,9	246,8	301,3
1146000	Dianópolis	250,8	228,2	238,5	125,2	36,3	3,3	1,7	3,7	29,2	118,2	201,2	265,1
1147000	Almas	257,5	222,6	227,2	122,8	33,4	3,9	2,1	4,4	28,9	105,0	223,7	284,2
1147001	Natividade	315,2	244,8	229,3	125,1	30,0	7,0	2,5	7,0	32,3	132,3	207,4	296,7
1147002	Pindorama do Tocantins	261,3	239,9	259,7	138,4	42,2	5,1	2,1	3,8	28,7	134,0	217,8	272,7
1147003	Porto Alegre	267,2	229,2	240,1	133,7	33,9	4,8	3,0	3,7	27,8	112,8	213,6	289,2
1148000	Fazenda Lobeira	280,6	233,9	248,9	122,9	28,0	3,9	0,4	4,4	38,1	132,3	202,7	249,8
1246000	Ponte Alta do Bom Jesus	420,2	378,9	337,4	182,2	34,9	8,5	3,2	4,3	38,9	143,5	277,6	372,4
1246001	Aurora do Norte	345,4	273,7	257,7	140,3	28,8	3,8	1,9	2,8	28,3	127,4	241,6	304,8
1247000	Conceição do Tocantins	235,6	207,3	191,1	86,5	23,4	2,6	2,9	3,2	21,9	90,0	188,8	237,4
1247002	Rio Palma	264,8	221,2	172,9	88,7	18,1	6,4	2,5	4,6	29,5	118,3	229,6	268,9
1247005	Fazenda Santa Rita	255,6	175,7	175,7	42,8	14,8	0,1	0,1	0,1	24,2	85,0	153,8	246,3

Quadro 4.5 - Precipitações mínimas mensais no postos pluviométricos selecionados

Código:	Nome:	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
747001	Goiatins	104,5	83,6	124,3	55,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,5	73,2	56,6
747009	Palmeirante	72,8	72,9	108,3	16,2	0,9	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	45,8	58,6
847001	Itacajá	104,4	134,5	70,7	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,5	80,0	112,5
847002	Campos Lindos	56,6	90,3	130,5	16,3	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	59,6	63,8	134,7
848003	Tupiratins	72,1	85,9	59,2	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	71,3	23,3	30,6
946003	Lizarda	144,3	98,9	79,4	45,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	53,8	58,4	98,0
947001	Mansinha	104,3	176,0	62,5	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,5	52,6	112,0
948000	Miracema do Tocantins	86,4	43,4	59,2	57,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,6	77,0	79,7
948001	Porto Real	49,0	65,1	55,3	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,0	62,7	53,8
1047000	Jatobá	6,0	8,0	11,0	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0,0	6,2
1047001	Novo Acordo	73,1	62,8	66,6	20,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,6	39,6	109,6
1047002	Porto Gilândia	58,0	62,1	65,7	32,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,4	60,2	64,0
1047004	Ponte Alta do Tocantins	140,4	100,2	74,8	15,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,1	22,1
1048005	Taquarussu Grande	93,2	142,8	95,1	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	72,5	96,2	99,6
1146000	Dianópolis	53,0	38,8	67,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	53,0	66,3
1147000	Almas	101,4	35,0	72,0	15,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	86,0	145,3
1147001	Natividade	101,1	68,0	62,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,2	99,4	91,8
1147002	Pindorama do Tocantins	86,6	92,0	92,6	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,5	76,3	121,7
1147003	Porto Alegre	62,0	42,8	47,8	12,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,0	111,9
1148000	Fazenda Lobeira	81,0	97,1	70,1	24,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,5	45,6	77,9
1246000	Ponte Alta do Bom Jesus	90,5	57,6	55,1	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	53,2	152,8
1246001	Aurora do Norte	49,3	50,2	48,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,4	51,3	139,4
1247000	Conceição do Tocantins	112,4	41,8	25,8	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,7	48,4
1247002	Rio Palma	54,0	46,0	47,2	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	50,9	47,8
1247005	Fazenda Santa Rita	60,7	71,9	54,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,3	77,1	118,0

Quadro 4.6 - Precipitações máximas mensais no postos pluviométricos selecionados

Código	Nome	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
747001	Goiatins	746,3	665,3	623,7	397,8	151,3	101,2	57,9	62,0	201,6	385,2	429,2	535,7
747009	Palmeirante	656,9	362,1	452,2	415,6	193,1	34,6	18,7	49,3	173,7	269,2	527,7	419,6
847001	Itacajá	592,7	757,8	610,2	590,2	306,7	65,0	55,2	110,2	125,2	354,0	526,0	533,0
847002	Campos Lindos	574,2	399,0	363,2	326,4	235,4	53,4	93,4	40,9	140,6	337,6	325,3	519,0
848003	Tupiratins	544,3	490,2	552,1	385,4	189,6	46,1	68,8	52,4	171,0	459,2	527,9	624,5
946003	Lizarda	529,8	377,3	363,3	239,8	140,8	17,0	8,0	38,5	125,5	266,2	342,7	676,9
947001	Mansinha	499,6	513,2	480,6	301,4	226,5	29,6	36,5	52,4	143,7	216,9	401,5	739,9
948000	Miracema do Tocantins	722,5	525,1	516,7	447,0	185,7	52,0	36,0	48,0	203,6	413,7	391,5	677,7
948001	Porto Real	1030,1	730,6	457,0	521,0	200,0	226,8	38,5	38,7	142,3	309,0	539,7	555,6
1047000	Jatobá	831,2	462,3	1073,0	527,0	175,0	99,6	31,7	17,6	128,4	342,0	756,3	713,9
1047001	Novo Acordo	617,6	666,6	367,4	282,2	212,7	26,4	20,8	24,6	184,1	288,8	417,5	746,5
1047002	Porto Gilândia	659,5	549,0	692,2	334,2	117,9	79,0	24,0	33,2	125,9	309,0	512,6	659,5
1047004	Ponte Alta do Tocantins	613,4	629,5	493,9	362,4	106,2	2,4	40,2	3,6	122,3	340,7	329,4	1028,2
1048005	Taquarussu Grande	637,1	569,1	670,9	328,2	221,8	50,8	26,2	64,6	185,0	327,4	461,7	540,8
1146000	Dianópolis	560,6	497,5	456,5	296,8	125,6	36,1	38,4	38,5	130,0	442,3	410,1	614,5
1147000	Almas	492,4	456,1	457,4	329,7	140,5	48,6	43,8	37,0	147,0	294,9	408,5	659,0
1147001	Natividade	470,0	505,8	408,3	296,1	136,9	116,2	43,8	71,8	140,8	308,4	381,2	599,1
1147002	Pindorama do Tocantins	471,5	449,3	454,9	354,3	107,4	58,6	28,6	27,4	113,3	586,4	426,5	532,2
1147003	Porto Alegre	455,6	399,4	520,2	319,8	116,7	36,8	40,0	27,0	96,6	269,7	434,2	582,4
1148000	Fazenda Lobeira	603,4	516,4	567,0	264,8	147,6	43,9	5,7	99,9	160,3	301,4	544,2	467,7
1246000	Ponte Alta do Bom Jesus	797,3	1106,2	814,8	448,8	126,2	93,3	62,4	30,3	129,3	381,9	527,8	1044,0
1246001	Aurora do Norte	941,5	834,4	595,1	349,8	111,8	42,2	42,8	19,4	113,8	350,8	532,0	839,2
1247000	Conceição do Tocantins	480,6	559,0	380,9	227,9	126,1	36,5	29,0	54,0	97,6	220,0	427,6	769,4
1247002	Rio Palma	554,8	406,0	441,7	277,7	84,0	71,0	32,0	58,6	180,0	407,1	672,4	723,5
1247005	Fazenda Santa Rita	510,1	329,7	334,3	97,4	48,8	1,5	1,7	1,1	96,2	175,6	275,1	549,8

4.3 Considerações Gerais

Foram selecionadas 25 estações pluviométricas do total de 34 postos levantados dentro da área de estudo. Observa-se haver uma distribuição espacial bastante homogênea da chuva,

com boa cobertura geográfica da informação de precipitação na área de estudo. Apenas na área do Jalapão houve carência de postos que atendam os critérios de seleção: as duas estações existentes (847003 – Recursolândia e 847003 – Centenário) apresentam séries muito curtas. A densidade de postos na área corresponde a 1 posto para cada 4.880km². Este número é insuficiente em face à recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM), de 1 posto para cada 1.000km², sendo necessário identificar a localização para instalação de novas estações na região. Porém, levando em consideração a distribuição espacial homogênea da chuva, estes elementos fornecem uma confiabilidade suficiente para utilização dos dados dos postos pluviométricos selecionados com fins de execução de estudo de regionalização de vazões na região em análise.

Uma constatação importante foi a de ocorrência de marcada sazonalidade na distribuição temporal da chuva na região em estudo, com uma estação seca no período de maio a setembro e uma estação chuvosa no período de outubro a abril. Este comportamento poderia implicar na necessidade de se considerar a sazonalidade na regionalização de vazões, com a determinação de curvas regionais distintas para períodos úmidos e secos.

5 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS

5 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS

5.1 Introdução

A seleção dos dados fluviométricos para um estudo de regionalização de vazões deve levar em conta critérios de qualidade e distribuição espacial e temporal. Conforme Tucci (2002), estes critérios geralmente contemplam:

- ❑ precisão das curvas de descarga, examinando possíveis fontes de erros, como instabilidade na seção transversal, ocorrência de remanso, ou extrapolação tendenciosa;
- ❑ alterações nas características das séries hidrológicas, devido a mudanças na bacia (tais como urbanização, mudança nas práticas de cultivo), ou no rio (tais como construção de barragens, canalização, diques);
- ❑ extensão dos períodos de vazão.

A seguir, são apresentados os postos fluviométricos disponíveis identificados na região em estudo, assim como a avaliação dos seus dados que definiram as estações que foram selecionadas para o presente estudo.

5.2 Postos Selecionados

5.2.1 Seleção dos Postos

A seleção dos dados fluviométricos teve como primeira etapa a elaboração de uma lista preliminar dos postos existentes, com base no cadastro eletrônico de dados da Agência Nacional de Águas – ANA (Hidroweb, disponível a partir da Internet) e de entidades como a ANEEL, INMET, CPRM, CELTINS e NATURATINS. No Anexo 2 é apresentada a disponibilidade temporal dos dados fluviométricos dos postos identificados na região de estudo.

O Quadro 5.1 mostra os postos fluviométricos identificados. Com base nesta lista, foram selecionados os postos que foram adotados, considerando aspectos de precisão das curvas de descarga em relação à sua extrapolação, alterações nas séries hidrológicas e extensão dos períodos de vazão e distribuição geográfica.

Em primeira instância, foram selecionados 17 postos da ANA que apresentavam pelo menos cinco anos de dados completos, com medições de vazão e curva de descarga estabelecida. Posteriormente tendo em vista a necessidade de complementação de informação nas cabeceiras também foram considerados também quatro postos da CELTINS e um da

NATURATINS, cujos dados puderam ser obtidos, mesmo que com séries menores que cinco anos. Os dados desses 5 postos apresentaram diversos problemas, principalmente pelo efeito causado pela operação de barragens próximos deles, problemas de georreferenciação e na definição da curva chave na seção. No Anexo 5 se encontra uma análise dos dados destes postos. A Figura 5.1 e o Quadro 5.2 apresentam a localização dos postos selecionados.

Quadro 5.1 - Postos fluviométricos identificados na região em estudo

Entidade	Código	Nome	Lat.	Long.	Tipo
ANA	21650000	Montante da barra do Palma	-12,60250	-47,86083	F D
ANA	21750000	Lavadeira	-12,79333	-46,51167	F D
CELTINS	21760080	PCH - Sobrado	-12,52750	-46,27833	F D T
CELTINS	21770080	PCH – Taguatinga	-12,46861	-46,44333	F D T
CELTINS	21780080	PCH – Ponte Alta do Bom Jesus	-12,09806	-46,48444	F D T
CELTINS	21780170	PCH Agro Trafo 2 - Montante	-11,60528	-46,52250	F D T
CELTINS	21780180	PCH Trafo 1 - Montante	-11,67639	-46,66417	F D T
CELTINS	21780190	PCH Agro Trafo 3 - Jusante	-11,67722	-46,67250	F D T
CELTINS	21780270	PCH Diacal - Montante	-11,73583	-46,75194	F D T
CELTINS	21780280	PCH Diacal - Jusante	-11,74500	-46,75611	F D T
Res/396)	21810000	PCH Sítio Caetana	-11,76722	-46,76167	F D
Res/396	21820000	PCH Sítio Porto Franco	-11,81444	-46,78472	F D
Res/396	21830000	PCH Sítio Boa Sorte	-11,89000	-52,76806	F D
Res/396	21840000	PCH Sítio Lagoa Grande	-12,14722	-52,80222	F D
ANA	21850000	Rio da Palma	-12,41556	-47,19944	F D
ANA	21890000	Barra do Palma	-12,60333	-47,86139	F D
ANA	21900000	Paraná	-12,62222	-47,88583	F r D S Q T
ANA	22040000	Fazenda Angical	-12,2511	-48,3467	F D
ANA	22050001	Peixe	-12,0222	-48,5333	F D
ANA	22100000	Colonha	-12,39139	-48,71139	F D
ANA	22150000	Investco	-11,98139	-48,65750	F D T
ANA	22190000	Porto Alegre	-11,61250	-47,04500	F D
CELTINS	22200080	PCH Dianópolis	-11,46917	-46,81333	F D T
ANA	22220000	Porto Gerônimo – Faz. Pirapora	-11,75861	-47,83639	F D T
CELTINS	22225080	PCH Bagagem - Jusante	-11,37222	-47,57444	F D T
ANA	22250000	Fazenda Lobeira	-11,53278	-48,28889	F D S
ANA	22280000	Ipeiras	-11,2548	-48,5031	F D
ANA	22350000	Porto Nacional	-10,6978	-48,4219	F D
Naturatins	22351000	Taquaruçu Grande	-10,25000	-48,26667	F D
CELTINS	22492080	PCH – Lajeado - Jusante	-9,83333	-48,29167	F D T
ANA	22680000	Jatobá (Fazenda Boa Nova)	-9,99056	-47,47861	F D Q T
ANA	22700000	Novo Acordo	9,96056	-47,67472	F D Q
Eletronorte	22710000	Fazenda Porteira	-10,00000	-47,00000	F D
ANA	22730000	Porto Gilândia	-10,7667	-47,7833	F D
CELTINS	22735050	UHE Isamu Ikeda 2 - Montante	-10,83528	-47,76750	F D T
CELTINS	22735060	UHE Isamu Ikeda 3 - Montante	-10,75167	-47,68083	F D T
CELTINS	22735070	UHE Isamu Ikeda 4	-10,69861	-47,79500	F D T
CELTINS	22735080	UHE Isamu Ikeda – Fase 1 e 2	-10,69417	-47,79222	F D T
ANA	22850000	Dois Irmãos	9,31139	-47,81333	F D Q
ANA	22900000	Porto Real	-9,30694	-47,92917	F D S Q T
ANA	23100000	Tupiratins	-8,39167	-48,11139	F D S Q
ANA	23130000	Proximo Colinas De Tocantins	-8,0692	-48,4517	F D
ANA	23150000	Itacajá	-8,39167	-47,76528	F D Q
ANA	23220000	Cachoeira Monte Lindo	-7,70972	-46,92639	F D Q
ANA	23250000	Goiatins	-07 42 28	-47 18 42	F
ANA	23230000	Jacaré	-7,96333	-47,26111	F D Q
ANA	23470000	Fazenda Veredão	-6,28333	-47,38333	F D

F: estação com medições linimétricas Fr: estação com medições linigráficas; D: estação com medições de descarga líquida
S: estação com medições de descarga sólida; Q: estação com medições de parâmetros de qualidade da água; T: estação com transmissão de dados

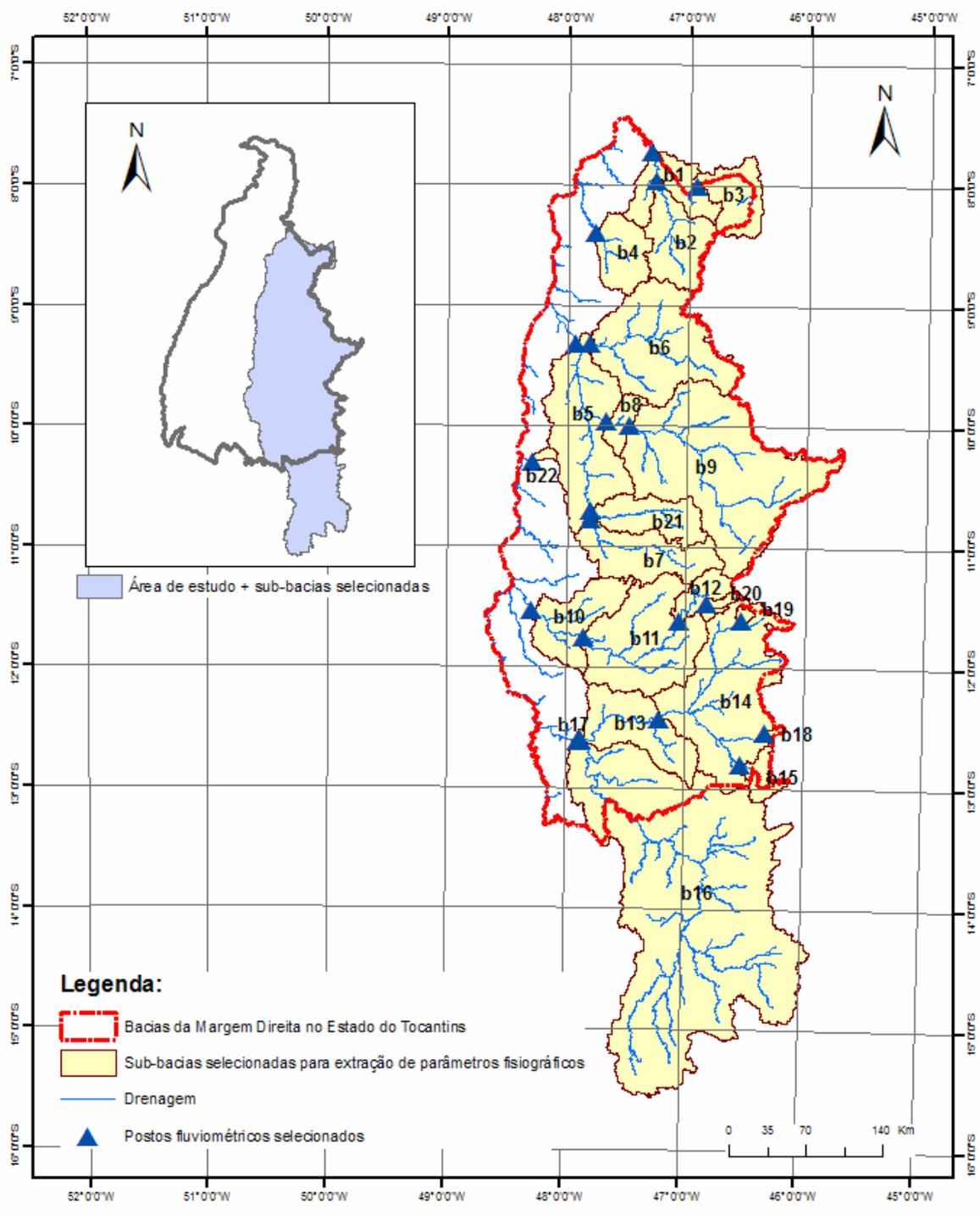


Figura 5.1 - Localização das sub-bacias e postos fluviométricos selecionados

Quadro 5.2 - Localização dos postos fluviométricos selecionados

CODIGO	NOME	ENTIDADE	LATITUDE	LONGITUDE
21650000	MONTANTE DA BARRA DO PALMA	ANA	-12 37 16	-47 53 10
21750000	LAVANDEIRA	ANA	-12 47 35	-46 30 42
21760080	PCH - SOBRADO	CELTINS	-12 31 39	-46 16 42
21780170	PCH – AGROTRAFO II MONTANTE	CELTINS	-11 36 19	-46 31 21
21850000	RIO DA PALMA	ANA	-12 24 57	-47 11 44
21890000	BARRA DO PALMA	ANA	-12 36 12	-47 51 41
21900000	PARANÃ	ANA	-12 37 20	-47 53 09
22190000	PORTO ALEGRE	ANA	-11 36 44	-47 02 43
22200080	PCH -DIANÓPOLIS	CELTINS	-11 28 09	-46 48 48
22220000	PORTO JERONIMO	ANA	-11 45 28	-47 50 15
22250000	FAZENDA LOBEIRA	ANA	-11 31 56	-48 17 18
22351000	TAQUARUSSU GRANDE	NATURATINS	-10 15 00	-48 16 00
22680000	JATOBA	ANA	-09 59 26	-47 28 43
22700000	NOVO ACORDO	ANA	-09 57 38	-47 40 29
22730000	PORTO GILANDIA	ANA	-10 46 00	-47 47 00
22735080	PCH – ISAMU IKEDA FASE I E II	CELTINS	-10 41 39	-47 47 32
22850000	DOIS IRMAOS	ANA	-09 18 41	-47 48 48
22900000	PORTO REAL	ANA	-09 18 25	-47 55 45
23150000	ITACAJÁ	ANA	-08 23 30	-47 45 55
23220000	CACHOEIRA MONTE LINDO	ANA	-07 42 35	-46 55 35
23230000	JACARÉ	ANA	-07 57 48	-47 15 41
23250000	GOIATINS	ANA	-07 42 28	-47 18 42

5.2.2 Análise dos Postos Selecionados

Os postos selecionados foram avaliados, visando determinar sua qualidade para utilização no estudo de regionalização de vazões.

Para esta análise, foram avaliados aspectos relativos a características da seção de medição de descarga, estabilidade da curva-chave, representatividade das curvas quanto às medições e leituras de régua, trecho de transbordamento, homogeneidade da amostra de descargas na faixa de variação de níveis.

O Quadro 5.3 apresenta a caracterização dos postos fluviométricos segundo conceitos (A=ótimo, B=bom, C=regular, D=ruim e E=péssimo) atribuídos para cada um deles, para vazões médias, máximas e mínimas, considerando aspectos de qualidade, estabilidade e extrapolação da curva de descarga, conforme descrito em Tucci (2002).

Quadro 5.3 - Caracterização dos postos selecionados mediante um escore

CODIGO	NOME	Situação	Séries disponíveis		
			Mínimas	Médias	Máximas
21650000	MONTANTE DA BARRA DO PALMA	DESATIVADO	-	-	-
21750000	LAVANDEIRA	OPERANTE	A	A	C
21760080	PCH - SOBRADO	OPERANTE	D	C	D
21780170	PCH – AGROTRAFIO II MONTANTE	OPERANTE	D	C	D
21850000	RIO DA PALMA	OPERANTE	A	A	C
21890000	BARRA DO PALMA	DESATIVADO	-	-	-
21900000	PARANÃ	DESATIVADO	-	-	-
22190000	PORTO ALEGRE	OPERANTE	A	A	C
22200080	PCH -DIANÓPOLIS	OPERANTE	D	C	D
22220000	PORTO JERONIMO	OPERANTE	A	A	B
22250000	FAZENDA LOBEIRA	OPERANTE	A	A	B
22351000	TAQUARUSSU GRANDE	OPERANTE	D	C	D
22680000	JATOBA	OPERANTE	A	A	C
22700000	NOVO ACORDO	OPERANTE	A	A	B
22730000	PORTO GILÂNDIA	DESATIVADO	-	-	-
22735080	PCH – ISAMU IKEDA FASE I E II	OPERANTE	D	C	D
22850000	DOIS IRMAOS	OPERANTE	A	A	C
22900000	PORTO REAL	OPERANTE	A	A	C
23150000	ITACAJA	OPERANTE	A	A	C
23220000	CACHOEIRA MONTE LINDO	OPERANTE	A	A	C
23230000	JACARÉ	OPERANTE	A	A	B
23250000	GOIATINS	OPERANTE	A	A	B

A partir da análise efetuada, verificou-se haver um bom comportamento das curvas-chave das estações para vazões mínimas e médias. Porém, observam-se limitações na extrapolação para vazões máximas. Na grande maioria dos casos, o máximo nível observado é muito superior ao máximo nível com medição de vazão. Frequentemente, o máximo nível observado está acima do limite da seção de medição, configurando, assim, uma situação de extravasamento para a várzea de inundação do curso d'água. Nestas condições, as técnicas usuais de extrapolação da curva-chave fornecem valores de vazão pouco confiáveis, e os resultados devem ser usados com a devida cautela. Nas estações monitoradas pela CELTINS e NATURATINS observou-se aplicabilidade apenas para regionalização de vazões médias, pois apresentaram poucas medições de vazão.

5.3 Considerações Gerais

Foram selecionadas 22 estações fluviométricas dentro da área de estudo, com base em na qualidade das curvas-chave, alterações nas séries hidrológicas (efeitos de remanso e regularização), tamanho das séries e distribuição espacial. Para a maioria delas observa-se

haver bom comportamento das curvas-chave para vazões mínimas e médias, mas há limitações para estimativa das vazões máximas.

Observa-se, também, uma baixa densidade de postos com qualidade suficiente para uso em estudos de regionalização precisos: 17 postos fluviométricos foram previamente selecionados, mas a necessidade de maior abrangência espacial conduziu para a adoção de mais cinco postos mesmo sem a qualidade ideal de suas séries de vazões. Mesmo com 22 postos tendo em vista a área de estudo com 122 mil km², observa-se que a densidade obtida (5.500 km²/posto) está ainda aquém do recomendado pela OMM que é de um posto a cada 2.500 km².

6 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS FISIAGRÁFICOS

6 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS FISIAGRÁFICOS

6.1 Introdução

As variáveis explicativas são entendidas como as usadas para estimar o valor de variáveis regionalizadas. Muitas variáveis explicativas são de natureza fisiográfica. As variáveis fisiográficas consideradas na maior parte dos estudos existentes são a área da bacia, o comprimento e declividade média do rio principal e um parâmetro da densidade de drenagem, obtidos a partir de cartografia analógica.

As variáveis fisiográficas são passíveis de serem obtidas e espacializadas a partir de técnicas de geoprocessamento como, por exemplo: *áreas de contribuição, perímetros de bacias, coeficientes de forma, comprimentos da rede de drenagem, ordenamento da rede de drenagem, grau de sinuosidade, declividade da bacia, declividade da rede de drenagem, variação hipsométrica, etc.* O uso de técnicas de geoprocessamento permite ampliar o número de variáveis explicativas a serem utilizadas no estudo.

A seguir, são apresentados os procedimentos adotados para estimativa dos parâmetros fisiográficos para o presente estudo, bem como os resultados obtidos para estas estimativas.

6.2 Estimativa dos Parâmetros Fisiográficos das Sub-Bacias de Referência

No presente estudo, os dados físicos e hidrometeorológicos são armazenados em ambiente SIG e podem ser classificadas em quatro (04) grupos:

Dados hidrometeorológicos:

Informação vetorial pontual referente à posição das estações fluviométricos associados aos valores de vazões médias de longo período, máximas e mínimas das bacias contribuintes e das posições das estações pluviométricas que tenham influência na área de estudo para obtenção através de interpolação espacial das precipitações médias anuais de cada sub-bacia.

Base cartográfica de apoio:

Arquivos digitais estruturados em SIG com informações cartográficas básicas (hidrografia, rede viária, infra-estrutura, etc) na escala 1:100.000 oriunda de cartas IBGE e DSG.

Cartografia temática:

Arquivos digitais temáticos, estruturados em SIG, escala 1:250.000, (fornecidos pela SEPLAN). Estes mapas, com especial ênfase aos temas geologia e geomorfologia, fornecem subsídios, para identificação de áreas de comportamento similar das águas subterrâneas, com potencial importância na regionalização de vazões mínimas.

Modelo Digital de Elevação (MDE):

Neste estudo de regionalização utilizou-se o MDE obtido pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ajustado aos dados altimétricos existentes na base cartográfica de apoio. A SRTM é o resultado de uma missão espacial conjunta da NASA (National Aeronautics and Space Administration), NIMA (National Imagery and Mapping Agency), DLR (Agência Espacial Alemã) e ASI (Agência Espacial Italiana) com o objetivo de gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE) da Terra, utilizando a interferometria. O MDE da SRTM apresenta um produto com aproximadamente 90x90m de resolução, compatível com a escala 1:100.000. O MDE deverá ser hidrologicamente consistente. Esta feição consiste em uma matriz semelhante ao MDE original, onde foram identificadas todas as possíveis depressões que possam interromper o fluxo sobre a superfície. Estas depressões podem ser naturais (o que originaria um lago) ou artificiais (decorrentes do processo de obtenção do MDE). A partir deste modelo é possível mapear as diferentes direções do escoamento superficial e obter um Modelo Digital de Fluxo (MDF) que consiste em uma matriz cujo atributo das células corresponde ao número de células contribuintes a cada ponto da superfície, ou seja, a área da bacia de contribuição em cada célula do MDE.

Uma vez selecionados os postos fluviométricos adequados ao estudo de regionalização de vazões, conforme critérios associados ao tamanho da série temporal e extensão de falhas, foram estimados os parâmetros fisiográficos das bacias de contribuição, derivados da geomorfometria da bacia, isto é, derivados do seu relevo.

Os parâmetros estimados para cada uma das 22 bacias foram: *área, perímetro, comprimento do rio principal, coeficiente de forma, coeficiente de compacidade, declividade do rio principal, altitudes mínimas, máximas e médias da bacia, declividades mínimas, máximas e médias da bacia e desvios padrão da altitude e da declividade.*

As etapas percorridas para obtenção dos parâmetros sobre o MDE foram as seguintes:

- ❑ Remoção das depressões existentes na superfície, criando um MDE hidrologicamente consistente. O processo pelo qual são preenchidas as depressões

consiste em uma função de convolução (janela móvel), que identifica células envolvidas por células vizinhas com cotas superiores, alterando-as de forma o restabelecer o fluxo;

- ❑ Obtenção de um Modelo Digital de Fluxo (MDF), derivado do MDE, onde são mapeadas as diferentes direções do escoamento superficial;
- ❑ Obtenção do Modelo Digital de Fluxo Acumulado (MDFA) que consiste em uma matriz cujo atributo das células corresponde ao número de células contribuintes a cada ponto da superfície, ou seja, a área da bacia de contribuição em qualquer célula do modelo;

Estes modelos (MDE, MDF e MDFA) foram a base para obtenção das variáveis explicativas de natureza fisiográfica acima listados.

As operações para obtenção dos parâmetros são comuns na maioria dos ambientes de geoprocessamento. Especificamente neste trabalho foram utilizadas as ferramentas de geoprocessamento disponíveis no software IDRISI, versão ANDES.

Na Figura 6.1 é apresentado o modelo digital de elevações utilizado para extração dos parâmetros fisiográficos das sub-bacias selecionadas da margem direita do rio Tocantins. Nos Quadro 6.1, Quadro 6.2 e Quadro 6.3 são apresentados os valores dos parâmetros fisiográficos de cada bacia.

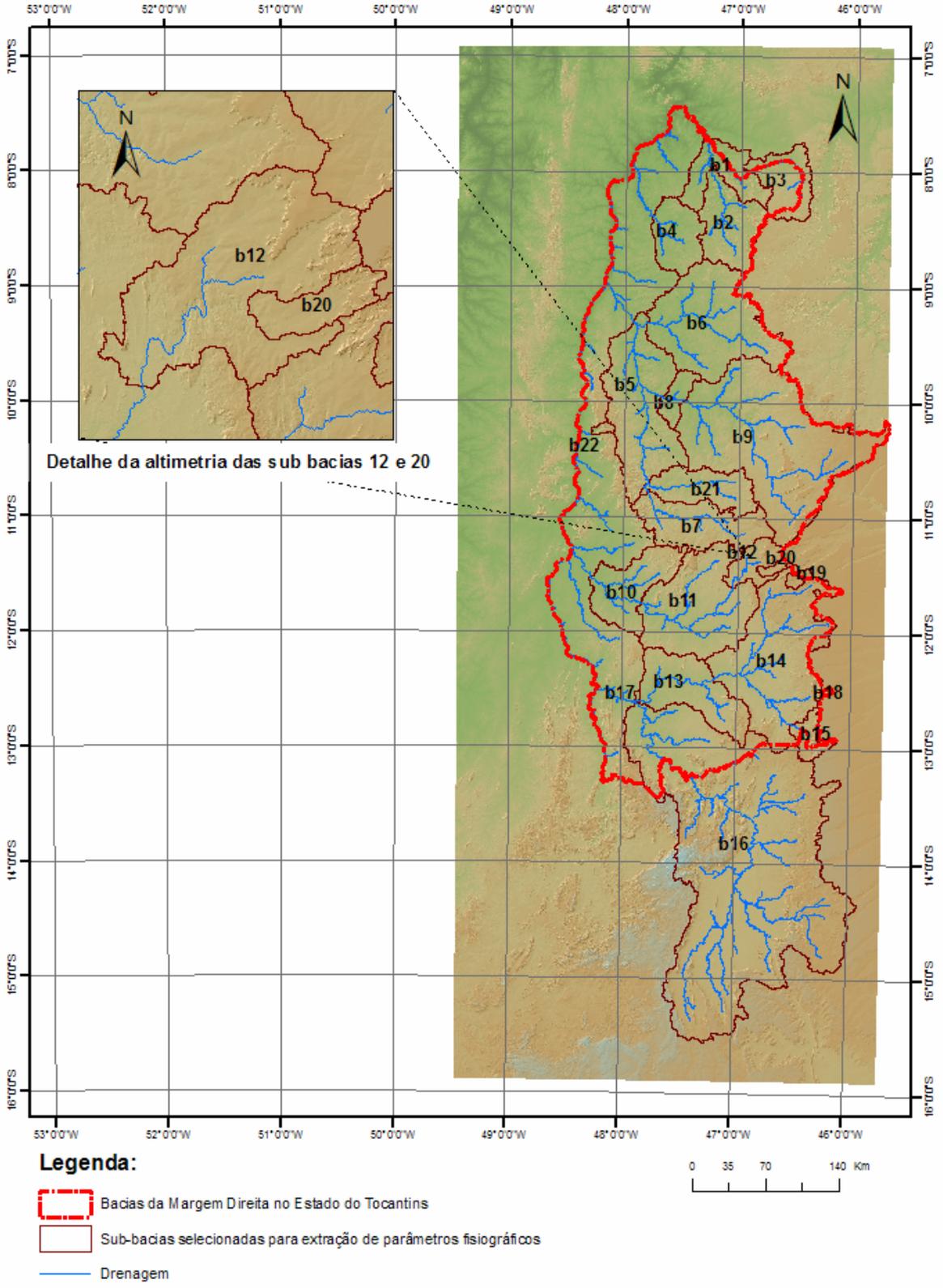


Figura 6.1 - Modelo digital de elevações utilizado

Quadro 6.1 - Localização dos postos fluviométricos e parâmetros morfométricos

Nome	Código (n°)	Long (° dec)	Lat (° dec)	Identificação na figura 2.2	Sub-bacias contribuintes	AI (km ²)	AT (km ²)	Per (km)	KC (-)	KF (-)
MONTANTE DA BARRA DO PALMA	21650000	-47,88	-12,62	16	16	40219	40219	2031	2,84	0,13
LAVANDEIRA	21750000	-46,51	-12,79	15	15	1063	1063	303	2,60	0,24
PCH – SOBRADO	21760080	-46,31	-12,53	18	18	103	103	76	2,09	0,27
PCH – AGROTRAFO II MONTANTE	21780170	-46,52	-11,65	19	19	171	171	86	1,85	0,50
RIO DA PALMA	21850000	-47,20	-12,42	14	(14-15-18-19)	10747	12892	1056	2,60	0,33
BARRA DO PALMA	21890000	-47,86	-12,60	13	(13-14-15-18-19)	4965	17857	1334	2,80	0,17
PARANÁ	21900000	-47,89	-12,62	17	(17-13-14-15-16-18-19)	52	58128	2544	2,95	0,14
PORTO ALEGRE	22190000	-47,04	-11,61	12	(12-20)	1544	1794	304	2,01	0,22
PCH –DIANÓPOLIS	22200080	-46,82	-11,47	20	20	250	250	118	2,08	0,20
PORTO JERONIMO	22220000	-47,84	-11,76	11	(11-12-20)	8576	10370	746	2,05	0,17
FAZENDA LOBEIRA	22250000	-48,29	-11,53	10	(10-11-12-20)	4082	14452	932	2,17	0,13
TAQUARUSSU DO PORTO	22351000	-48,29	-10,29	22	22	186	186	94	1,92	0,22
JATOBÁ	22680000	-47,48	-9,99	9	9	16990	16991	1085	2,33	0,23
NOVO ACORDO	22700000	-47,67	-9,96	8	(8-9)	1071	18061	1054	2,20	0,21
PORTO GILANDIA	22730000	-47,79	-10,77	7	7	4737	4737	675	2,74	0,13
PCH – ISAMU IKEDA FASE I E II	22735080	-47,79	-10,70	21	(21-7)	3322	8059	659	2,06	1,19
DOIS IRMAOS	22850000	-47,81	-9,31	6	6	9470	9470	822	2,37	0,21
PORTO REAL	22900000	-47,93	-9,31	5	(5-6-8-7-8-9-21)	8393	43983	1470	1,96	0,29
ITACAJÁ	23150000	-47,77	-8,39	4	4	2834	2834	374	1,97	0,36
CACHOEIRA MONTE LINDO	23220000	-46,94	-8,00	3	3	2987	2987	447	2,29	0,15
JACARÉ	23230000	-47,27	-7,96	2	2	4073	4073	516	2,26	0,18
GOIATINS	23250000	-47,31	-7,71	1	(1-2-3)	2977	10036	789	2,21	0,18

Onde:

AI – área incremental da bacia, AT - área total da bacia, Per – perímetro da bacia, KC – coeficiente de compacidade, KF – coeficiente de forma.

Formulário:

$$KC = 0,28 \frac{Per}{\sqrt{A}} ; \quad KF = \frac{A}{L^2} ; \quad \text{onde: } A \text{ (área da bacia); } Per \text{ (perímetro da bacia); } L \text{ (comprimento do rio principal).}$$

Quadro 6.2 - Parâmetros fisiográficos associados à drenagem

Nome	Código (n°)	A (km ²)	L (km)	HE (m)	HC (m)	S (%)	LT (km)	DD (km/km ²)
MONTANTE DA BARRA DO PALMA	21650000	40219	562	257	835	0,10	32540	0,81
LAVANDEIRA	21750000	1063	67	392	766	0,56	875	0,82
PCH – SOBRADO	21760080	103	19	461	760	1,54	76	0,74
PCH – AGROTRAFI II MONTANTE	21780170	171	18	612	879	1,45	134	0,79
RIO DA PALMA	21850000	12892	198	319	760	0,22	10485	0,81
BARRA DO PALMA	21890000	17857	324	267	760	0,15	14423	0,81
PARANÁ	21900000	58128	653	257	879	0,10	47003	0,81
PORTO ALEGRE	22190000	1794	89	369	594	0,25	1365	0,76
PCH – DIANÓPOLIS	22200080	250	36	474	719	0,69	186	0,74
PORTO JERÔNIMO	22220000	10370	251	267	594	0,13	8261	0,80
FAZENDA LOBEIRA	22250000	14452	332	229	594	0,11	11354	0,79
TAQUARUSSU DO PORTO	22351000	186	29	220	547	1,12	130	0,70
JATOBÁ	22680000	16991	271	215	793	0,21	12206	0,72
NOVO ACORDO	22700000	18061	295	209	793	0,20	12984	0,72
PORTO GILÂNDIA	22730000	4737	188	266	654	0,21	3507	0,74
PCH – ISAMU IKEDA FASE I E II	22735080	8059	82	260	654	0,48	5841	0,72
DOIS IRMÃOS	22850000	9470	212	190	539	0,16	6980	0,74
PORTO REAL	22900000	43983	393	184	793	0,16	31912	0,73
ITACAJÁ	23150000	2834	89	185	318	0,15	2121	0,75
CACHOEIRA MONTE LINDO	23220000	2987	143	249	478	0,16	2356	0,79
JACARÉ	23230000	4073	152	192	360	0,11	3125	0,77
GOIATINS	23250000	10036	234	175	478	0,13	7686	0,77

Onde:

A – área total;

L – comprimento do rio principal;

HE – altitude do exutório;

HC – altitude na cabeceira;

S – declividade do rio principal;

LT – comprimento total da drenagem na bacia total;

DD – Densidade de drenagem.

Formulário:

$$DD = \frac{LT^2}{AT}$$

Quadro 6.3 - Parâmetros fisiográficos associados à hipsometria

Nome	Código (n°)	HMIN (m)	HMAX (m)	HMED (m)	SBMIN (%)	SBMAX (%)	SBMED (%)
M. DA B. DO PALMA	21650000	254	1669	620	0,0	194,8	8,3
LAVANDEIRA	21750000	392	1048	670	0,0	132,6	10,3
PCH – SOBRADO	21760080	460	926	731	0,0	112,0	11,5
PCH – AG. II MONT.	21780170	611	924	762	0,0	83,5	7,3
RIO DA PALMA	21850000	346	972	546	0,0	145,6	6,2
BARRA DO PALMA	21890000	324	983	504	0,0	147,4	6,0
PARANÁ	21900000	275	1457	584	0,0	180,1	7,6
PORTO ALEGRE	22190000	384	910	581	0,0	103,1	6,8
PCH –DIANÓPOLIS	22200080	475	912	648	0,0	82,4	7,0
PORTO JERÔNIMO	22220000	284	946	430	0,0	143,0	5,9
FAZENDA LOBEIRA	22250000	268	906	408	0,0	133,2	5,7
TAQ. DO PORTO	22351000	220	715	508	0,0	102,6	13,0
JATOBÁ	22680000	214	885	474	0,0	116,3	4,4
NOVO ACORDO	22700000	214	860	464	0,0	112,4	4,5
PORTO GILÂNDIA	22730000	267	858	476	0,0	114,5	8,4
PCH-I. IKEDA F. I II	22735080	264	832	440	0,0	96,4	7,6
DOIS IRMÃOS	22850000	189	772	316	0,0	105,3	5,4
PORTO REAL	22900000	211	815	406	0,0	101,7	6,0
ITACAJÁ	23150000	184	497	275	0,0	89,8	5,2
CACH. MTE. LINDO	23220000	248	567	387	0,0	76,1	4,4
JACARÉ	23230000	192	603	331	0,0	122,1	9,8
GOIATINS	23250000	203	603	337	0,0	105,4	7,4
<p><u>Onde:</u></p> <p><i>HMIN – altitude mínima da bacia incremental;</i> <i>HMAX – altitude máxima da bacia incremental;</i> <i>HMED – altitude média da bacia incremental;</i> <i>SBMIN – declividade mínima da bacia incremental;</i> <i>SBMAX – declividade máxima da bacia incremental;</i> <i>SBMED – declividade média da bacia incremental</i></p>							

Os parâmetros fisiográficos apresentados nos Quadro 6.1, Quadro 6.2 e Quadro 6.3 formaram uma base para análise e seleção das variáveis explicativas no presente estudo.

Da análise destes dados, pode-se destacar que as áreas de contribuição variam de 103km² a 58.323 km². Porém, observam-se apenas quatro postos com área inferior a 1.000km², todos eles operados pela CELTINS e apresentando diversos problemas, principalmente pelo efeito causado pela operação de barragens próximos a eles e na definição da curva chave na seção. Estes valores podem trazer limitações na aplicação das curvas regionais, principalmente para pequenas bacias. Por exemplo, uma vazão mínima obtida numa bacia de 10.000 km² não segue uma mesma tendência linear quando extrapolado para uma bacia menor do que 500 km² já que a bacia menor tem pouca regularização natural e depende muito da distribuição espacial dos aquíferos. Isto poderia ser resolvido na regionalização quando existirem dados, mas neste caso a quantidade de postos é limitada, e a extrapolação poderá levar a conflitos na outorga, já que a tendência seria de outorgar uma vazão que poderia não existir. Esta restrição pode ser importante porque vários dos objetivos específicos apresentados no item 1.3 do presente relatório demandam a determinação de vazões para bacias com áreas inferiores a 1.000 km², principalmente no que se refere à outorga, projetos viários, projetos de irrigação.

Estes valores de área contribuinte implicam, portanto, na necessidade de extrapolação das curvas regionais ajustadas para bacias com área de contribuição inferiores a 1.000 km², o que pode resultar em grandes incertezas nos resultados, conforme descrito por Silva Jr. et al. (2003). Estes autores apresentam um estudo de extrapolação espacial na regionalização de vazões no Rio Grande do Sul, onde mostram haver grandes incertezas na extrapolação para bacias com área inferior a 10 km². Estudos como este mostra que os resultados de estimativas de vazão por equações regionais extrapoladas devem ser utilizados com cautela.

Há necessidade de procurar soluções alternativas à regionalização para reduzir as incertezas envolvidas. Uma alternativa é o uso de modelagem hidrológica do processo de transformação chuva-vazão. Outra alternativa é a aplicação do método apresentado por Silveira et al. (1998) para quantificação de vazões em pequenas bacias sem dados, que caracteriza uma solução alternativa para a avaliação de disponibilidades hídricas quando a regionalização não produz bons resultados. Estudos específicos seriam necessários para determinar a melhor metodologia a ser aplicada.

7 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÉDIAS

7 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÉDIAS

7.1 Vazão Média

A vazão média anual é uma medida da disponibilidade hídrica de cada ano hidrológico na bacia hidrográfica contribuinte. É o resultado do balanço hídrico anual, que pode ser estabelecido aproximadamente pela diferença entre os fluxos anuais médios da precipitação e da evapotranspiração real.

A cada ano hidrológico, em cada ponto da rede hidrográfica, define-se como vazão média anual a razão entre o volume acumulado de escoamento no ano pelo tempo de um ano. Em postos fluviométricos com disponibilidade de vazões médias diárias a vazão média anual é a média dos 365 dias (ou 366, no caso de ano bissexto). De preferência deve-se considerar o ano hidrológico centralizado no período úmido do ano.

A série de vazões médias anuais de um ponto da rede hidrográfica oscila entre valores mais altos e valores mais baixos, isto é, enquadra-se em um comportamento natural a existência de uma variabilidade interanual, onde é normal o escoamento variar significativamente numa faixa entre anos secos e úmidos. A abordagem clássica estatística considera a série de vazões médias anuais como uma série independente, estacionária e não-periódica, o que permite analisar suas frequências através do ajuste de uma distribuição de probabilidades. Evidentemente, se a série não tiver as características acima, haverá distorção nas frequências, em maior ou menor grau, dependendo do grau de afastamento das condições acima.

Chamaremos simplesmente de vazão média, então, neste estudo de regionalização, a vazão média anual associada a um período de retorno - inverso da frequência de excedência - oriunda de uma distribuição de probabilidades. O período de retorno de uma vazão média permite avaliar sua posição entre anos secos e úmidos.

7.2 Vazão Média de Longo Período

O valor esperado, em linguagem estatística, das vazões médias de um ponto da rede hidrográfica corresponde à vazão média de longo período deste ponto. Numa série estacionária é o valor em torno do qual flutuarão as vazões médias anuais, sendo, por isso, um parâmetro importante da distribuição das vazões médias.

A vazão média de longo período espelha a disponibilidade hídrica média (ou esperada) da bacia contribuinte a um ponto da rede hidrográfica. Teoricamente, desconsiderando-se qualquer perda, é a maior vazão possível de ser regularizada através de uma barragem, por regularização total, numa bacia hidrográfica.

Em postos fluviométricos com dados disponíveis de vazão, a vazão média de longo período é estimada pela média das vazões médias anuais de todos os anos.

7.3 Regionalização da Vazão Média

O método de regionalização analisa a semelhança das séries pontuais de vazões médias anuais, separando a análise estatística em duas funções básicas :

- ❑ Vazão média de longo período definida por características fisiográficas e climáticas da bacia (regressão da vazão média de longo período).
- ❑ Distribuição de probabilidades das vazões médias anuais adimensionalizadas pela vazão média de longo período (*curva adimensional de probabilidade da vazão média*) ;

Os agrupamentos espaciais dos postos que definem as regiões homogêneas são analisados, considerando simultaneamente os melhores indicadores de ajustamento das equações de regressão e as menores dispersões das curvas adimensionais de probabilidades.

Definidas as regiões homogêneas, o método propicia, portanto que se estime primeiro, em função de características físicas e climáticas, o mais importante parâmetro das distribuições de probabilidades das vazões médias, a vazão média de longo período, e, após, o valor procurado de uma vazão média anual com determinado período de retorno, multiplicando esta vazão média de longo período pelo valor da curva adimensional, com o período de retorno requerido.

7.4 Regressão da Vazão Média de Longo Período

A margem direita do rio Tocantins no estado de Tocantins teve 17 postos obtidos da Hidroweb selecionados com dados de vazão média de longo período e dados fisiográficos e climáticos (precipitação média anual). Também foram considerados 5 postos obtidos junto a NATURANTINS, CELTINS e SEPLAN, perfazendo um total de 22 postos fluviométricos.

Para a análise das vazões médias foi considerado o ano hidrológico de setembro a agosto, de forma de considerar claramente o período úmido no centro do período analisado. No Quadro 7.1 estão listados os 22 postos utilizados, suas vazões médias de longo período e

as características explicativas que foram analisadas no processo de regressão (*stepwise*) da regionalização.

Quadro 7.1 - Vazão média de longo período e índices fisiográficos na região estudada

Código ANA	Código Mapa	A (km ²)	P (mm)	Per (km)	kc	kf	L (km)	S (%)	DD (km/km ²)	Q _{méd.} Long. Per. (m ³ .s ⁻¹)
23250000	1	10036	1641,3	789	2,21	0,18	233,9	0,13	0,81	160,1
23230000	2	4073	1680,6	516	2,26	0,18	151,9	0,11	0,82	75,8
23220000	3	2987	1583,3	447	2,29	0,15	143,2	0,16	0,74	33,5
23150000	4	2834	1791,3	374	1,97	0,36	88,7	0,15	0,79	53,9
22900000	5	43983	1617,5	1470	1,96	0,29	392,7	0,16	0,81	741,1
22850000	6	9470	1668,0	822	2,37	0,21	212,2	0,16	0,81	175,7
22730000	7	4737	1569,0	675	2,74	0,13	188,0	0,21	0,81	95,4
22700000	8	18061	1609,6	1054	2,20	0,21	295,2	0,20	0,76	306,2
22680000	9	16991	1605,8	1085	2,33	0,23	271,5	0,21	0,74	306,3
22250000	10	14452	1551,4	932	2,17	0,13	331,7	0,11	0,80	196,6
22220000	11	10370	1536,1	746	2,05	0,17	250,6	0,13	0,79	143,4
22190000	12	1794	1587,7	304	2,01	0,22	89,3	0,25	0,70	42,8
21890000	13	17857	1722,6	1334	2,80	0,17	323,7	0,15	0,72	268,7
21850000	14	12892	1852,3	1056	2,60	0,33	198,0	0,22	0,72	230,1
21750000	15	1063	1786,9	303	2,60	0,24	67,2	0,56	0,74	37,5
21650000	16	40219	1498,4	2031	2,84	0,09	654,6	0,09	0,72	433,07
21900000	17	58128	1567,1	2544	2,95	0,14	653,3	0,09	0,74	700,5
21760080	18	103	1965,5	76	2,09	0,27	19,4	1,54	0,73	5,7
21780170	19	978	1829,9	266	2,38	0,30	57,4	0,27	0,75	4,2
22200080	20	250	1640,2	118	2,08	0,20	35,7	0,69	0,79	6,4
22735080	21	8059	1560,1	659	2,06	0,20	203,2	0,19	0,77	102,1
22351000	22	186	1722,7	94	1,92	0,22	29,3	1,12	0,77	3,5

$$kc = 0,28.Per.A^{-1/2}$$

$$kf = A.L^{-2};$$

A = área da bacia;

Per = perímetro da bacia;

L = comprimento do rio principal;

S = declividade do rio principal

A forma de obtenção dos valores das variáveis explicativas e uma análise de seu comportamento já foram discutidas em relatório anterior. Destaque-se que nem todas as variáveis explicativas são independentes entre si, influenciando no processo de regressão, onde a agregação de mais uma ou diversas variáveis pode alterar significativamente os valores numéricos inicialmente obtidos dos expoentes ou coeficientes da equação de regressão. Isto é normal, pois mesmo adicionando-se uma variável explicativa altamente correlacionada a outra (caso de comprimento em relação a área), ela sempre traz alguma informação nova, melhorando a regressão, mas mudando os parâmetros da equação. O que deve ser avaliado é se este ganho de informação é significativo para justificar a manutenção da variável adicionada da equação. Por uma questão de parcimônia e facilidade de uso é preferível uma

equação de regressão com um mínimo de variáveis explicativas, para níveis de precisão semelhantes.

A equação de regressão procurada para cada região homogênea tem a seguinte forma potencial multivariada:

$$Q_{med} = a \cdot A^b \cdot P^c \cdot Per^d \cdot Kc^e \cdot Kf^f \cdot L^g \cdot S^h \cdot DD^i$$

onde:

- Q_{med} = Vazão média de longo período (m³s⁻¹)
- A = Área (km²)
- P = Precipitação média na bacia (mm)
- Per = Perímetro da bacia
- Kc = Coeficiente de compacidade
- Kf = Coeficiente de forma
- L = Comprimento do rio principal (km)
- S = Declividade do rio principal (%)
- DD = Densidade de drenagem (km/km²)

O ajuste da equação de regressão corresponde ao ajuste dos parâmetros a, b, c, d, e, f, g, h, i de acordo com os dados de cada região. Neste estudo, a metodologia de ajuste foi por regressão linear múltipla dos logaritmos naturais dos termos da equação:

$$\ln(Q_{med}) = \ln a + b \cdot \ln A + c \cdot \ln P + d \cdot \ln Per + e \cdot \ln Kc + f \cdot \ln Kf + g \cdot \ln L + h \cdot \ln S + i \cdot \ln DD$$

Para avaliação da qualidade da regressão usou-se, além da análise dos erros percentuais, o fator R², muitas vezes chamado de coeficiente de determinação, que avalia, numa escala de 0 a 1, a fração da variância explicada pela regressão. Evidentemente, o R² considerado foi o não tendencioso também denominado de “R² ajustado”, que corrige o efeito dos graus de liberdade a menos que cada variável explicativa introduz.

A definição das regiões foi baseada na tendência das curvas adimensionais e na qualidade das regressões das vazões médias de longo período. Para cada um dos postos selecionados na região estudada foram estabelecidas as frequências empíricas dos valores de vazão média anual das suas séries disponíveis. Os valores de vazão foram, em seguida, adimensionalizados, dividindo-os pela vazão média de longo período observada em cada série de cada posto fluviométrico. Como resultado, obteve-se, para cada posto, uma curva empírica adimensional relacionando as vazões adimensionais com probabilidades de ocorrência. Como são curvas adimensionais, torna-se possível sua comparação no conjunto de todos os postos, procurando-se tendências semelhantes, agrupáveis em regiões homogêneas.

As probabilidades empíricas foram estabelecidas com a expressão que reflete a posição de plotagem de uma distribuição de extremos de Gumbel:

$$p = \frac{i - 0,44}{n + 0,12}$$

onde:

p = probabilidade da vazão ser igualada ou superada;
 i = ordem da vazão (série ordenada de forma decrescente);
 n = tamanho da série.

Os pontos de todas as séries foram plotados com a ajuda da variável reduzida de Gumbel (y_{GUMBEL}) para comparação e distinção de regiões homogêneas:

$$y_{\text{GUMBEL}} = -\ln[-\ln(1 - p)]$$

A plotagem dos pares de pontos (y_{GUMBEL} , p) de todos os postos gera uma ‘nuvem’ de pontos que é trabalhada empiricamente, mas com uma lógica espacial hidrológica, para separar tendências diferentes que configurem regiões homogêneas distintas. Na Figura 7.1 se observa a plotagem das curvas adimensionais para cada posto fluviométrico analisado, sendo que para cada posto foi ajustada uma reta.

A declividade das retas ajustadas às curvas adimensionais foi comparada com diferentes características fisiográficas da região analisada: Clima (Figura 7.2); Declividade média no trecho (Figura 7.3); Ambientes geológicos (Figura 7.4); Tipos de solos (Figura 7.5). Nas Figura 7.2 a Figura 7.5, cada posto é representado por um círculo, cujo tamanho está relacionado com a declividade da reta adimensional de probabilidade: quanto maior o círculo, maior a declividade.

A partir do cruzamento das declividades com cada uma das características fisiográficas analisadas foi possível estabelecer a distinção de duas áreas bem definidas: Região 1 e Região 2, conforme apresentado na Figura 7.6. No entanto, deve-se levar em conta as limitações dos dados existentes na aplicação da regionalização.

A Região 1 compreende as cabeceiras da maioria dos rios que são afluentes pela margem direita do rio Tocantins no estado de Tocantins, escoando por regiões com uma declividade considerável e com regime climático mais seco, dentro da bacia sedimentar do rio São Francisco. Esta região sofre efeitos de regularização das vazões por captura hidrogeológica da bacia do São Francisco. A Região 2 abrange as bacias mais próximas do rio Tocantins, possuindo clima mais úmido pela sua cercania com a bacia Amazônica, e

declividades relativamente baixas. A região 2 escoar sobre ambientes geológicos sedimentares e vulcano-sedimentares.

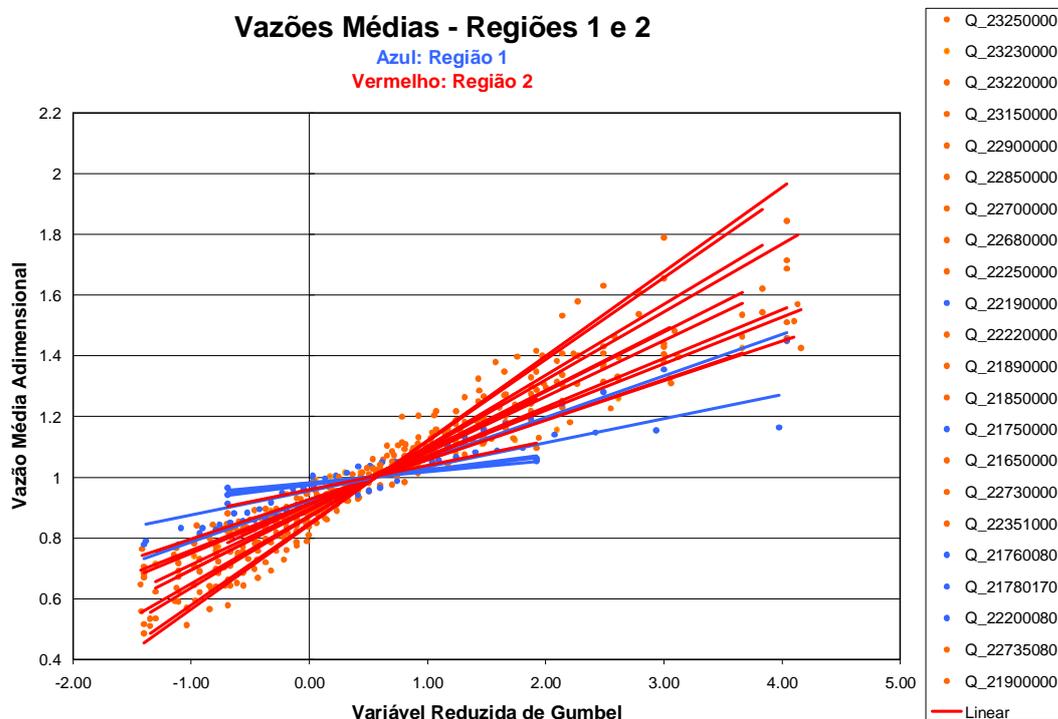


Figura 7.1 - Curvas adimensionais de vazões médias

Observa-se nas retas adimensionais da vazão média da região 1 que suas retas representadas no gráfico probabilístico de Gumbel são mais horizontais que as curvas da região 2. Curvas horizontais indicam maior regulação das vazões, o que, por sua vez, implica em um controle do escoamento pelo aquífero. Estes resultados são coerentes porque as cabeceiras das bacias dos rios do Sono, Balsas e Manoel Alves da Natividade compartilham o aquífero Urucuiá-Areado com a bacia do rio Grande (Bacia do rio São Francisco). Com base em balanços hídricos realizados (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003; SCHUSTER et al., 2002) observou-se o elevado percentual de contribuição subterrânea na composição das descargas médias dos rios situados neste aquífero, chegando a 70% da vazão total do rio. Em particular, resulta interessante destacar que os autores indicam a existência de um deslocamento do divisor de águas subterrâneo para dentro da Bacia do Rio Grande, razão pela qual os rios da cabeceira das bacias do Sono, Balsas e Manoel Alves da Natividade podem até apresentar coeficiente de escoamento anual (relação entre precipitação e escoamento) muito próximo ou até superior a um. Esta particularidade deve ser levada em conta no gerenciamento dos recursos hídricos na região, já que ações na bacia do São Francisco podem ter efeitos significativos nas bacias mencionadas, e, por tratar-se de águas subterrâneas, estes seriam sensíveis após um tempo significativo, mas com muito difícil capacidade de retorno à situação

original. Deve-se ainda destacar a inexistência de dados na região do Jalapão, o que traz grande incerteza para qualquer análise nesta área.

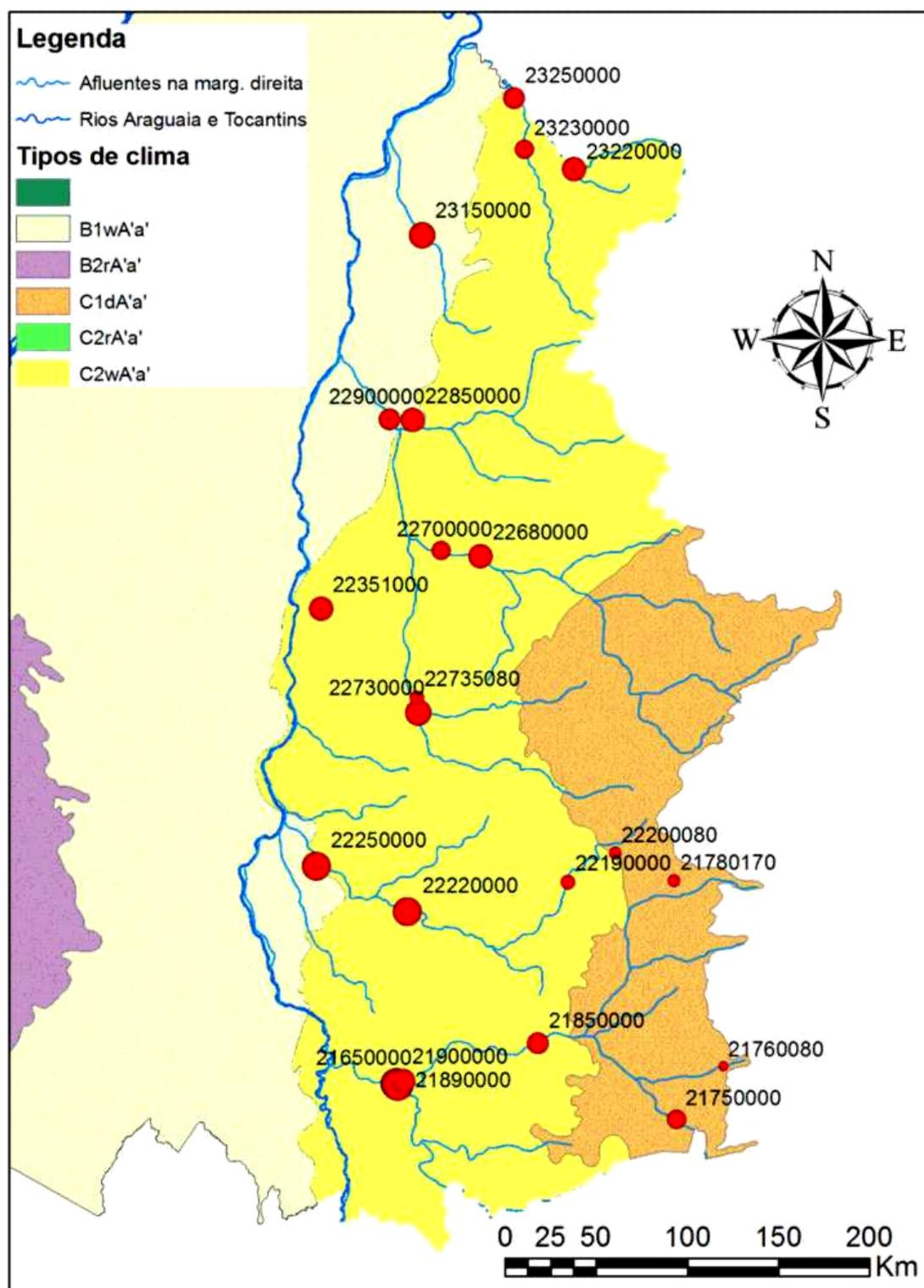


Figura 7.2 - Declividade das retas de probabilidades de vazão média (tamanho dos círculos) e regiões climáticas segundo Köppen

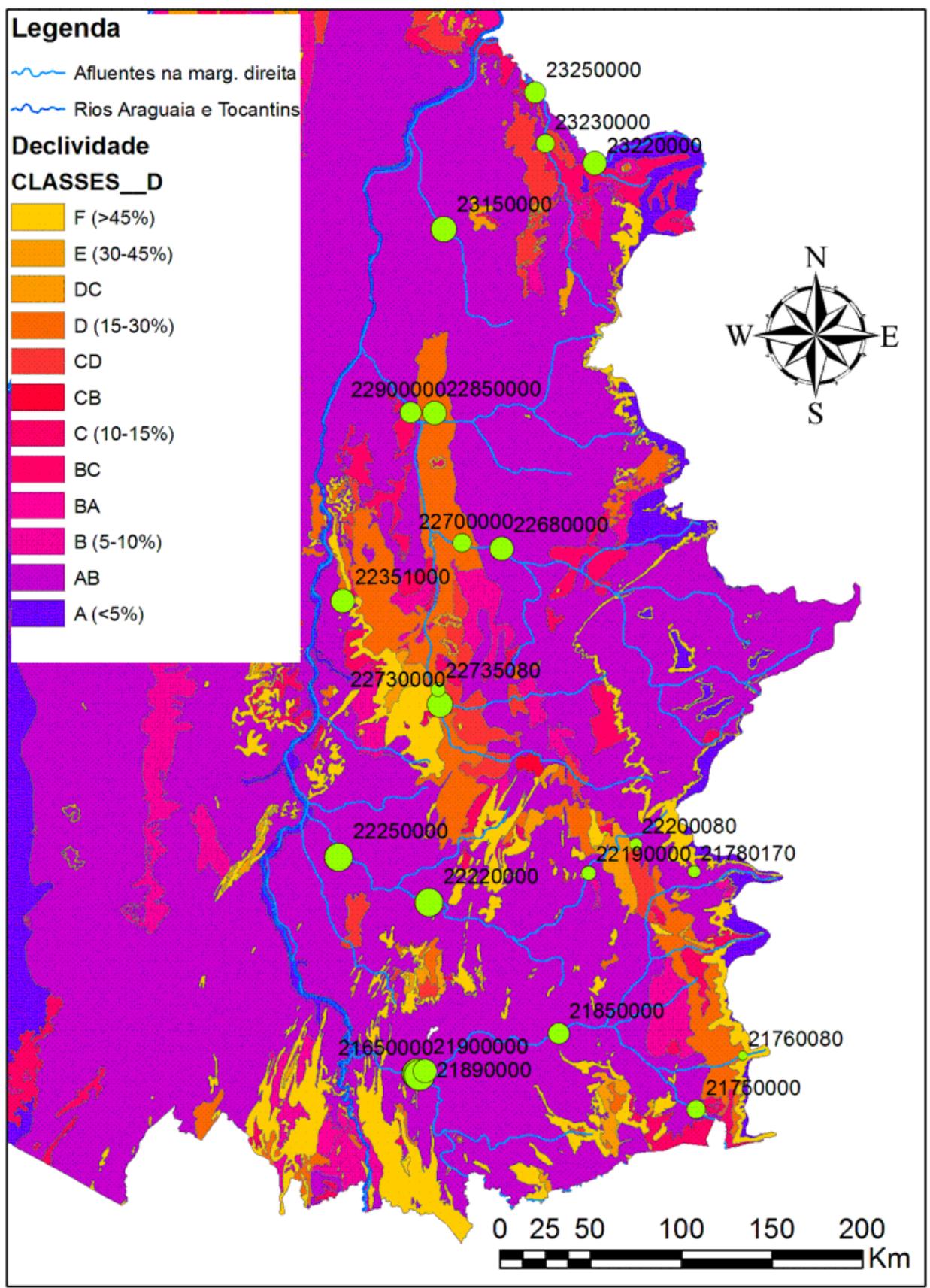
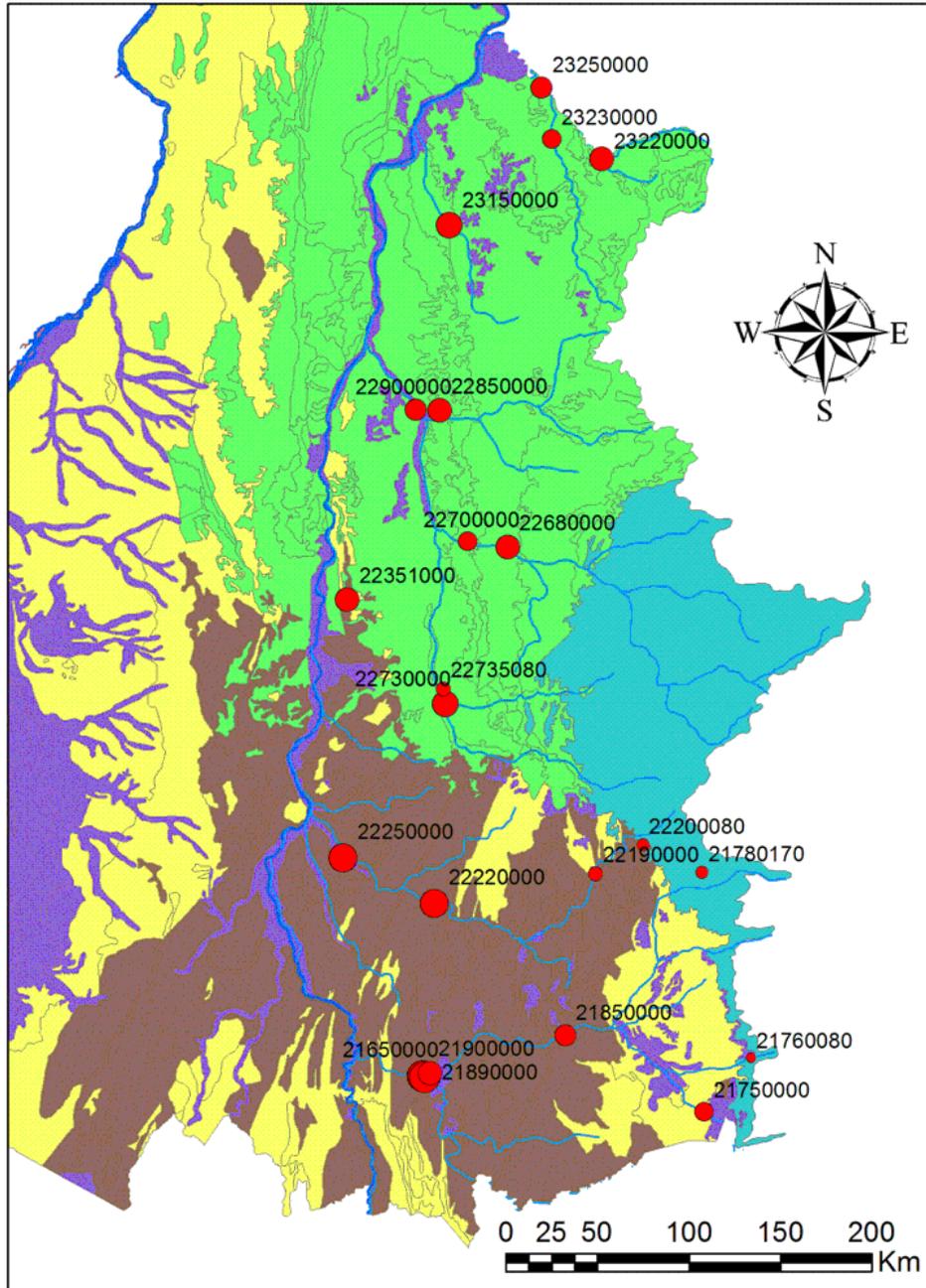


Figura 7.3 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazão média e declividade do terreno



Legenda

- Afluentes na marg. direita
- Rios Araguaia e Tocantins

Ambientes geológicos

- Bacia Sedimentar do Parnaíba
- Bacia Sedimentar do São Francisco
- Coberturas Cenozóicas
- Compl. Metamórficos e Seq. Vulcano-sedimentares do Arqueano e Proterozóico Inferior
- Faixa de Dobramentos do Proterozóico Médio e Superior
- Rio Araguaia
- Rio Tocantins

Figura 7.4 - Declividade das restas de probabilidades adimensionais de vazão média e ambientes geológicos da bacia

Legenda

- Afluentes na marg. direita
- Rios Araguaia e Tocantins

Tipos de solo

NOME

- Areias Quartzosas
- Areias Quartzosas Hidromórficas
- Cambissolo
- Hidromórfico Gleizado
- Latossolo Amarelo
- Latossolo Roxo
- Latossolo Vermelho-Amarelo
- Latossolo Vermelho-Escuro
- Plintossolo
- Podzólico Vermelho-Amarelo
- Podzólico Vermelho-Escuro
- Solos Concrecionários
- Solos Litólicos

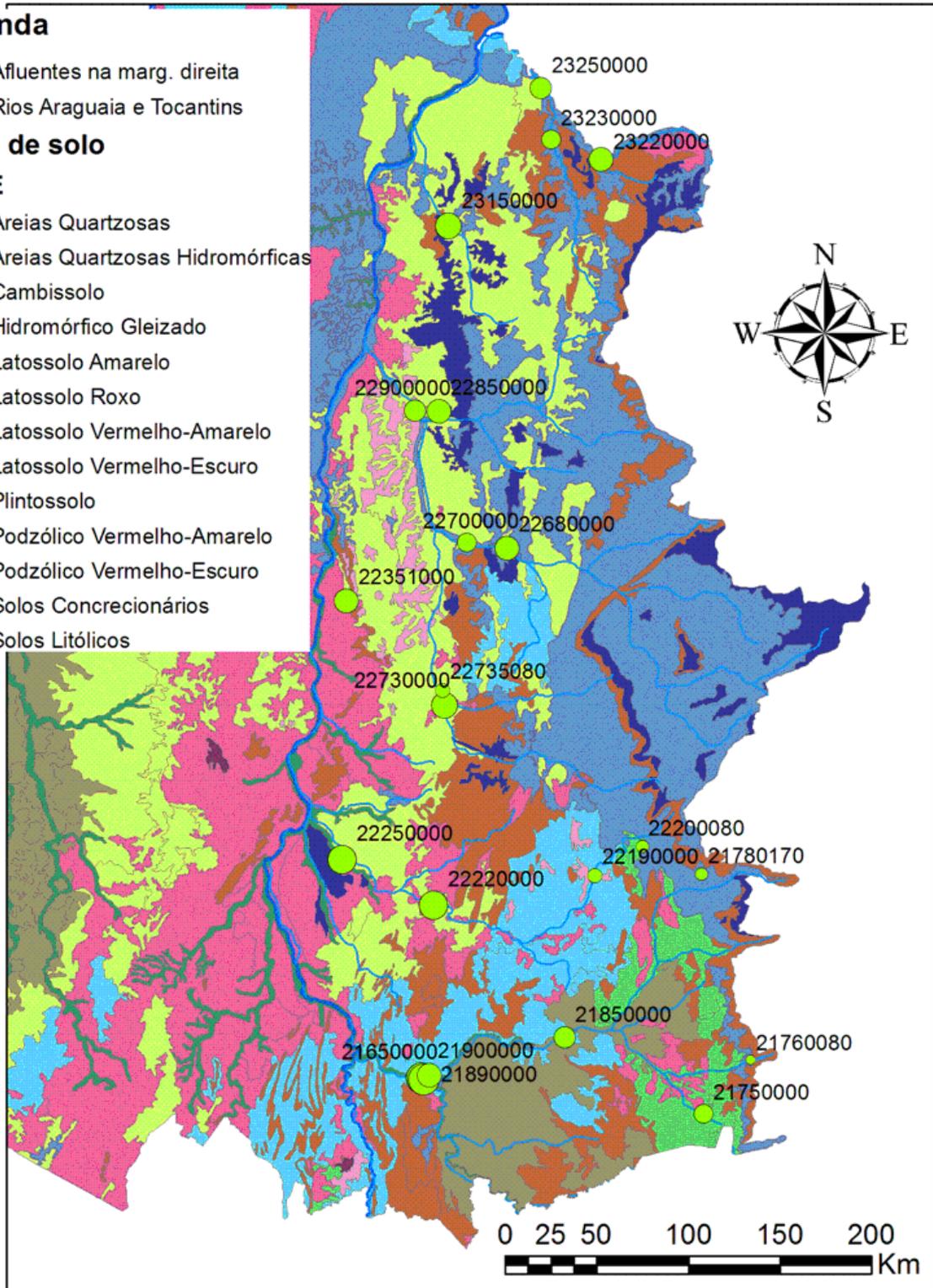


Figura 7.5 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazão média (tamanho dos círculos) e tipo de solo

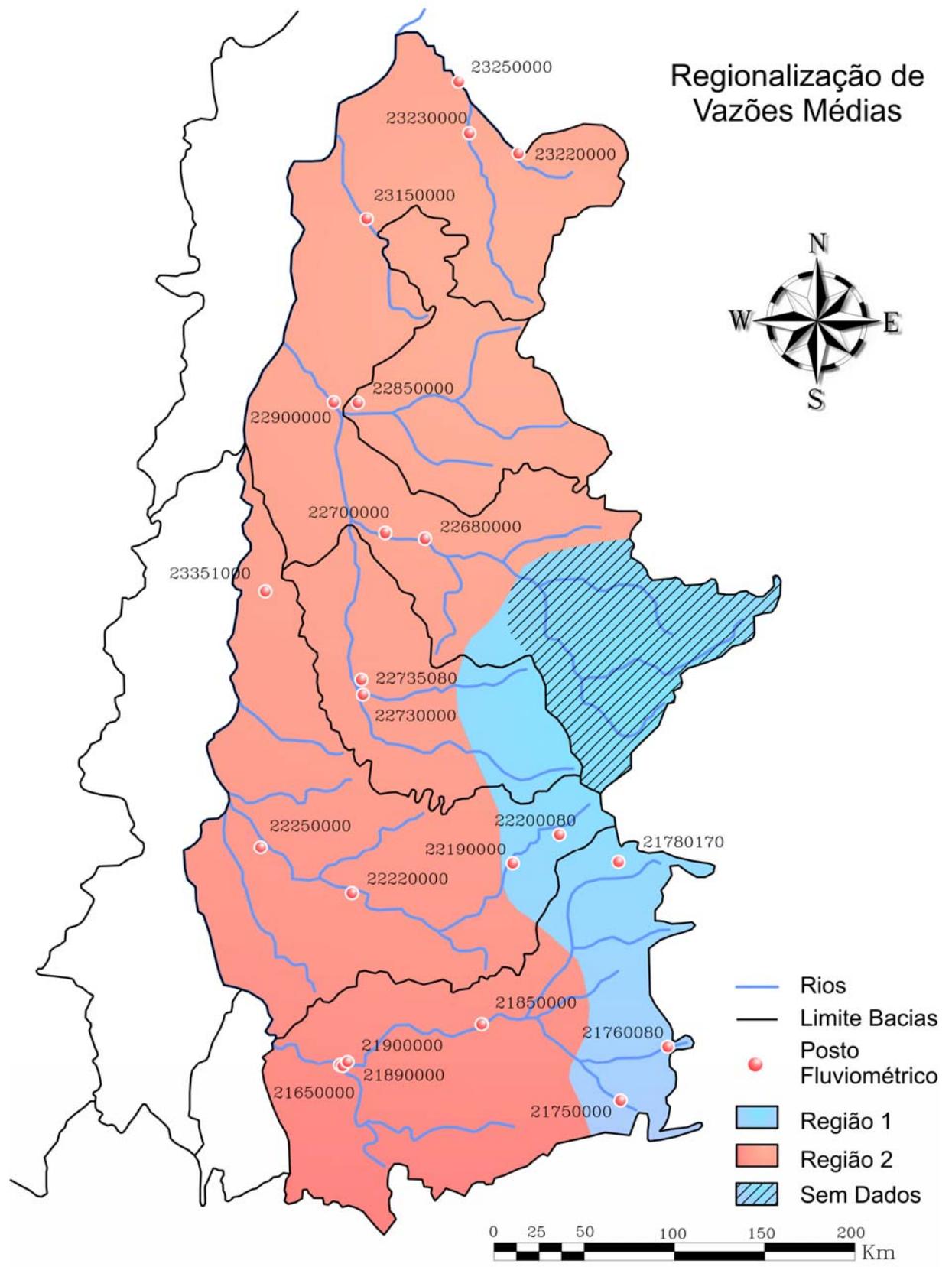


Figura 7.6 - Regiões homogêneas para as vazões médias

Para análise e indicação de uma regressão para uso, foram realizados quatro tipos de ajustes:

- ❑ Regressão com todas as variáveis explicativas (A, P, Per, kc, kf, L, S e DD), com escolha automática daquelas mais significativas (método *stepwise*);
- ❑ Regressão com apenas A e P;
- ❑ Regressão somente com a área da bacia, mas admitindo um expoente “b” diferente de um;
- ❑ Regressão somente com a área, forçando o expoente $b = 1$.

Desta forma, estavam previstas quatro equações de regressão por região. Evidentemente se o método *stepwise* concluísse pela significância apenas da área, restariam apenas duas equações.

7.4.1 Região 1 – Cabeceiras dos Rios (Bacia Sedimentar do São Francisco)

Integram esta região os postos: 22190000, 21750000, 22200080, 21780170 e 21760080.

A metodologia de cálculo de variáveis regionalizada se baseia em dois valores ou curvas:

a) A primeira é a definição de uma regressão entre as características físicas e a vazão média de longo período, que permita estimar este valor regionalizado.

b) a segunda é a definição da curva adimensional média da região, que é utilizada para estimar o período de retorno de uma vazão média, permitindo, portanto, avaliar sua posição entre anos secos e úmidos.

a) Regressão com Variáveis Físicas – Região 1

Para a região 1 foram obtidas as equações e respectivos R^2 ajustados indicadas no Quadro 7.2. A análise das regressões com a metodologia *Stepwise* indicou que o melhor ajuste é possível obtendo a vazão média de longo período em função da área e precipitação média anual na bacia. Outras variáveis não mostraram incremento significativo na qualidade do ajuste.

Quadro 7.2 - Regressões das vazões médias de longo período – Região 1

Equação	R ² ajustado
$Q_{med} = (1,714 * 10^{-15}) A^{1,04} P^{4,05}$	0,979
$Q_{med} = 0,077 A^{0,853}$	0,917
$Q_{med} = 0,0269 * A$	0,715

P em mm ; A em km²

A regressão considerando simplesmente a área forneceu bons resultados, com R² maior que 0,9. A regressão em que foi utilizada a área, forçando o expoente b =1, não foi muito boa, embora ainda esteja dentro das faixas com valores aceitáveis. Esta última equação, é útil porque fornece uma idéia intuitiva da vazão média específica: para a região 1, a vazão média específica pode ser estimada como 26,9 Ls⁻¹km⁻².

No Quadro 7.3 são indicados os valores observados junto com os calculados para cada um dos postos desta região.

Quadro 7.3 - Valores observados e calculador das vazões médias de longo período – Região 1

Código	Área (km ²)	Precip. Méd. (mm)	Q _{méd.} Long. Per. (m3.s-1)	Q _{med} = (1,714*10 ⁻¹⁵)A ^{1,04} P ^{4,05}	Q _{med} = 0,077 A ^{0,853}	Q _{med} = 0,0269A
22190000	1794	1587,7	42,8	47,31	46,34	48,25
21750000	1063	1640,2	37,5	29,12	29,67	28,59
22200080	250	1786,9	6,4	8,89	8,62	6,72
21780170	136	1829,9	4,2	6,05	5,13	3,66
21760080	103	1965,5	5,7	5,23	4,05	2,77

Na Figura 7.7 e na Figura 7.8 é mostrada a estimativa da vazão média de longo período com a regressão em função da área e precipitação. Nos gráficos se mostra todo o intervalo de valores para o qual o ajuste é válido (extrapolações da regressão fora do intervalo com dados são muito perigosas e devem ser evitadas), e também o intervalo de confiança de 95% da estimativa e os valores observados utilizados no ajuste. A determinação do intervalo de confiança foi efetuada a partir da estimativa do erro padrão relativo à variável explicativa em análise em cada figura. Na Figura 7.7 é plotado o ajuste em função da área e na Figura 7.8 é graficado o ajuste em função da precipitação. O aspecto quebrado mostrado pelo ajuste nos gráficos se deve a que se trata de um ajuste com duas variáveis, e, portanto, o ajuste se manifesta como uma reta em três dimensões que, projetada num plano, apresenta este aspecto. Por questões de simplicidade de entendimento, não são apresentados gráficos em três dimensões.

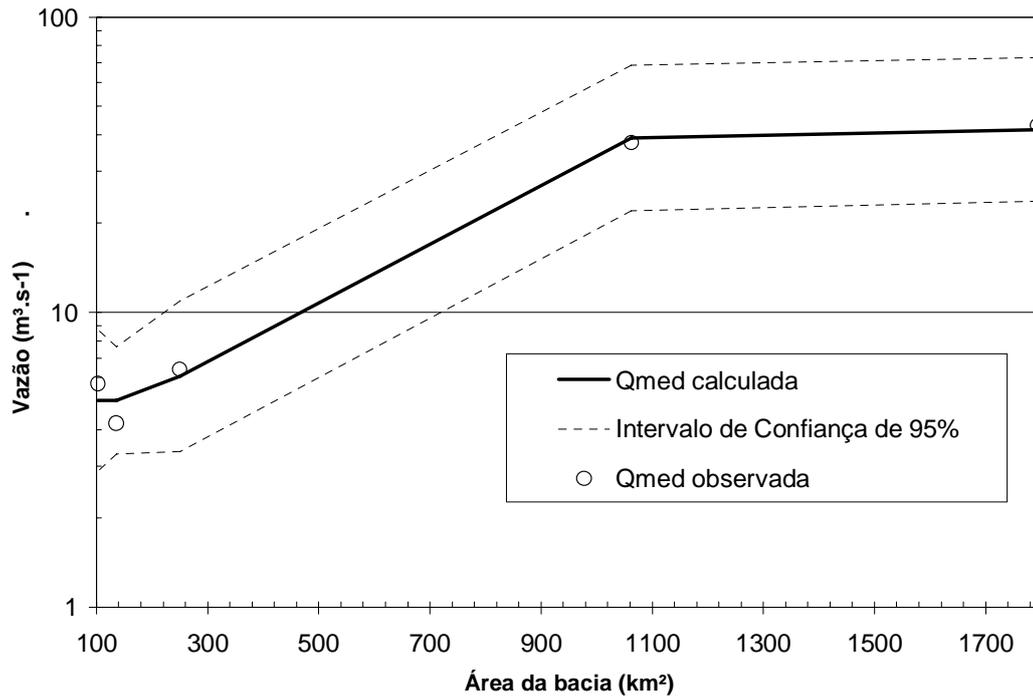


Figura 7.7 - Região 1 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da área com de longo período mediante a fórmula $Q_{med} = (1,714 \cdot 10^{-15}) \cdot A^{1,04} P^{4,05}$

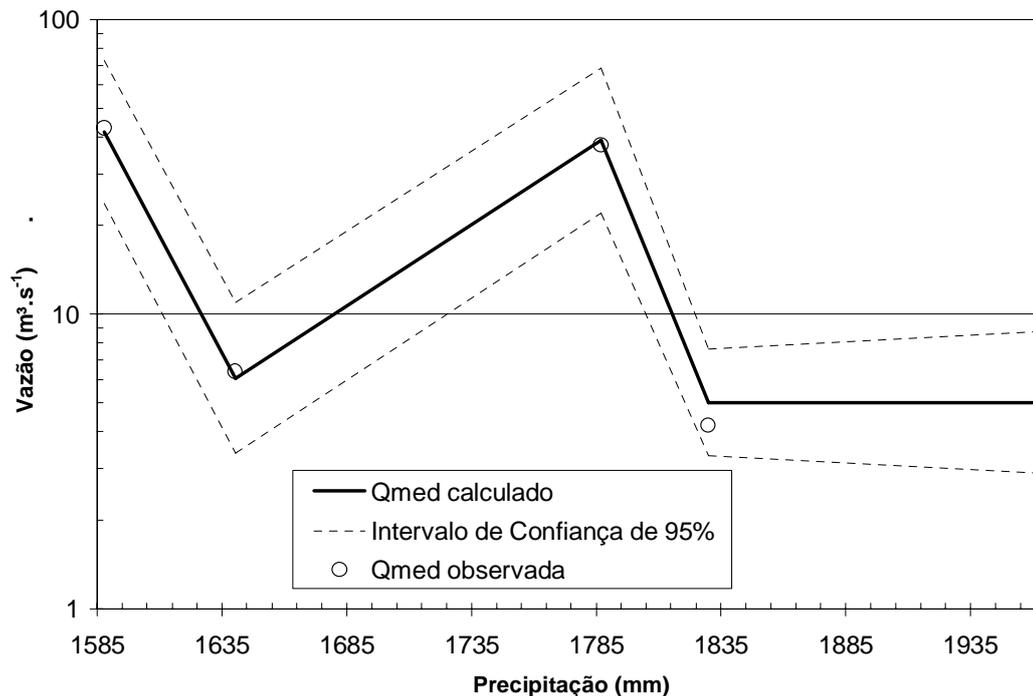


Figura 7.8 - Região 1 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da precipitação com de longo período mediante a fórmula $Q_{med} = (1,714 \cdot 10^{-15}) \cdot A^{1,04} P^{4,05}$

Na Figura 7.9 é apresentado o ajuste da vazão média de longo período com a regressão em função da área. No gráfico são indicados o ajuste, o intervalo de confiança de 95% da estimativa e os valores observados utilizados no ajuste.

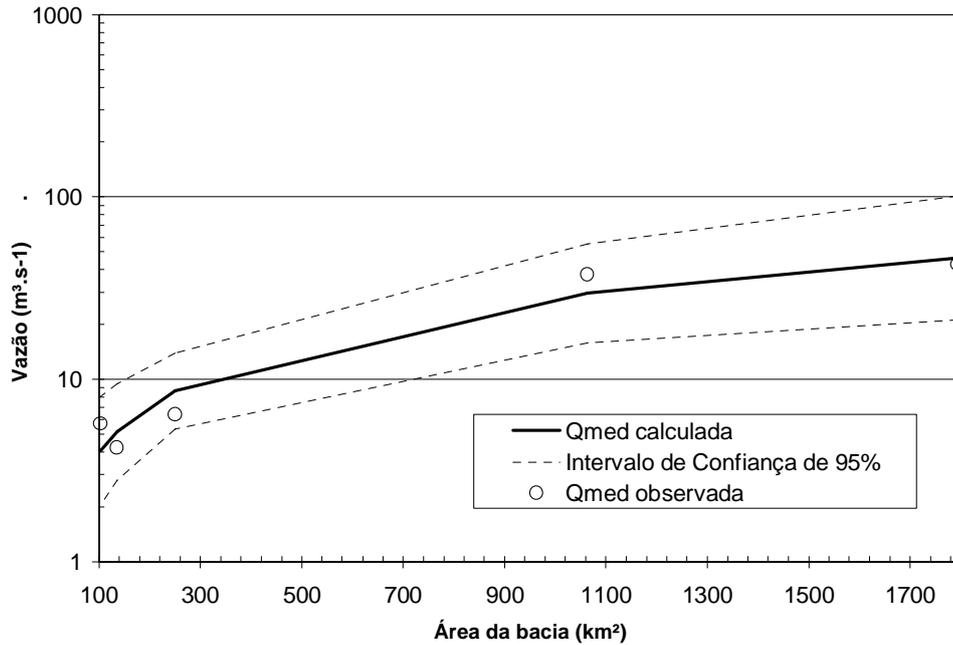


Figura 7.9 - Região 1 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da área com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=0,077A^{0,853}$

Finalmente, na Figura 7.10 é mostrado o ajuste da equação obtida forçando o expoente $b = 1$, junto com os valores medidos e o intervalo de confiança de 95% da estimativa. Observa-se uma grande incerteza, principalmente para bacias menores que 1.000 km², indicando que se deve tomar cuidados ao utilizar esta equação.

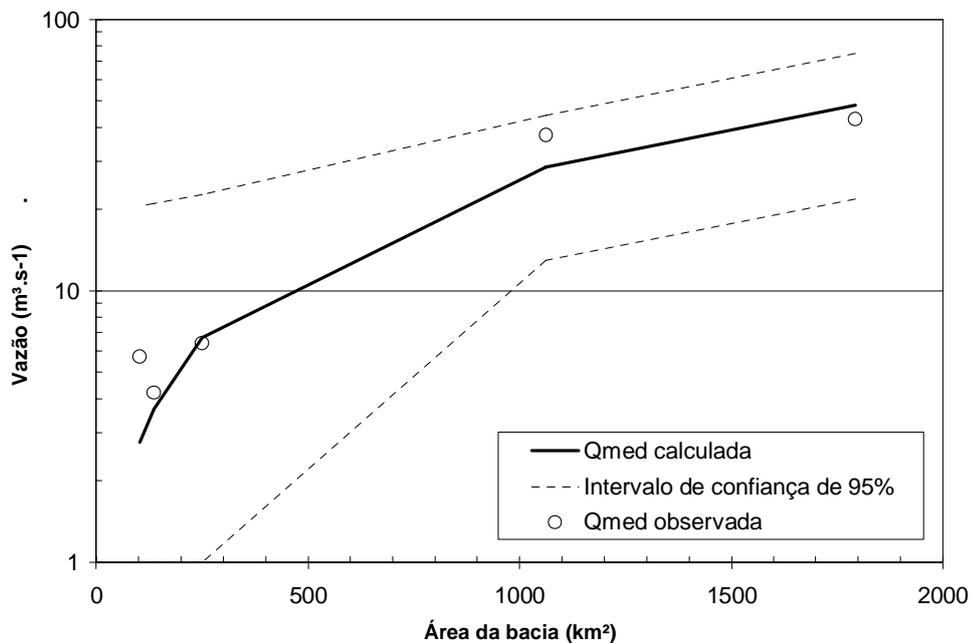


Figura 7.10 - Região 1 - Valores estimativa da vazão média em função da precipitação com de longo período mediante a fórmula $Q_{med}= 0,0269 A$

b) Curva Adimensional Média da Região 1

Os pontos adimensionais dos postos desta região agrupam-se em torno de uma reta (Figura 7.11) A dispersão é reduzida para períodos de retorno inferiores a 10 anos ($y_{\text{GUMBEL}} \leq 2,26$), mas não é excessiva para valores maiores. A equação da reta ajustada sobre o gráfico ($R^2 = 0,94$) permite estabelecer a seguinte relação analítica entre a vazão média adimensional e o período de retorno :

$$q_{\text{med}} = 0,9436 + 0,1019 \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

onde :

q_{med} = vazão média adimensional

T = período de retorno (anos)

A multiplicação da vazão adimensional assim obtida pela vazão média de longo período em um ponto da rede hidrográfica resulta na vazão média anual com período T neste ponto.

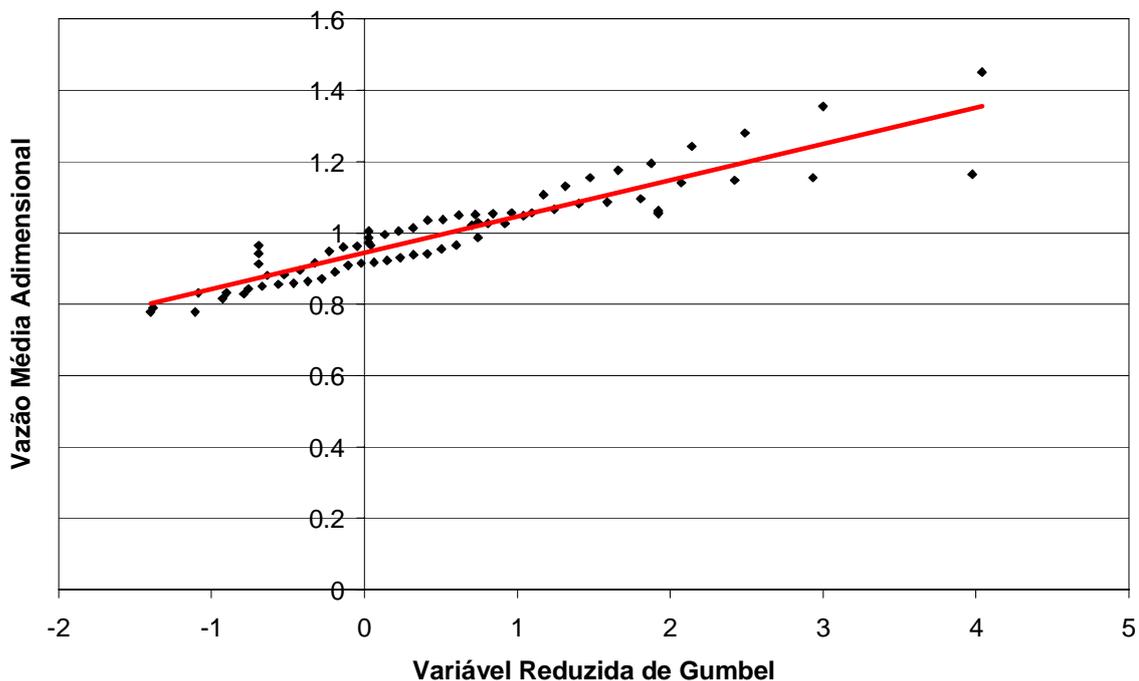


Figura 7.11 - Curva de probabilidade adimensional da vazão média – Região 1 – Clima Seco

7.4.2 Região 2 – Cursos Médio e Inferior dos Rios

Esta região corresponde aos cursos médios e inferiores dos afluentes na margem direita do rio Tocantins dentro do estado de Tocantins. Integram esta região os postos:

23250000, 23230000, 23220000, 23150000, 22900000, 22850000, 22730000, 22700000, 22680000, 22250000, 22220000, 21890000, 21850000, 21650000, 21900000, 22735080, 22351000.

As metodologias de cálculo de variáveis regionalizadas se baseiam em dois valores ou curvas:

a) A primeira é a definição de uma regressão entre as características físicas e a vazão média de longo período, que permita estimar este valor regionalizado.

b) a segunda é a definição da curva adimensional média da região, que é utilizada para estimar o período de retorno de uma vazão média permitindo, portanto, avaliar sua posição entre anos secos e úmidos.

Nos próximos itens serão avaliadas estas curvas.

a) Regressão com Variáveis Físicas – Região 2

Para a região 2 foram obtidas as equações e respectivos R^2 ajustados abaixo com até duas variáveis. A inclusão de maior quantidade de variáveis não melhorou o R^2 ajustado, ou seja, que a incerteza introduzida com maior quantidade de variáveis não compensou a melhora de qualidade do ajuste. A rigor, o melhor ajuste na região para a estimativa da vazão média de longo prazo foi obtida em uma regressão com a área e o coeficiente de forma (kf). No entanto, o valor de R^2 ajustado foi de 0,986 que foi muito similar ao ajuste obtido com a área e a precipitação (R^2 ajustado de 0,985). Dada a grande proximidade entre os valores, a grande incerteza contida nos dados, resultados obtidos por outros pesquisadores e os requerimentos computacionais do software de regionalização (a determinação de área e precipitação envolve muito menos esforço computacional que a determinação de kf), decidiu-se estabelecer a relação com A e P como equação de regressão para o local. O Quadro 7.4 mostra as equações adotadas.

Quadro 7.4 - Regressões das vazões médias de longo período – Região 2

Equação	R^2 ajustado
$Q_{med} = (1,128 * 10^{-8}) A^{0,973} P^{1,95}$	0,985
$Q_{med} = 0,0268 A^{0,941}$	0,978
$Q_{med} = 0,0137 A$	0,925

P em mm ; A em km²

Todas as regressões apresentadas no Quadro 7.4 apresentam um R^2 muito alto (acima de 0,92). É importante ressaltar que o ajuste simplesmente considerando a área da bacia foi

muito bom (R^2 ajustado de 0,978), e que, por ser um valor muito simples de obter, colabora para a robustez da regionalização, levando à conclusão de que apenas área como variável explicativa é suficiente para uma boa estimativa da vazão média de longo período na margem direita do rio Tocantins no estado de Tocantins na região 2. Ela indica um valor da vazão média específica para a região 2 de $13,7 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, menor que o da região 1, o que era de se esperar, uma vez que a vazão média específica diminui com o aumento da área da bacia.

No Quadro 7.5 são indicados os valores observados junto com os calculados para cada um dos postos desta região. Observa-se nos dados de regionalização desta região que o menor valor da área obtido no Posto de Taquarussu Grande (22351000) de 186 km^2 é significativamente menor que o segundo menor valor (posto 23150000) com 2.834 km^2 . Esta diferença significa que o valor do Posto de Taquarussu Grande influencia significativamente a regressão já que não se encontram dados com área semelhante na região analisada. Alguns autores como Netter et al (1985) consideram muito perigoso utilizar este valor e indicam que valores muito extremos devem ser indicados como outliers. Em função da limitação dos dados existentes (temporal e espacialmente) o valor inicialmente será aceito, mas se recomenda extrema precaução no uso da regressão para bacias com áreas entre 180 e 2.800 km^2 .

Na Figura 7.12 e na Figura 7.13 é mostrada a estimativa da vazão média de longo período com a regressão em função da área e precipitação. Nos gráficos se mostra todo o intervalo de valores para o qual o ajuste é válido e também o intervalo de confiança de 95% da estimativa e os valores observados utilizados no ajuste. Na Figura 7.14 se observa a regressão em que a vazão média de longo período é obtida em função da área. Embora o ajuste tenha sido muito bom, se observa que alguns pontos ficaram de fora do intervalo de confiança do ajuste. Este comportamento está influenciado pelo efeito do posto de Taquarussu Grande.

Quadro 7.5 - Valores observados e calculados das vazões médias de longo período – Região 2

Código	Área (km ²)	Precip. Média (mm)	Vazão Méd. de Longo Período (m ³ .s ⁻¹)	$Q_{med} = (1,128 \cdot 10^{-8}) A^{0,973} P^{1,95}$	$Q_{med} = 0,0268 A^{0,941}$	$Q_{med} = 0,0137 A$
23250000	10036,0	1641,3	160,1	164,27	155,71	137,54
23230000	4073,0	1680,6	75,8	71,53	66,64	55,88
23220000	2987,0	1583,3	33,5	47,09	49,77	40,93
23150000	2834,0	1791,3	53,9	56,92	47,37	38,84
22900000	43983,0	1617,5	741,1	672,32	625,59	602,78
22850000	9470,0	1668	175,7	160,21	147,44	129,78
22730000	4737,0	1569	95,4	72,47	76,82	64,92
22700000	18061,0	1609,6	306,2	280,10	270,70	247,52
22680000	16991,0	1605,8	306,3	262,73	255,60	232,86
22250000	14452,0	1551,4	196,6	209,86	219,47	198,06
22220000	10370,0	1536,1	143,4	149,03	160,58	142,12
21890000	17857,0	1722,6	268,7	316,21	267,82	244,73
21850000	12892,0	1852,3	230,1	265,33	197,10	176,68
21650000	40219,0	1498,4	433,07	530,88	575,07	551,20
21900000	58128,0	1567,1	700,5	829,08	813,38	796,64
22735080	8059,0	1560,1	102,1	120,19	126,67	110,44
22351000	186,0	1722,7	3,5	3,73	3,65	2,54

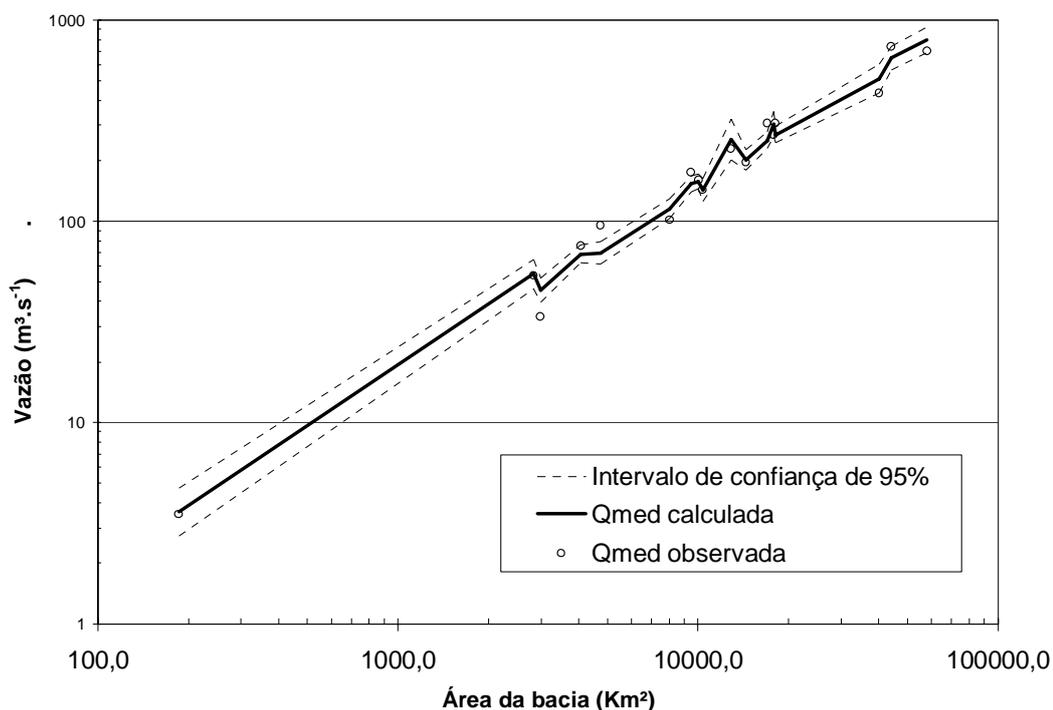


Figura 7.12 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da área com de longo período mediante a fórmula $Q_{med} = (1,128 \cdot 10^{-8}) \cdot A^{0,973} \cdot P^{1,95}$

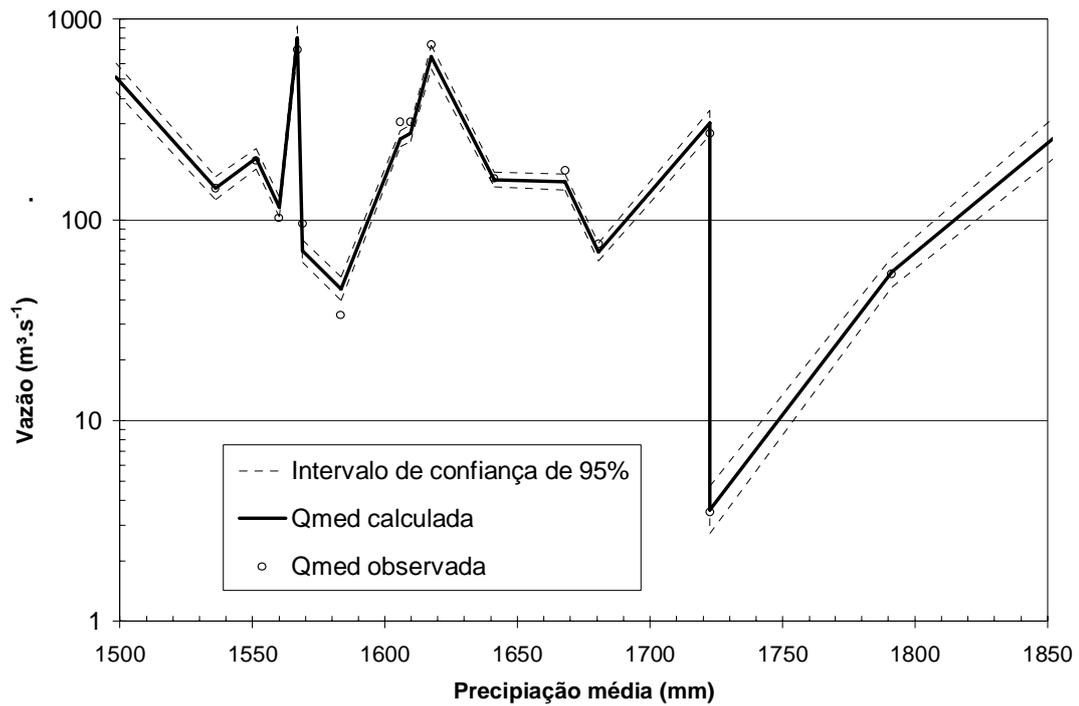


Figura 7.13 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média em função da precipitação com de longo período mediante a fórmula $Q_{med} = (1,128 \cdot 10^{-8}) \cdot A^{0,973} \cdot P^{1,95}$

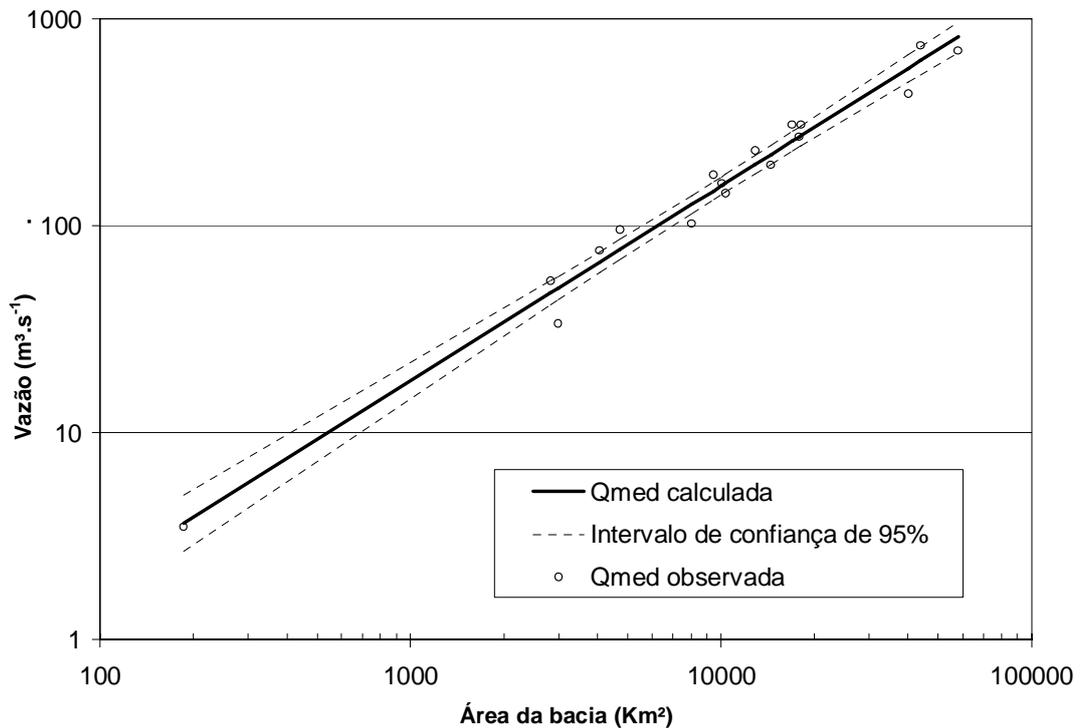


Figura 7.14 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de longo período mediante a fórmula $Q_{med} = 0,0268 \cdot A^{0,941}$

A Figura 7.15 mostra o ajuste da equação que permite obter a vazão média de longo período em função da área. O R^2 obtido indica um ajuste muito bom. No entanto, o efeito das grandes diferenças nas áreas menores introduz grandes incertezas indicadas pela grande

amplitude do intervalo de confiança de 95%. Também resulta importante que as vazões de longo período para os postos com mais de 10.000 km² foram subestimadas. Esta equação, embora forneça uma idéia expedita do valor da vazão específica deve ser utilizada com cuidados.

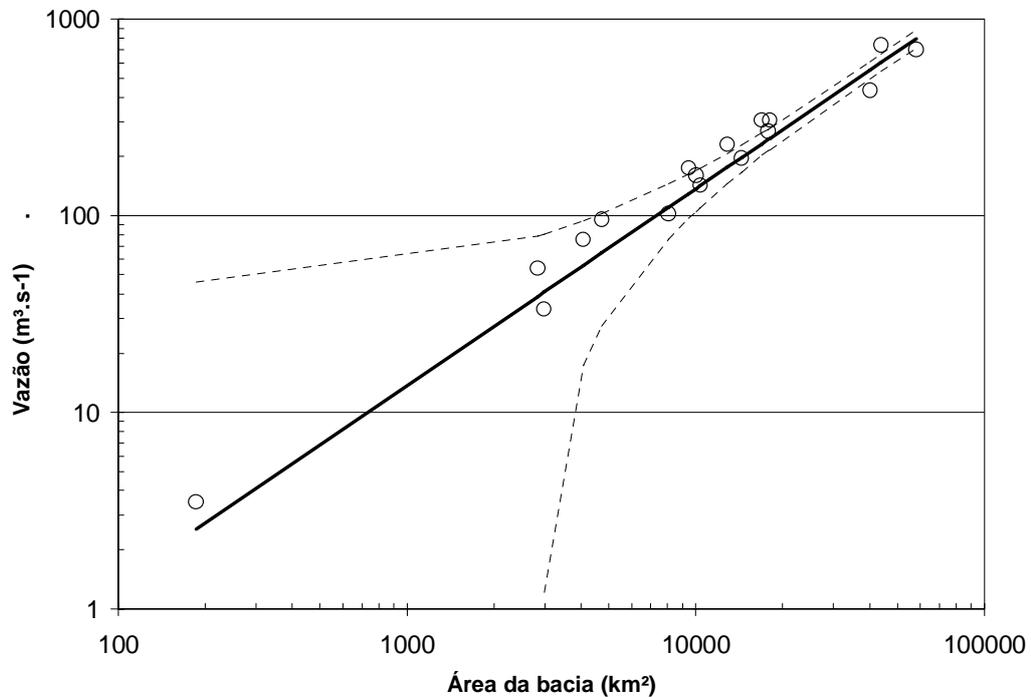


Figura 7.15 - Região 2 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de longo período mediante a fórmula $Q_{med}=0,0137.A$

b) Curva Adimensional Média da Região 2

Os pontos adimensionais dos postos desta região agrupam-se em torno de uma reta (Figura 7.16) A dispersão é reduzida para períodos de retorno inferiores a 10 anos ($Y_{GUMBEL} \leq 2,26$), mas é significativa para valores maiores, devendo utilizar-se com cuidados. A equação da reta ajustada sobre o gráfico ($R^2 = 0,96$) permite estabelecer uma relação analítica entre a vazão média adimensional e o período de retorno:

$$q_{med} = 0,8929 + 0,1908 \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

onde :

q_{med} = vazão média adimensional

T = período de retorno (anos)

A multiplicação da vazão adimensional assim obtida pela vazão média de longo período em um ponto da rede hidrográfica resulta na vazão média anual com período T neste ponto.

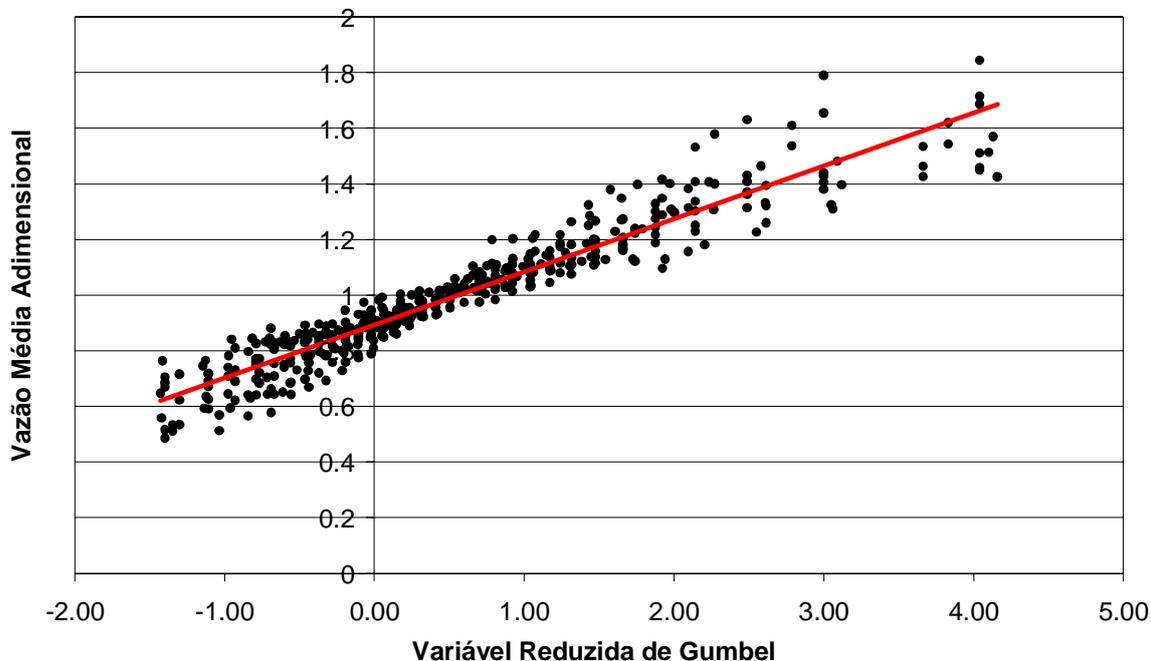


Figura 7.16 - Região 2 - Curva de probabilidade adimensional da vazão média

7.5 Roteiro de Cálculo da Vazão Média Anual para um Período de Retorno T

Uma vez definidas as equações analíticas, tanto para a vazão média de longo período como para vazão adimensional dependente de T, o cálculo da vazão média anual para este mesmo período de retorno T, depende apenas de medidas prévias de área e a precipitação média anual, conforme a região homogênea.

Assim, em função da posição do local onde se pretende estimar a vazão (Figura 7.6) deve-se determinar a região. Se o local se encontra na região 1, deve-se seguir o procedimento do item 7.5.1; se o local encontra-se na região 2, deve-se seguir o procedimento descrito no item 7.5.2.

7.5.1 Roteiro de Cálculo para a Região 1:

Para a região que inclui a maioria das cabeceiras dos rios da região, a equação principal é:

$$Q_{med}(T) = (1,714 \cdot 10^{-15}) A^{1,04} P^{4,05} \left\{ 0,9436 + 0,1019 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}$$

onde: a área A deve ser dada em km², P em mm e T em anos.

A equação alternativa é:

$$Q_{med}(T) = 0,0216 A^{0,853} \left\{ 0,9436 + 0,1019 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}$$

onde: a área A deve ser dada em km² e T em anos.

7.5.2 Roteiro de Cálculo para a Região 2

Para a região que inclui os cursos médios e inferiores dos rios da região, a equação principal é:

$$Q_{med}(T) = (1,128 \cdot 10^{-8}) A^{0,973} P^{1,95} \left\{ 0,8929 + 0,1908 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}$$

onde: a área A deve ser dada em km², P em mm e T em anos.

A equação alternativa é:

$$Q_{med}(T) = 0,0268 A^{0,941} \left\{ 0,8929 + 0,1908 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}$$

onde: a área A deve ser dada em km² e T em anos.

7.6 Limitações

A regionalização das vazões médias na margem direita do rio Tocantins no Estado de Tocantins, não se aplica em princípio, a bacias pequenas porque a maior parte dos postos fluviométricos analisados tem áreas contribuintes maiores que 1.000 km². Vide os respectivos limites nos gráficos de cada região.

Em termos de representatividade temporal, muitas séries têm menos de cinco anos; desta forma, é possível que as vazões médias analisadas não estimem a verdadeira média de longo período.

7.7 Exemplo de Aplicação

Para a avaliação do máximo teórico de regularização em um local, se deseja conhecer a vazão média de longo período nas coordenadas -10°46' e -47°47'.

Também foi determinado por um estudo fictício desenvolvido por uma consultora que o tempo de retorno de 15 anos caracteriza corretamente um ano úmido típico. Deseja-se conhecer qual o valor da vazão média durante um ano úmido.

Solução:

Em função das coordenadas e com um software de geoprocessamento foi encontrada que a área correspondente a esse local tem 4.737 km² e localiza-se na região 2 das vazões médias.

Como não se dispõe de dados de precipitação para o local, se utilizará a equação alternativa que somente utiliza como dados de entrada a área da bacia.

Neste caso como o valor solicitado é simplesmente a vazão de longo período se utilizam as equações indicadas no Quadro 7.4.

$$Q_{med} = 0,0268 \cdot A^{0,941} = 0,0268 \cdot 4737^{0,941} = 77,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Para a estimativa da segunda parte da questão pode utilizar-se diretamente a fórmula indicada no roteiro.

$$Q_{med}(T) = 0,0268 A^{0,941} \left\{ 0,8929 + 0,1908 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \Rightarrow 108,11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

8 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS

8 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS

8.1 Vazão Máxima

A vazão máxima é uma variável hidrológica que permite caracterizar cheias (enchentes) e inundações. É a vazão de pico dos hidrogramas de cheia. Em cada ano hidrológico (para cheias), e em cada ponto da rede hidrográfica, podem ser definidas várias vazões máximas, em função do período de retorno e do intervalo de tempo de registro da série de vazões. É muito comum estarem disponíveis séries de vazões diárias.

Em postos fluviométricos com disponibilidade de vazões médias diárias a vazão máxima anual é o maior valor dos 365 dias (ou 366, no caso de ano bissexto). Entretanto, a vazão máxima de maior interesse é a vazão máxima instantânea que reflete a verdadeira potencialidade da bacia em produzir eventos extremos. A vazão máxima instantânea é maior que a vazão máxima diária e a diferença torna-se maior à medida que a área da bacia e o tempo de concentração diminuem. A vazão máxima instantânea só pode ser avaliada com maior precisão em estações fluviométricas dotadas de linígrafo com registros a intervalos de tempo curtos. Como a maioria das estações fluviométricas apresenta séries de vazões diárias, torna-se necessário o uso de relações entre vazões máximas instantâneas e vazões máximas diárias derivadas de postos com linígrafos.

As vazões máximas são de grande importância para o estudo de risco de inundações e para o dimensionamento de dispositivos de proteção de obras hidráulicas, como vertedores de barragens e ensecadeiras.

Assim como as vazões médias, as vazões máximas anuais de um ponto da rede hidrográfica oscilam entre valores mais altos e valores mais baixos, dentro de um quadro de comportamento natural. Na abordagem clássica estatística, a série de vazões máximas anuais é admitida como uma série independente, estacionária e não-periódica, o que permite analisar suas frequências através do ajuste de uma distribuição de probabilidades. Naturalmente, se a série não tiver as características acima, haverá distorção nas frequências, em maior ou menor grau.

Neste estudo de regionalização, chamaremos simplesmente de vazão máxima a vazão máxima anual associada a um período de retorno - inverso da frequência de excedência - oriunda de uma distribuição de probabilidades. Salvo em item específico dedicado às vazões máximas instantâneas, as vazões máximas abordadas no texto têm duração diária.

8.2 Vazão Média de Cheia

A vazão média de cheia é o valor esperado, em linguagem estatística, das vazões máximas de um ponto da rede hidrográfica. Ela tem a ordem de grandeza da vazão de extravasamento do leito menor do rio.

A vazão média de cheia considerada neste texto é a média das vazões máximas diárias anuais. Numa série estacionária de vazões máximas diárias anuais, é o valor em torno do qual flutuarão as vazões médias anuais, sendo, por isso, um parâmetro importante da distribuição destas vazões máximas. Em postos fluviométricos com dados disponíveis de vazão diária, a vazão média de cheia é estimada pela média das vazões máximas anuais de todos os anos.

As séries existentes nos postos da CELTINS e NATURANTINS não foram suficientes para uma correta caracterização das curvas de vazões máximas. Entre as causas deste comportamento se encontram o efeito da operação das PCHs existentes e o tamanho das séries, além dos diversos problemas encontrados na curva chave, derivados principalmente das poucas medidas de descarga existentes. No Quadro 8.1 estão listados os 17 postos utilizados, suas vazões médias de longo período e as características explicativas que foram analisadas no processo de regressão (*stepwise*) da regionalização.

Quadro 8.1 - Vazão média de cheia e índices fisiográficos na região estudada

Código ANA	Código Mapa	A (km ²)	P (mm)	Per (km)	kc	kf	L (km)	S (%)	DD (km/km ²)	Q _{méd. de Cheia} (m ³ .s ⁻¹)
23250000	1	10036	1641,3	789	2,21	0,18	233,9	0,13	0,81	604,5
23230000	2	4073	1680,6	516	2,26	0,18	151,9	0,11	0,82	379,6
23220000	3	2987	1583,3	447	2,29	0,15	143,2	0,16	0,74	174,7
23150000	4	2834	1791,3	374	1,97	0,36	88,7	0,15	0,79	298,4
22900000	5	43983	1617,5	1470	1,96	0,29	392,7	0,16	0,81	2692,3
22850000	6	9470	1668,0	822	2,37	0,21	212,2	0,16	0,81	1022,6
22730000	7	4737	1569,0	675	2,74	0,13	188,0	0,21	0,81	452,3
22700000	8	18061	1609,6	1054	2,20	0,21	295,2	0,20	0,76	1182,7
22680000	9	16991	1605,8	1085	2,33	0,23	271,5	0,21	0,74	1358,8
22250000	10	14452	1551,4	932	2,17	0,13	331,7	0,11	0,80	1383,8
22220000	11	10370	1536,1	746	2,05	0,17	250,6	0,13	0,79	1058,6
22190000	12	1794	1587,7	304	2,01	0,22	89,3	0,25	0,70	169,8
21890000	13	17857	1722,6	1334	2,80	0,17	323,7	0,15	0,72	1761,3
21850000	14	12892	1852,3	1056	2,60	0,33	198,0	0,22	0,72	1340,0
21750000	15	1063	1786,9	303	2,60	0,24	67,2	0,56	0,74	184,3
21650000	16	40219	1498,4	2031	2,84	0,09	654,6	0,09	0,72	3125,3
21900000	17	58128	1567,1	2544	2,95	0,14	653,3	0,09	0,74	5220,6

onde: $kc = 0,28.Per.A^{-1/2}$; $kf = A.L^{-2}$; A = área da bacia; Per = perímetro da bacia; L = comprimento do rio principal; S = declividade do rio principal

8.3 *Curvas Adimensionais de Probabilidade da Vazão Máxima*

À semelhança do que foi feito para as vazões médias, foram estabelecidas as frequências empíricas dos valores de vazão máxima anual das séries disponíveis para cada um dos 17 postos obtidos fluviométricos obtidos da Hidroweb.

Lamentavelmente, as séries existentes nos postos da CELTINS, NATURANTINS e SEPLAN não foram suficientes para uma correta caracterização das curvas de vazões adimensionais pelos problemas já mencionados nos itens anteriores. Na análise das curvas de probabilidade da vazão adimensionalizada dos postos administrados por organismos estaduais foram utilizadas tanto séries anuais como séries parciais, também denominada de análise sobre um patamar, mas nenhuma das alternativas forneceu valores consistentes.

Posteriormente, os valores de vazão máxima anual foram adimensionalizados pela vazão média de cheia. Obtiveram-se então, as curvas de vazões adimensionais em função das probabilidades de ocorrência. As curvas de todos os postos foram sobrepostas para confirmar, por semelhança de tendências, a divisão das regiões homogêneas.

As probabilidades empíricas foram estabelecidas com a seguinte expressão:

$$p = \frac{i - 0,44}{n + 0,12}$$

onde :

p = probabilidade da vazão ser igualada ou superada ;

i = ordem da vazão (série ordenada de forma decrescente) ;

n = tamanho da série

Os pontos de todas as séries foram plotados com a ajuda da variável reduzida de Gumbel para comparação e distinção de regiões homogêneas :

$$y_{\text{GUMBEL}} = -\ln[-\ln(1 - p)]$$

A plotagem dos pares de pontos (y_{GUMBEL} , p) de todos os postos geram uma ‘nuvem’ de pontos que é trabalhada empiricamente, mas com uma lógica espacial hidrológica, para separar tendências diferentes que configurem regiões homogêneas distintas. Na Figura 8.1 se observa a plotagem das curvas adimensionais para cada posto fluviométrico analisado.

Vazões Máximas Regiões 1, 2, 3 e 4

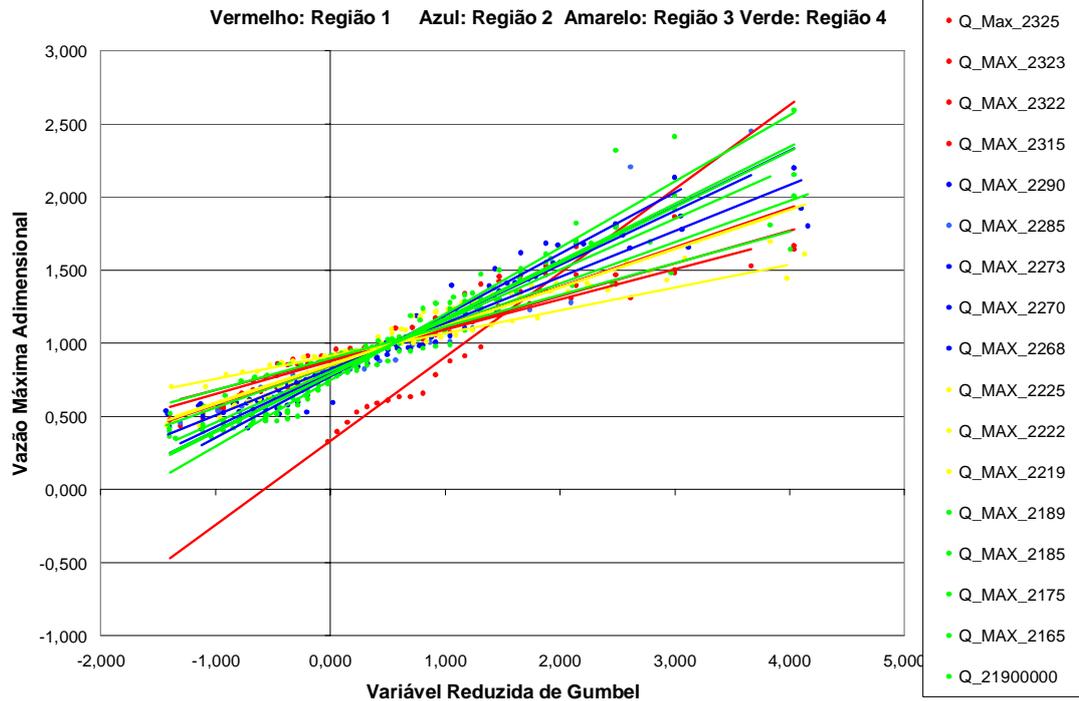


Figura 8.1 - Curvas adimensionais das vazões máximas para os postos obtidos do site da ANA

A declividade da reta ajustada a cada posto foi comparada com diferentes características fisiográficas da região analisada: Clima (Figura 8.2); Declividade média no trecho (Figura 8.3); Ambientes geológicos (Figura 8.4); Tipos de solos (Figura 8.5). Foram inicialmente identificadas quatro regiões para serem utilizadas na regionalização de vazões máximas: a região 1, das bacias dos rios Manoel Alves Grande e Manoel Alves Pequeno (4 postos); a região 2, da bacia do Rio do Sono (6 postos); a região 3, do rio Manoel Alves da Natividade (3 postos); e a região 4, do rio da Palma (4 postos). Observou-se impraticável dividir a área em quatro diferentes regiões, pois o pequeno número de postos por região reduz o número de graus de liberdade do ajuste, o que faz com que as incertezas geradas invalidem o ajuste. É importante destacar que todos os postos utilizados apresentaram sérios problemas para as vazões máximas, já que as cotas máximas correspondentes às descargas medidas estão abaixo dos valores máximos registrados nas réguas. Porém, foram os únicos postos disponíveis e, por isto, foram adotados, com os devidos cuidados.

Optou-se, assim, pela regionalização da vazão máxima de cheia em uma única região, que engloba todos os afluentes do rio Tocantins pela margem direita dentro do estado de Tocantins, como apresentado na Figura 8.6. Deve-se destacar a ausência de informação na região do Jalapão, o que faz com que qualquer estimativa de vazão nesta área deva ser utilizada com muitos cuidados.

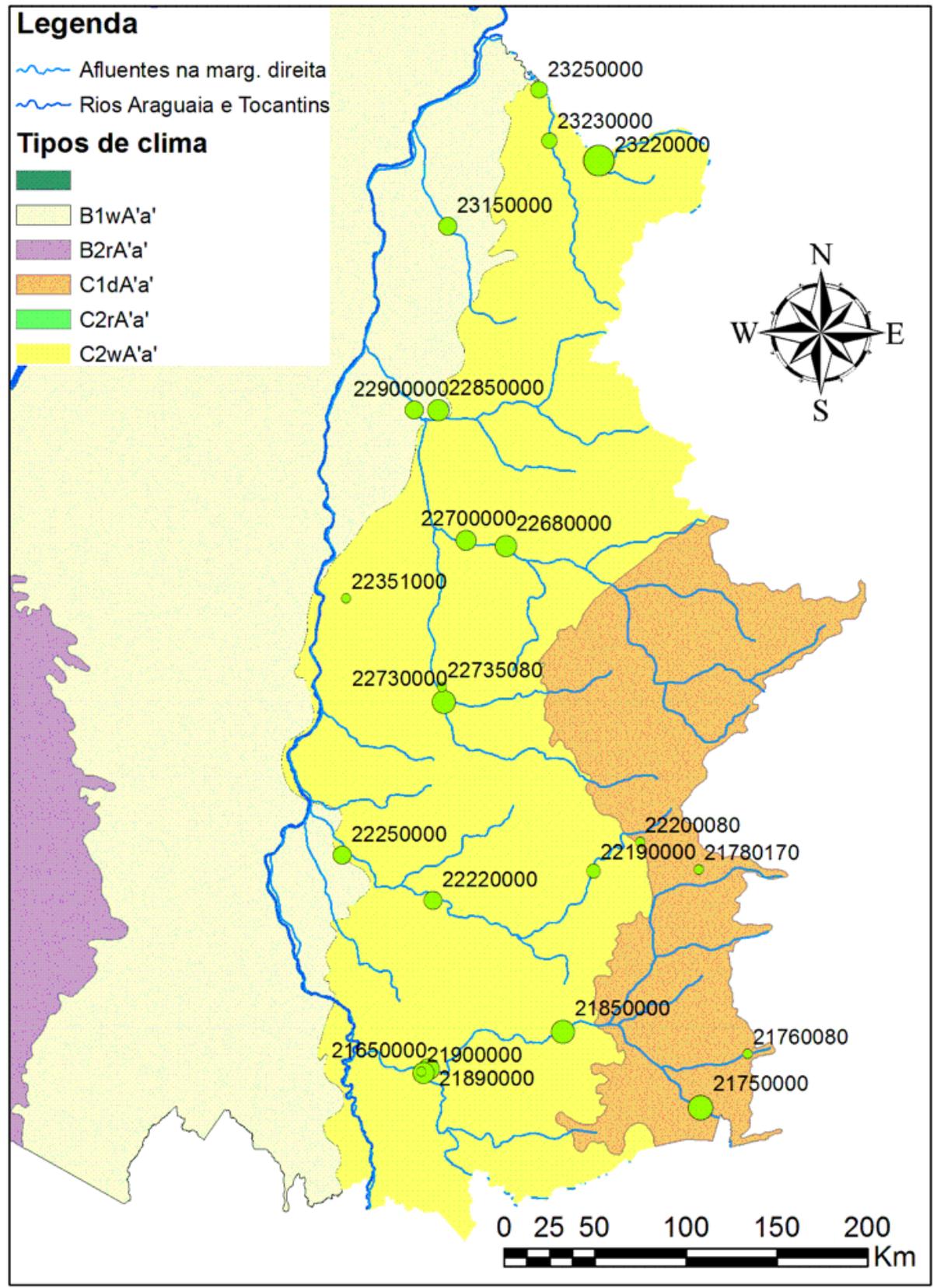


Figura 8.2 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho dos círculos) e regiões climáticas segundo Köppen

Legenda

-  Afluentes na marg. direita
-  Rios Araguaia e Tocantins

Declividade

CLASSES_D

-  F (>45%)
-  E (30-45%)
-  DC
-  D (15-30%)
-  CD
-  CB
-  C (10-15%)
-  BC
-  BA
-  B (5-10%)
-  AB
-  A (<5%)

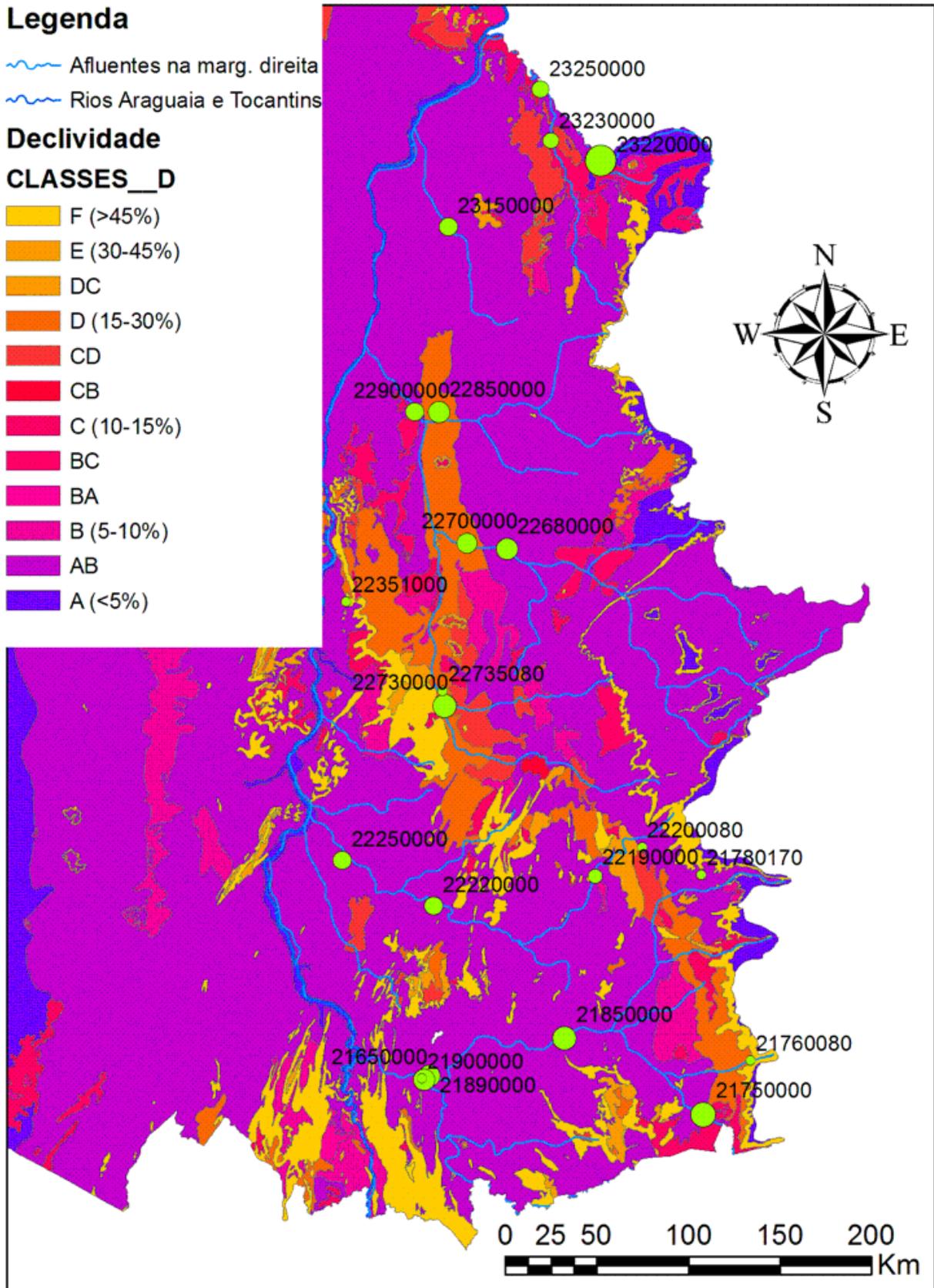
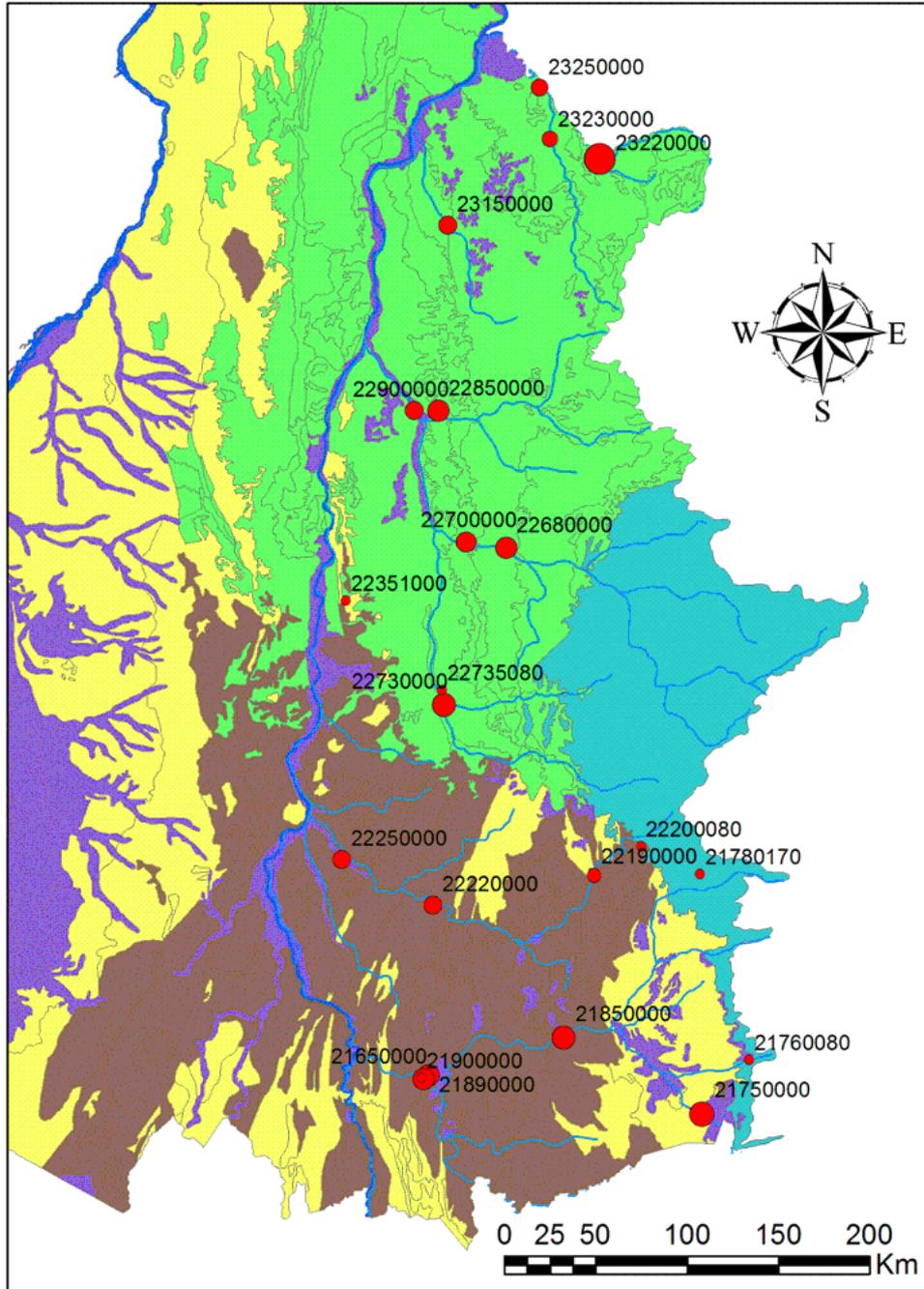


Figura 8.3 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho do círculo) e declividade do terreno



Legenda

-  Afluentes na marg. direita
-  Rios Araguaia e Tocantins

Ambientes geológicos

-  Bacia Sedimentar do Parnaíba
-  Bacia Sedimentar do São Francisco
-  Coberturas Cenozóicas
-  Compl. Metamórficos e Seq. Vulcano-sedimentares do Arqueano e Proterozóico Inferior
-  Faixa de Dobramentos do Proterozóico Médio e Superior
-  Rio Araguaia
-  Rio Tocantins

Figura 8.4 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho dos círculos) e ambientes geológicos

Legenda

- Afluentes na marg. direita
- Rios Araguaia e Tocantins

Tipos de solo

NOME

- Areias Quartzosas
- Areias Quartzosas Hidromórficas
- Cambissolo
- Hidromórfico Gleizado
- Latossolo Amarelo
- Latossolo Roxo
- Latossolo Vermelho-Amarelo
- Latossolo Vermelho-Escuro
- Plintossolo
- Podzólico Vermelho-Amarelo
- Podzólico Vermelho-Escuro
- Solos Concrecionários
- Solos Litólicos

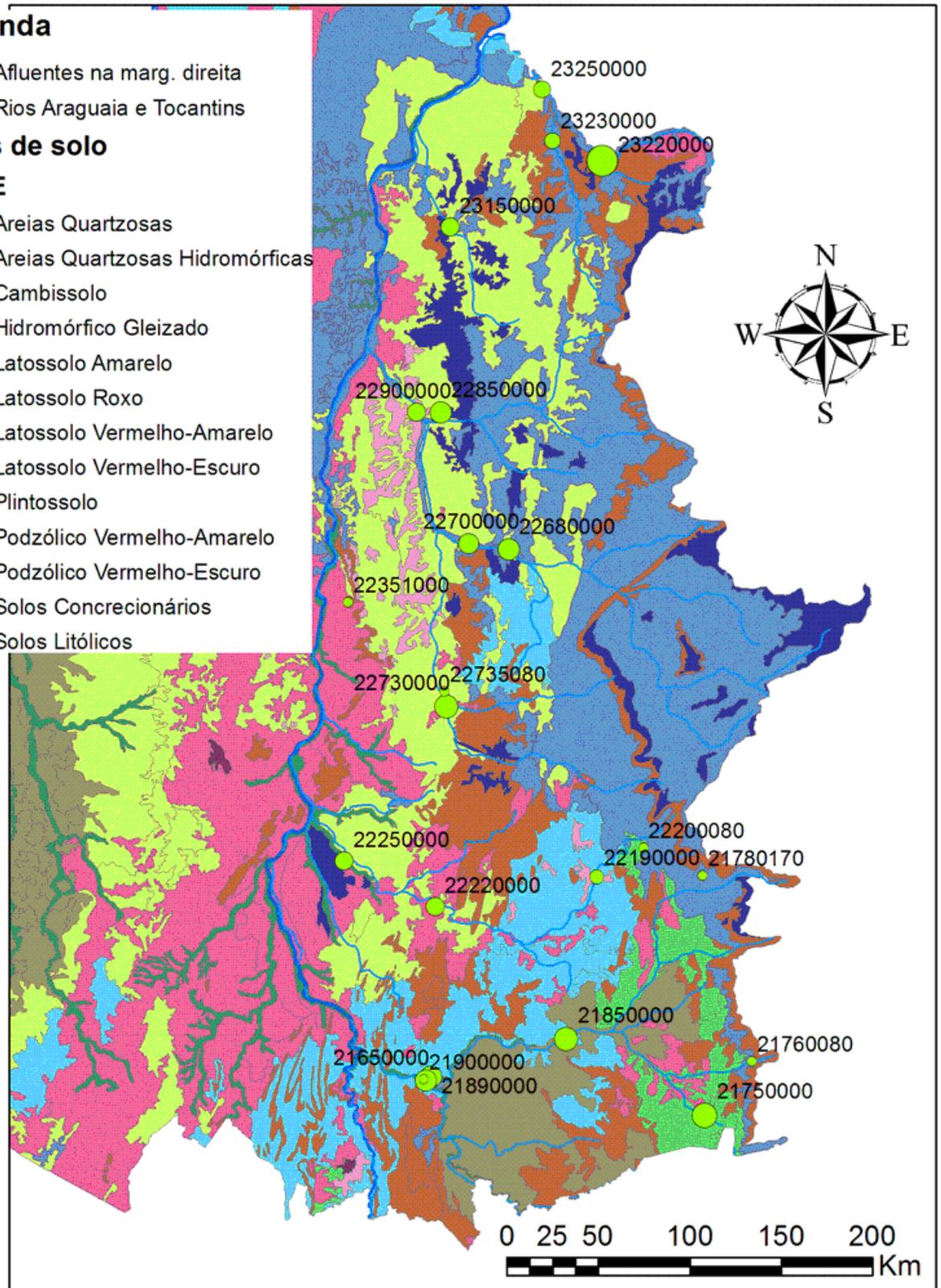


Figura 8.5 - Declividade das retas de probabilidades adimensionais de vazões máximas (tamanho do círculo) e tipos de solo

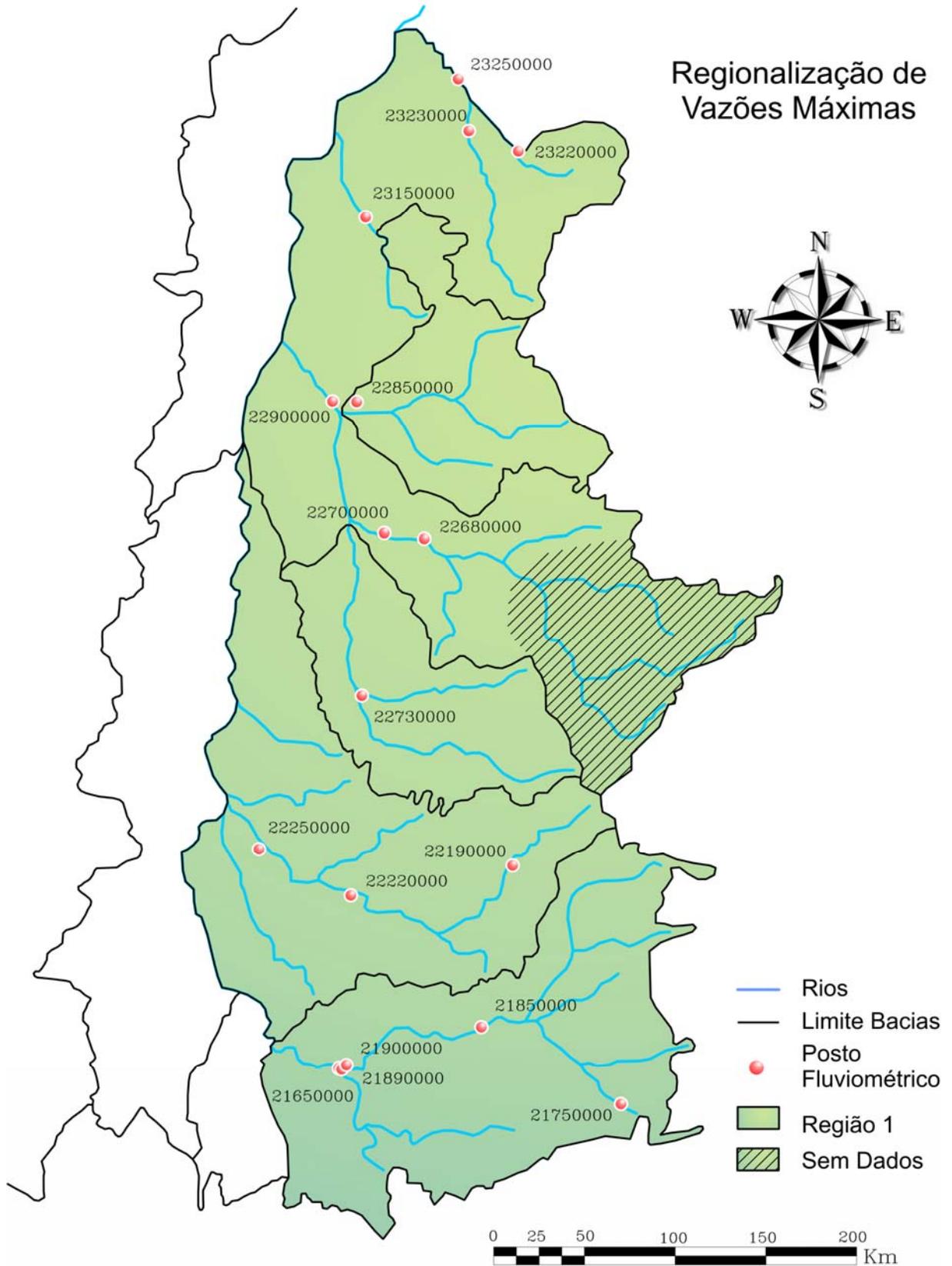


Figura 8.6 - Região única identificada para regionalização das vazões máximas

8.4 Regionalização da Vazão Máxima

De modo análogo ao realizado para as vazões médias, o método de regionalização analisa a semelhança das séries de vazões máximas anuais dos diversos postos fluviométricos, separando a análise estatística em duas funções básicas:

- Vazão média de cheia definida por características fisiográficas e climáticas da bacia (regressão da vazão média de cheia) (item 8.5).
- Distribuição de probabilidades das vazões máximas anuais adimensionalizadas pela vazão média de cheia (curva adimensional de probabilidade da vazão máxima)(item 8.6);

As regiões homogêneas são definidas pelos agrupamentos espaciais dos postos que apresentam, simultaneamente, os melhores indicadores de ajustamento das equações de regressão e as menores dispersões das curvas adimensionais de probabilidades. Nesse caso, e como comentado no item anterior é utilizada uma única região.

Para a região homogênea o método estima primeiro a vazão média de cheia, em função de características físicas e climáticas. Em seguida, obtém-se o valor procurado de uma vazão máxima, com determinado período de retorno, multiplicando-se a vazão média de cheia pelo valor da curva adimensional, com o período de retorno requerido.

8.5 Regressão da Vazão Média de Cheia

Os postos selecionados para regressão da vazão média de cheia são os 17 postos obtidos da Agência Nacional de Águas. Os demais postos foram descartados pelas razões já expostas.

As variáveis explicativas testadas pelo método *stepwise* também foram as mesmas indicadas no Quadro 8.1: A, P, Per, kc, kf, L, S, e DD. As medidas das variáveis fisiográficas referem-se à escala 1:100.000 e valores determinados a partir do modelo numérico SRTM.

Em princípio, fisicamente, todas estas variáveis explicativas podem integrar uma equação de regressão de vazão média de cheia; entretanto, a correlação entre elas pode reduzir seu número no corpo da equação, embora isto não signifique que as variáveis explicativas ausentes deixem de ter um papel físico na gênese das cheias.

Destaque-se que nem todas as variáveis explicativas escolhidas (Quadro 8.1) são independentes entre si, influenciando no processo de regressão, onde a agregação de mais uma ou diversas variáveis pode alterar significativamente os valores numéricos inicialmente obtidos

dos expoentes ou coeficientes da equação de regressão. Isto é normal, pois mesmo adicionando-se uma variável explicativa altamente correlacionada à outra (caso de comprimento em relação a área), ela sempre traz alguma informação nova, melhorando a regressão, mas mudando os parâmetros da equação. Esta característica estatística se denomina multicolinearidade. Só o que se tem que avaliar é se este ganho de informação é significativo para manter a variável adicionada da equação. Por uma questão de parcimônia e facilidade de uso é preferível uma equação de regressão com um mínimo de variáveis explicativas, para níveis de precisão semelhantes.

A equação de regressão procurada para cada região homogênea tem a seguinte forma potencial multivariada:

$$Q_{med} = a \cdot A^b \cdot P^c \cdot Per^d \cdot kc^e \cdot kf^f \cdot L^g \cdot S^h \cdot DD^i$$

O ajuste da equação de regressão corresponde ao ajuste dos parâmetros a, b, c, d, e, f, g, h, i de acordo com os dados de cada região. Neste estudo, a metodologia de ajuste foi por regressão linear múltipla dos logaritmos naturais dos termos da equação:

$$\ln(Q_{med}) = \ln a + b \cdot \ln A + c \cdot \ln P + d \cdot \ln Per + e \cdot \ln kc + f \cdot \ln kf + g \cdot \ln L + h \cdot \ln S + i \cdot \ln DD$$

A avaliação da qualidade da regressão foi realizada com o cálculo do coeficiente de determinação R^2 e dos erros padrão e percentuais. O R^2 considerado foi o não tendencioso, que corrige o efeito dos graus de liberdade a menos que cada variável explicativa introduz.

Para análise e indicação de uma regressão para uso, foram realizados quatro tipos de ajustes:

- ❑ Regressão com todas as variáveis explicativas (A, P, Per, kc, kf, L, S e DD), com escolha automática daquelas mais significativas (método *stepwise*);
- ❑ Regressão só com a área da bacia, admitindo um expoente “b” diferente de um;
- ❑ Regressão somente com a área, forçando o expoente $b = 1$.

O método *stepwise* indicou como variáveis significativas a área contribuinte e o coeficiente de compactidade Kc. Todas as regressões efetuadas, mesmo aquelas com a área e forçando o expoente a ser igual a um, podem ser consideradas como muito boas, quando se analisa apenas o R^2 , como mostra o Quadro 8.2.

Quadro 8.2 - Regressões das vazões médias de cheia

Equação	R ²
$Q_{max}=0,147 \cdot A^{0,867} \cdot Kc^{0,833}$	0,951
$Q_{max}=0,2385 \cdot A^{0,892}$	0,943
$Q_{max} = 0,080 A$	0,910

A em km²

No Quadro 8.3 são indicados os valores observados junto com os calculados para cada um dos postos desta região.

Quadro 8.3 - Vazões médias de cheia observadas e calculadas

Código ANA	Área (km ²)	Precip. (mm)	Kc	Vazão média de cheia (m ³ /s)	Regressão1	Regressão2	Regressão3
23250000	10036	1641,3	2,21	604,5	838,59	814,85	802,88
23230000	4073	1680,6	2,26	379,6	390,92	371,26	325,84
23220000	2987	1583,3	2,29	174,7	302,06	248,14	238,96
23150000	2834	1791,3	1,97	298,4	254,59	307,72	226,72
22900000	43983	1617,5	1,96	2692,3	2732,09	3.296,78	3518,64
22850000	9470	1668,0	2,37	1022,6	845,24	779,07	757,6
22730000	4737	1569,0	2,74	452,3	523,15	429,66	378,96
22700000	18061	1609,6	2,20	1182,7	1390,43	1.755,84	1444,88
22680000	16991	1605,8	2,33	1358,8	1383,33	1.404,03	1359,28
22250000	14452	1551,4	2,17	1383,8	1133,04	1.098,28	1156,16
22220000	10370	1536,1	2,05	1058,6	810,38	816,48	829,6
22190000	1794	1587,7	2,01	169,8	174,16	179,74	143,52
21890000	17857	1722,6	2,80	1761,3	1683,13	1.663,04	1428,56
21850000	12892	1852,3	2,60	1340	1192,99	1.353,43	1031,36
21750000	1063	1786,9	2,60	184,3	137,09	146,12	85,04
21650000	40219	1498,4	2,84	3125,3	3443,29	2.906,20	3217,52
21900000	58128	1567,1	2,95	5220,6	4891,04	4.288,10	4650,24

Na Figura 8.7 é analisado o ajuste com a primeira equação (regressão em função da área e coeficiente de compacidade da bacia), apresentando os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa em função da área. Na Figura 8.8 é realizado o mesmo ajuste em função do coeficiente de compacidade. Na Figura 8.9 pode ser observado o desempenho da segunda equação (equação de regressão da vazão média de cheia em função da área, admitindo um expoente “b” diferente de um), com os valores observados e o intervalo de confiança da estimativa. A determinação do intervalo de confiança foi efetuada a partir da estimativa do erro padrão relativo à variável explicativa em análise em cada figura. Observam-se ajustes muito bons para ambas equações. A existência de alguns pontos fora do

intervalo de confiança pode ser explicada por problemas de precisão no ramo superior da curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

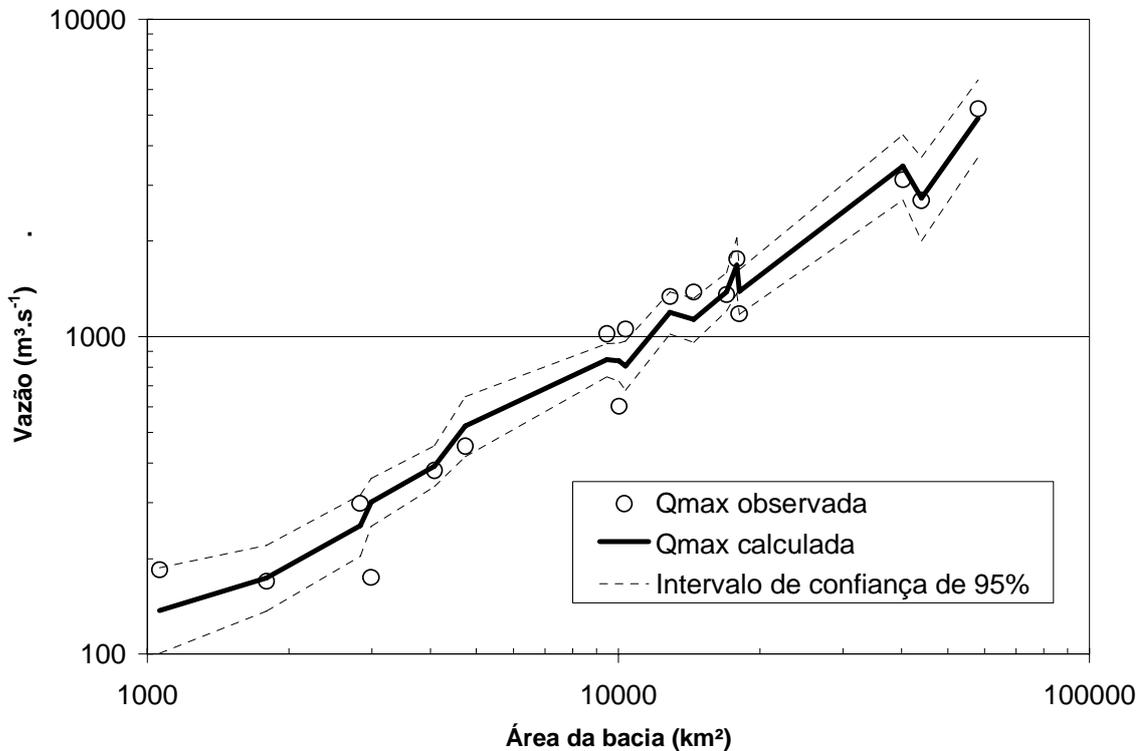


Figura 8.7 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função da área mediante a equação $Q_{max}=0,147.A^{0,867}.Kc^{0,833}$

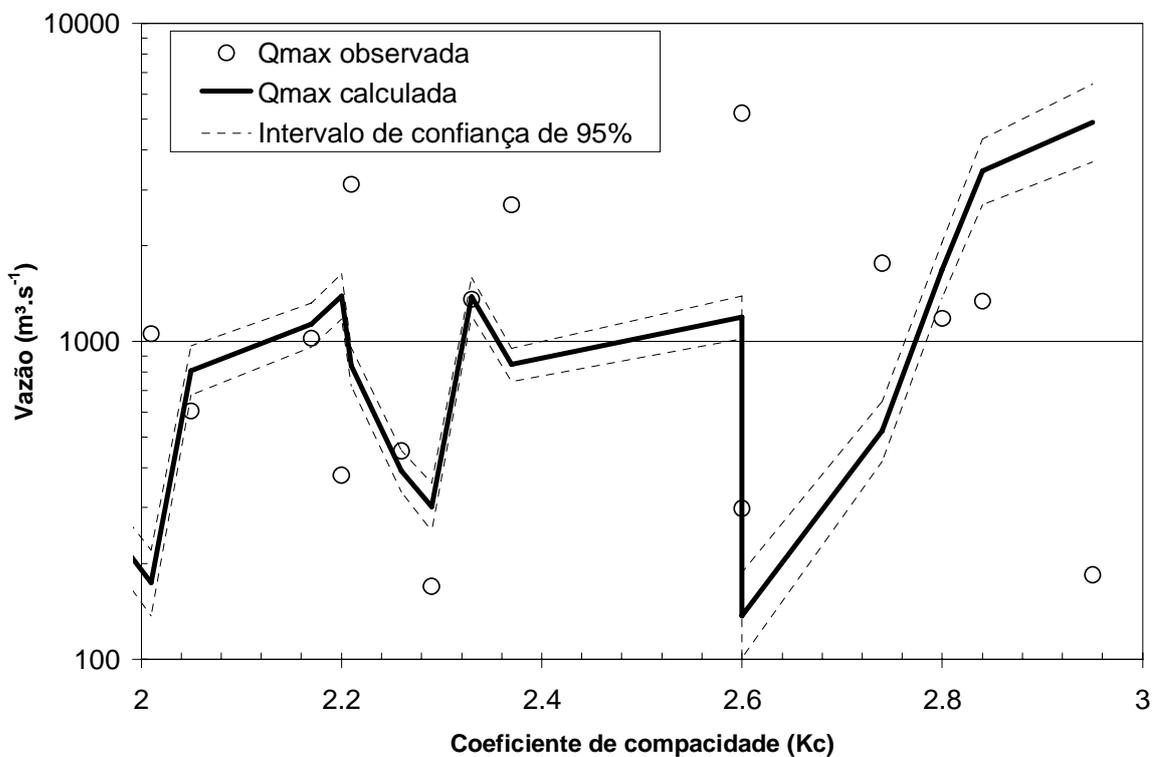


Figura 8.8 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função do coeficiente de compacidade mediante a equação $Q_{max}=0,147.A^{0,867}.Kc^{0,833}$

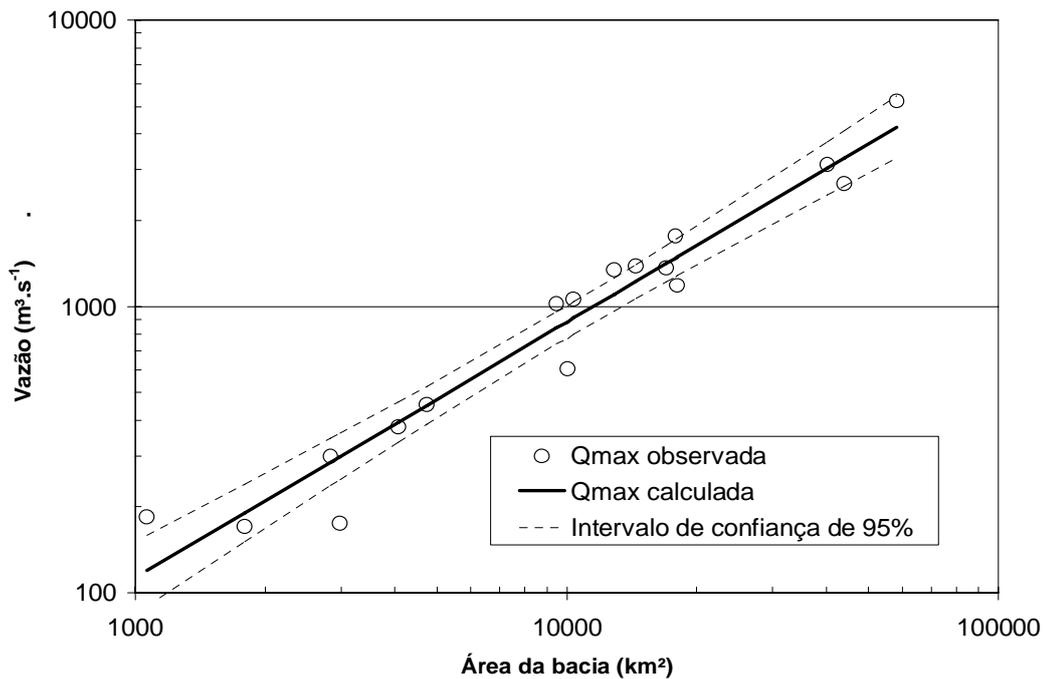


Figura 8.9 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função da área da bacia mediante a equação $Q_{max}=0,2385.A^{0,892}$

Finalmente, na Figura 8.10 se observa o ajuste da regressão da vazão média de cheia em função da área, em que o expoente da regressão foi forçado para ser igual a um.

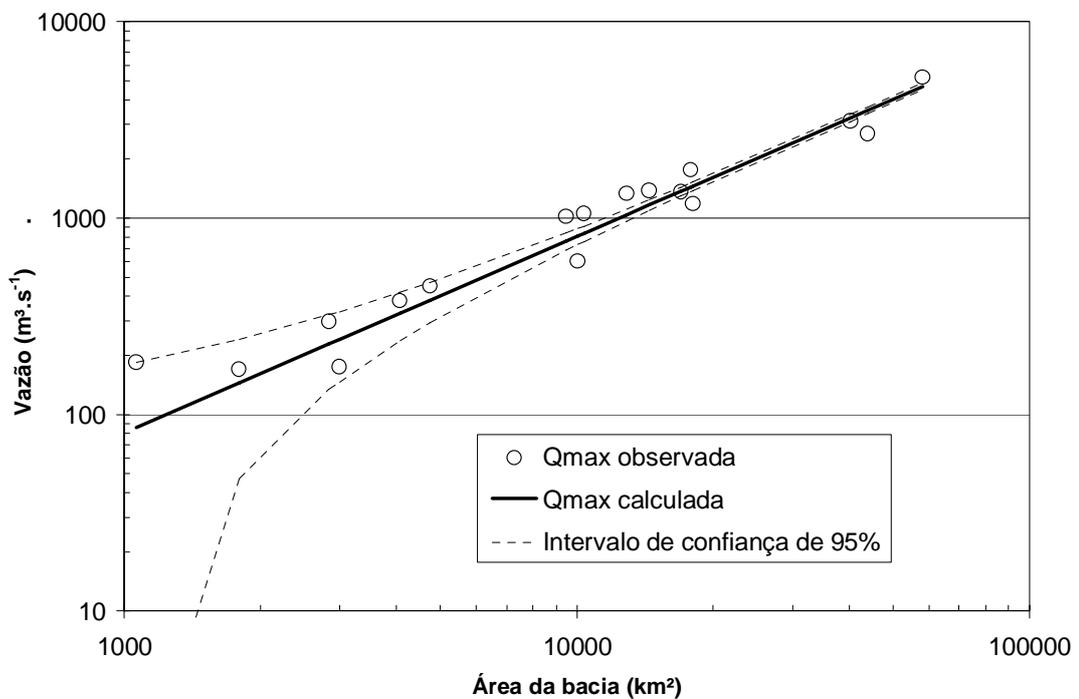


Figura 8.10 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da vazão média de cheia em função da área da bacia mediante a equação $Q_{max}=0,080.A$

Segundo este modelo (vazão média de cheia em função da área, em que o expoente da regressão foi forçado para ser igual a um), a vazão de cheia específica dos afluentes da margem direita do rio Tocantins no estado de Tocantins chega ao valor de $80 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, ou seja, o valor é 3,5 vezes a vazão média de longo período para a região 1 das vazões médias e 6 vezes a vazão média de longo período para a região 2 das vazões médias, definidas no capítulo correspondente como $26,9 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ e $13,7 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, respectivamente. Observar, mais uma vez, a grande incerteza para áreas abaixo de 2.000 km^2 , onde esta equação deve ser utilizada com cuidado.

8.6 Curva Adimensional de Probabilidade para a Vazão Máxima

Os pontos da curva adimensional de vazões máximas agrupam-se em torno de uma reta (Figura 8.11). A dispersão é significativa para $TR > 10$ anos (valor da variável reduzida de gumbel $> 2,26$). A equação da reta ajustada sobre o gráfico ($R^2 = 0,88$) permite estabelecer uma relação analítica entre a vazão média adimensional e o período de retorno:

$$q_{\max} = 0,824 - 0,3122 \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

onde:

q_{\max} = vazão máxima adimensional

T = período de retorno (anos)

A multiplicação da vazão adimensional assim obtida pela vazão média de cheia em um ponto da rede hidrográfica resulta na vazão máxima anual com período T neste ponto.

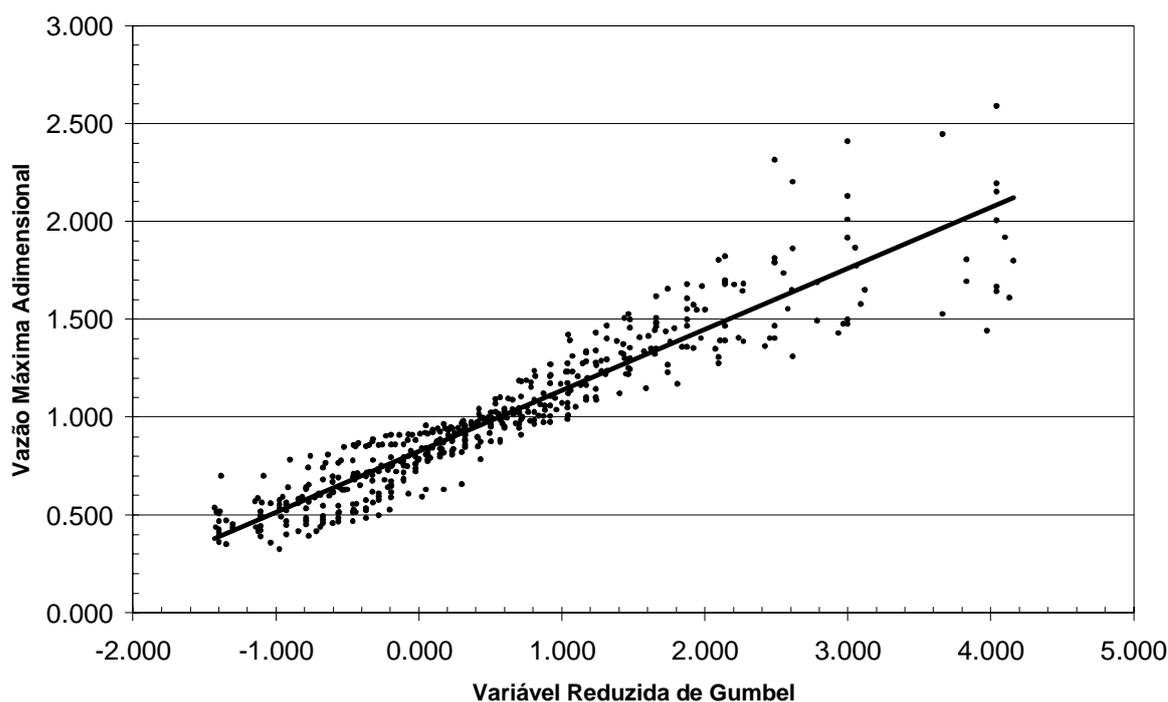


Figura 8.11 - Curva de probabilidade adimensional da vazão média de cheia

8.7 Vazão Máxima Instantânea

A vazão máxima diária pode diferir significativamente da verdadeira vazão máxima que é a vazão máxima instantânea. A rigor, não se consegue medir efetivamente a vazão máxima instantânea (aplicando a curva-chave ao nível máximo instantâneo) pois, os aparelhos registradores trabalham a intervalos fixos de tempo, por menores que sejam. Entretanto, na prática, os postos fluviométricos dotados de linígrafo são considerados aptos para avaliações de níveis e vazões máximas instantâneas (pico da cheia). De fato, é a partir de dados de postos deste tipo que são realizados estudos do fator que relaciona a vazão máxima instantânea a partir da vazão máxima diária. Portanto, a qualidade de tais fatores depende da representatividade dos linigramas e da curva-chave. Há relativamente poucos estudos deste tipo na literatura científica, mas pode-se concluir que esta relação, vazão máxima instantânea pela vazão máxima diária, é muito dependente das condições físicas e do regime hidrológico locais.

Quanto menor o tempo de concentração e a área da bacia maior é o fator que espelha a razão entre a vazão máxima instantânea e a vazão máxima média diária. Muitos fatores encontrados na literatura utilizam como variável explicativa apenas a área da bacia.

Silva e Tucci (1998) apresentam 11 relações entre vazões máximas obtidas por diversos autores, para diferentes locais no mundo. Para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina há o estudo de Tucci et al. (1991) que apresentam a seguinte equação:

$$K = 1 + 15,03A^{-0,58}$$

onde: K é a razão entre a vazão máxima instantânea e a vazão máxima diária, sendo A a área da bacia em km².

8.8 Limitações

Para a regionalização das vazões máximas da região analisada, também há uma limitação ligada à área da bacia, já que a maior parte dos postos fluviométricos analisados tem áreas contribuintes maiores que 1.000 km².

As informações dos estudos de consistência indicam que maioria dos postos fluviométricos apresenta uma extrapolação nos ramos superiores de suas curvas-chave de muito baixa qualidade. Isto pode ter limitado a precisão da regionalização, especialmente na determinação das regiões homogêneas.

Há uma significativa dispersão dos pontos adimensionais de vazão máxima em torno das retas regionais, para períodos de retorno acima de 10 anos. Isto ligado ao fato de que as séries não são muito longas e existem diferenças regionais não contempladas por falta de dados, prejudica o cálculo de vazões máximas com períodos de retorno acima de este valor.

A função de cálculo da vazão máxima instantânea a partir da vazão máxima diária ainda não foi revalidada com dados de um número de postos com medidas linigráficas suficientes, permanecendo os condicionantes apontados por Tucci et al. (1991).

8.9 Procedimento de Cálculo das Vazões Máximas Regionalizadas

O procedimento consiste em:

1) verificar que a área da bacia se encontra dentro dos limites da regionalização. Não se recomenda a utilização para áreas superiores e inferiores as utilizadas na própria regionalização.

2) Utilizar uma das regressões indicadas no item 8.5 para estimar a vazão média de cheia, em função dos dados disponíveis.

3) Utilizar a curva adimensional de vazões máximas para estimar o valor da vazão para o tempo de retorno requerido.

8.10 Exemplo de Aplicação

Para pré-dimensionar uma ponte em uma estrada vicinal, se deseja conhecer a vazão de 10 anos de tempo de retorno. A área da bacia foi determinada em 1.794 km².

Solução:

Como se conhece a área da bacia unicamente, é utilizada a regressão que utiliza esta única variável.

$$Q_{\max} = 0,2385 \cdot A^{0,892} = 0,2385 \cdot 1794^{0,892} = 190,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Finalmente, a equação ajustada da curva adimensional de probabilidades:

$$q_{\max} = 0,824 - 0,3122 \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

é possível determinar a vazão adimensional de 10 anos de tempo de retorno:

$$q_{10} = 0,824 - 0,3122 \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{10} \right) \right]$$

$$q_{10} = 1,524$$

Multiplicando este valor pela vazão média de cheia, se obtém o valor procurado:

$$Q_{\text{TR}=10} = 290,81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}.$$

9 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS

9 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS

9.1 Vazão Mínima de Duração d

A cada ano hidrológico, centralizado no período seco, pode-se associar, em cada ponto da rede hidrográfica, uma vazão média mínima numa duração d .

Para evitar confusão conceitual resume-se o nome para vazão mínima de duração d . A duração d é geralmente expressa em dias, assim a vazão mínima de duração d representa o mínimo valor que atinge a média de uma seqüência de d vazões diárias no ano hidrológico. Por exemplo, a vazão mínima de sete dias de determinado ano é o menor valor, encontrado neste ano, entre as médias das seqüências de sete dias consecutivos quaisquer de vazões diárias.

A vazão mínima de duração d é uma variável hidrológica que é importante para avaliação da disponibilidade hídrica em períodos críticos de estiagem. Ela espelha basicamente o comportamento da contribuição dos aquíferos ao escoamento de base dos rios, em períodos climáticos secos. É importante nos processos de outorga, já que cultivos e animais conseguem sobreviver um determinado período sem água, que é maior do que 1 dia. Neste contexto, a vazão mínima de 1 dia tem pouco uso prático, mas sem deixar de ser um indicador para estes períodos críticos. No outro extremo está a vazão mínima de 365 dias que tende à vazão média anual, afastando-se um pouco de seu caráter de vazão de estiagem. Mais utilidade prática possuem as vazões com períodos intermediários, como a vazão mínima de sete dias ou 30 dias, por exemplo, pois uma seqüência de dias com baixa vazão na estação seca é que, normalmente, apresenta riscos ao abastecimento público, irrigação e outros usos. Mais especificamente, a vazão mínima de sete dias de duração, com período de retorno de 10 anos, tem sido freqüentemente usada como referência crítica para a qualidade da água e para limites de outorga.

Em uma seqüência temporal de vários anos em um ponto da rede hidrográfica, estabelece-se então uma série de vazões mínimas para cada duração d . Como para qualquer série hidrológica, a série de vazões mínimas anuais de duração d de um ponto da rede hidrográfica oscila entre valores mais altos e valores mais baixos, dentro de um quadro de normalidade de variabilidade interanual. O uso descontrolado, por parte do homem, dos recursos hídricos da bacia, seja por captação do escoamento superficial ou prospecção de águas subterrâneas, pode afetar significativamente a gravidade dos períodos de estiagem e, por via de consequência, as séries de vazões mínimas.

A análise estatística das vazões mínimas anuais, ao contrário das vazões médias e máximas, vai se interessar pela probabilidade de não-excedência, isto é, à probabilidade de determinado valor ser igualado ou inferiorizado. O período de retorno associado equivale ao inverso desta probabilidade e vai representar o período de tempo médio que determinada condição de estiagem se agrava.

A análise estatística clássica vai considerar as séries de vazões mínimas anuais como séries independentes, estacionárias e não-periódicas, o que permite estabelecer frequências de ocorrência, através do ajuste de distribuições de probabilidades. Evidentemente, se as séries não tiverem as características acima, haverá distorção nas frequências, em maior ou menor grau.

A vazão mínima de duração d tem, neste estudo de regionalização, portanto, uma dimensão probabilística, um período de retorno. O período de retorno da vazão mínima permite avaliar o quanto extrema é a condição de estiagem para a duração d .

9.2 Vazão Mínima Média de Longo Período de Duração t

O valor esperado, em linguagem estatística, das vazões mínimas de duração d em um ponto da rede hidrográfica corresponde à vazão mínima média de longo período nesta duração d . Numa série estacionária é o valor em torno do qual flutuarão as vazões mínimas anuais, sendo, por isso, um parâmetro importante da distribuição destas vazões mínimas. Evidentemente, há uma vazão mínima média de longo período para cada duração d .

Em postos fluviométricos com dados disponíveis de vazão, a vazão mínima média de d dias de longo período é estimada pela média das vazões mínimas anuais, com este período d , de todos os anos.

9.3 Regionalização da Vazão Mínima

Dada a forte sazonalidade existente nas bacias analisadas, optou-se por caracterizar as vazões mínimas em dois períodos:

- anual: considerando ano hidrológico para vazões mínimas, ou seja, coincidente com o ano civil. Este período abarca o período seco, que se estende desde 1º de maio até 31 de outubro;

- período úmido: abarca o período de chuva, que se estende desde o 1º de novembro até o dia 30 de abril

Para cada período, o método de regionalização analisa a semelhança das séries pontuais de vazões mínimas anuais, separando a análise estatística em duas funções básicas:

- Vazão mínima média de longo período em função da duração d e de características fisiográficas e climáticas da bacia (regressão da vazão mínima média de duração t);
- Distribuição de probabilidades das vazões mínimas anuais de todas as durações adimensionalizadas, respectivamente, pelas vazões mínimas médias de longo período nas correspondentes durações (curva adimensional de probabilidade das vazões mínimas).

Os agrupamentos espaciais dos postos que definem as regiões homogêneas são analisados, considerando simultaneamente os melhores indicadores de ajustamento das equações de regressão e as menores dispersões das curvas adimensionais de probabilidades. Evidentemente, seguindo uma lógica hidrológica.

Definidas as regiões homogêneas, o método propicia, portanto, que se estime, na duração desejada, em função de características físicas e climáticas, o valor esperado da vazão mínima de longo período, que vem a ser o parâmetro de média das distribuições de probabilidades das vazões mínimas. Este parâmetro, multiplicado pelo valor da curva adimensional no período de retorno desejado, estabelece o valor procurado de uma vazão mínima com determinado período de retorno, na duração analisada.

9.4 Regressão da Vazão Mínima de Longo Período

Na margem direita do rio Tocantins no estado de Tocantins foram analisados os 17 postos obtidos a partir da Hidroweb. Não foram considerados os cinco postos obtidos junto a NATURANTINS, CELTINS e SEPLAN, já que os dados desses postos apresentaram diversos problemas, principalmente pelo efeito causado pela operação de barragens próximos deles, problemas de georreferenciação e na definição da curva chave na seção. No Quadro 9.1 estão listados os 17 postos utilizados e as correspondentes características explicativas utilizadas na regionalização. Nos Quadros 9.1 e 9.2 são apresentadas as vazões

mínimas de longo período para as diferentes durações e os diferentes períodos estudados (anual/seco e úmido).

Quadro 9.1 - Índices fisiográficos na região estudada

Código ANA	Código Mapa	A (km ²)	P (mm)	Per (km)	kc	kf	L (km)	S (%)	DD (km/km ²)
23250000	1	10036	1641,3	789	2,21	0,18	233,9	0,13	0,81
23230000	2	4073	1680,6	516	2,26	0,18	151,9	0,11	0,82
23220000	3	2987	1583,3	447	2,29	0,15	143,2	0,16	0,74
23150000	4	2834	1791,3	374	1,97	0,36	88,7	0,15	0,79
22900000	5	43983	1617,5	1470	1,96	0,29	392,7	0,16	0,81
22850000	6	9470	1668,0	822	2,37	0,21	212,2	0,16	0,81
22730000	7	4737	1569,0	675	2,74	0,13	188,0	0,21	0,81
22700000	8	18061	1609,6	1054	2,20	0,21	295,2	0,20	0,76
22680000	9	16991	1605,8	1085	2,33	0,23	271,5	0,21	0,74
22250000	10	14452	1551,4	932	2,17	0,13	331,7	0,11	0,80
22220000	11	10370	1536,1	746	2,05	0,17	250,6	0,13	0,79
22190000	12	1794	1587,7	304	2,01	0,22	89,3	0,25	0,70
21890000	13	17857	1722,6	1334	2,80	0,17	323,7	0,15	0,72
21850000	14	12892	1852,3	1056	2,60	0,33	198,0	0,22	0,72
21750000	15	1063	1786,9	303	2,60	0,24	67,2	0,56	0,74
21650000	16	40219	1498,4	2031	2,84	0,09	654,6	0,09	0,72
21900000	17	58128	1567,1	2544	2,95	0,14	653,3	0,09	0,74

onde: $kc = 0,28.Per.A^{-1/2}$; $kf = A.L^{-2}$; A = área da bacia; Per = perímetro da bacia; L = comprimento do rio principal

S = declividade do rio principal; DD = densidade de drenagem

Quadro 9.2. - Vazão mínima de longo período para as diferentes durações consideradas- período anual/seco

POSTO	Duração					
	1 dia	7 dias	15 dias	30 dias	90 dias	180 dias
21650000	100,3	102,0	103,9	107,1	115,1	140,6
21750000	26,0	26,8	27,1	27,3	28,0	28,7
21850000	126,8	130,2	131,4	133,1	136,8	145,8
21890000	122,8	123,7	124,7	126,8	131,2	143,2
21900000	220,4	223,4	227,8	233,4	250,0	298,2
22190000	22,9	23,6	24,0	24,5	25,5	28,3
22220000	22,1	22,8	23,6	25,4	29,3	39,8
22250000	29,2	30,0	31,0	32,6	37,3	53,3
22680000	154,0	156,7	159,0	162,5	172,8	193,4
22700000	138,5	144,4	148,6	154,5	170,0	192,8
22730000	33,7	35,1	35,9	37,2	40,5	47,9
22850000	40,5	42,7	44,2	45,7	52,4	66,1
22900000	274,6	287,4	296,3	306,4	337,6	399,7
23150000	14,0	14,5	14,9	15,6	17,8	22,3
23220000	12,6	12,9	13,1	13,4	14,5	17,2
23230000	31,0	31,5	31,9	32,5	35,1	42,0
23250000	63,9	65,1	66,2	68,4	75,3	84,9

Quadro 9.3. - Vazão mínima de longo período para as diferentes durações consideradas – período úmido

POSTO	Duração					
	1 dia	7 dias	15 dias	30 dias	90 dias	180 dias
21650000	133,7	155,0	190,7	241,8	449,7	615,2
21750000	27,3	28,8	29,7	31,4	37,0	39,1
21850000	138,0	150,4	159,8	179,8	251,6	298,8
21890000	136,4	148,9	164,6	189,3	296,3	371,4
21900000	297,2	320,7	367,9	436,5	699,1	809,2
22190000	26,4	29,7	32,4	37,5	48,7	52,9
22220000	38,3	50,7	64,5	84,8	155,8	181,8
22250000	51,0	65,7	85,7	114,0	222,6	267,0
22680000	178,3	196,9	222,2	256,9	334,9	368,2
22700000	166,3	194,3	220,4	264,0	338,2	369,2
22730000	44,3	52,2	61,6	71,3	101,1	115,1
22850000	59,3	78,5	101,5	127,5	205,2	237,1
22900000	369,1	444,0	498,2	581,3	826,9	960,1
23150000	19,1	23,4	27,1	33,0	53,1	69,3
23220000	16,6	18,2	19,5	22,5	36,0	44,9
23230000	39,1	43,5	48,8	58,0	84,2	100,3
23250000	85,0	93,9	102,2	116,3	160,1	199,5

A equação de regressão procurada para cada região homogênea tem a seguinte forma potencial multivariada:

$$Q_{mín} = a.A^b.P^c.Per^d.kc^e.kf^f.L^g.S^h.DD^i.d^j$$

onde:

- Q_{min} = Vazão mínima (m^3s^{-1})
 A = Área (km^2)
 P = Precipitação média na bacia (mm)
 Per = Perímetro da bacia
 Kc = Coeficiente de compacidade
 Kf = Coeficiente de forma
 L = Comprimento do rio principal (km)
 S = Declividade do rio principal (%)
 DD = Densidade de drenagem (km/km^2)
 d = Duração (dias)

O ajuste da equação de regressão corresponde ao ajuste dos parâmetros a, b, c, d, e, f, g, h, i, j de acordo com os dados de cada região. Neste estudo, a metodologia de ajuste foi por regressão linear múltipla dos logaritmos naturais dos termos da equação:

$$\ln(Q_{mín}) = \ln a + b.\ln A + c.\ln P + d.\ln Per + e.\ln kc + f.\ln kf + g.\ln L + h.\ln S + i.\ln DD + j.\ln d$$

A definição das regiões foi baseada na tendência das curvas adimensionais e na qualidade das regressões das vazões médias de longo período. Para cada um dos postos selecionados na região estudada foram estabelecidas as frequências empíricas dos valores de vazão média anual das suas séries disponíveis. Os valores de vazão foram, em seguida, adimensionalizados, dividindo-os pela vazão média de longo período observada em cada série de cada posto fluviométrico. Como resultado, obteve-se, para cada posto, uma curva empírica adimensional relacionando as vazões adimensionais com probabilidades de ocorrência. Como são curvas adimensionais, torna-se possível sua comparação no conjunto de todos os postos, procurando-se tendências semelhantes, agrupáveis em regiões homogêneas.

As probabilidades empíricas foram estabelecidas com a expressão que reflete a posição de plotagem de uma distribuição de extremos de Gumbel:

$$p = \frac{i - 0,44}{n + 0,12}$$

onde:

p = probabilidade de determinado valor ser igualado ou inferiorizado;

i = ordem da vazão (série ordenada de forma decrescente) ;

n = tamanho da série

Os pontos de todas as séries foram plotados com a ajuda da variável reduzida de Gumbel (y_{GUMBEL}) para comparação e distinção de regiões homogêneas :

$$y_{\text{GUMBEL}} = -\ln[-\ln(1 - p)]$$

A plotagem dos pares de pontos (y_{GUMBEL} , p) de todos os postos gera uma ‘nuvem’ de pontos que é trabalhada empiricamente, mas com uma lógica espacial hidrológica, para separar tendências diferentes que configurem regiões homogêneas distintas. Na Figura 9.1 se observa a plotagem das curvas adimensionais para cada posto fluviométrico analisado, sendo que para cada posto foi ajustada uma curva. Para verificar se a seleção das regiões é mantida para o período úmido, foram graficadas as curvas adimensionais de probabilidade nestes períodos (Figura 9.2).

A partir da análise do comportamento das curvas adimensionais de probabilidade das vazões mínimas em conjunto com diferentes características fisiográficas analisadas (clima, relevo, declividade, etc) foi possível estabelecer a distinção de duas áreas bem definidas: região 1 e região 2, conforme apresentado na Figura 9.3 . No entanto, deve-se levar em conta as limitações dos dados existentes na aplicação da regionalização.

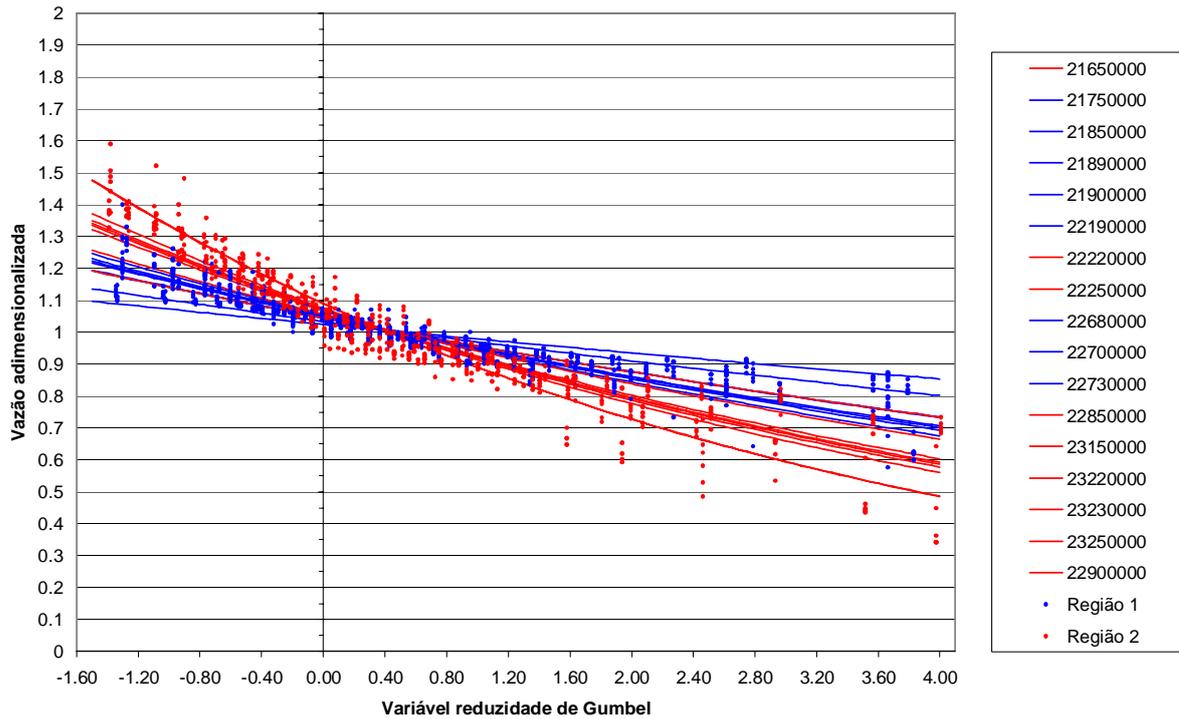


Figura 9.1 - Curvas adimensionais de vazões mínimas para o período anual/seco

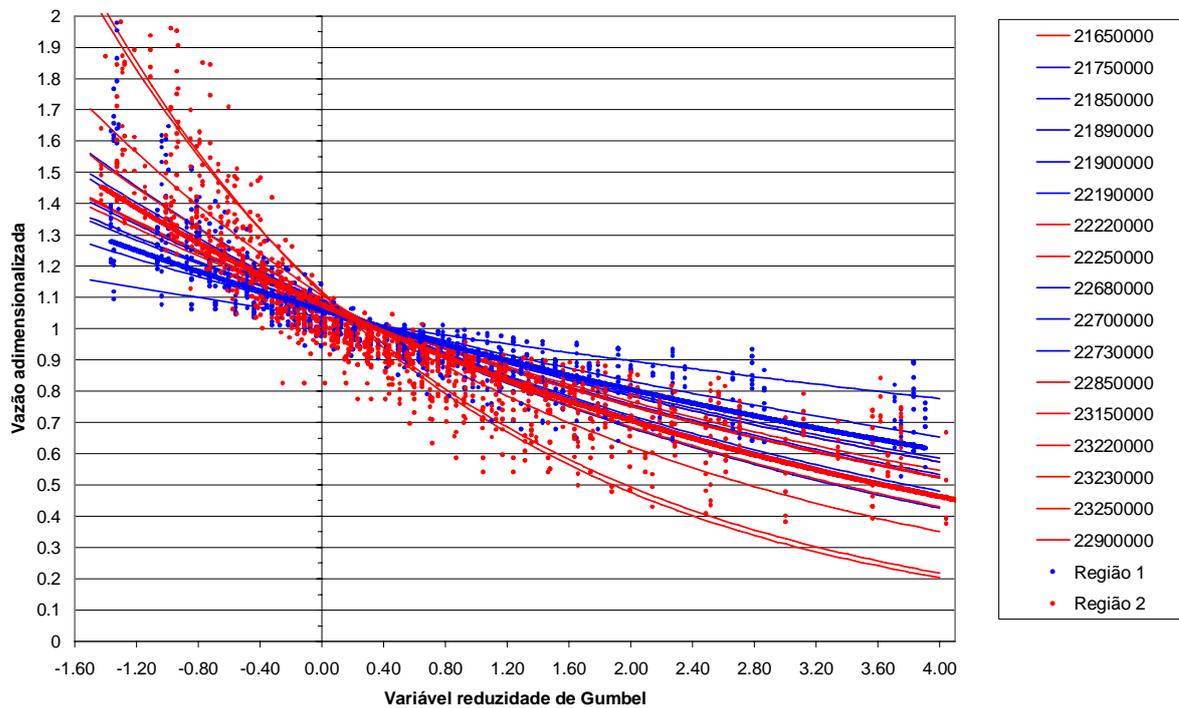


Figura 9.2 - Curvas adimensionais de vazões mínimas para o período úmido

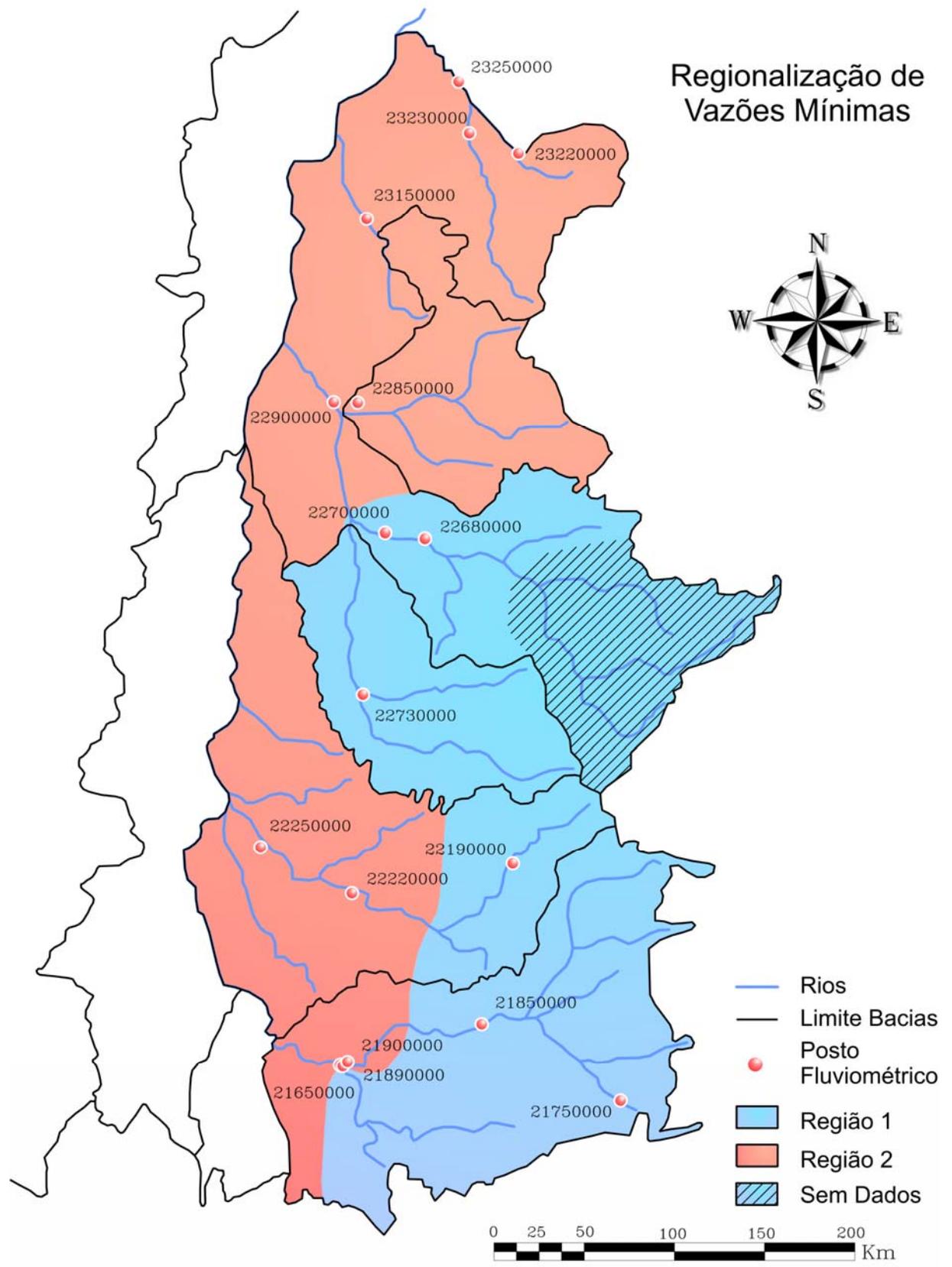


Figura 9.3 - Regiões homogêneas para as vazões mínimas

A região 1 compreende as cabeceiras da maioria dos rios que são afluentes pela margem direita do rio Tocantins no estado de Tocantins, escoando por regiões com uma declividade considerável e com regime climático mais seco, dentro da bacia sedimentar do rio São Francisco. Esta região sofre efeitos de regularização das vazões por captura hidrogeológica da bacia do São Francisco. A região 2 abrange as bacias mais próximas do rio Tocantins, possuindo clima mais úmido pela sua cercania com a bacia Amazônica, declividades relativamente baixas. A região 2 escoar sobre ambientes geológicos sedimentares e vulcano-sedimentares.

9.4.1 Região 1 – Cabeceiras dos Rios

A metodologia de cálculo de variáveis regionalizada se baseia em dois valores ou curvas: a) A primeira é a definição de uma regressão entre as características físicas e a vazão mínima de longo período com diferentes durações, que permita estimar este valor regionalizado; b) a segunda é a definição da curva adimensional média da região, que é utilizada para estimar o período de retorno de uma vazão média, permitindo, portanto, avaliar sua posição entre anos secos e úmidos.

a) Região 1 - Regressão com Variáveis Físicas

Para a região 1, período anual e seco foram obtidas as equações e respectivos R^2 ajustados, indicados no Quadro 9.4. No Quadro 9.5 se encontram as equações determinadas para a região 1 para o período úmido e as estatísticas de ajuste.

Quadro 9.4 - Regressões das vazões mínimas de longo período – Região 1 – período anual/seco

Equação	R^2 ajustado
$Q_{\min} = 0,2033 * d^{0,0422} * A^{0,651}$	0,92
$Q_{\min} = 0,0509 * d^{0,0422} * A^{0,964} S^{0,934}$	0,98
$Q_{\min} = 0,041 * d^{0,0392} S^{1,010} * A$	0,95

Quadro 9.5 - Regressões das vazões mínimas de longo período – Região 1 – período úmido

Equação	R^2 ajustado
$Q_{\min} = 0,115 * d^{0,160} * A^{0,723}$	0,97
$Q_{\min} = 0,052 * d^{0,160} * A^{0,902} S^{0,533}$	0,98

No Quadro 9.6 são indicados os valores observados e calculados para cada um dos postos desta região para o período anual e o período seco. Já no Quadro 9.7 se encontram os valores observados e calculados para o período úmido.

Quadro 9.6 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações-
Região 1- período anual/seco

Posto	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Duração (dias)	Área (km ²)	S (%)	$Q_{min} = 0,2033 \cdot d^{0,0422} \cdot A^{0,651}$	$Q_{min} = 0,0509 \cdot d^{0,0422} \cdot A^{0,9645} \cdot S^{0,934}$	$Q_{min} = 0,0417 \cdot d^{0,0392} \cdot S^{1,010} \cdot A$
21750000	26,0	1	1063	0,56	18,98	24,50	24,68
21750000	26,8	7	1063	0,56	20,61	26,59	26,64
21750000	27,1	15	1063	0,56	21,28	27,46	27,44
21750000	27,3	30	1063	0,56	21,92	28,28	28,20
21750000	28,0	90	1063	0,56	22,96	29,62	29,44
21750000	28,7	180	1063	0,56	23,64	30,50	30,25
21850000	126,8	1	12892	0,22	96,37	113,47	116,49
21850000	130,2	7	12892	0,22	104,62	123,18	125,73
21850000	131,4	15	12892	0,22	108,04	127,21	129,54
21850000	133,1	30	12892	0,22	111,25	130,99	133,11
21850000	136,8	90	12892	0,22	116,53	137,20	138,97
21850000	145,8	180	12892	0,22	119,99	141,27	142,79
21890000	122,8	1	17857	0,15	119,14	108,63	109,60
21890000	123,7	7	17857	0,15	129,34	117,92	118,28
21890000	124,7	15	17857	0,15	133,57	121,78	121,87
21890000	126,8	30	17857	0,15	137,53	125,39	125,23
21890000	131,2	90	17857	0,15	144,06	131,34	130,74
21890000	143,2	180	17857	0,15	148,33	135,24	134,34
21900000	220,4	1	58128	0,09	256,89	210,30	212,96
21900000	223,4	7	58128	0,09	278,88	228,30	229,84
21900000	227,8	15	58128	0,09	287,99	235,76	236,81
21900000	233,4	30	58128	0,09	296,54	242,76	243,34
21900000	250,0	90	58128	0,09	310,61	254,28	254,05
21900000	298,2	180	58128	0,09	319,83	261,83	261,04
22190000	22,9	1	1794	0,25	26,69	19,10	18,44
22190000	23,6	7	1794	0,25	28,98	20,74	19,91
22190000	24,0	15	1794	0,25	29,92	21,41	20,51
22190000	24,5	30	1794	0,25	30,81	22,05	21,08
22190000	25,5	90	1794	0,25	32,27	23,10	22,00
22190000	28,3	180	1794	0,25	33,23	23,78	22,61
22680000	154,0	1	16991	0,21	115,35	141,78	146,49
22680000	156,7	7	16991	0,21	125,22	153,91	158,10
22680000	159,0	15	16991	0,21	129,31	158,94	162,89
22680000	162,5	30	16991	0,21	133,15	163,66	167,38
22680000	172,8	90	16991	0,21	139,47	171,42	174,74
22680000	193,4	180	16991	0,21	143,61	176,51	179,56
22700000	138,5	1	18061	0,2	120,03	143,67	148,22
22700000	144,4	7	18061	0,2	130,30	155,97	159,97
22700000	148,6	15	18061	0,2	134,56	161,07	164,82
22700000	154,5	30	18061	0,2	138,55	165,85	169,36
22700000	170,0	90	18061	0,2	145,13	173,72	176,82
22700000	192,8	180	18061	0,2	149,43	178,88	181,69
22730000	33,7	1	4737	0,21	50,22	41,39	40,84
22730000	35,1	7	4737	0,21	54,52	44,93	44,08
22730000	35,9	15	4737	0,21	56,30	46,40	45,41
22730000	37,2	30	4737	0,21	57,97	47,77	46,66
22730000	40,5	90	4737	0,21	60,72	50,04	48,72
22730000	47,9	180	4737	0,21	62,53	51,53	50,06

Quadro 9.7 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações-
Região 1-período úmido

Posto	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Duração (dias)	Área (km ²)	S (%)	$Q_{min} = 0,115 \cdot d^{0,160} \cdot A^{0,723}$	$Q_{min} = 0,052 \cdot d^{0,160} \cdot A^{0,902} \cdot S^{0,533}$
21750000	27,31	1	1,063	0,56	17,74	20,50
21750000	28,82	7	1,063	0,56	24,22	27,99
21750000	29,69	15	1,063	0,56	27,36	31,62
21750000	31,39	30	1,063	0,56	30,56	35,32
21750000	36,95	90	1,063	0,56	36,44	42,11
21750000	39,14	180	1,063	0,56	40,71	47,05
21850000	138,03	1	12,892	0,22	107,76	118,31
21850000	150,41	7	12,892	0,22	147,12	161,52
21850000	159,83	15	12,892	0,22	166,20	182,47
21850000	179,83	30	12,892	0,22	185,69	203,87
21850000	251,61	90	12,892	0,22	221,38	243,05
21850000	298,77	180	12,892	0,22	247,34	271,56
21890000	136,42	1	17,857	0,15	136,38	129,42
21890000	148,87	7	17,857	0,15	186,20	176,69
21890000	164,59	15	17,857	0,15	210,34	199,60
21890000	189,29	30	17,857	0,15	235,01	223,01
21890000	296,26	90	17,857	0,15	280,18	265,87
21890000	371,43	180	17,857	0,15	313,04	297,05
21900000	297,15	1	58,128	0,09	320,15	285,82
21900000	320,66	7	58,128	0,09	437,08	390,22
21900000	367,93	15	58,128	0,09	493,77	440,82
21900000	436,48	30	58,128	0,09	551,68	492,53
21900000	699,06	90	58,128	0,09	657,70	587,18
21900000	809,25	180	58,128	0,09	734,84	656,05
22190000	26,43	1	1,794	0,25	25,89	21,38
22190000	29,66	7	1,794	0,25	35,35	29,19
22190000	32,44	15	1,794	0,25	39,94	32,98
22190000	37,48	30	1,794	0,25	44,62	36,85
22190000	48,69	90	1,794	0,25	53,20	43,93
22190000	52,93	180	1,794	0,25	59,44	49,08
22680000	178,30	1	16,991	0,21	131,57	148,05
22680000	196,93	7	16,991	0,21	179,62	202,12
22680000	222,17	15	16,991	0,21	202,92	228,34
22680000	256,87	30	16,991	0,21	226,72	255,12
22680000	334,87	90	16,991	0,21	270,29	304,15
22680000	368,16	180	16,991	0,21	301,99	339,82
22700000	166,27	1	18,061	0,20	137,51	152,42
22700000	194,33	7	18,061	0,20	187,73	208,09
22700000	220,41	15	18,061	0,20	212,08	235,08
22700000	263,98	30	18,061	0,20	236,95	262,65
22700000	338,24	90	18,061	0,20	282,49	313,12
22700000	369,21	180	18,061	0,20	315,62	349,85
22730000	44,32	1	4,737	0,21	52,25	46,78
22730000	52,22	7	4,737	0,21	71,33	63,87
22730000	61,64	15	4,737	0,21	80,59	72,15
22730000	71,31	30	4,737	0,21	90,04	80,61
22730000	101,07	90	4,737	0,21	107,34	96,10
22730000	115,14	180	4,737	0,21	119,93	107,37

b) Curvas Adimensionais Médias da Região 1

Os pontos adimensionais dos postos desta região agrupam-se em torno de uma curva diferente em cada período (o período anual e o seco tiveram ajuste iguais) (Figura 9.4 e Figura 9.5).

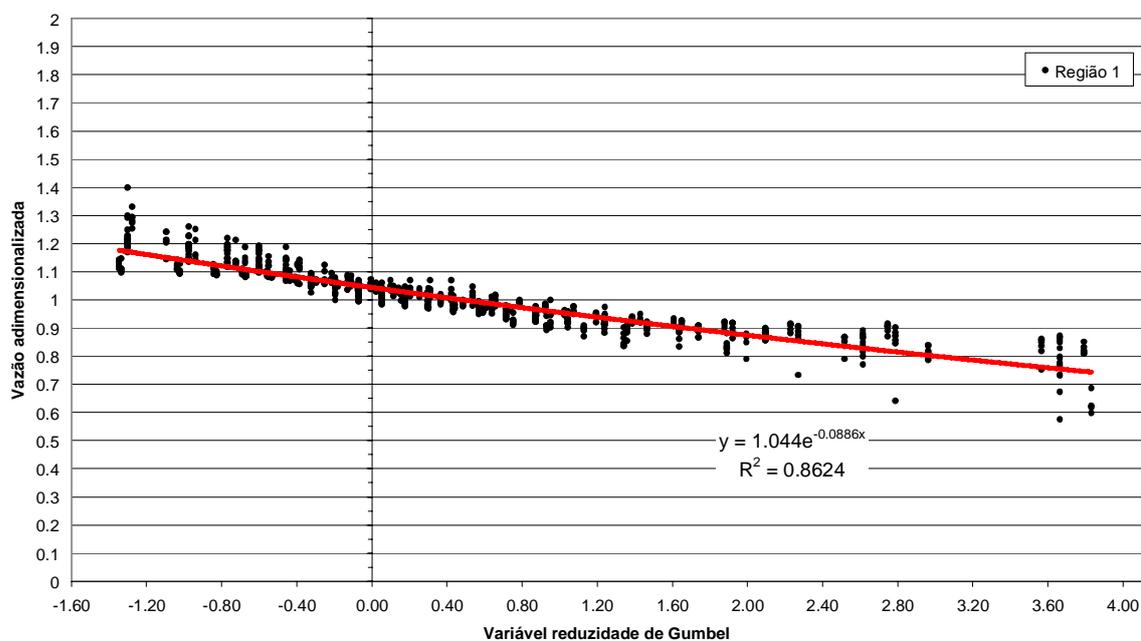


Figura 9.4 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 1 - período anual/seco

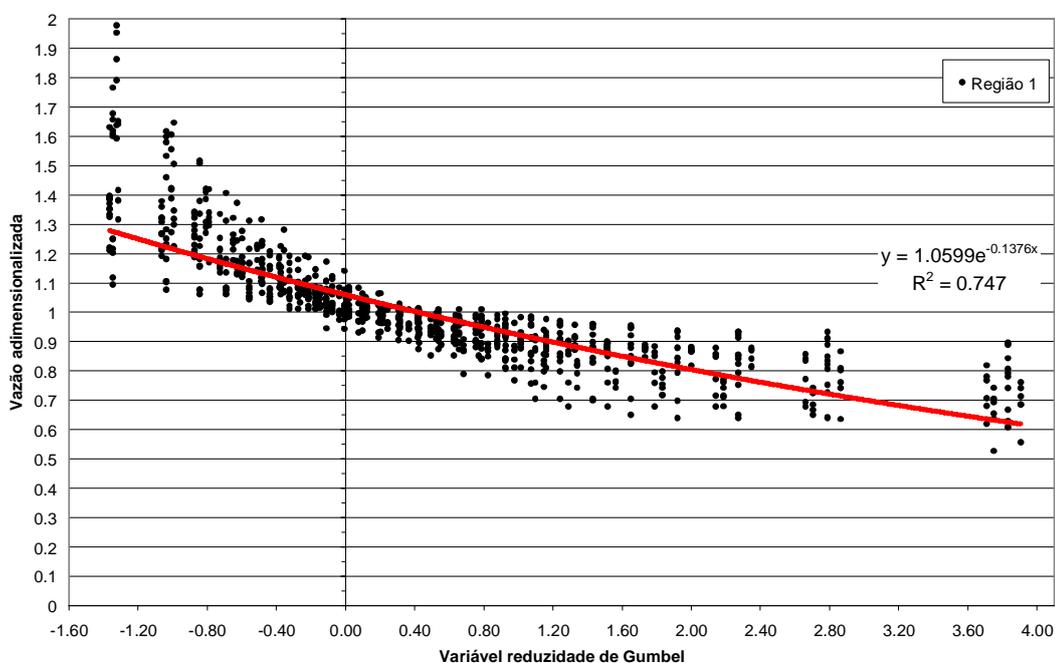


Figura 9.5 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 1 - período úmido

A dispersão é reduzida para períodos de retorno inferiores a 10 anos ($y_{\text{GUMBEL}} \leq 2,26$), mas não é excessiva para valores maiores no período anual. No período úmido a dispersão é importante e deve ser considerada na aplicação. As equações ajustadas sobre os gráficos permitem estabelecer as seguintes relações analíticas entre a vazão média adimensional e o período de retorno:

Anual e seco

$$q_{\min} = 1,044 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,0886} \quad R^2 = 0,862$$

Úmido

$$q_{\min} = 1,0599 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,1376} \quad R^2 = 0,747$$

onde :

q_{\min} = vazão mínima adimensionalizada
T = período de retorno (anos)

A multiplicação da vazão adimensional assim obtida pela vazão média de longo período em um ponto da rede hidrográfica resulta na vazão média anual com período T neste ponto.

9.4.2 Região 2 – Cursos Médio e Inferior dos Rios

As metodologias de cálculo de variáveis regionalizadas se baseiam em dois valores ou curvas:

a) A primeira é a definição de uma regressão entre as características físicas e a vazão mínima média de longo período, que permita estimar este valor regionalizado.

b) a segunda é a definição da curva adimensional média da região, que é utilizada para estimar o período de retorno de uma vazão mínima média permitindo, portanto, avaliar sua posição entre anos secos e úmidos.

Nos próximos itens serão avaliadas estas curvas.

a) Regressão com Variáveis Físicas

Para a região de clima úmido foram obtidas as equações e respectivos R^2 ajustados abaixo com até três variáveis (área, precipitação mínima anual de longo perímetro e perímetro). A inclusão de maior quantidade de variáveis não melhorou o R^2 ajustado, ou seja, que a incerteza introduzida com maior quantidade de variáveis não compensou a melhora de qualidade do ajuste.

O Quadro 9.8 mostra a equação adotada para o período anual e seco.

Quadro 9.8 - Regressão das vazões mínimas de longo período com diferentes durações – Região 2 – período anual e seco

Equação	R^2 ajustado
$Q_{\min} = 0,00502 * d^{0,146} A^{0,912}$	0,77

No Quadro 9.9 é apresentada a equação adotada para o período úmido da Região 2.

Quadro 9.9 - Regressões das vazões mínimas de longo período com diferentes durações – Região 2 – período úmido

Equação	R^2 ajustado
$Q_{\min} = 0,01013 * d^{0,249} A^{0,919}$	0,90

No Quadro 9.10 são indicados os valores observados junto com os calculados para cada um dos postos da região 2 para período anual e seco.

No Quadro 9.11 são indicados os valores observado junto com os calculados para cada um dos posto da região 2 para o período úmido.

Quadro 9.10 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações-
Região 2 - período anual e seco.

Posto	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Duração (dias)	Área (km ²)	L (km)	Perímetro (km)	$Q_{min} = 0,00502 * d^{0,146} * A^{0,912}$
21650000	100,3	1	40219	654,6	2031	79,42
21650000	102,0	7	40219	654,6	2031	105,52
21650000	103,9	15	40219	654,6	2031	117,94
21650000	107,1	30	40219	654,6	2031	130,50
21650000	115,1	90	40219	654,6	2031	153,20
21650000	140,6	180	40219	654,6	2031	169,52
22220000	22,1	1	10370	250,6	746	23,07
22220000	22,8	7	10370	250,6	746	30,65
22220000	23,6	15	10370	250,6	746	34,26
22220000	25,4	30	10370	250,6	746	37,91
22220000	29,3	90	10370	250,6	746	44,51
22220000	39,8	180	10370	250,6	746	49,25
22250000	29,2	1	14452	331,7	932	31,23
22250000	30,0	7	14452	331,7	932	41,49
22250000	31,0	15	14452	331,7	932	46,37
22250000	32,6	30	14452	331,7	932	51,31
22250000	37,3	90	14452	331,7	932	60,24
22250000	53,3	180	14452	331,7	932	66,65
22850000	40,5	1	9470	212,2	822	21,24
22850000	42,7	7	9470	212,2	822	28,22
22850000	44,2	15	9470	212,2	822	31,54
22850000	45,7	30	9470	212,2	822	34,90
22850000	52,4	90	9470	212,2	822	40,97
22850000	66,1	180	9470	212,2	822	45,33
22900000	274,6	1	43983	392,7	1470	86,17
22900000	287,4	7	43983	392,7	1470	114,49
22900000	296,3	15	43983	392,7	1470	127,96
22900000	306,4	30	43983	392,7	1470	141,59
22900000	337,6	90	43983	392,7	1470	166,23
22900000	399,7	180	43983	392,7	1470	183,93
23150000	14,0	1	2834	88,7	374	7,07
23150000	14,5	7	2834	88,7	374	9,39
23150000	14,9	15	2834	88,7	374	10,50
23150000	15,6	30	2834	88,7	374	11,61
23150000	17,8	90	2834	88,7	374	13,63
23150000	22,3	180	2834	88,7	374	15,09
23220000	12,6	1	2987	143,2	447	7,42
23220000	12,9	7	2987	143,2	447	9,85
23220000	13,1	15	2987	143,2	447	11,01
23220000	13,4	30	2987	143,2	447	12,18
23220000	14,5	90	2987	143,2	447	14,30
23220000	17,2	180	2987	143,2	447	15,83
23230000	31,0	1	4073	151,9	516	9,84
23230000	31,5	7	4073	151,9	516	13,07
23230000	31,9	15	4073	151,9	516	14,61
23230000	32,5	30	4073	151,9	516	16,17
23230000	35,1	90	4073	151,9	516	18,98
23230000	42,0	180	4073	151,9	516	21,00
23250000	63,9	1	10036	233,9	789	22,39
23250000	65,1	7	10036	233,9	789	29,75
23250000	66,2	15	10036	233,9	789	33,25
23250000	68,4	30	10036	233,9	789	36,79
23250000	75,3	90	10036	233,9	789	43,20
23250000	84,9	180	10036	233,9	789	47,80

Quadro 9.11 - Valores calculados e observados das vazões mínimas de longo período com diferentes durações-
Região 2 – período úmido

Posto	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Duração (dias)	Área (km ²)	Q _{min} =0,01013*d ^{0,249} A ^{0,919}
21650000	133,72	1	40.219,00	172,62
21650000	155,02	7	40.219,00	280,23
21650000	190,74	15	40.219,00	338,79
21650000	241,85	30	40.219,00	402,61
21650000	449,70	90	40.219,00	529,28
21650000	615,21	180	40.219,00	628,99
22220000	38,29	1	10.370,00	49,67
22220000	50,71	7	10.370,00	80,64
22220000	64,51	15	10.370,00	97,49
22220000	84,83	30	10.370,00	115,85
22220000	155,79	90	10370,00	152,31
22220000	181,78	180	10,370,00	181,00
22250000	51,04	1	14.452,00	67,39
22250000	65,66	7	14.452,00	109,40
22250000	85,65	15	14.452,00	132,26
22250000	113,99	30	14.452,00	157,18
22250000	222,63	90	14.452,00	206,63
22250000	267,04	180	14.452,00	245,55
22850000	59,27	1	9.470,00	45,70
22850000	78,45	7	9.470,00	74,18
22850000	101,50	15	9.470,00	89,69
22850000	127,52	30	9.470,00	106,58
22850000	205,18	90	9.470,00	140,11
22850000	237,10	180	9.470,00	166,51
22900000	369,08	1	43.983,00	187,41
22900000	444,02	7	43.983,00	304,24
22900000	498,20	15	43.983,00	367,82
22900000	581,34	30	43.983,00	437,11
22900000	826,90	90	43.983,00	574,64
22900000	960,13	180	43.983,00	682,89
23150000	19,15	1	2.834,00	15,08
23150000	23,39	7	2,834,00	24,48
23150000	27,06	15	2.834,00	29,59
23150000	33,05	30	2.834,00	35,17
23150000	53,13	90	2.834,00	46,24
23150000	69,30	180	2.834,00	54,94
23220000	16,62	1	2.987,00	15,83
23220000	18,24	7	2.987,00	25,69
23220000	19,48	15	2.987,00	31,06
23220000	22,49	30	2.987,00	36,91
23220000	36,00	90	2.987,00	48,52
23220000	44,89	180	2.987,00	57,67
23230000	39,08	1	4.073,00	21,04
23230000	43,52	7	4.073,00	34,16
23230000	48,78	15	4.073,00	41,30
23230000	58,05	30	4.073,00	49,08
23230000	84,23	90	4.073,00	64,52
23230000	100,26	180	4.073,00	76,68
23250000	85,05	1	10.036,00	48,20
23250000	93,92	7	10.036,00	78,25
23250000	102,17	15	10.036,00	94,60
23250000	116,30	30	10.036,00	112,42
23250000	160,14	90	10.036,00	147,79
23250000	199,51	180	10.036,00	175,63

b) Curva Adimensional Média da Região 2

Os pontos adimensionais dos postos desta região agrupam-se em torno de uma curva diferente em cada período (Figura 9.6 e Figura 9.7).

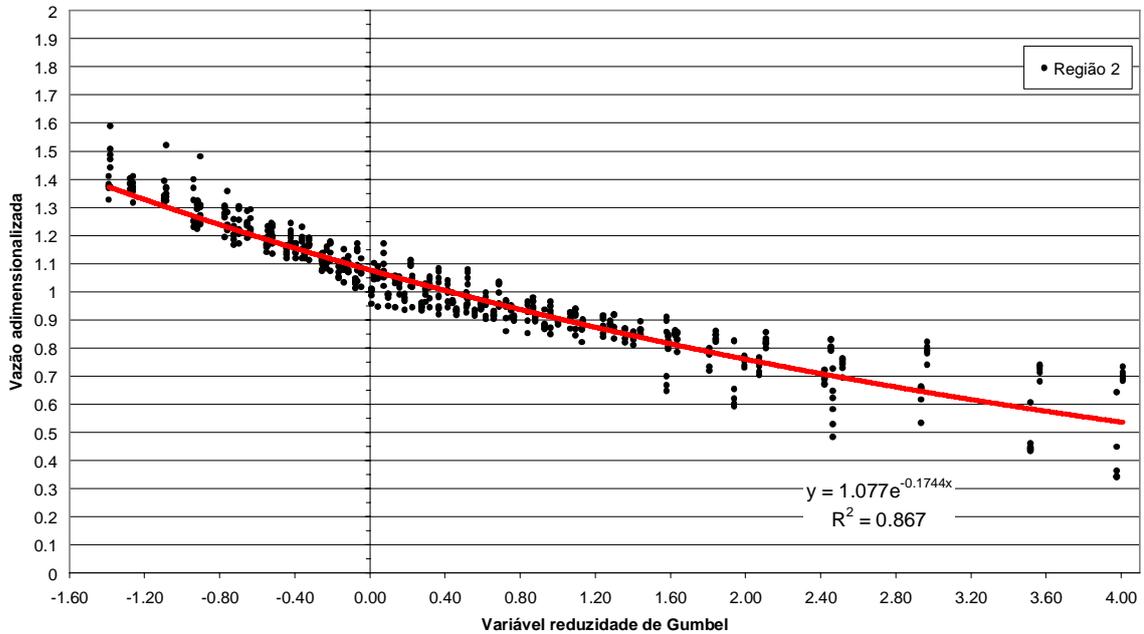


Figura 9.6 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 2 -período anual/seco

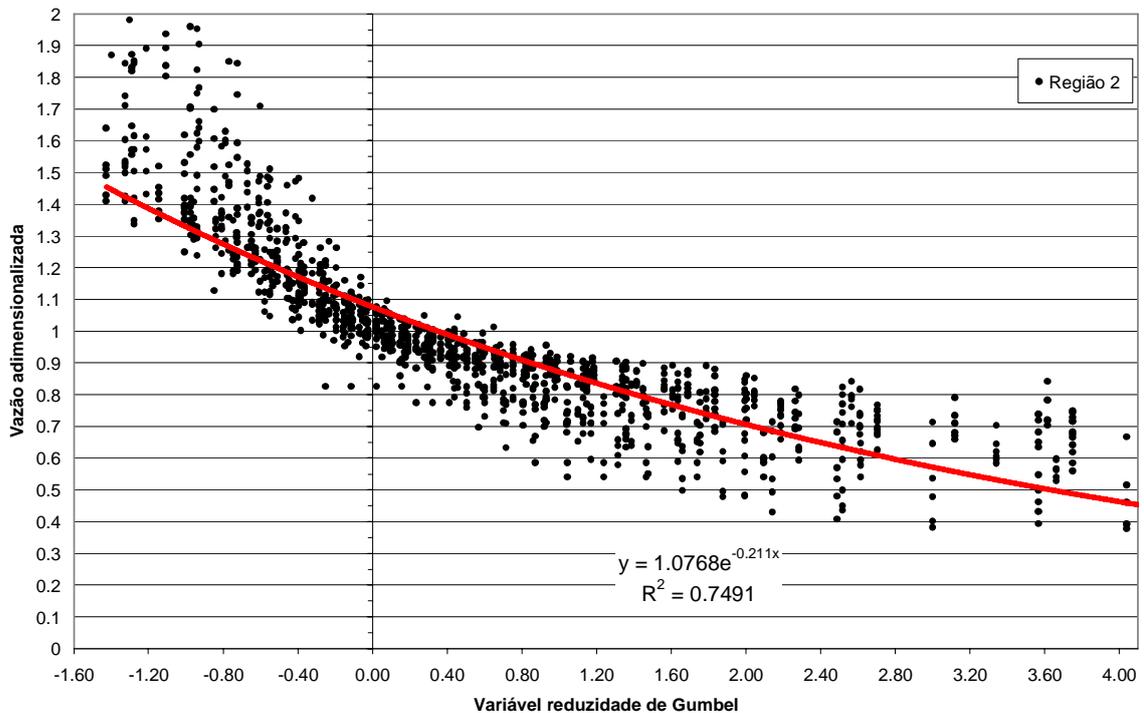


Figura 9.7 - Curva adimensional de probabilidade para as vazões mínimas – Região 2 - período úmido

A dispersão é reduzida para períodos de retorno inferiores a 10 anos ($y_{\text{GUMBEL}} \leq 2,26$), mas significativa para valores maiores, devendo utilizar-se com cuidados. As equações das retas ajustadas sobre os gráficos permitem estabelecer as seguintes relações analíticas entre a vazão média adimensional e o período de retorno:

Anual e seco

$$q_{\min} = 1,077 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,1744} \quad R^2 = 0,867$$

Úmido

$$q_{\min} = 1,0768 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,211} \quad R^2 = 0,749$$

onde:

q_{\min} = vazão mínima adimensionalizada

T = período de retorno (anos)

A multiplicação da vazão adimensional assim obtida pela vazão mínima de longo período com a duração d em um ponto da rede hidrográfica resulta na vazão média anual com período de retorno T neste ponto.

9.5 Roteiro de Cálculo da Vazão Mínima Média Anual - Período de Retorno T

Em função da posição do local onde se pretende estimar a vazão (Figura 9.3) determinar a região. Se o local se encontra na região 1, deve-se seguir o procedimento do item 9.4.1; se o local encontra-se na região 2, deve-se seguir o procedimento descrito no item 9.4.2.

9.5.1 Roteiro de Cálculo para a Região 1:

O primeiro passo consiste em determinar a vazão mínima de longo período a partir de uma das equações do Quadro 9.4 para os períodos seco e anual e do Quadro 9.5 para o período úmido.

Depois deve utilizar-se a equação adimensional de probabilidades correspondente para determinar a vazão com o tempo de retorno requerido.

As equações assim obtidas para o período anual/seco são:

$$Q_{\min}(T) = q_{\min} * 0,2033 * d^{0,0422} * A^{0,651}$$

$$Q_{\min}(T) = q_{\min} * 0,0509 * d^{0,0422} * A^{0,964} S^{0,934}$$

$$Q_{\min}(T) = q_{\min} * 0,041 * d^{0,0392} S^{1,010} * A$$

$$q_{\min} = 1,077 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,1744}$$

As equações assim obtidas para o período úmido são:

$$Q_{\min}(T) = q_{\min} * 0,115 * d^{0,160} * A^{0,723}$$

$$Q_{\min}(T) = q_{\min} * 0,052 * d^{0,160} * A^{0,902} S^{0,533}$$

$$q_{\min} = 1,0768 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,211}$$

9.5.2 Roteiro de Cálculo para a Região 2

O primeiro passo consiste em determinar a vazão mínima de longo período a partir da equação do Quadro 9.8 para os períodos seco e anual e do Quadro 9.9 para o período úmido.

Depois deve utilizar-se a equação adimensional de probabilidades correspondente para determinar a vazão com o tempo de retorno requerido.

As equações assim obtidas para o período anual/seco são:

$$Q_{\min} = q_{\min} * 0,00502 * d^{0,146} A^{0,912}$$

$$q_{\min} = 1,077 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,1744}$$

As equações assim obtidas para o período úmido são:

$$Q_{\min} = q_{\min} * 0,01013 * d^{0,249} A^{0,919}$$

$$q_{\min} = 1,0768 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,211}$$

9.6 Limitações

A regionalização das vazões mínimas na margem direita do rio Tocantins no Estado de Tocantins a princípio, não se aplica a bacias pequenas porque a maior parte dos postos fluviométricos analisados tem áreas contribuintes maiores que 1.000 km².

A representatividade temporal é relativamente boa, embora nos últimos tempos exista uma tendência de mudança nas precipitações que, se confirmada, indica uma mudança na estacionariedade da série, e, portanto, indica novos estudos antes da aplicabilidade de qualquer equação deste trabalho.

9.7 Exemplo de Aplicação

Para realizar uma outorga em um lote de teste, foi determinado a possibilidade de que seja utilizadas duas vazões, uma na época seca e outra na época úmida. Foi determinado que seria utilizado um máximo de água igual a vazão de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno.

Em função das coordenadas e com um software de geoprocessamento foi encontrada que a área correspondente a esse local tem 4.737 Km² e que este local se encontra na região 2.

Solução:

O primeiro passo consiste em determinar a vazão mínima de longo período a partir de uma das equações do Quadro 9.5 para os períodos seco e anual e o Quadro 9.6 para o período úmido. Estas equações são:

$$Q_{\min} = 0,00502 * d^{0,146} A^{0,912} \text{ (período anual e seco)} \Rightarrow Q_{\min(d=7)} = 15,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_{\min} = 0,01013 * d^{0,249} A^{0,919} \text{ (período úmido)} \Rightarrow Q_{\min(d=7)} = 39,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Depois deve utilizar-se a equação adimensional de probabilidades correspondente para determinar a vazão com o tempo de retorno requerido.

$$\text{Anual e seco: } q_{\min} = 1,077 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,1744} \Rightarrow q_{\min(T=10)} = 0,727396$$

$$\text{Úmido: } q_{\min} = 1,0768 \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^{0,211} \Rightarrow q_{\min(T=10)} = 0,669761$$

$$\text{Anual e Seco} \Rightarrow Q_{(7,10)} = 10,91 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Úmido} \Rightarrow Q_{(7,10)} = 26,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

10 REGIONALIZAÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA

10 REGIONALIZAÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA

10.1 Conceitos

A curva de permanência de vazões de um ponto da rede hidrográfica é uma função hidrológica que espelha a disponibilidade hídrica neste ponto. É uma síntese do regime hidrológico que dá uma idéia do potencial de utilização de um manancial, sobretudo na faixa das vazões médias a mínimas, sendo freqüentemente empregada em estudos de potencial hidrelétrico, abastecimento, irrigação e de qualidade da água.

A curva de permanência de vazões relaciona cada magnitude de vazão de um rio com a soma de todos os períodos de tempo (a permanência) em que ela foi igualada ou superada numa cronologia de vazões. É também chamada de curva de duração. Costuma-se representar a curva de permanência com os tempos em porcentagem, para facilitar a comparação desta função hidrológica de postos com diferentes tamanhos de séries de vazão.

Para uma série de vazões de um posto, representativa do seu escoamento, podem ser calculadas diferentes curvas de permanência. Uma primeira diferença diz respeito ao intervalo de tempo: uma curva de permanência calculada com vazões diárias é diferente daquela calculada com vazões médias mensais (esta dá mais permanência a valores de baixas vazões do que a primeira).

Desconsiderando o efeito do intervalo de tempo, várias curvas de permanência podem ser estabelecidas para um posto porque podem ser identificadas diferenças conceituais. O conceito mais comum é o daquela que hoje poderíamos denominar de curva de permanência total ou anual. A curva de permanência total é a que é normalmente apresentada nos livros-texto de hidrologia, sendo construída com todos os valores observados. O grande problema da curva de permanência total é que ela ordena todas as vazões de todos os anos de observação, misturando sazonalidades e períodos críticos interanuais. Assim, as vazões associadas a cada permanência são as mesmas em todos os períodos do ano, o que não é verdade. A maneira de contornar isto é a consideração de curvas de permanência sazonais (estacionais ou mensais). Por outro lado, a mistura de períodos críticos interanuais (períodos de estiagem de todos os anos de observação) faz com que a curva de permanência total seja muito conservadora, ao subestimar a permanência de muitas vazões num ano qualquer. Isto pode ser contornado pela curva de permanência anual média, ou seja, a média das curvas de permanência individuais de cada ano. O conceito de curva de permanência média pode ser estendido também para a definição de uma curva de permanência sazonal média (por exemplo, mensal média). As

curvas de permanência médias (anuais ou mensais) são criticáveis justamente porque fornecem o valor esperado de uma vazão para uma permanência especificada, o que não satisfaz muitos usuários que querem valores mais conservadores.

Neste estudo de regionalização, as curvas de permanência médias não foram estabelecidas. Os cálculos abrangeram a tradicional curva de permanência total ou anual e as curvas de permanência sazonais.

10.2 Curva de Permanência Observada

Com o advento das planilhas eletrônicas o estabelecimento de uma curva de permanência observada é bastante simples, bastando:

- Criar uma primeira coluna com a ordem de 1 a n, sendo n o número de vazões disponíveis;
- Colocar, numa segunda coluna, a série de vazões, e ordená-la de forma decrescente, de modo que para a ordem um corresponda a maior vazão da série e para a ordem n, a menor;
- Calcular, numa terceira coluna, a permanência $p(\%) = (100*i)/(n+1)$, onde i é a ordem (primeira coluna).

Para determinar as vazões correspondentes às permanências exatas desejadas (por exemplo, 50%, 95%, e outras), é suficiente proceder a uma interpolação linear.

Este modo de calcular dá resultados muito semelhantes aos métodos clássicos dos livros-texto de hidrologia que usam intervalos de classe e contagem da frequência de ocorrência acumulada nestes intervalos.

A maneira de calcular as vazões de permanência observadas não muda em função da natureza da curva de permanência, pois o que muda é o universo das vazões ordenadas. Por exemplo, se há uma série de 30 anos de vazões diárias, a curva de permanência total seria feita com a ordenação de 10.950 valores enquanto que uma curva de permanência mensal, como a de janeiro, o número de vazões ordenadas seria de 930.

A simbologia utilizada normalmente para uma curva de permanência de vazões é Q_p (p sem o %). Por exemplo, Q_{95} significa a vazão igualada ou superada em 95% do tempo, isto é, a vazão com permanência de 95%.

10.3 Modelo da Curva de Permanência

A escolha de um modelo para a curva de permanência observada das vazões (também chamada de curva de permanência empírica) condiciona a própria regionalização.

Há basicamente dois tipos de modelagem da curva de permanência:

- Função matemática ajustando-se a todos os pontos estabelecidos da curva de permanência observada;
- Função matemática interpolando dois ou mais pontos da curva de permanência observada.

O primeiro tipo é conhecido como modelo paramétrico e um, dentre vários exemplos, seria a equação de um polinômio de terceiro grau da permanência (variável explicativa). A regionalização de uma função como esta é feita pela regressão dos seus parâmetros (os coeficientes do polinômio, no caso deste exemplo) com características físicas e climatológicas da bacia.

O segundo tipo de modelagem “amarra” uma função matemática a vazões de permanência notáveis (a função passa obrigatoriamente por estes pontos), sendo, por isso, conhecido como modelo interpolativo. A vantagem principal do modelo interpolativo sobre o modelo paramétrico é que ele força a passagem da função sobre vazões importantes, já que o modelo paramétrico pode mostrar desvio significativo no ajuste das vazões com alta permanência, isto é, no ramo mais importante da curva de permanência, o ramo inferior.

No presente estudo o modelo escolhido foi o modelo interpolativo exponencial entre as vazões Q_{50} e Q_{90} dado por :

$$Q_p = e^{\alpha p + \beta}$$

onde

p = permanência em %

$$\alpha = -\frac{1}{0,40} \ln\left(\frac{Q_{50}}{Q_{90}}\right)$$

$$\beta = \ln Q_{50} - 0,50\alpha$$

A regionalização foi feita em cima das regressões das vazões Q_{50} e Q_{90} em função de características da bacia.

10.4 Regionalização da Curva de Permanência

Dada a forte sazonalidade existente nas bacias analisadas, optou-se por caracterizar a curva de permanência em três períodos:

- anual: considerando ano hidrológico para vazões mínimas, ou seja, coincidente com o ano civil;
- período úmido: abarca o período de chuva, se estende desde o 1º de novembro até o até o 30 de abril;
- período seco: se estende desde o 1º de maio até o até o 31 de outubro.

No Quadro 10.1 são apresentadas para comparação as vazões médias de longo período para cada um dos períodos em que foi dividida a séries. Estes valores foram utilizados para adimensionalizar as curvas de permanência em cada período.

Quadro 10.1 - Vazões médias de longo período para os períodos anual, úmido e seco

Código ANA	Qm anual	Qm seco	Qm úmido
21650000	433,07	153,15	729,52
21750000	37,5	29,39	45,4
21760080	5,7	5,34	5,93
21780170	4,2	4,25	4,3
21850000	230,1	150,64	311,92
21890000	268,7	148,62	394,76
21900000	700,5	313,42	1091,43
22190000	42,8	29,19	56,97
22200080	6,4	6,09	6,8
22220000	143,4	46,08	239,29
22250000	196,6	62,08	325,04
22351000	3,5	2,51	3,71
22680000	306,3	202,28	408,42
22700000	306,2	207,7	406,8
22730000	95,4	53,5	139,16
22735080	102,1	85,57	130,64
22850000	175,7	77,83	253,42
22900000	741,1	439,48	1039,49
23150000	53,9	28,4	79,68
23220000	33,5	19,42	48,08
23230000	75,8	45,73	106,44
23250000	160,1	100,14	218,35

No anexo 6 podem ser observadas as curvas de permanência estimadas para cada um dos 22 postos obtidos fluviométricos obtidos da Hidroweb e organismos estaduais (Ex, CELTINS) com séries disponíveis, e para os três períodos considerados. No Quadro 10.2

estão apresentadas as vazões características para o período anual. No Quadro 10.3 é apresentada a mesma informação para o período úmido e no Quadro 10.4 para o período seco.

Quadro 10.2 - Vazão diárias características da curva de permanência-anual

Código ANA	ANUAL			
	Q50	Q90	a	b
21650000	214,5	105,4	-1,7764	6,2565
21750000	30,9	26,9	-0,3466	3,6040
21760080	5,3	4,0	-0,7060	2,0283
21780170	4,1	3,6	-0,3080	1,5582
21850000	170,2	126,8	-0,7359	5,5049
21890000	172,6	124,8	-0,8107	5,5563
21900000	431,3	228,4	-1,5893	6,8614
22190000	33,6	24,6	-0,7794	3,9043
22200080	5,9	5,3	-0,2478	1,8971
22220000	65,4	27,2	-2,1933	5,2772
22250000	94,2	33,4	-2,5922	5,8415
22351000	1,9	0,6	-3,1384	2,2267
22680000	235,5	161,7	-0,9399	5,9317
22700000	246,1	158,5	-1,1000	6,0557
22730000	68,8	37,2	-1,5372	4,9998
22735080	72,7	61,7	-0,4128	4,4930
22850000	107,8	47,4	-2,0541	5,7073
22900000	564,2	304,7	-1,5402	7,1055
23150000	34,3	16,2	-1,8753	4,4728
23220000	24,3	13,3	-1,5068	3,9439
23230000	56,2	32,9	-1,3386	4,6982
23250000	126,5	69,6	-1,4937	5,5871

Quadro 10.3 - Vazões diárias características da curva de permanência-úmido

Código ANA	ÚMIDO			
	Q50	Q90	a	b
21650000	486,3	191,4	-2,3312	7,3524
21750000	35,9	28,7	-0,5596	3,8605
21760080	5,7	5,0	-0,3129	1,8908
21780170	4,3	3,6	-0,4386	1,6845
21850000	238,3	151,8	-1,1274	6,0372
21890000	292,2	158,1	-1,5355	6,4452
21900000	785,3	382,3	-1,7800	7,5659
22190000	47,4	31,2	-1,0455	4,3814
22200080	6,7	5,6	-0,4294	2,1181
22220000	147,8	57,7	-2,3515	6,1716
22250000	227,6	75,8	-2,7487	6,8020
22351000	3,9	1,1	-3,2869	3,0070
22680000	332,8	211,6	-1,1321	6,3736
22700000	351,1	219,3	-1,1766	6,4494
22730000	114,0	59,2	-1,6382	5,5553
22735080	129,2	67,0	-1,6441	5,6836
22850000	212,9	87,4	-2,2258	6,4737
22900000	888,0	506,4	-1,4041	7,4910
23150000	59,5	26,8	-1,9939	5,0829
23220000	39,2	20,7	-1,5964	4,4669
23230000	88,4	50,1	-1,4196	5,1917
23250000	194,1	106,1	-1,5100	6,0234

Quadro 10.4 - Vazões diárias características da curva de permanência-seco

Código ANA	SECO			
	Q50	Q90	a	b
21650000	137,1	94,0	-0,9435	5,3925
21750000	28,3	26,2	-0,1928	3,4392
21760080	4,6	3,9	-0,4430	1,7493
21780170	3,8	3,6	-0,1698	1,4252
21850000	143,6	122,5	-0,3973	5,1657
21890000	140,4	120,4	-0,3842	5,1366
21900000	277,0	212,9	-0,6580	5,9530
22190000	27,8	23,3	-0,4415	3,5458
22200080	5,5	5,3	-0,1308	1,7783
22220000	36,5	24,3	-1,0171	4,1059
22250000	47,2	29,1	-1,2091	4,4590
22351000	0,9	0,4	-2,3727	1,1138
22680000	188,8	152,5	-0,5338	5,5076
22700000	188,0	148,1	-0,5964	5,5346
22730000	47,5	34,1	-0,8286	4,2750
22735080	64,1	61,3	-0,1124	4,2169
22850000	64,0	42,0	-1,0530	4,6854
22900000	391,1	278,2	-0,8516	6,3947
23150000	21,9	14,6	-1,0137	3,5933
23220000	16,8	12,0	-0,8412	3,2420
23230000	39,1	31,2	-0,5643	3,9483
23250000	87,5	64,2	-0,7741	4,8587

Para a estimativa da curva de permanência foram utilizados somente anos que não tinham mais de 15 falhas em um mesmo mês no período de chuvas(úmido) e mais de 10 falhas no período de estiagem (seco). No Quadro 10.5 pode-se observar um resumo dos valores utilizados na estimativa da curva de permanência.

Quadro 10.5 - Resumo de utilização dos dados para as curvas de permanência

Código ANA	Anos		
	Total	Úteis	Excluídos
21650000	28	24	4
21750000	31	27	4
21850000	33	27	6
21890000	34	30	4
22190000	30	27	3
22220000	32	20	12
22250000	36	31	5
22680000	33	24	9
22700000	34	26	8
22730000	13	11	2
22850000	29	17	12
22900000	37	31	6
23130000	16	12	4
23150000	33	26	7
23220000	22	19	3
23230000	22	20	2
23250000	34	22	12

Para definir as regiões homogêneas foram plotadas as curvas de permanência ajustadas entre 50 e 90 % da permanência segundo a metodologia apresentada no item 10.3. A plotagem dos pares de pontos de todos os postos geram uma ‘nuvem’ de pontos que é trabalhada empiricamente, mas com uma lógica espacial hidrológica, para separar tendências diferentes que configurem regiões homogêneas distintas.

Na Figura 10.1 se observa as curvas de permanência adimensionais para cada posto fluviométrico analisado. Da plotagem pode-se observar a existência de três regiões com comportamento homogêneo, embora as diferenças dentro de cada região apontem para heterogeneidades que não podem ser capturadas com os dados existentes.

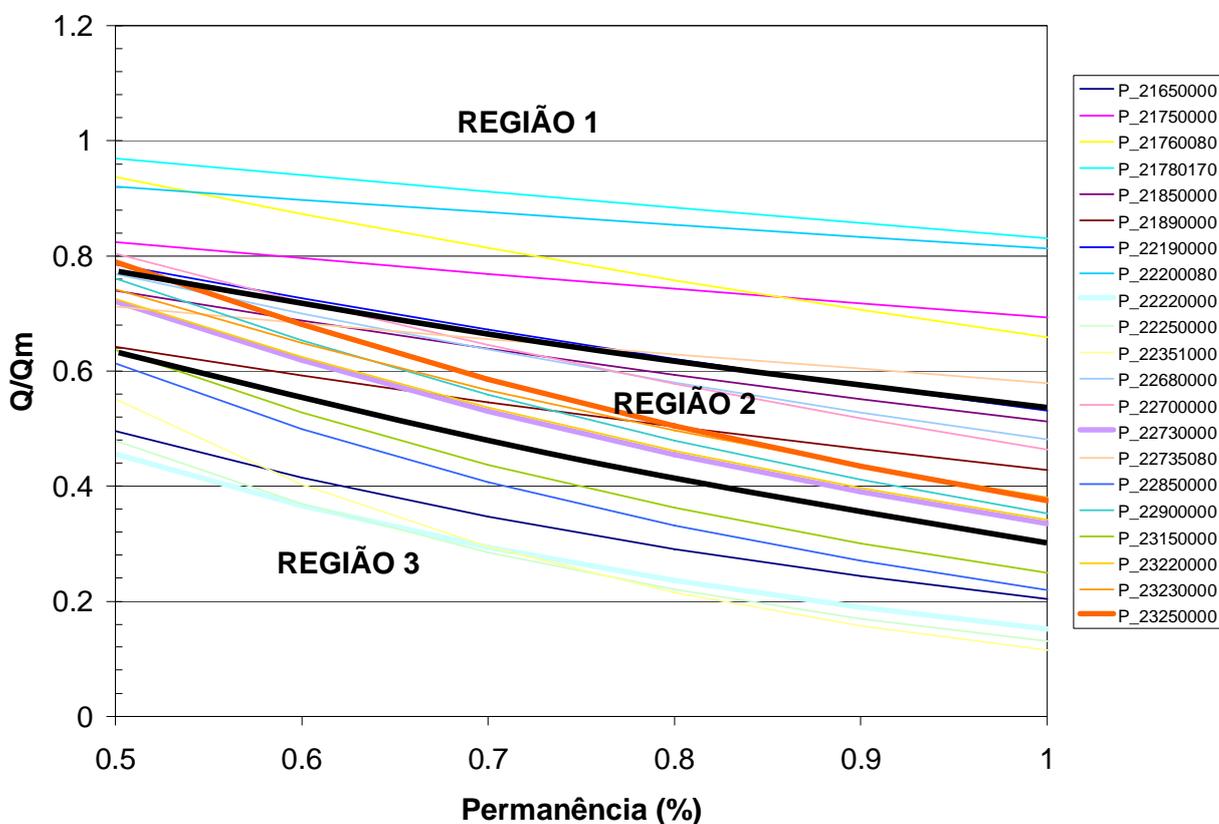


Figura 10.1 - Curvas de permanência adimensionais para o período anual

A região do Jalapão foi englobada dentro de uma região genérica denominada “sem dados”, pela falta de séries para caracterizar seu comportamento. Assim que novos postos estejam disponíveis e com suficiente resolução temporal, a regionalização deve ser revisada para eliminar esta zona sem dados. As regiões definidas para o período anual, foram verificadas para o período seco (Figura 10.2) e úmido (Figura 10.3).

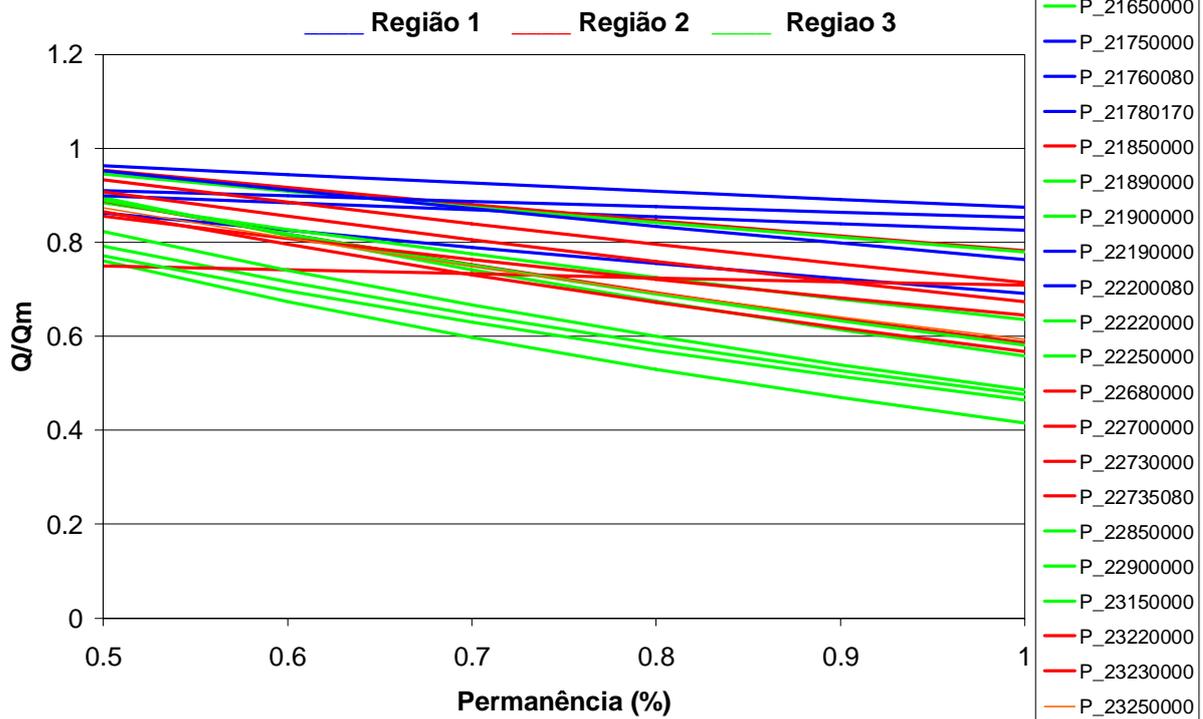


Figura 10.2 - Curvas de permanência adimensionais para o período seco

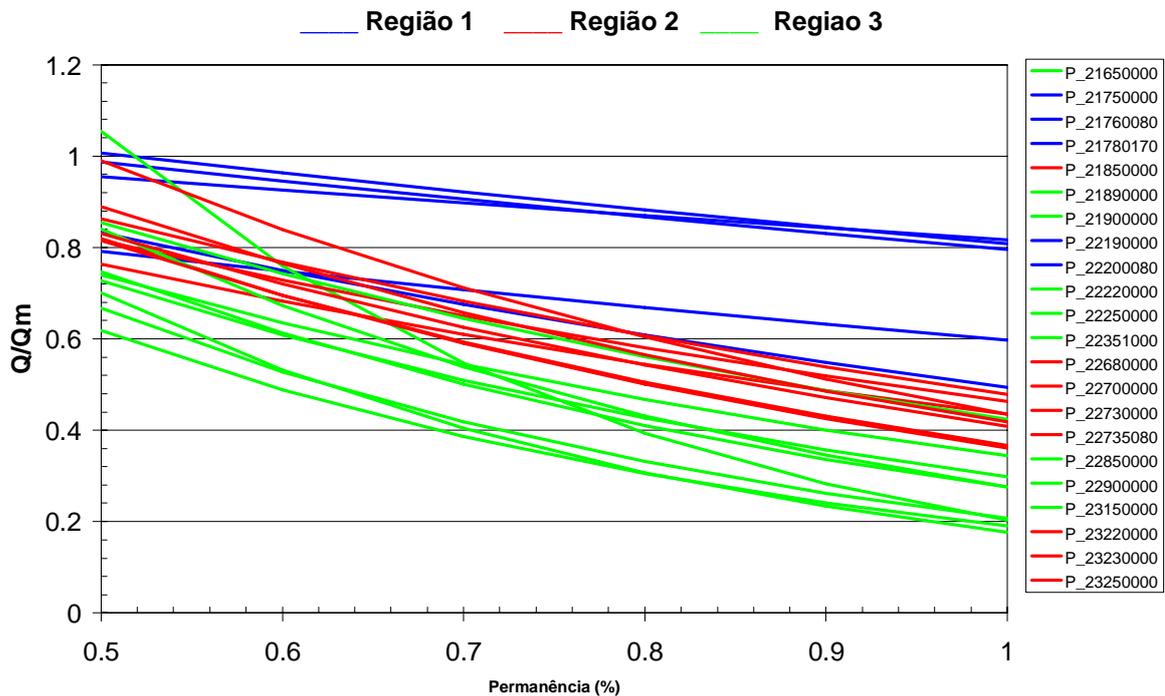


Figura 10.3 - Curvas de permanência adimensionais para o período úmido

A comparação entre as curvas de permanência de cada um dos períodos mostrou que, apesar de existirem alguns postos que mostraram diferenças no comportamento médio de acordo com o período, o comportamento geral foi bastante homogêneo, mostrando, assim, o acerto das regiões definidas. As regiões determinadas se encontram delimitadas na Figura 10.4.

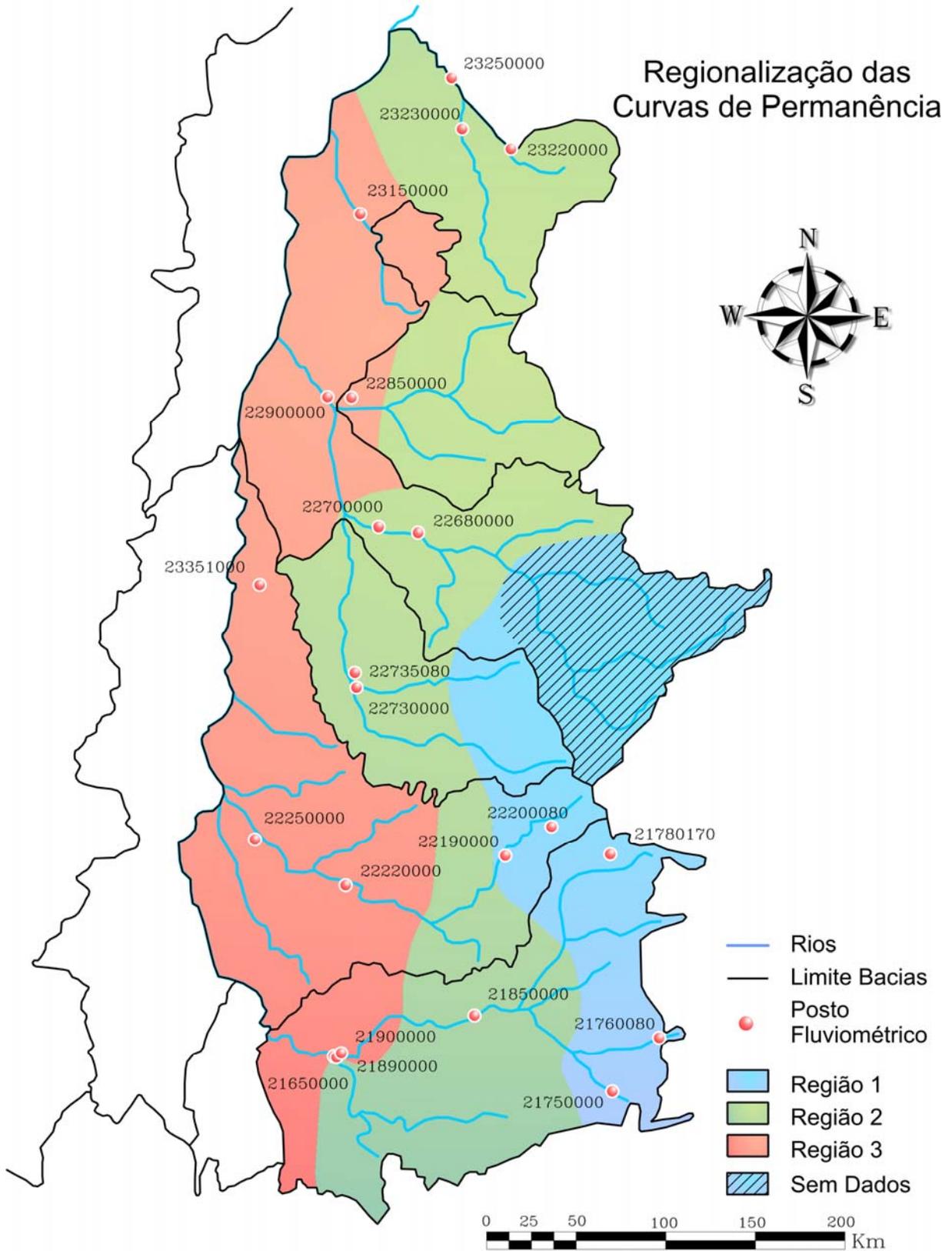


Figura 10.4 - Regiões homogêneas para as curvas de permanência

10.5 Regionalização da Curva de Permanência Anual

Na análise da curva de permanência existem duas opções: (a) regionalizar os parâmetros α e β das curvas ajustadas ou (b) regionalizar as vazões características Q_p (Por exemplo, $p = 50\%$ ou 95%).

Neste trabalho, seguindo as recomendações de Tucci (2002), optou-se por regionalizar as vazões características Q_{50} e Q_{90} . A equação de regressão de Q_p ($p = 50\%$ ou 90%) para cada região homogênea tem a seguinte forma:

$$Q_p = a.A^b.P^c.Per^d.kc^e.kf^f.L^g.S^h.DD^i$$

O ajuste da equação de regressão corresponde ao ajuste dos parâmetros $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ de acordo com os dados de cada região. Neste estudo, a metodologia de ajuste foi por regressão linear múltipla dos logaritmos naturais dos termos da equação:

$$\ln(Q_p) = \ln a + b.\ln A + c.\ln P + d.\ln Per + e.\ln kc + f.\ln kf + g.\ln L + h.\ln S + i.\ln DD$$

O método *stepwise* foi aplicado para reter apenas as variáveis explicativas importantes.

A avaliação da qualidade da regressão foi realizada com o cálculo do coeficiente de determinação R^2 . Foram consideradas todas as variáveis explicativas utilizadas na estimativa das vazões máximas, médias e mínimas.

Destaque-se que nem todas as variáveis explicativas escolhidas são independentes entre si, influenciando no processo de regressão, onde a agregação de mais uma ou diversas variáveis pode alterar significativamente os valores numéricos inicialmente obtidos dos expoentes ou coeficientes da equação de regressão. Isto é normal, pois mesmo adicionando-se uma variável explicativa altamente correlacionada à outra (caso de comprimento em relação a área), ela sempre traz alguma informação nova, melhorando a regressão, mas mudando os parâmetros da equação. Esta característica estatística se denomina multicolinearidade. Torna-se necessário avaliar se este ganho de informação é significativo para manter a variável adicionada da equação. Por uma questão de parcimônia e facilidade de uso é preferível uma equação de regressão com um mínimo de variáveis explicativas, para níveis de precisão semelhantes.

Para análise e indicação de uma regressão para uso, foi utilizada a Regressão com todas as variáveis explicativas (A, P, Per, kc, kf, L, S e DD), com escolha automática daquelas mais significativas (método *stepwise*);

10.5.1 Região 1 - Cabeceiras

O método *stepwise* indicou como única variável significativa a área contribuinte A para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}). A partir das regressões, o posto Agro Trafo 2 (21780170) foi excluído já que apresentou valores fora da tendência, configurando-se num “*outlier*”. Os valores apresentados podem estar influenciados pela operação da PCH presente na vizinhança do posto conforme analisado anteriormente.

Para a região 1 foram obtidas as equações e respectivos R^2 ajustados, indicados no Quadro 10.6.

Quadro 10.6 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 1 – período anual

Variável	Equação	R^2
Q_{50}	$Q_{50}=3,97+0,0186.A$	0,84
Q_{90}	$Q_{90}=0,1165.A^{0,737}$	0,90

Na Figura 10.5 é analisado o ajuste da regressão para estimativa da vazão Q_{50} , onde se observa o posto de Sobrado fora do intervalo de confiança. O fato do posto de Sobrado ter sido eliminado da análise impediu a possibilidade de introduzir outras variáveis já que foi estabelecida a necessidade de se respeitar um mínimo de três graus de liberdade.

Na Figura 10.6 se observam os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área. Para esta vazão característica valem as mesmas considerações que para a Q_{50} .

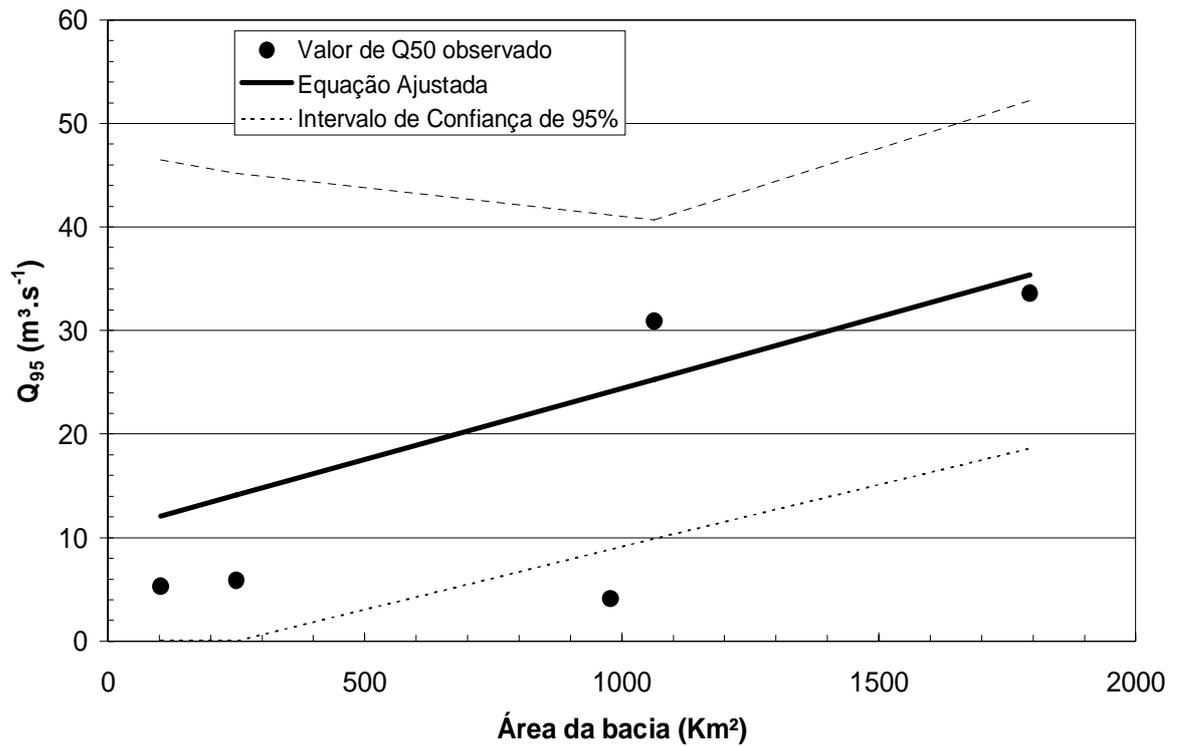


Figura 10.5 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período anual – Região 1

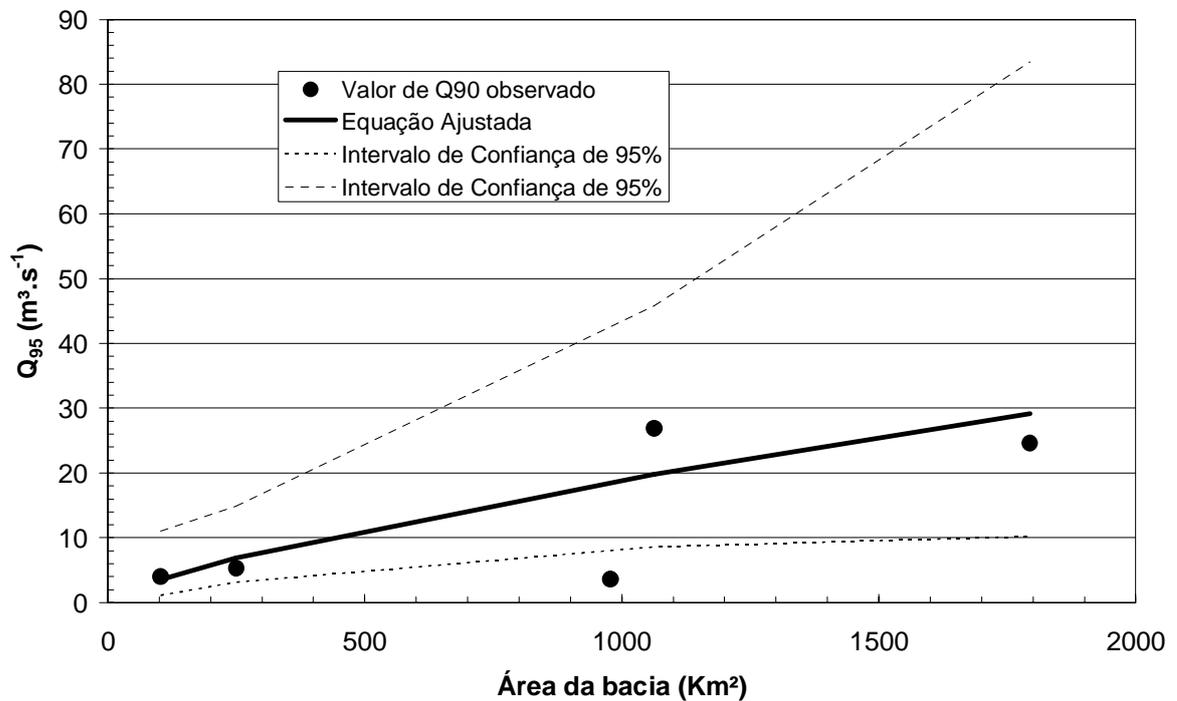


Figura 10.6 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período anual – Região 1

Conforme foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

10.5.2 Região 2 – Trecho Médio dos Rios

O método *stepwise* indicou como única variável significativa a área contribuinte A para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Quadro 10.7). A inclusão do comprimento do rio principal na regressão forneceu uma pequena melhora para a vazão Q_{90} . No entanto, esta melhora esteve muito próxima do limite de aceitação, e, considerando que esta variável é de estimativa muito incerta, pela dificuldade de determinação do início do rio principal, se optou por não incluir esta variável.

Na análise das regressões, os postos Isamu Ikeda/jusante (22735080) e Goiatins (23250000) apresentaram valores fora do intervalo de confiança nas vazões Q_{50} e Q_{90} respectivamente. No entanto, não foram eliminados da regressão, já que mesmo com eles o ajuste foi muito bom. Os valores no posto de Isamu Ikeda/Jusante podem estar influenciados pela operação da PCH que se encontra nas vizinhanças do posto conforme analisado anteriormente.

Quadro 10.7 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 2 – período anual

Variável	Equação	R^2
Q_{50}	$Q_{50} = -13,9 + 0,0143 A$	0,97
Q_{90}	$Q_{90} = -13,7 + 0,00991 A$	0,97

Na Figura 10.7 é analisado o ajuste da regressão para estimativa da vazão Q_{50} , onde se observa o posto de Isamu Ikeda/jusante fora do intervalo de confiança.

Na Figura 10.8 se observam os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área. Para esta vazão característica valem as mesmas considerações apontadas para a Q_{50} .

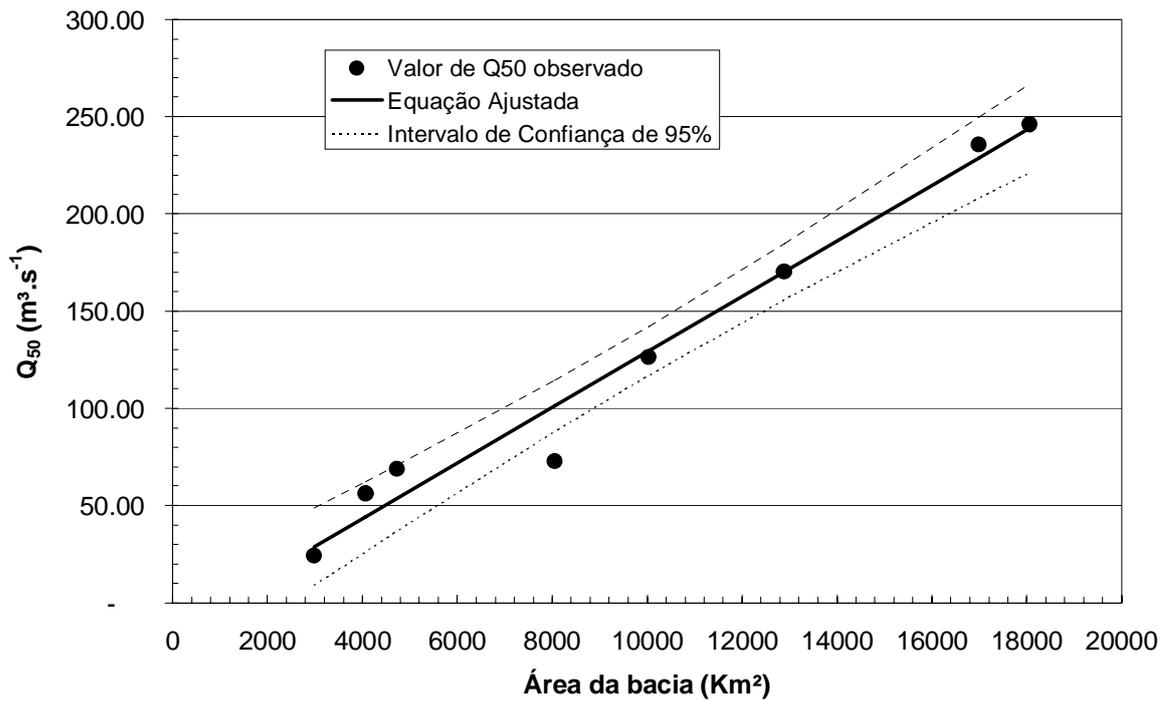


Figura 10.7 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período anual – Região 2.

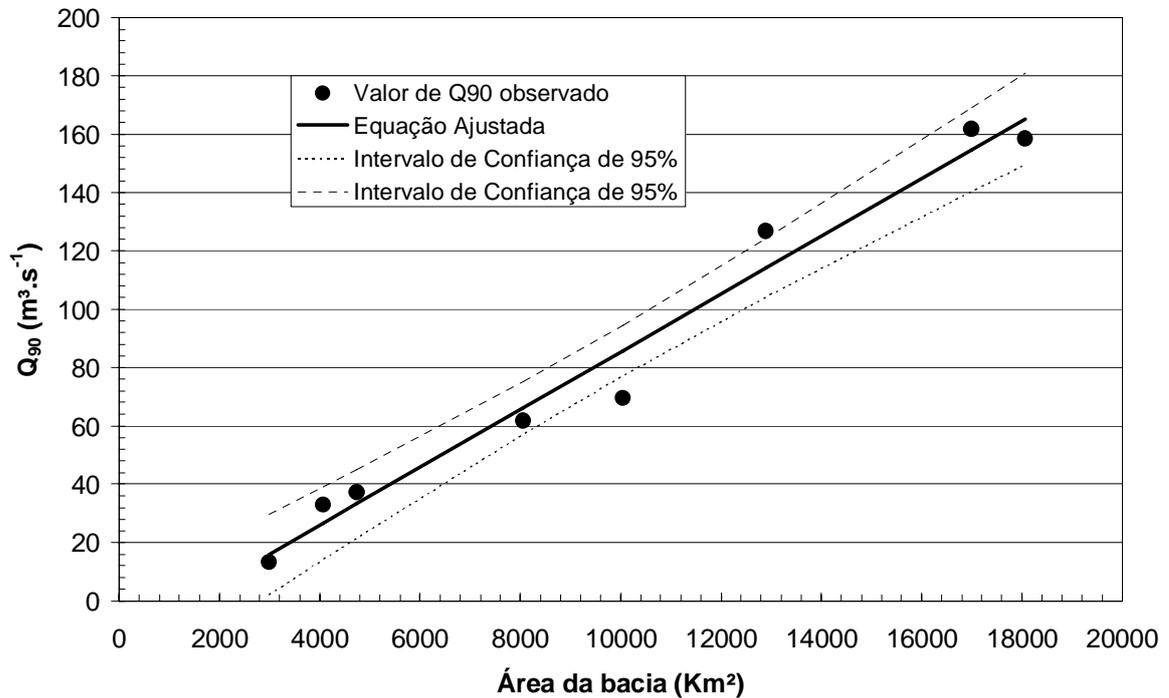


Figura 10.8 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período anual – Região 2

Como foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

10.5.3 Região 3 – Trecho Inferior dos Rios da Margem Direita

O método *stepwise* indicou como única variável significativa a área contribuinte (A) para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Quadro 10.8). A inclusão do comprimento do rio principal na regressão forneceu uma pequena melhora para a vazão Q_{90} . No entanto, esta melhora esteve muito próxima do limite de aceitação, e optou-se por não incluir esta variável, considerando que sua estimativa apresenta grande incerteza, pela dificuldade de determinação do início do rio principal.

Quadro 10.8 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 3 – período anual

Variável	Equação	R ²
Q_{50}	$Q_{50} = 0,015 A^{0,941}$	0,96
Q_{90}	$Q_{90} = 0,0031 A^{1,03}$	0,94

Na Figura 10.9 é analisado o ajuste da regressão para estimativa da vazão Q_{50} .

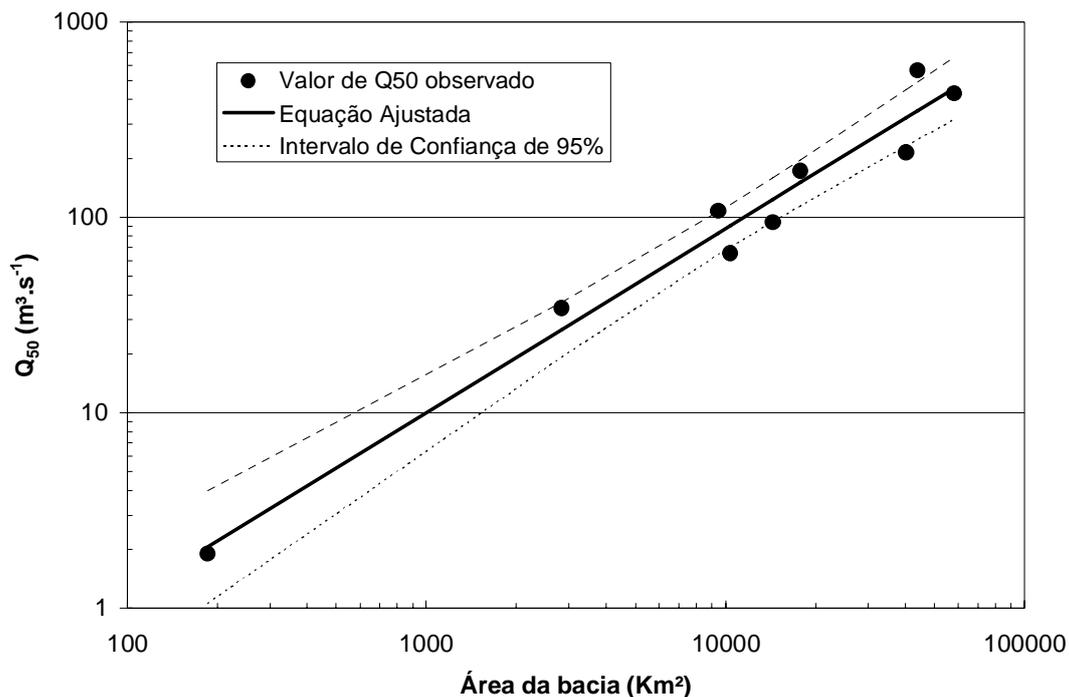


Figura 10.9 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período anual – Região 3

Na Figura 10.10 se observam os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área.

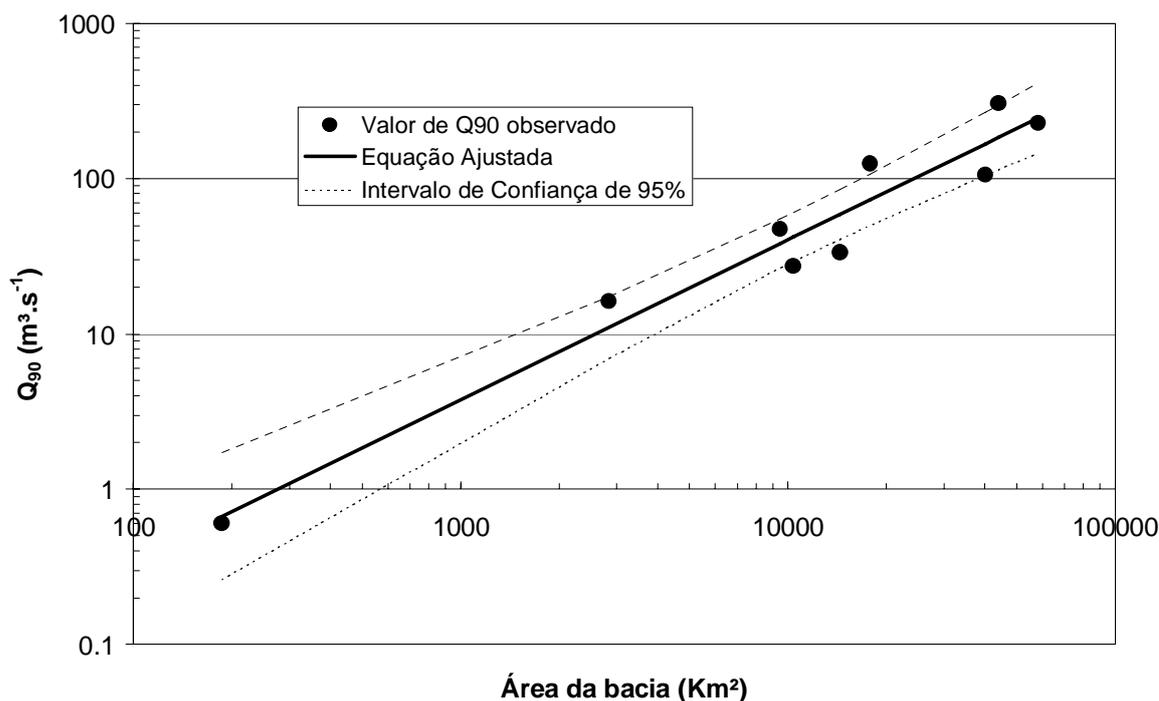


Figura 10.10 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período anual – Região 3

Como foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

10.6 Regionalização da Curva de Permanência para o Período Seco

Neste item serão regionalizados os valores característicos selecionados da curva de permanência (Q_{90} e Q_{50}) para o período seco.

10.6.1 Região 1 - Cabeceiras

O método *stepwise* indicou como única variável significativa a área contribuinte A para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Quadro 10.9). Na análise das regressões, o posto Agro Trafo 2 (21780170) teve que ser excluído, já que apresentou valores fora da tendência. Os valores apresentados podem estar influenciados pela operação da PCH que se encontra nas vizinhanças do posto, conforme analisado anteriormente.

Quadro 10.9 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 1 – período seco

Variável	Equação	R^2
Q_{50}	$Q_{50} = 0,133A^{0,730}$	0,90
Q_{90}	$Q_{90} = 0,121 * A^{0,726}$	0,90

Na Figura 10.11 é analisado o ajuste da regressão para a estimativa da vazão Q_{50} , onde se observa o posto de Sobrado fora do intervalo de confiança. O fato do posto de Sobrado ter sido eliminado da análise impediu a possibilidade de introduzir outras variáveis já que foi estabelecida a necessidade de se respeitar um mínimo de três graus de liberdade.

Na Figura 10.12 são apresentados os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área. Para esta vazão característica valem as mesmas considerações que para a Q_{50} .

Conforme foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

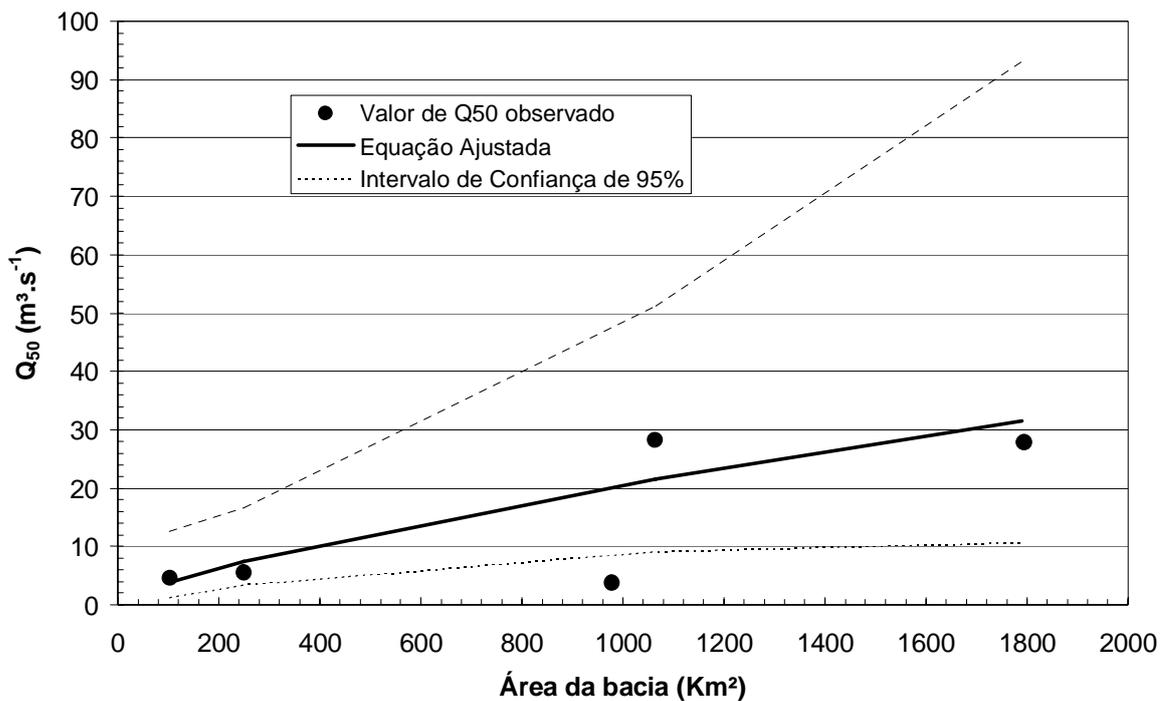


Figura 10.11 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco – Região 1

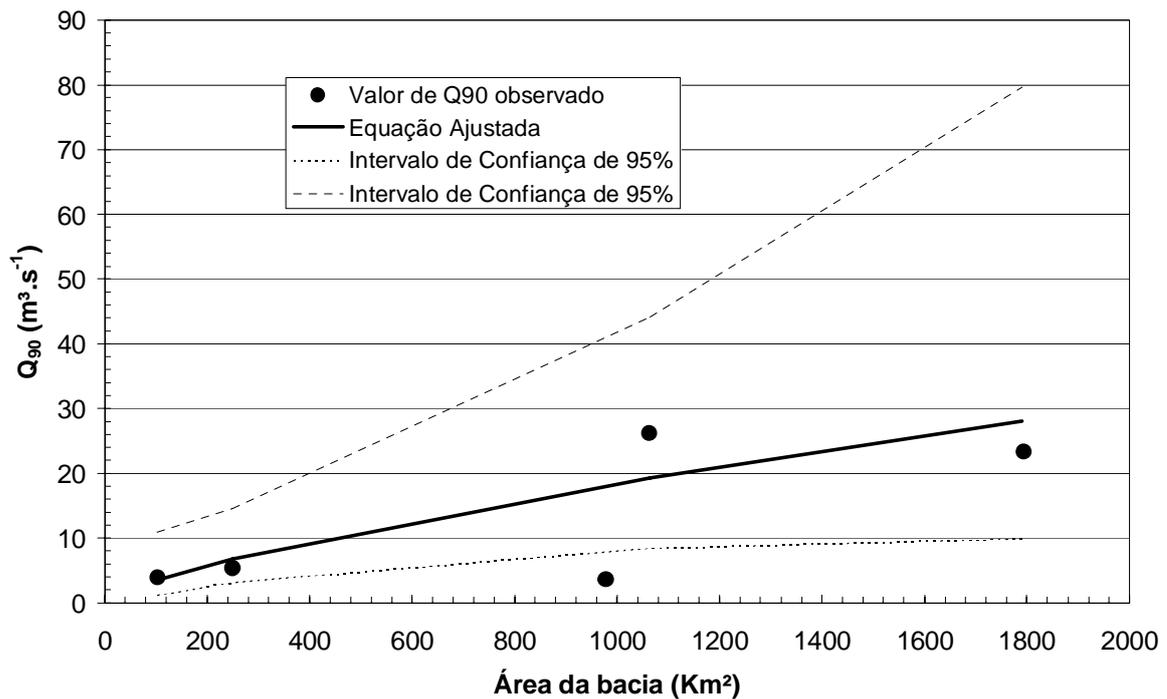


Figura 10.12 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período seco – Região 1

10.6.2 Região 2 – Trecho Médio dos Rios

O método *stepwise* indicou como única variável significativa a área contribuinte para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Quadro 10.10). A inclusão do comprimento do rio principal na regressão forneceu uma pequena melhora para a vazão Q_{90} . No entanto, esta melhora esteve muito próxima do limite de aceitação, e, considerando que esta variável é de estimativa muito incerta, pela dificuldade de determinação do início do rio principal, se optou por não incluir esta variável.

Na análise das regressões, os postos Isamu Ikeda/jusante (22735080) e Goiatins (23250000) apresentaram valores fora do intervalo de confiança nas vazões Q_{50} e Q_{90} , respectivamente. No entanto não foram eliminados da regressão, já que o ajuste foi muito bom. Os valores no posto de Ikeda/Jusante podem estar influenciados pela operação da PCH presente na vizinhança do posto, conforme analisado anteriormente.

Quadro 10.10 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 2 – período seco

Variável	Equação	R ²
Q_{50}	$Q_{50} = - 15,3 + 0,0115 A$	0,98
Q_{90}	$Q_{90} = - 12,7 + 0,00934 A$	0,96

Na Figura 10.13 é analisado o ajuste da regressão para estimativa da vazão Q_{50} .

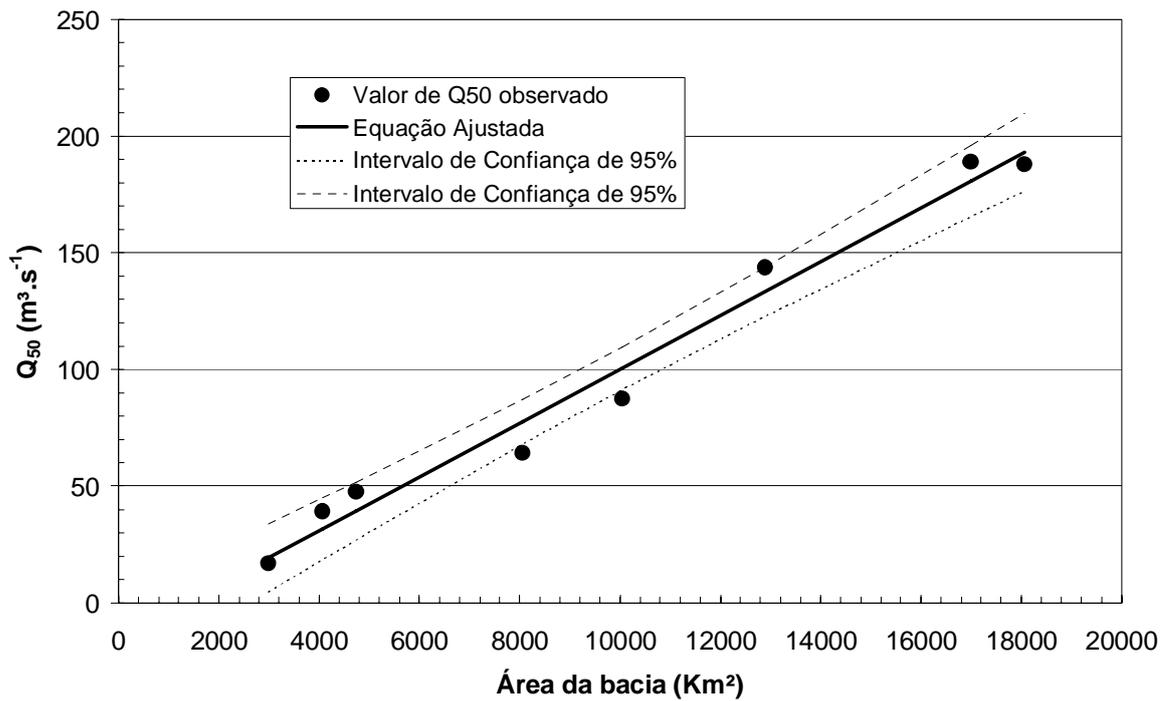


Figura 10.13 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco – Região 2

Na Figura 10.14 são apresentados os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área.

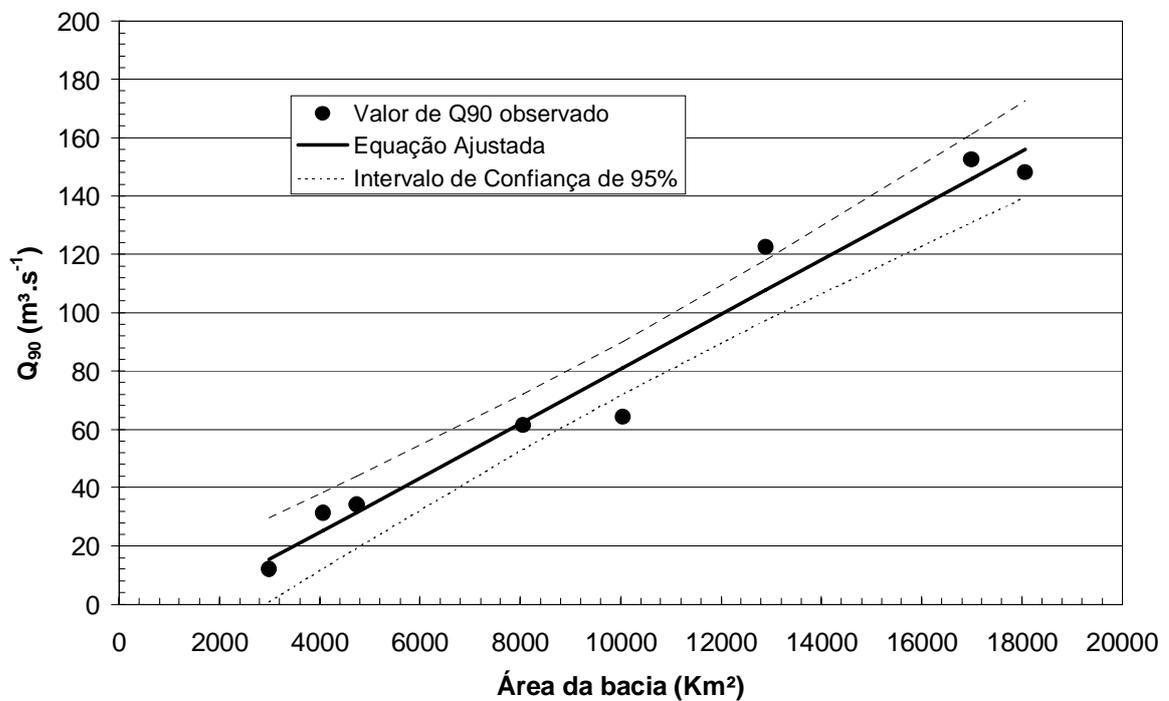


Figura 10.14 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período seco – Região 2

Conforme foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

10.6.3 Região 3 – Trecho Inferior dos Rios da Margem Direita

O método *stepwise* indicou como variáveis significativas a área contribuinte A e a precipitação anual de longo período para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Quadro 10.11). A inclusão do comprimento do rio principal na regressão forneceu uma pequena melhora para a vazão Q_{90} . No entanto, esta melhora esteve muito próxima do limite de aceitação, e optou-se por não incluir esta variável, considerando que sua estimativa apresenta grande incerteza, pela dificuldade de determinação do início do rio principal.

Quadro 10.11 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 3 – período seco

Variável	Equação	R^2
Q_{50}	$Q_{50} = 1,59967E-27.A^{1,15}P^{7,45}$	0,99
Q_{50}	$Q_{50} = 0,0055A^{0,996}$	0,95
Q_{90}	$Q_{90} = 1,984E-33.A^{1,27}P^{9,08}$	0,99
Q_{90}	$Q_{90} = 0,00165 A^{1,08}$	0,94

Nas Figura 10.15 a Figura 10.17 é analisado o ajuste da regressão para estimativa da vazão Q_{50} .

Nas Figura 10.18 a Figura 10.20 estão apresentados os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área. Para esta vazão característica valem as mesmas considerações que para a Q_{50} .

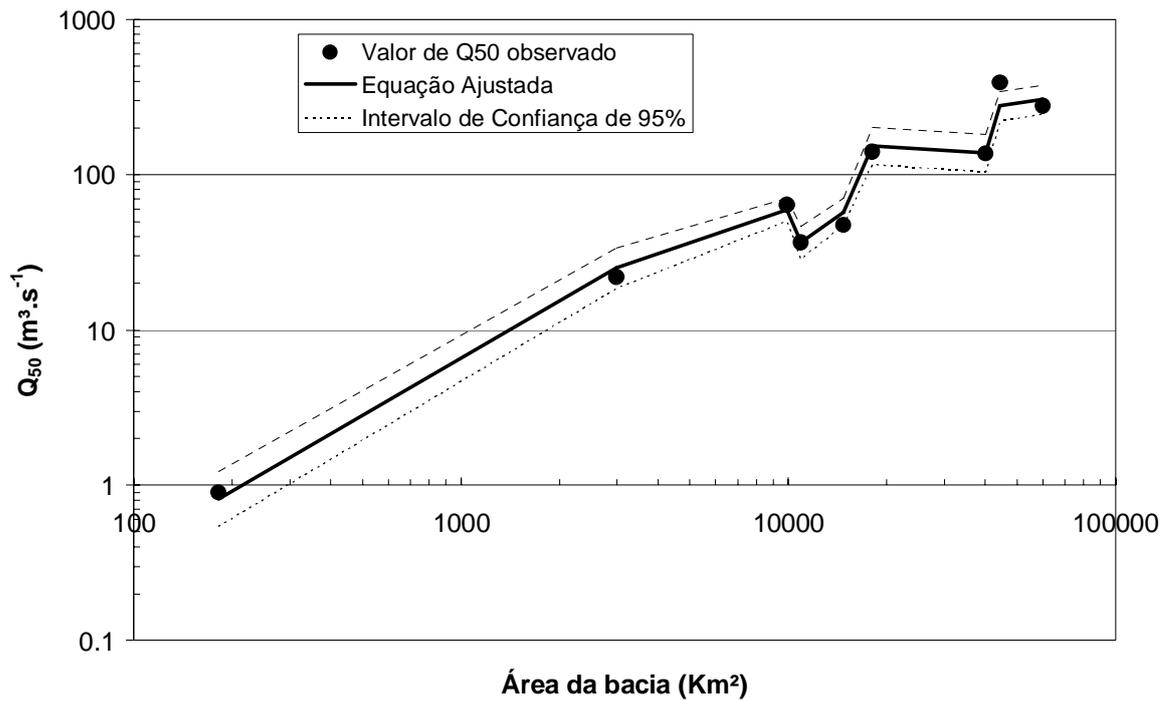


Figura 10.15 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da área com a equação $Q_{50} = 1,59967E-27.A^{1.15}.P7,45$ – Região 3

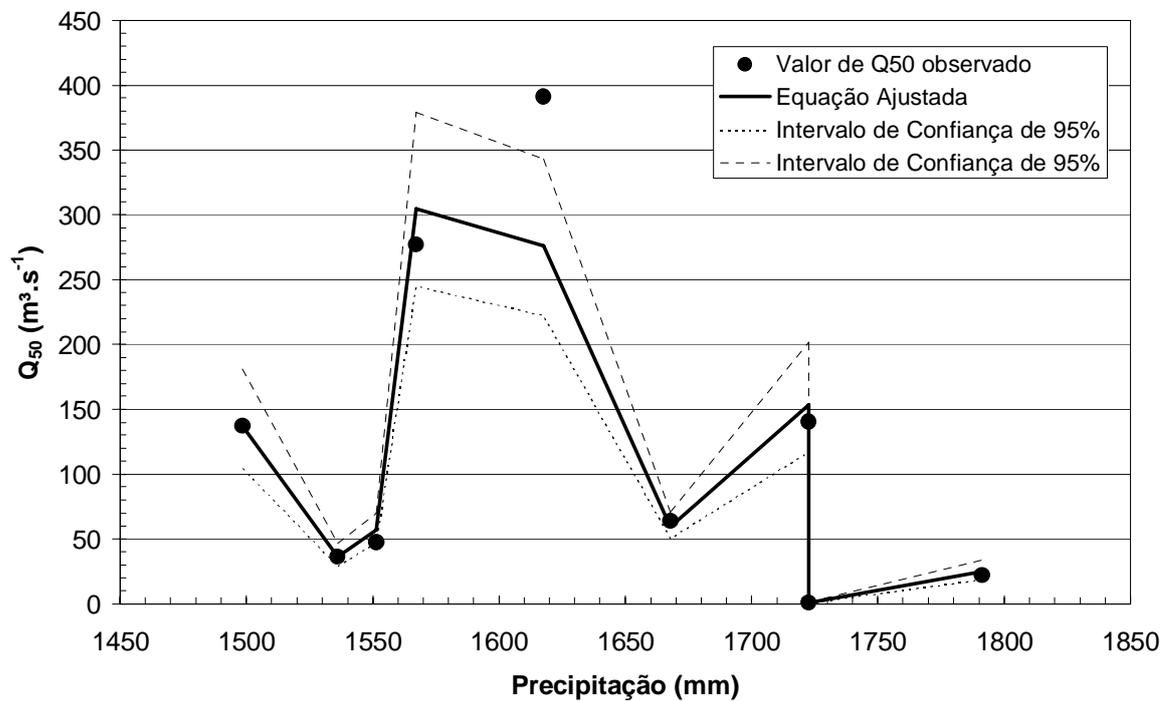


Figura 10.16 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da precipitação com a equação $Q_{50} = 1,59967E-27.A^{1.15}.P7,45$ – Região 3

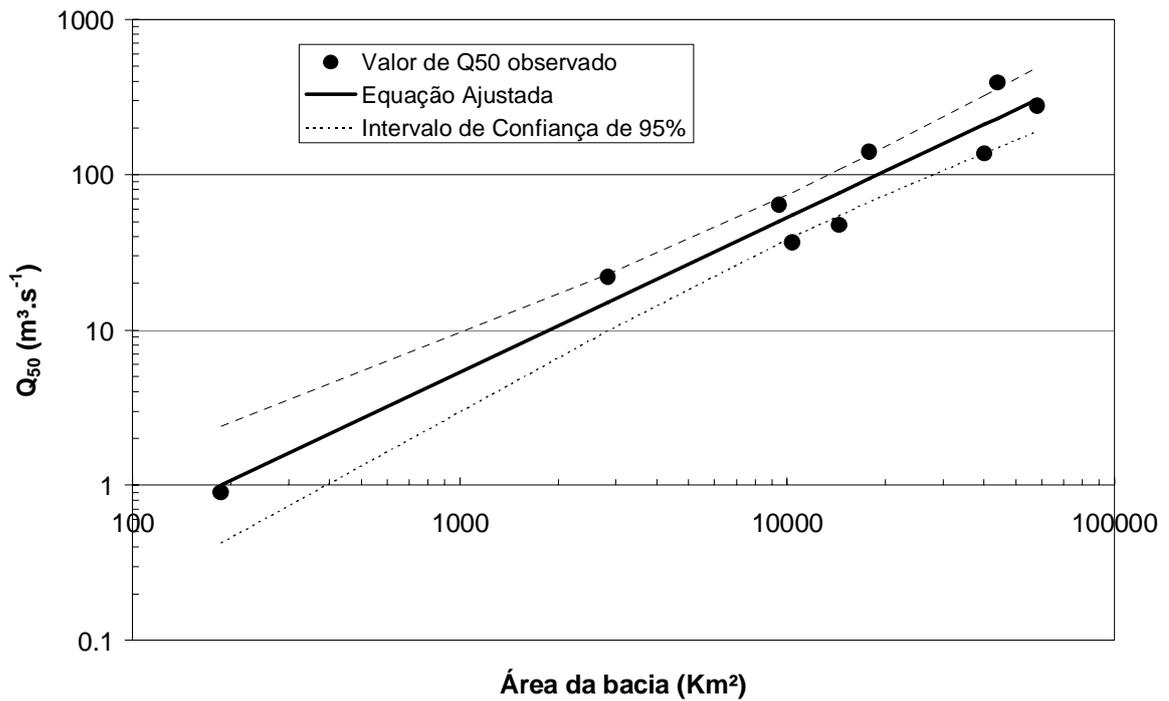


Figura 10.17 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da área com a equação $Q_{50} = 0,0055.A^{0,996}$ – Região 3

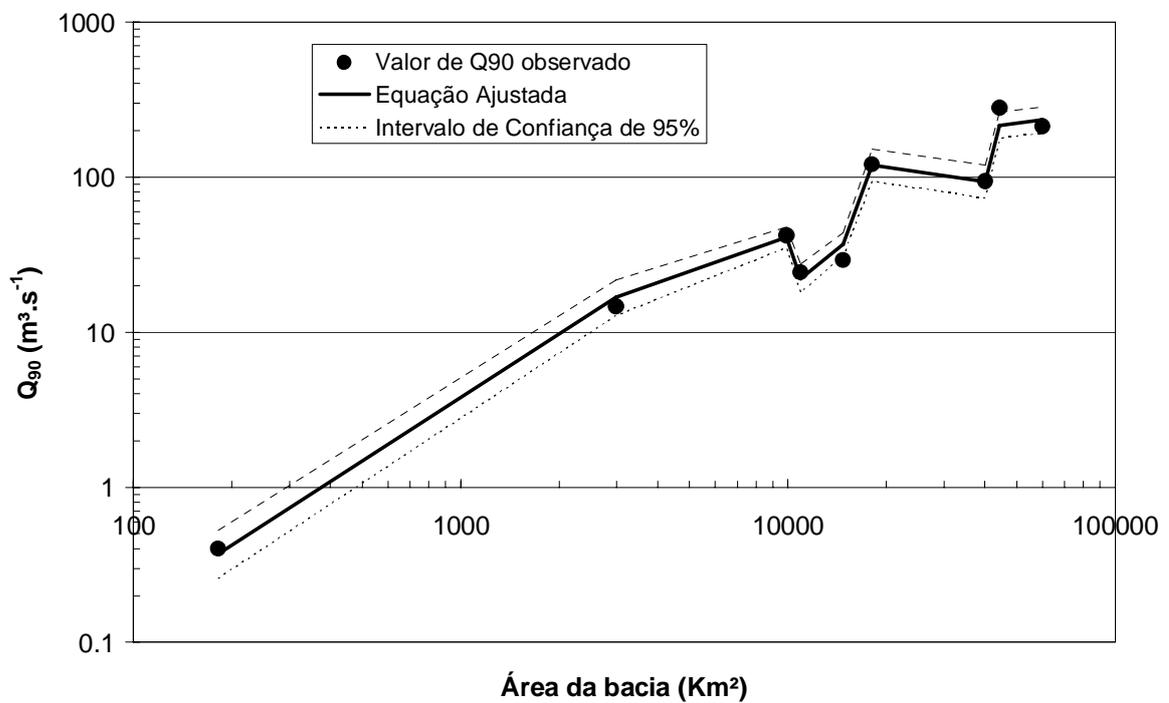


Figura 10.18 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período seco em função da área com a equação $Q_{90} = 1,984E-33.A^{1,27}P^{9,08}$ – Região 3

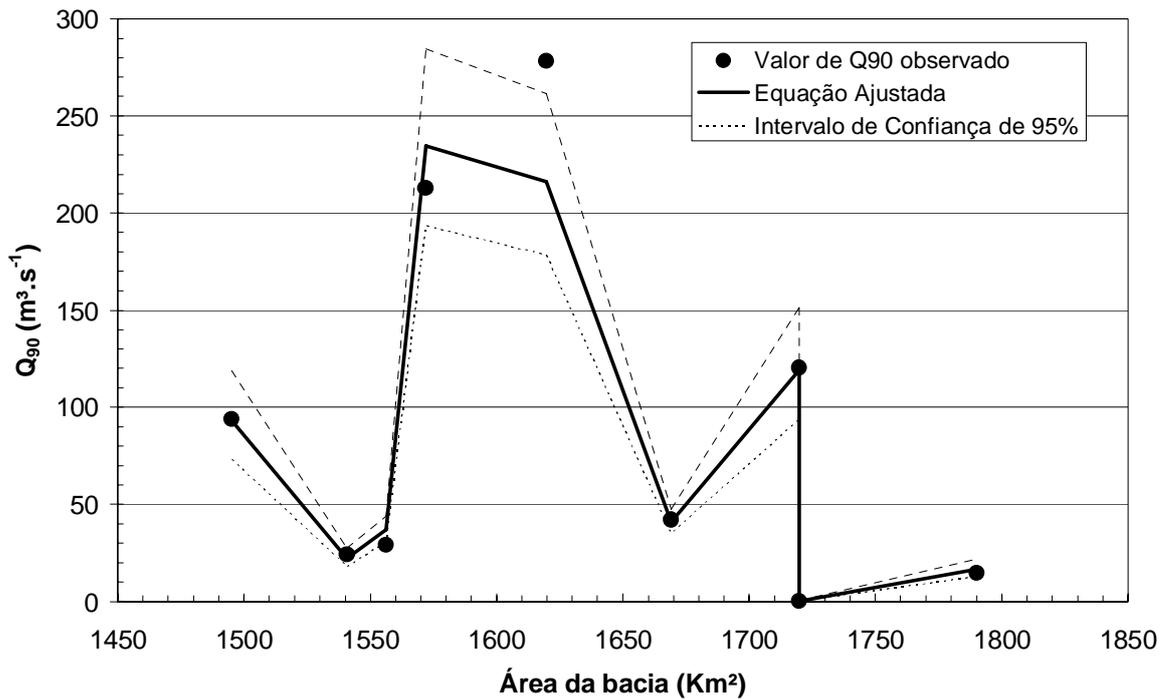


Figura 10.19 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da precipitação com a equação $Q_{50} = 1,59967E-27 \cdot A^{1,15} P^{7,45}$ – Região 3

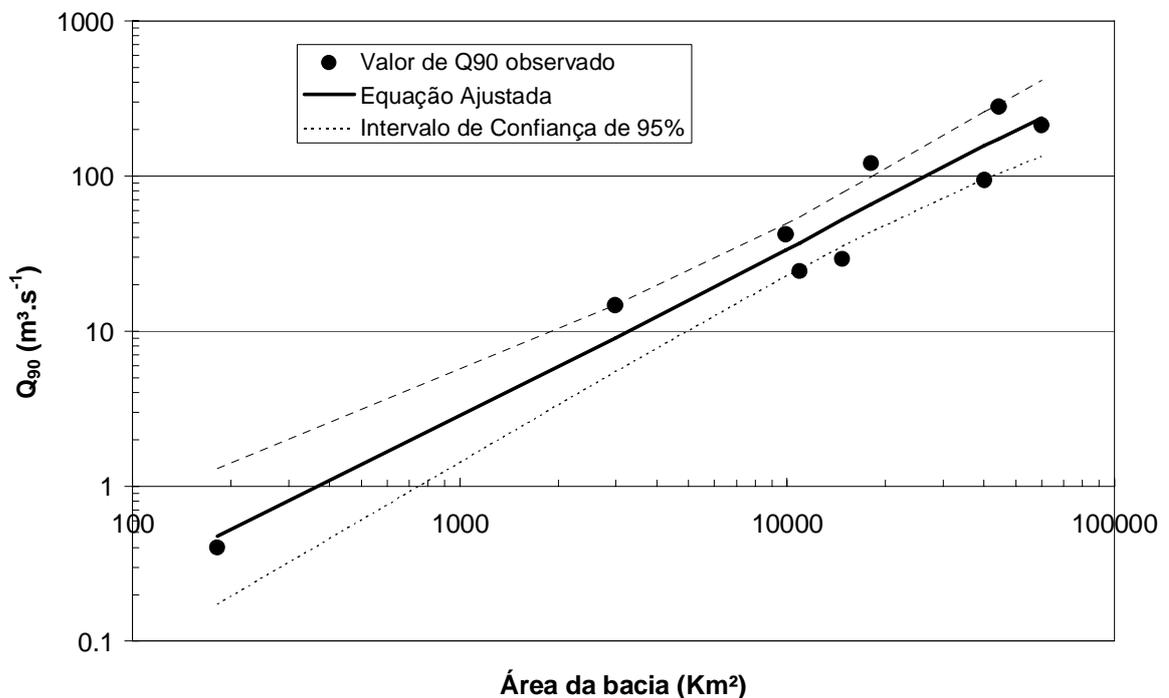


Figura 10.20 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período seco em função da área com a equação $Q_{50} = 0,0055A^{0,996}$ – Região 3

Conforme foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

10.7 Regionalização da Curva de Permanência para o Período Úmido

Neste item serão regionalizados os valores característicos selecionados da curva de permanência (Q_{90} e Q_{50}) para o período úmido.

10.7.1 Região 1 - Cabeceiras

O método *stepwise* indicou como única variável significativa a área contribuinte A para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Quadro 10.12). Na análise das regressões, o posto Agro Trafo 2 (21780170) teve que ser excluído, já que apresentou valores fora da tendência. Os valores apresentados podem estar influenciados pela operação da PCH que se encontra nas vizinhanças do posto, conforme analisado anteriormente.

Quadro 10.12 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 1 – período úmido

Variável	Equação	R^2
Q_{50}	$Q_{50} = 2,77 + 0,0264.A$	0,97
Q_{90}	$Q_{90} = - 5,86 + 0,117.Per$	0,97
Q_{90}	$Q_{90} = 3,79 + 0,0172.A$	0,85

Per em km ; A em km²

Na Figura 10.21 é analisado o ajuste da regressão para a estimativa da vazão Q_{50} , onde se observa o posto de Sobrado fora do intervalo de confiança. O fato do posto de Agro Trafo 2 ter sido eliminado da análise impediu a possibilidade de introduzir outras variáveis já que foi estabelecida a necessidade de se respeitar um mínimo de três graus de liberdade.

Na Figura 10.22 se observam os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área. Para esta vazão característica valem as mesmas considerações que para a Q_{50} .

Conforme foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

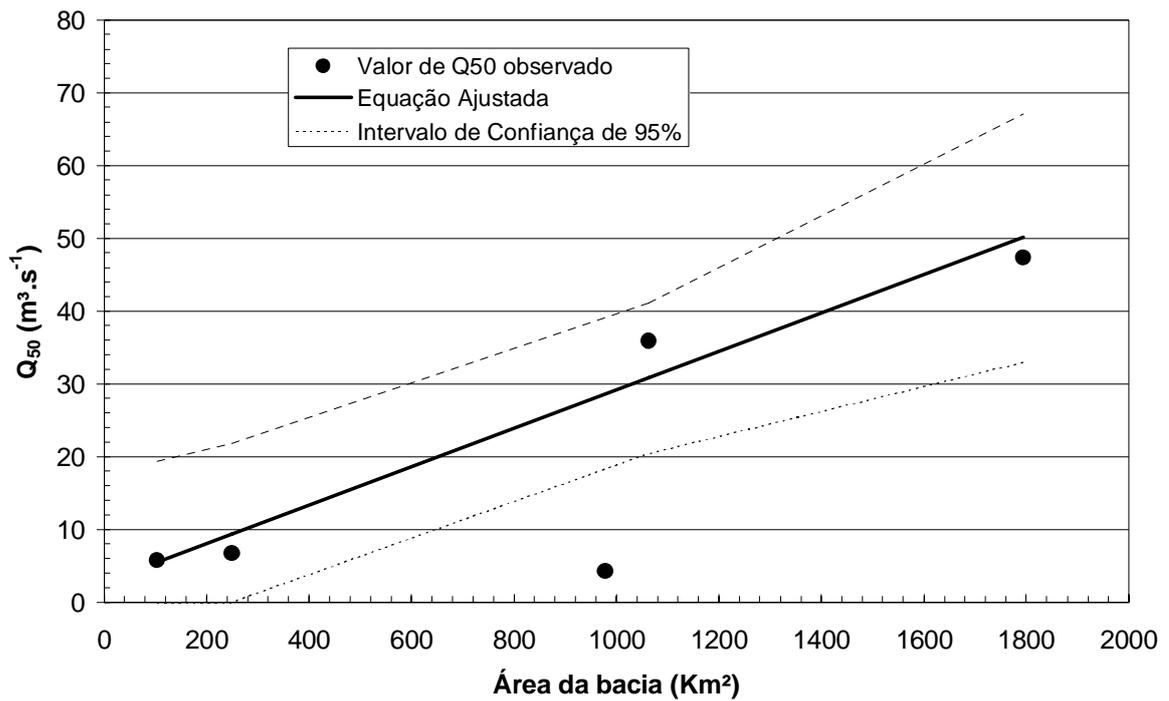


Figura 10.21 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período úmido – Região 1

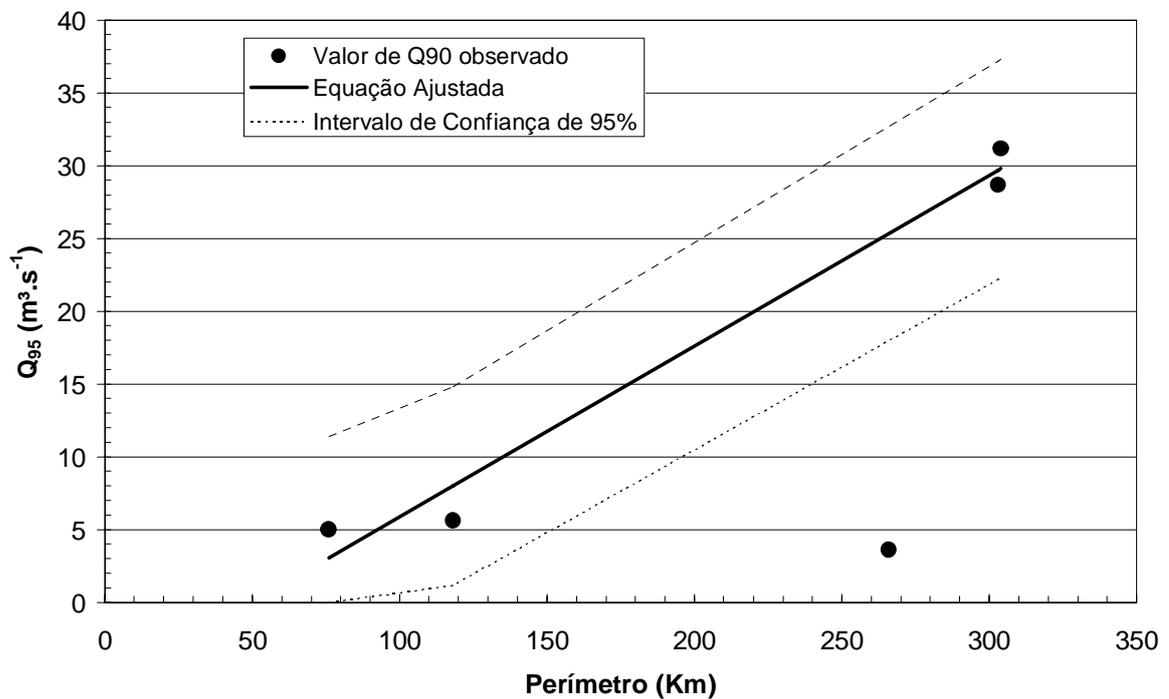


Figura 10.22 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} em função do perímetro para o período úmido – Região 1

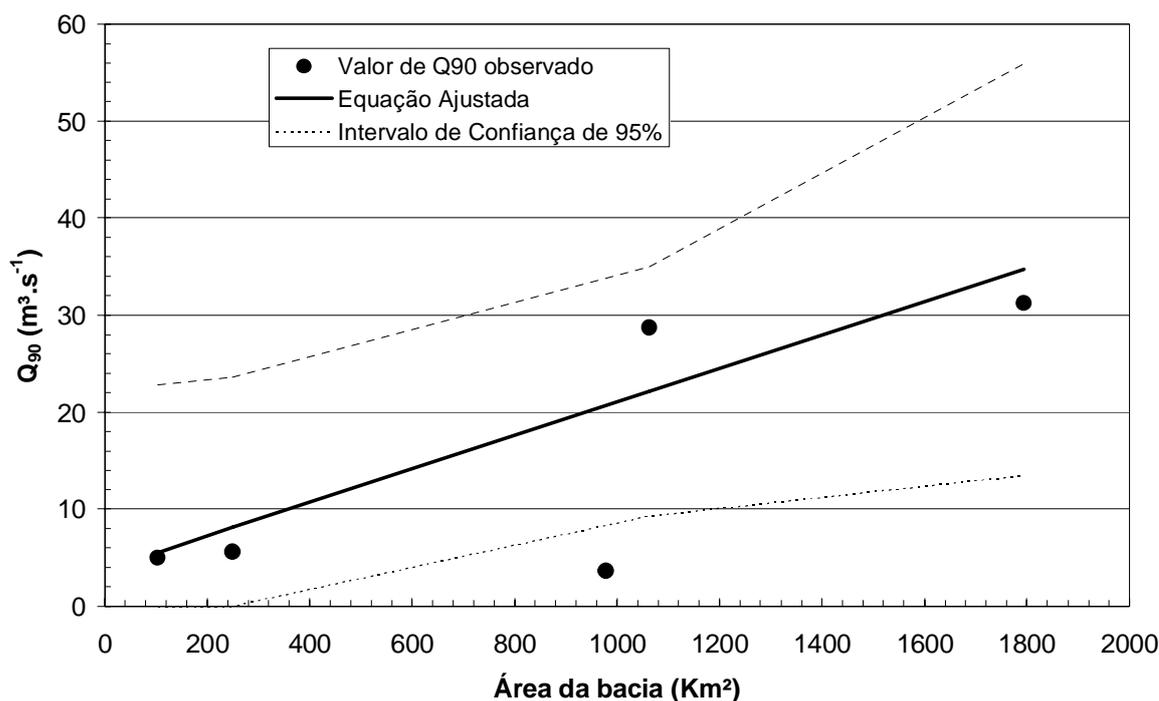


Figura 10.23 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} em função da área para o período úmido - Região 1

10.7.2 Região 2 – Trecho Médio dos Rios

O método *stepwise* indicou como única variável significativa a área contribuinte A para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Figura 10.13). A inclusão do coeficiente de compacidade na regressão forneceu uma pequena melhora para a estimativa da vazão Q_{90} . No entanto, esta melhora esteve muito próxima do limite de aceitação, e, considerando que esta variável é de estimativa muito incerta, optou-se por não incluir esta variável.

Quadro 10.13 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 2 – período úmido

Variável	Equação	R^2
Q_{50}	$Q_{50} = -2,9 + 0,0194 A$	0,98
Q_{90}	$Q_{90} = -14,1 + 0,0128 A$	0,97

A em km^2

Na Figura 10.24 é analisado o ajuste da regressão para estimativa da vazão Q_{50} .

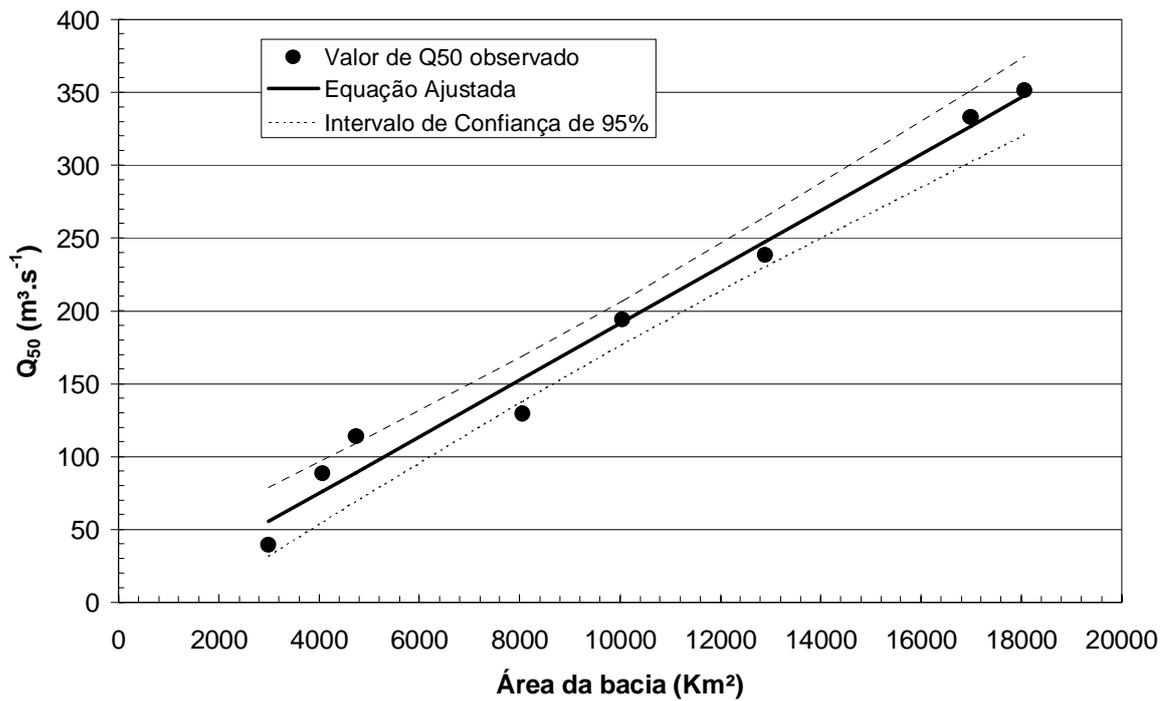


Figura 10.24 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período úmido - Região 2

Na Figura 10.25 se observam os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área.

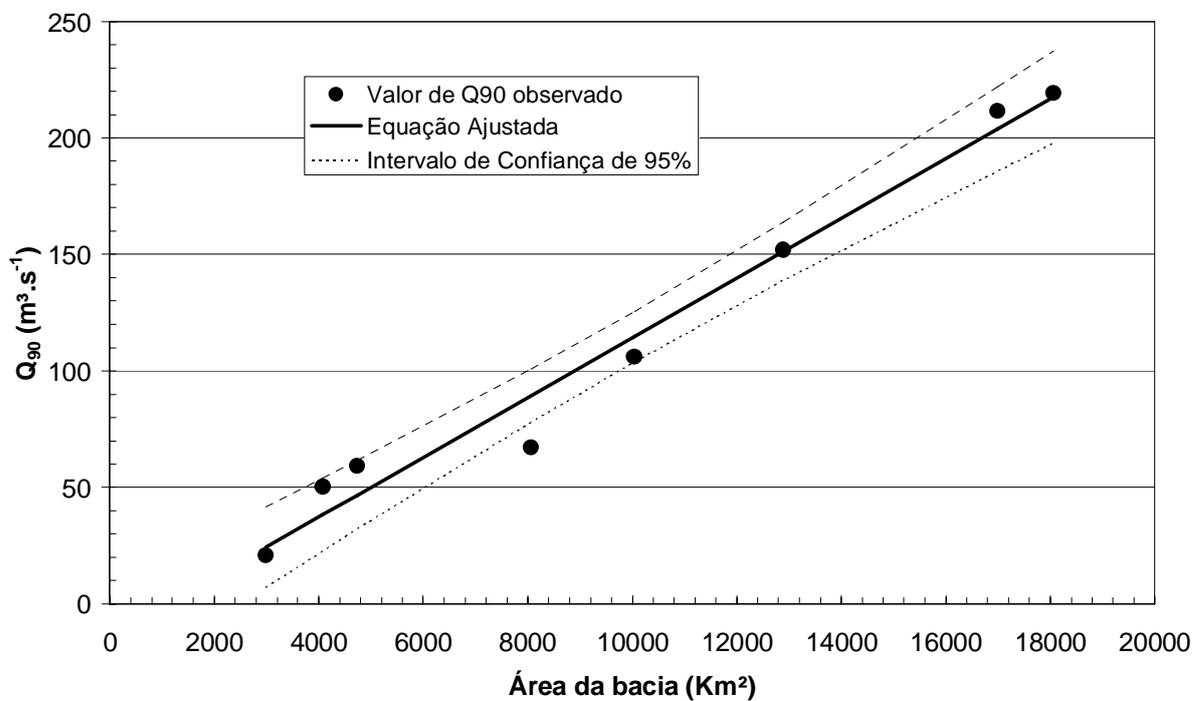


Figura 10.25 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} para o período úmido - Região 2

Conforme foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

10.7.3 Região 3 – Trecho Inferior dos Rios da Margem Direita

O método *stepwise* indicou como variáveis significativas a área contribuinte A e a precipitação anual de longo período para as duas vazões de referência (Q_{50} e Q_{90}) (Quadro 10.14). A inclusão do comprimento do rio principal na regressão forneceu uma pequena melhora para a estimativa da vazão Q_{90} . No entanto, esta melhora esteve muito próxima do limite de aceitação, e optou-se por não incluir esta variável, considerando que sua estimativa apresenta grande incerteza, pela dificuldade de determinação do início do rio principal. Foi excluído do ajuste o posto 2290000 porque se mostrou significativamente fora das tendências.

Quadro 10.14 - Regressões das vazões características Q_{50} e Q_{90} – Região 3 – período úmido

Variável	Equação	R^2
Q_{50}	$Q_{50} = 36,2 + 0,0125 A$	0,98
Q_{90}	$Q_{90} = 8,7 + 0,00594 A$	0,92

A em km^2

Na Figura 10.26 é analisado o ajuste da regressão para estimativa da vazão Q_{50}

Na Figura 10.27 se observam os valores observados e calculados e os intervalos de confiança da estimativa da vazão Q_{90} em função da área. Para esta vazão característica valem as mesmas considerações que para a Q_{50} .

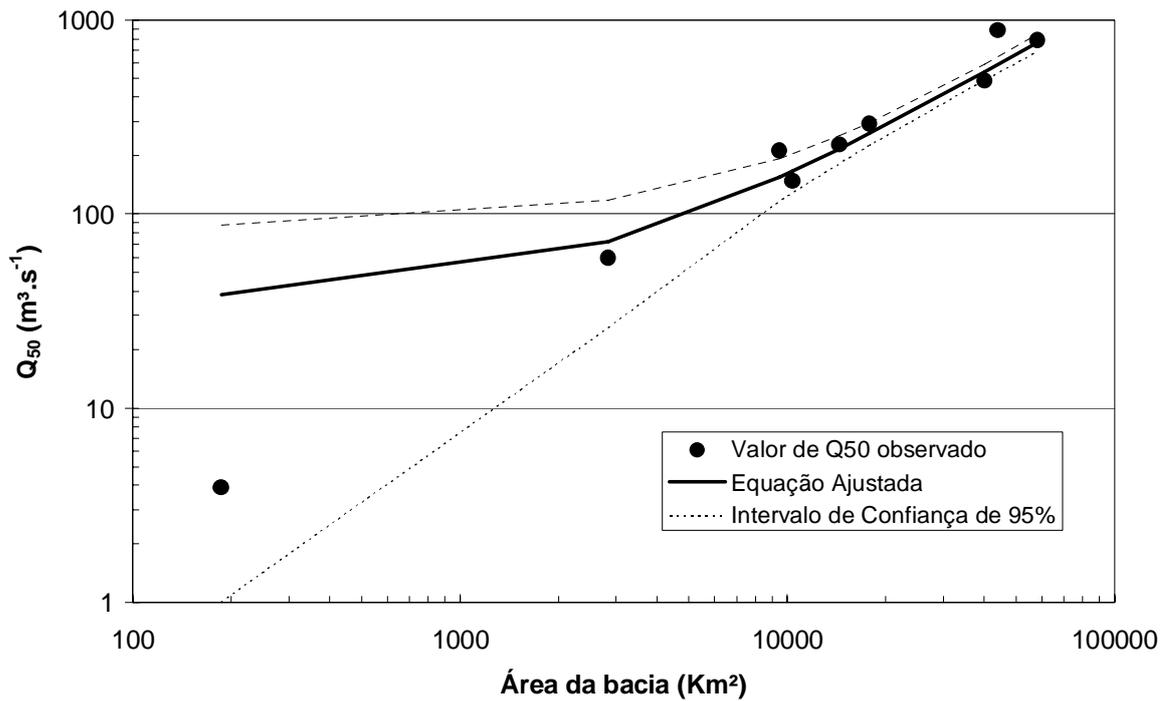


Figura 10.26 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{50} para o período úmido – Região 3

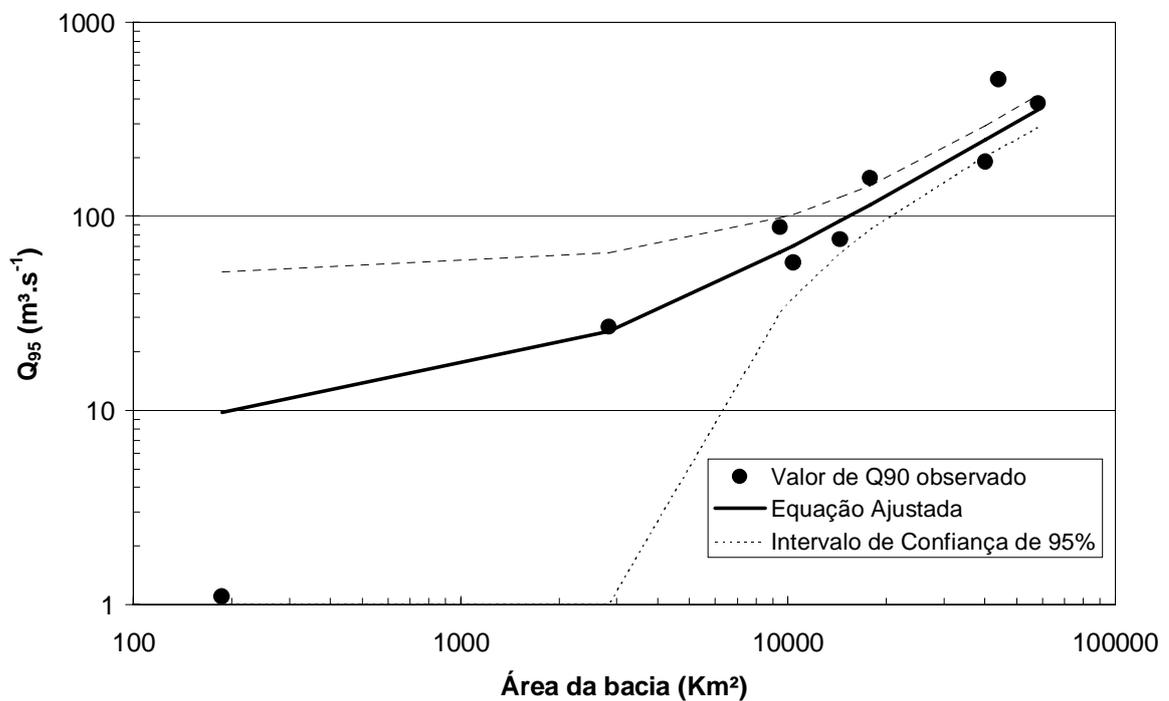


Figura 10.27 - Valores previstos e intervalos de confiança da estimativa da Q_{90} em função da área para o período úmido – Região 3

Conforme foi observado pelos coeficientes R^2 , em termos gerais as equações denotam uma qualidade de ajuste razoável, que pode ser explicada ainda por problemas de precisão na curva-chave de alguns postos e pela incerteza inerente das medições de vazões de cheia.

10.8 Limitações

Para a regionalização da curva de permanência também há uma limitação ligada à área da bacia, já que a maior parte dos postos fluviométricos analisados tem áreas contribuintes maiores que 1.000 km².

As informações dos estudos de consistência da realizados indicam que maioria dos postos fluviométricos apresenta uma extrapolação nos ramos superiores de suas curvas-chave de muito baixa qualidade. Isto pode ter limitado a precisão da regionalização, especialmente na determinação das regiões homogêneas.

Também foi observado que alguns postos, especialmente os relacionados com as PCH no estado, apresentaram problemas e deveram ser retirados da análise. Neste caso valem as mesmas recomendações indicadas anteriormente (revisão dos dados, re-naturalização das vazões, etc).

10.9 Procedimento de Cálculo da Curva de Permanência Regionalizada

O procedimento consiste em:

1) verificar que a área da bacia se encontra dentro dos limites da regionalização. Não se recomenda a utilização para áreas superiores e inferiores as utilizadas na própria regionalização.

2) Em função da Figura 10.4, determinar a região.

3) Utilizar uma das regressões indicadas para a região para estimar as vazões características com 50 e 90 % de permanência (Q_{50} e Q_{90})

4) Determinar os parâmetros α e β do modelo da curva de permanência com as equações.

$$\alpha = -\frac{1}{0,40} \ln\left(\frac{Q_{50}}{Q_{90}}\right)$$

$$\beta = \ln Q_{50} - 0,50\alpha$$

5) Substituir os valores dos parâmetros para estimar a vazão com a permanência P na

$$\text{equação: } Q_p = e^{\alpha p + \beta}$$

10.10 Exemplo de Aplicação

Para determinar o dimensionamento de uma estrutura hidráulica especial, é necessário determinar a vazão com 75 % de permanência anual. A localização da estrutura é em: 11° 36' 39" de latitude Sul e 47° 02' 43" de Longitude Oeste.

Solução:

Em função da localização foi determinada a área da bacia com o valor de 1.794 Km².

Em função da Figura 10.4 foi determinado que o local se encontra na região 1, desta forma as vazões características são:

$$Q_{50} = 3,97 + 0,0186 \cdot A = 37,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_{90} = 0,1165 \cdot A^{0,737} = 29,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Utilizando as vazões de referência calculo os parâmetros do modelo interpolativo exponencial, escolhido para o cálculo, tem-se:

$$\alpha = -\frac{1}{0,40} \ln\left(\frac{Q_{50}}{Q_{90}}\right)$$

$$\alpha = -0,62$$

$$\beta = \ln Q_{50} - 0,50\alpha$$

$$\beta = 3,93$$

Inserindo os parâmetros calculados na equação do modelo e obtém-se o valor desejado:

$$Q_p = e^{\alpha p + \beta}$$

$$Q_p = 31,97 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

11 REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE REGULARIZAÇÃO

11 REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE REGULARIZAÇÃO

11.1 Curva de Regularização

O regime de escoamento dos rios normalmente oscila entre períodos úmidos e secos, sincronizado com os índices de precipitação regional ao longo do ano. As atividades humanas demandam vazões que por vezes não são disponíveis em períodos de seca, assim, é necessária uma intervenção no regime de escoamento do curso d'água, esta intervenção é denominada regularização de vazão, que fisicamente é obtida com a construção de reservatórios que garantem o suprimento de água nestes períodos.

Para tanto, a utilização dos recursos hídricos de um curso d'água deve ser planejado e este necessita de valores de volumes necessários para armazenar a água excedente durante o período úmido que irá atender a demanda no período seco, para isto são utilizadas as curvas de regularização.

A curva de regularização de um determinado ponto da rede hidrográfica estabelece qual o volume necessário a ser armazenado neste ponto para garantir uma demanda de vazão fixa ou variável no tempo. Para facilitar a regionalização, trabalha-se normalmente com a função de regularização para demandas fixas no tempo, isto é, uma curva de regularização que relaciona volumes de reservação às vazões fixas de demanda, passíveis de serem adimensionalizadas pela vazão média de longo período, cuja regressão com características físicas e climatológicas já foi estabelecida anteriormente.

Apesar de considerar demandas fixas, a curva de regularização, assim definida, serve para avaliação preliminar das condições de regularização de vazões no ponto considerado. Assim, problemas específicos que exijam barramentos e reservação, cujo uso ou consumo de água são fortemente sazonalizados, como são normalmente as demandas em recursos hídricos (irrigação, abastecimento, geração hidrelétrica, navegação, exigências ecológicas), não podem ser analisados com a curva de regularização de demanda fixa, mas podem ter com ela uma visão aproximada do potencial de regularização.

Outra simplificação da curva de regularização de demanda fixa, que, a partir de agora, será referida apenas como curva de regularização, é que ela despreza a evaporação do reservatório. Na confecção de uma curva regional nem seria factível considerar esta evaporação pela dificuldade, senão impossibilidade, de regionalizar curvas cota-área inundada. De qualquer forma, no uso da curva de regularização é possível adaptar procedimentos simplificados de estimativa da evaporação para um caso específico.

11.2 Modelo de Regularização

O modelo de regularização retorna o valor do volume a armazenar para uma dada vazão de demanda, em função da série cronológica de vazões. O método clássico é o método gráfico de Rippl. A versão computacional deste método é o chamado método da simulação.

O método da simulação é dado pela aplicação a cada intervalo de tempo (Δt), da equação de balanço dada por:

$$V_j = V_{j-1} + Q - Q_R$$

onde :

V_j = volume (por unidade de Δt) no tempo j ;

V_{j-1} = volume (por unidade de Δt) no tempo $j-1$;

Q = vazão natural afluente ao reservatório;

Q_R = vazão regularizada (demanda fixa no tempo)

O método usa do artifício de sinalizar o reservatório cheio (cujo volume é desconhecido, a incógnita) com $V = 0$. Se a equação de balanço der $V_j \geq 0$, faz-se $V_j = 0$ (fisicamente tem-se o excesso vertido, permanecendo o reservatório cheio). Se der $V_j < 0$, conserva-se o valor negativo (déficit em relação ao reservatório cheio) para o cálculo seguinte, pois o reservatório foi acionado para garantir a vazão de regularização. Após a aplicação da equação de balanço a toda a série de vazões, o maior déficit de volume, em termos absolutos, ou seja, o máximo $|V_j| \Delta t$, é o volume a reservar.

Em resumo, o modelo de regularização estabelece um par de pontos: para cada Q_R há o correspondente V_R . Assim pode-se construir, para cada posto com dados fluviométricos, a sua curva de regularização.

Analiticamente, é possível ajustar aos pontos obtidos, uma equação do tipo:

$$V_R = \alpha Q_R^\beta$$

A máxima vazão teórica regularizável, desprezando-se perdas por evaporação e infiltração no reservatório, é a vazão média de longo período.

A curva de regularização obtida com a série histórica de vazões representa os volumes com falha nula na satisfação das respectivas vazões de demanda. A incerteza reside no fato de que no futuro não há uma garantia de repetição de uma série de vazões com as mesmas características estatísticas da histórica, sobretudo aquelas referentes aos períodos mais críticos de estiagem. A curva de regularização obtida de uma série histórica é, na prática, definida pelas características do período de estiagem mais crítico da série histórica das vazões.

11.3 Curva de Regularização Adimensional

A curva de regularização tem como parâmetro de escala a vazão média, que é a máxima vazão teoricamente regularizável, por regularização total. Para a regionalização é, então conveniente, adimensionalizar todas as curvas de regularização de todos os postos fluviométricos, com base na vazão média. Para as vazões de regularização, basta dividi-las pela vazão média do posto e assim obter as correspondentes vazões regularizadas adimensionais. Para os volumes o fator de adimensionalização é o volume escoado anual com vazão igual à vazão média, isto é, a vazão média multiplicada pelo tempo de um ano. Dividindo-se então os volumes de regularização por este fator obtém-se os volumes de regularização adimensionais. Enquanto as vazões de regularização adimensionais variam entre zero e um, os volumes de regularização adimensionais podem ser maiores que um.

11.4 Regionalização da Curva de Regularização Adimensional

A curva de regularização (histórica) de qualquer posto é muito sensível ao período de estiagem mais crítico da série de vazões. Portanto, postos com períodos de observação distintos, ou não coincidentes, podem apresentar diferenças significativas nas suas curvas de regularização, sem que isto represente uma verdadeira heterogeneidade regional.

A região de estudo não apresenta períodos históricos marcados por grandes distinções nos regimes de vazão, ficando a eleição dos postos balizado pelos seus tamanhos de série de dados, que tivessem ao menos 5 anos de registro.

Os postos 21760080, 21780170, 22200080, 22735080, e 23351000, de responsabilidade da CELTINS, não foram utilizados no ajuste das curvas de regularização por possuírem séries curtas, com menos de cinco anos. Também os valores de volume adimensional acima de 0,7 não foram utilizados, a partir deste valor, existe uma grande dispersão nos pontos, que impediu um bom ajuste para os volumes adimensionais mais baixos.

Foi possível identificar duas regiões com o comportamento semelhante das curvas, para fins de regularização de vazão, as regiões demarcam claramente a influência do relevo no regime de vazões ficando a região 1 com as áreas mais a montante das sub-bacias e a região 2 com as áreas de relevo menos íngreme no trecho final, a jusante das sub-bacias.

A Figura 11.1 mostra as curvas de volume adimensional ajustadas. No Quadro 11.1 estão apresentados os postos utilizados na regionalização da curva de regularização adimensional e a região que pertencem.

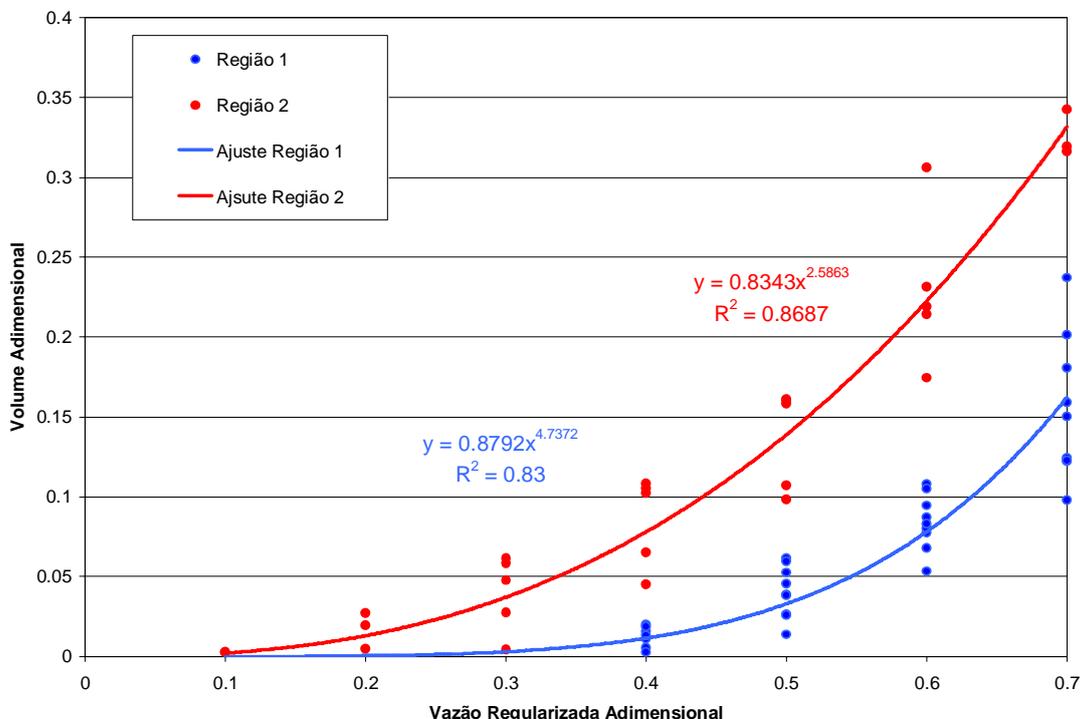


Figura 11.1 - Curvas de volume adimensional ajustadas para as regiões 1 e 2

Quadro 11.1 - Postos e regiões

Código	Nome	Região
21650000	Montante da barra do Palma	2
21750000	Lavandeira	1
21850000	Rio da Palma	2
21890000	Barra do Palma	1
21900000	Paraná	2
22190000	Porto Alegre	1
22220000	Porto Jerônimo – Faz. Pirapora	2
22250000	Fazenda Lobeira	2
22680000	Jatobá (Fazenda Boa Nova)	1
22700000	Novo Acordo	1
22730000	Porto Gilândia	1
22850000	Dois Irmãos	1
22900000	Porto Real	1
23150000	Itacajá	2
23220000	Cachoeira Monte Lindo	1
23230000	Jacaré	1
23250000	Goiatins	1

A Figura 11.2 apresenta a divisão das regiões homogêneas para as curvas de regularização adimensional na margem direita do rio Tocantins.

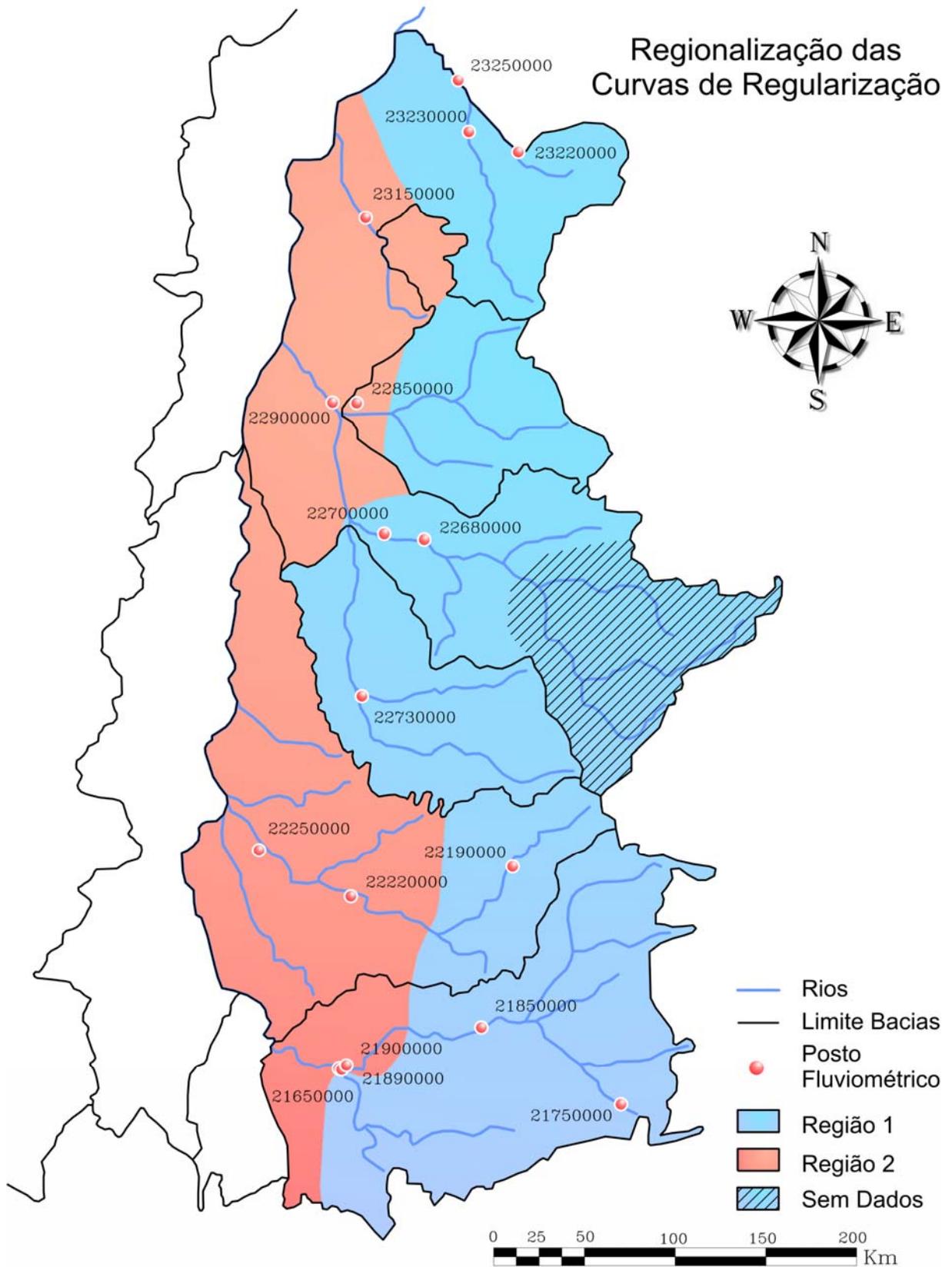


Figura 11.2 - Regiões homogêneas para curvas de regularização

A seguir apresentam-se as equações de ajuste, os volumes de cada posto os respectivos gráficos em termos do volume adimensional.

Região 1

$$V_R = 0,8792 \cdot Q_R^{4,7372} \quad R^2 = 0,830$$

Região 2

$$V_R = 0,8343 \cdot Q_R^{2,5863} \quad R^2 = 0,869$$

Onde:

VR = volume adimensional

QR = vazão regularizada adimensional

11.5 Limitações

Para a regionalização da curva de regularização também há uma limitação ligada à área da bacia, já que a maior parte dos postos fluviométricos analisados tem áreas contribuintes maiores que 1.000 km².

O efeito da evaporação no balaço de volume no reservatório hipotético não é facilmente estimado, para isso, demandar-se-ia de informações de difícil obtenção, tais como local exato para construção do reservatório, área do seu espelho d'água, bem como curva cota-volume, assim este efeito não foi computado para elaboração das curvas de regularização.

A demanda considerada nos cálculos foi constante em função do tempo.

11.6 Procedimento de Cálculo da Curva de Permanência

O procedimento consiste em:

- 1) Identificar na Figura 11.2 em que região está o ponto onde se deseja obter o volume necessário para regularizar uma certa vazão.
- 2) Calcular a vazão média de longo período (Q_{med}), em $m^3 \cdot s^{-1}$ pela equação de regionalização desta variável.

3) Verificar se a vazão de demanda (Q_d) está entre 10 e 70% da vazão média de longo período (Q_{med}), pois as curvas de regionalização do volume de regularização são válidas para este intervalo.

4) O percentual da Q_d em relação a Q_{med} é a vazão de regularização adimensional (Q_R) que entra diretamente na equação para cálculo do volume de regularização adimensional (V_R) da região de interesse:

Região 1

$$V_R = 0,8792 \cdot Q_R^{4,7372}$$

Região 2

$$V_R = 0,8343 \cdot Q_R^{2,5863}$$

5) O volume real é calculado multiplicando o volume adimensional de regularização (V_R) pela vazão média de longo período (Q_{med}) e calculado a sua acumulação no ano.

$$V_{REAL} = 31,5576 \cdot Q_R \cdot V_R \text{ (hm}^3\text{)}$$

Para obter o volume em metros cúbicos, multiplicar o volume por 10^6 ($1\text{hm}^3 = 1.000.000\text{m}^3$).

Uma estimativa inicial para a evaporação no lago do reservatório pode ser feita em função da área de espelho d'água e com dados de evaporação anual da região. Esta lâmina anual evaporante, a rigor, deveria ser desconsiderada da evapotranspiração natural desta área.

Para estimar a evaporação considere que 2/3 da área do espelho d'água é a parcela efetiva que gera evaporação. Multiplicando a evaporação ($\text{m}\cdot\text{ano}^{-1}$) pela área (m^2) é obtido o volume anual evaporado, para transformar em vazão na unidade de " $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ", divida pelo número de segundos em um ano (31557600 segundo por ano) o volume anual. Por fim obtenha a vazão de demanda total somando a vazão de evaporação (Q_v) com a vazão de demanda líquida (Q_d). Utilize então a demanda total adimensionalizada para calcular o volume de regularização.

11.7 Exemplo de Aplicação

Determinar o volume necessário para regularizar uma vazão de $20\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ para uma área de 3.850 km^2 que contribui para ponto de um curso d'água que está na região 2 da regionalização de vazões medias, e na região 1 para a regionalização da curva de regularização.

Solução:

Cálculo da vazão média pela equação para região 2 da regionalização.

$$Q_{med} = 0.0268A^{0,941} \Rightarrow 63,4\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

Cálculo da vazão adimensional de regularização e verificação da validade do percentual da demanda em relação a Q_{med} , que deve estar entre 10 e 70%.

$$Q_d = 10\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

$$Q_R = Q_d \cdot Q_{med}^{-1} \Rightarrow 0,315 \text{ ou } 31,5\% \text{ ok!}$$

Cálculo do volume de regularização adimensional pela equação da região 1 .

$$V_R = 0,8792 \cdot Q_R^{4,7372} \Rightarrow 3,719 \cdot 10^{-3}$$

Calculo do volume real.

$$V_{REAL} = 31,5576 \cdot Q_R \cdot V_R = 7,44 \text{ hm}^3$$

12 MAPEAMENTO DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

12 MAPEAMENTO DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS

O processo de regionalização hidrológica em um ambiente SIG permite uma melhor capacidade de manuseio dos dados de entrada e visualização dos resultados. Um exemplo disso verifica-se na possibilidade de representar espacialmente as equações de regionalização.

As principais variáveis explicativas das equações de regionalização (área e precipitação) foram obtidas a partir de rotinas computacionais que estimam o seu valor na forma de matrizes georreferenciadas. Estas rotinas atribuem para cada célula (posições pontuais nas matrizes) o valor da variável, permitindo apreciar a sua alteração no espaço.

Uma vez identificada a equação que melhor explique um processo hidrológico (ex.: vazão média específica de longo período), também é possível visualizá-la na forma de uma matriz, para isso bastaria sobrepor algebricamente as matrizes correspondentes as variáveis explicativas da equação. No entanto, este estudo de regionalização mostrou que a precisão das equações fica substancialmente reduzida para valores de área de contribuição inferiores a 1000 km², não recomendando o seu uso nessa situação.

Outra forma de visualizar a distribuição espacial de uma variável hidrológica é através da interpolação espacial a partir de pontos amostrais (opção seguida neste estudo). O processo de seleção dos pontos para interpolação é o da técnica de amostragem randômica estratificada, por apresentar a imparcialidade de uma amostragem aleatória aliada à uniformidade geográfica de uma distribuição sistemática.

Uma vez gerada a amostragem, selecionam-se os pontos em cuja localização apresentem uma condição de área superior a 1000 km², calculando-se nestes locais o valor da variável hidrológica. A Figura 12.1 apresenta a distribuição espacial dos pontos amostrados selecionados para o mapeamento das variáveis hidrológicas.

Por último a variável é interpolada espacialmente na forma de uma matriz regular, utilizando o método de Kriging. A matriz resultante da interpolação pode ser visualizada como um mapa de isolinhas.

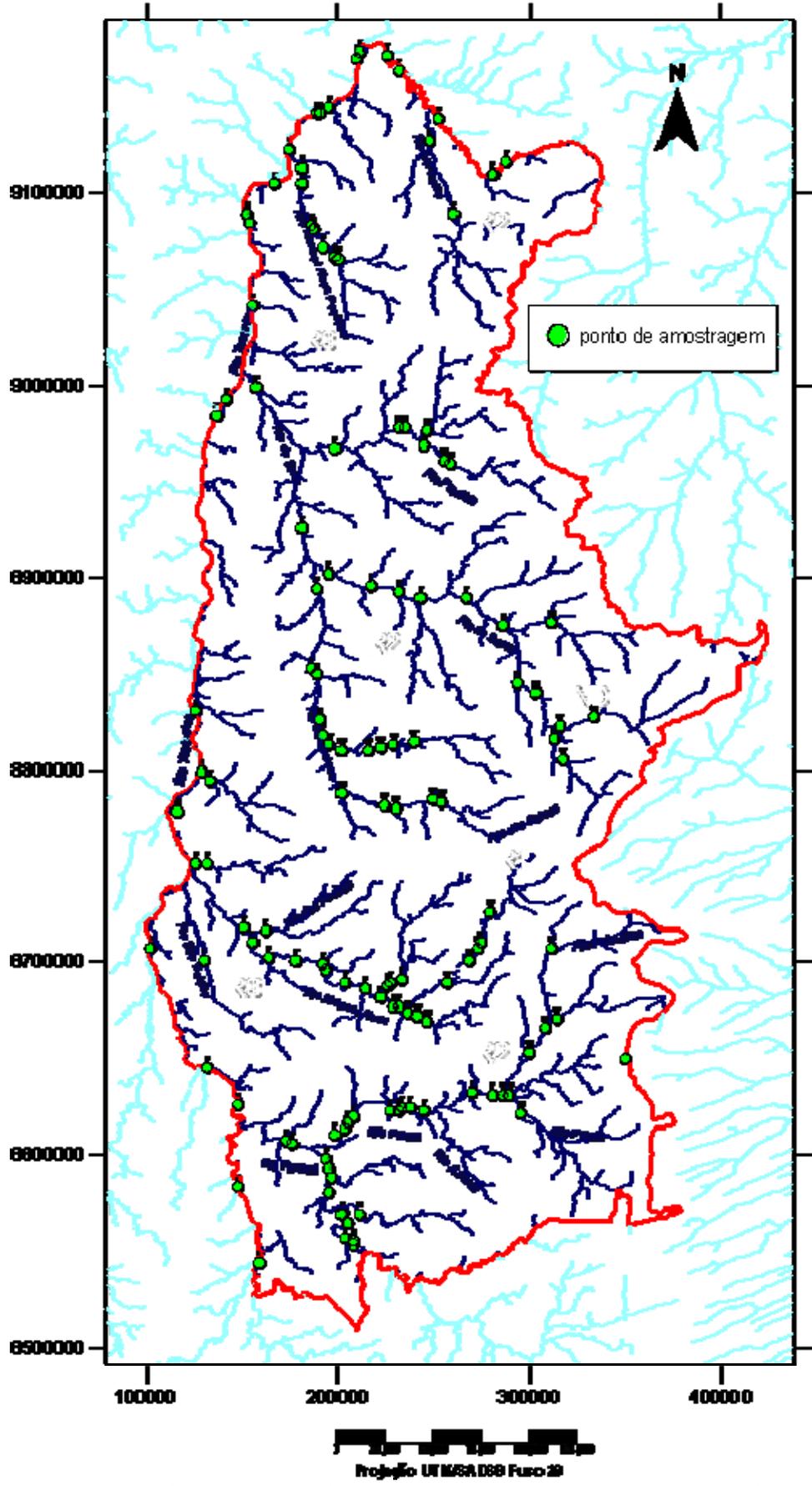


Figura 12.1 - Pontos de amostragem selecionados para o mapeamento das variáveis hidrológicas.

As variáveis hidrológicas especializadas foram:

- Vazão média específica de longo período (qLP);
- Vazão média de cheia específica (qmáx);
- Vazão mínima média específica para duração de 7 dias anual e período seco (q7a/s);
- Vazão mínima média específica para duração de 7 dias período úmido (q7u);
- Vazão específica de permanência de 90% anual (q90a);
- Vazão específica de permanência de 90% período seco (q90s);
- Vazão específica de permanência de 90% período úmido (q90u).

12.1 Vazão Média Específica de Longo Período (qLP)

A vazão média de longo período espelha a disponibilidade hídrica média (ou esperada) da bacia contribuinte a um ponto da rede hidrográfica. Teoricamente, desconsiderando-se qualquer perda, é a maior vazão possível de ser regularizada através de uma barragem, por regularização total, numa bacia hidrográfica. A vazão média específica de longo período indica a vazão disponível por unidade de área.

Neste estudo de regionalização foram identificadas duas regiões homogêneas para as vazões médias (Figura 12.2), resultando em dois conjuntos de equações de regressão para explicar esta variável na margem direita do Rio Tocantins. A região do Jalapão foi englobada dentro de uma região genérica denominada “sem dados” (ND), pela falta de séries para caracterizar seu comportamento. Assim que novos postos estejam disponíveis e com suficiente resolução temporal, a regionalização deve ser revisada para eliminar esta zona sem dados.

As equações de regressão escolhidas para mapear a vazão específica média de longo período e apresentada no Quadro 12.1.

Os valores de área e precipitação média da bacia contribuinte foram extraídos das matrizes respectivas.

Quadro 12.1 - Regressões das Vazões Específicas Médias de Longo Período.

Região	Equação	R ² ajustado
1	$qLP = \frac{[(1,714 \times 10^{-15}) A^{1,04} P^{4,05}]}{A}$	0,979
2	$qLP = \frac{[(1,128 \times 10^{-8}) A^{0,973} P^{1,95}]}{A}$	0,985

obs.: P precipitação média da bacia contribuinte; A área da bacia contribuinte

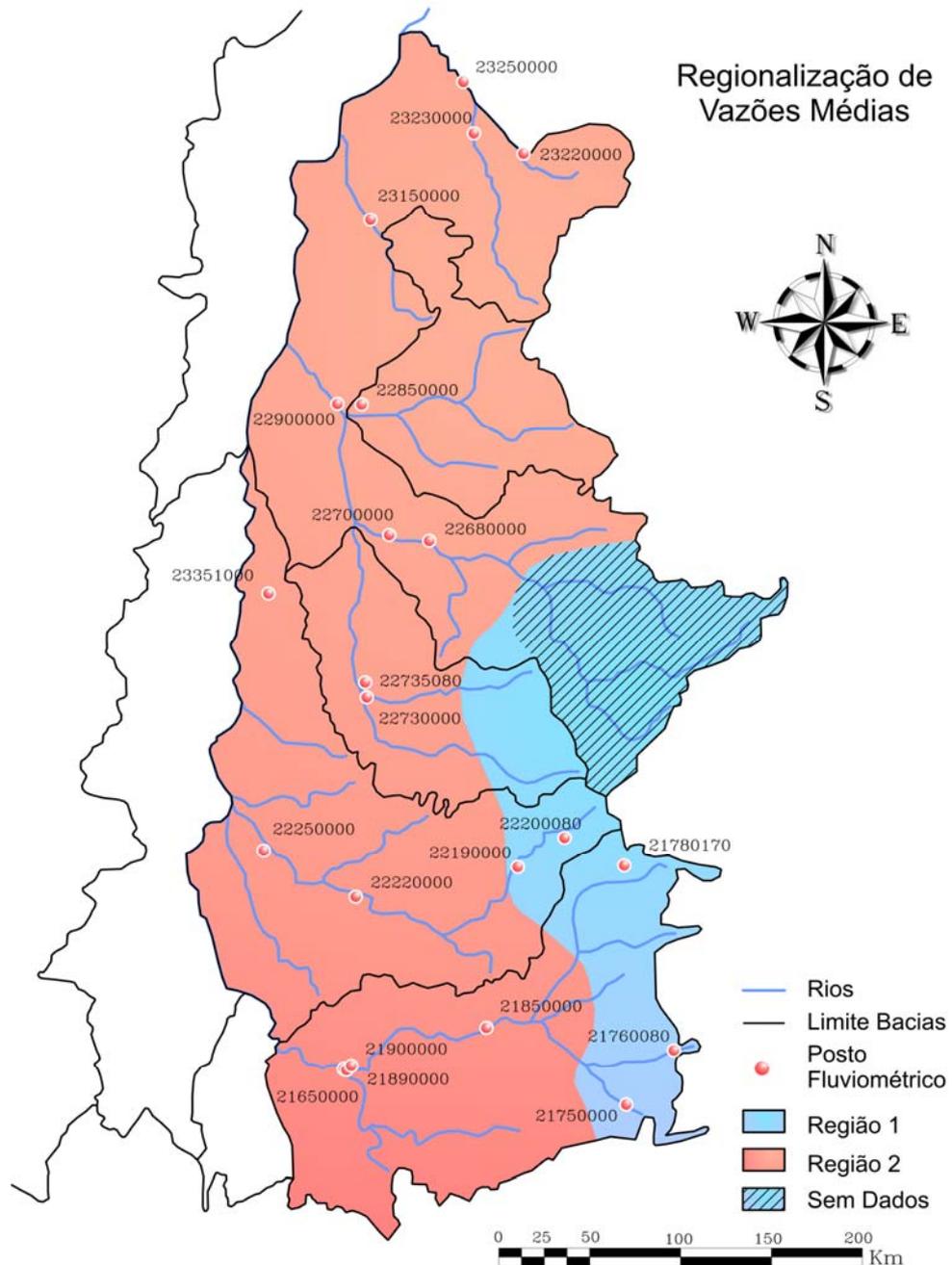


Figura 12.2 - Regiões homogêneas para as vazões médias.

O mapa com a distribuição espacial de q_{LP} é apresentado na Figura 12.3.

Este mapeamento descreve o comportamento esperado para esta variável, no qual há uma tendência de decréscimo de montante para jusante, inverso ao acréscimo de área de contribuição.

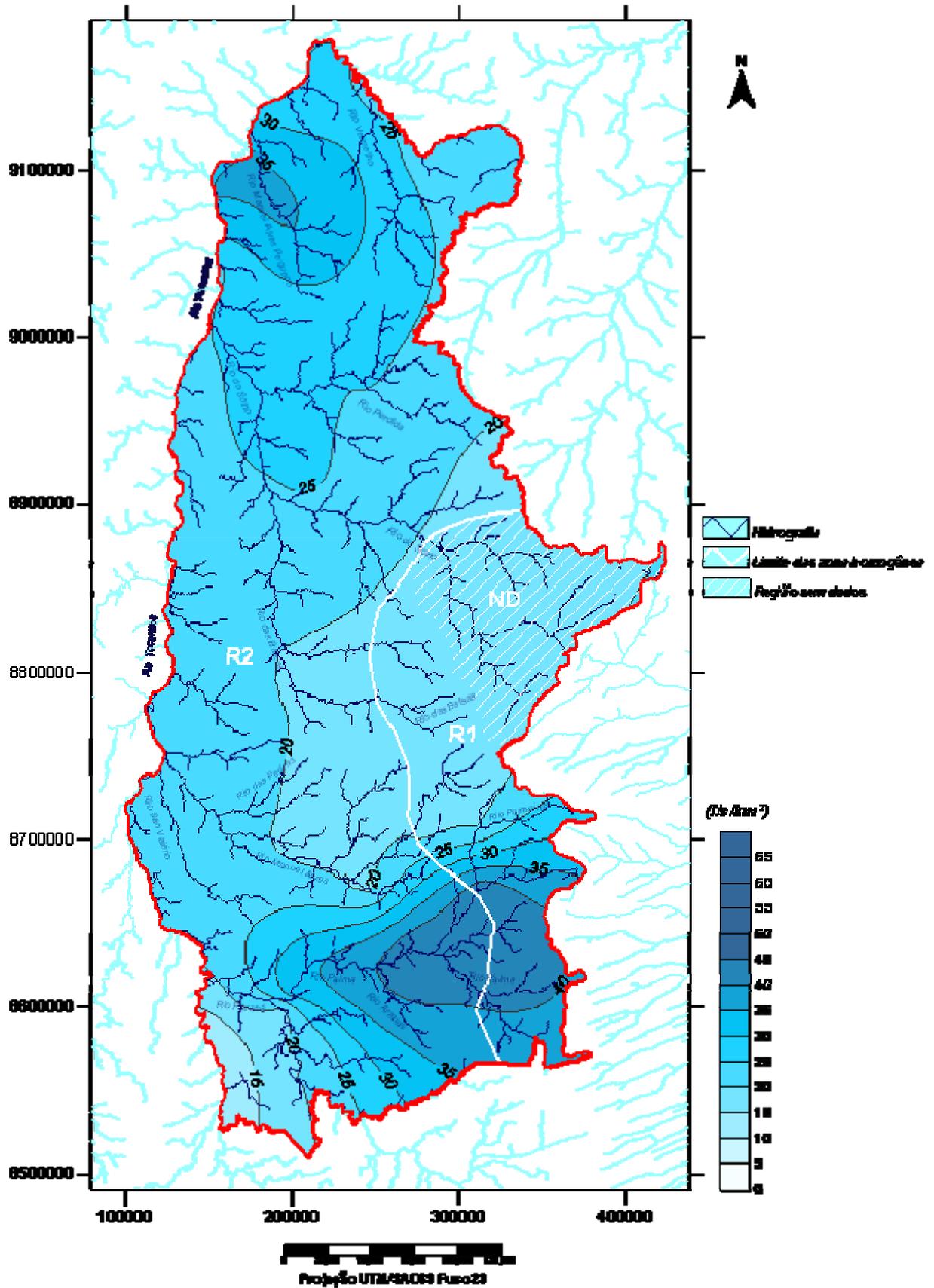


Figura 12.3 - Isolinas das vazões médias específicas de longo período (q_{LP}).

12.2 Vazão Média de Cheia Específica ($q_{máx}$)

A vazão média de cheia é o valor esperado, em linguagem estatística, das vazões máximas de um ponto da rede hidrográfica. Ela tem a ordem de grandeza da vazão de extravasamento do leito menor do rio.

A vazão média de cheia considerada neste estudo é a média das vazões máximas diárias anuais. Numa série estacionária de vazões máximas diárias anuais, é o valor em torno do qual flutuarão as vazões médias anuais, sendo, por isso, um parâmetro importante da distribuição destas vazões máximas. Em postos fluviométricos com dados disponíveis de vazão diária, a vazão média de cheia é estimada pela média das vazões máximas anuais de todos os anos.

Neste estudo de regionalização as vazões médias de cheia apresentam um comportamento homogêneo em toda a margem direita do Rio Tocantins.

A equação de regressão escolhida para mapear esta variável hidrológica é apresentada no Quadro 12.2.

Os valores de área da bacia contribuinte foram extraídos da matriz respectiva.

Quadro 12.2 - Regressão das Vazões Médias de Cheia Específicas.

Região	Equação	R ²
Região única	$q_{máx} = \frac{(0,2385 \cdot A^{0,892})}{A}$	0,943

obs.: A área da bacia contribuinte

O mapa com a distribuição espacial de $q_{máx}$ é apresentado na Figura 2.4.

É possível perceber que o mapeamento da vazão média de cheia específica ($q_{máx}$), também descreve um comportamento esperado, em que da mesma forma que a vazão média de longo período (q_{LP}), ocorre uma tendência de decréscimo de montante para jusante, inverso ao acréscimo de área de contribuição.

12.3 Vazão Mínima Média Específica de 7 dias

O valor esperado, em linguagem estatística, das vazões mínimas de duração t em um ponto da rede hidrográfica corresponde à vazão mínima média de longo período nesta duração t . Numa série estacionária é o valor em torno do qual flutuarão as vazões mínimas anuais, sendo, por isso, um parâmetro importante da distribuição destas vazões mínimas. Evidentemente, há uma vazão mínima média de longo período para cada duração t .

Neste estudo de regionalização foram identificadas duas regiões homogêneas para as vazões mínimas médias (Figura 12.5), resultando em dois conjuntos de equações de regressão para explicar esta variável na margem direita do Rio Tocantins.

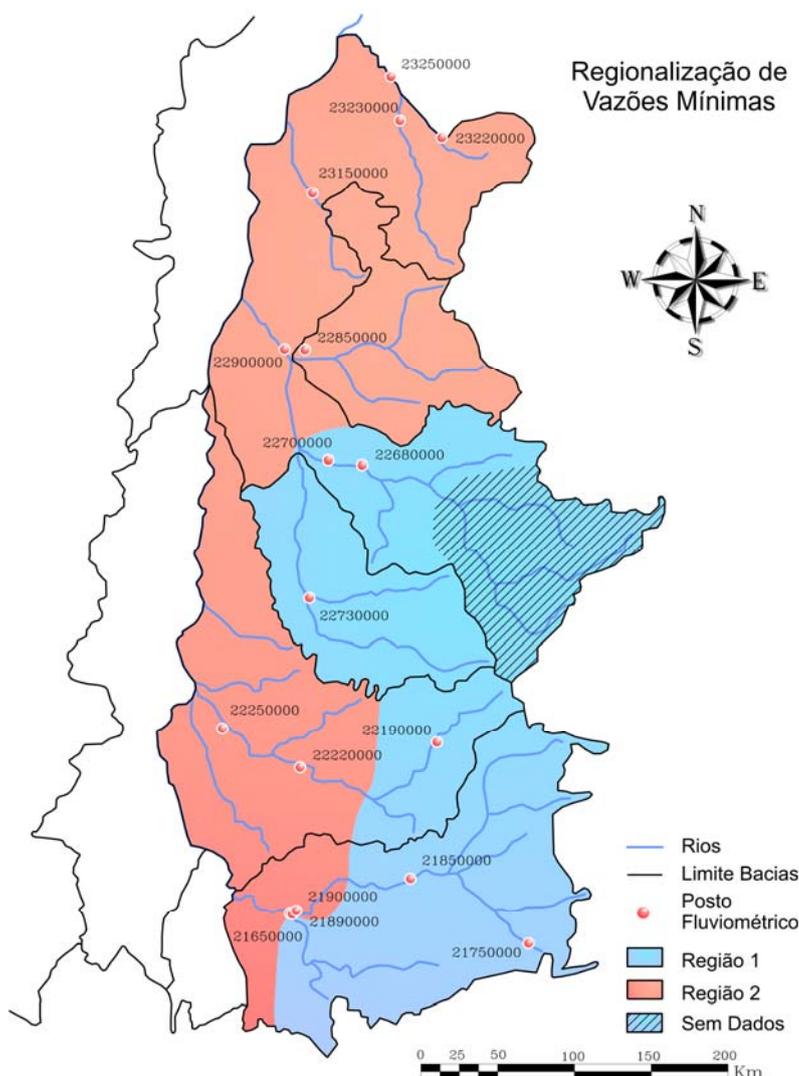


Figura 12.5 - Regiões homogêneas para as vazões mínimas.

As equações de regressão escolhidas para mapear esta variável hidrológica são apresentadas nos Quadros 12.3 e 12.4. A duração utilizada foi de sete (7) dias para três períodos: anual, seco e úmido, sendo que os dois primeiros apresentaram um comportamento similar.

Quadro 12.3 - Regressão das Vazões Mínimas Específicas período anual e seco

Região	Equação	R ² ajustado
1	$q7(a/s) = \frac{(0,2033.d^{0,0422} .A^{0,651})}{A}$	0,92
2	$q7a/s = \frac{(0,00502.d^{0,146} .A^{0,912})}{A}$	0,77

obs.: A área da bacia contribuinte; d 7 dias

Quadro 12.3 - Regressão das Vazões Mínimas Específicas período úmido

Região	Equação	R ² ajustado
1	$q7u = \frac{(0,0115.d^{0,160} .A^{0,723})}{A}$	0,97
2	$q7u = \frac{(0,01013.d^{0,249} .A^{0,919})}{A}$	0,90

obs.: A área da bacia contribuinte; d 7 dias

A espacialização das $q7(a/s)$ e $q7(u)$ são apresentadas nas Figuras 12.6 e 12.7 respectivamente.

O comportamento de decréscimo da magnitude da variável, de montante para jusante, mais uma vez é percebido no mapeamento das vazões médias mínimas, como era de se esperar.

12.4 Vazão Específica de Permanência de 90%

A curva de permanência de vazões de um ponto da rede hidrográfica é uma função hidrológica que espelha a disponibilidade hídrica neste ponto. É uma síntese do regime hidrológico que dá uma idéia do potencial de utilização de um manancial, sobretudo na faixa das vazões médias a mínimas, sendo freqüentemente empregada em estudos de potencial hidrelétrico, abastecimento, irrigação e de qualidade da água.

A curva de permanência de vazões relaciona cada magnitude de vazão de um rio com a soma de todos os períodos de tempo (a permanência) em que ela foi igualada ou superada numa cronologia de vazões. É também chamada de curva de duração. Costuma-se representar a curva de permanência com os tempos em porcentagem, para facilitar a comparação desta função hidrológica de postos com diferentes tamanhos de séries de vazão.

Neste relatório serão mapeadas as vazões de permanência de 90%, ou seja, vazões igualadas ou superadas em 90% do tempo.

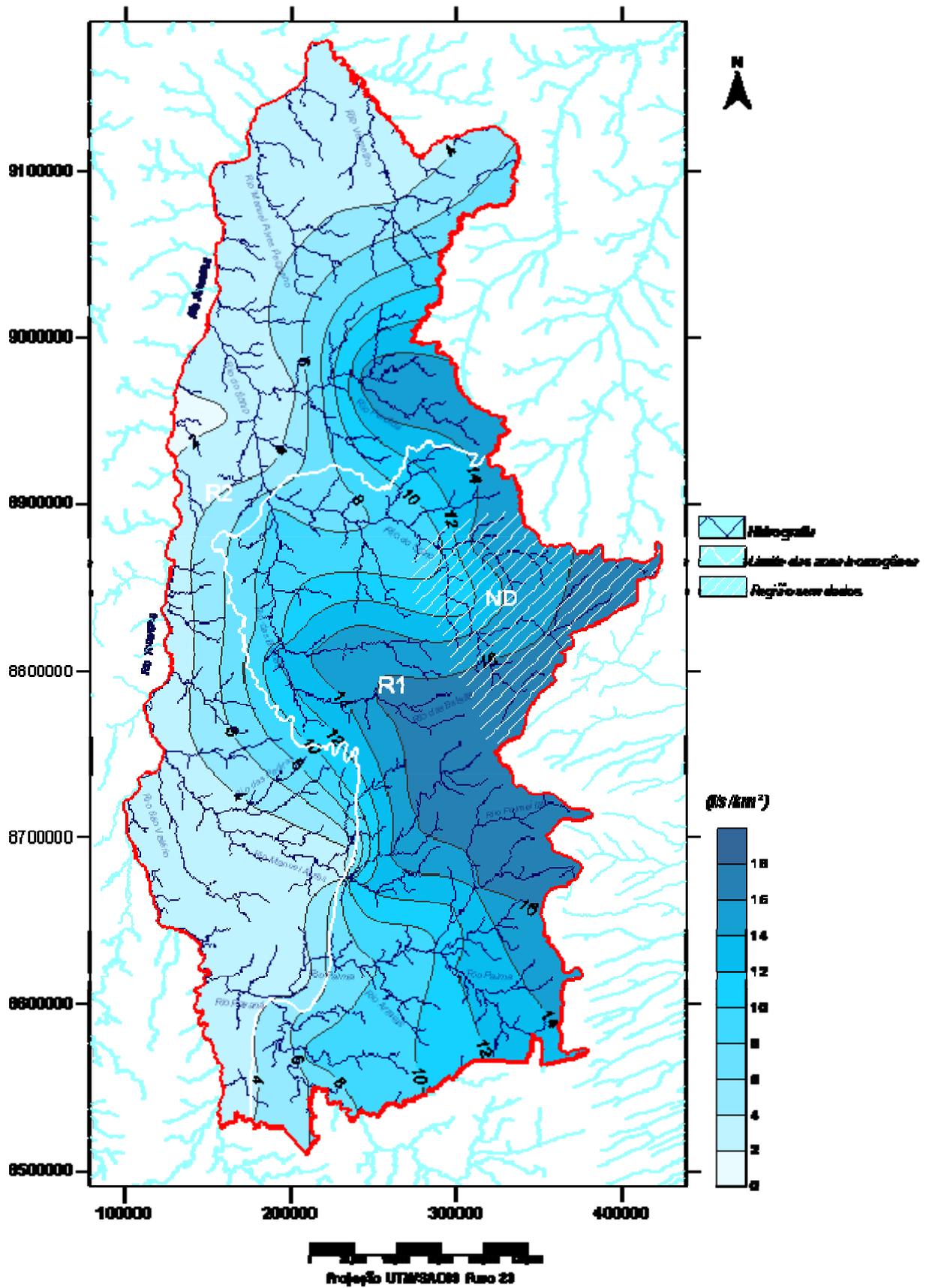


Figura 12.6 - Isolinhas das vazões mínimas médias específicas de 7 dias períodos anual e seco ($q_{7a/s}$).

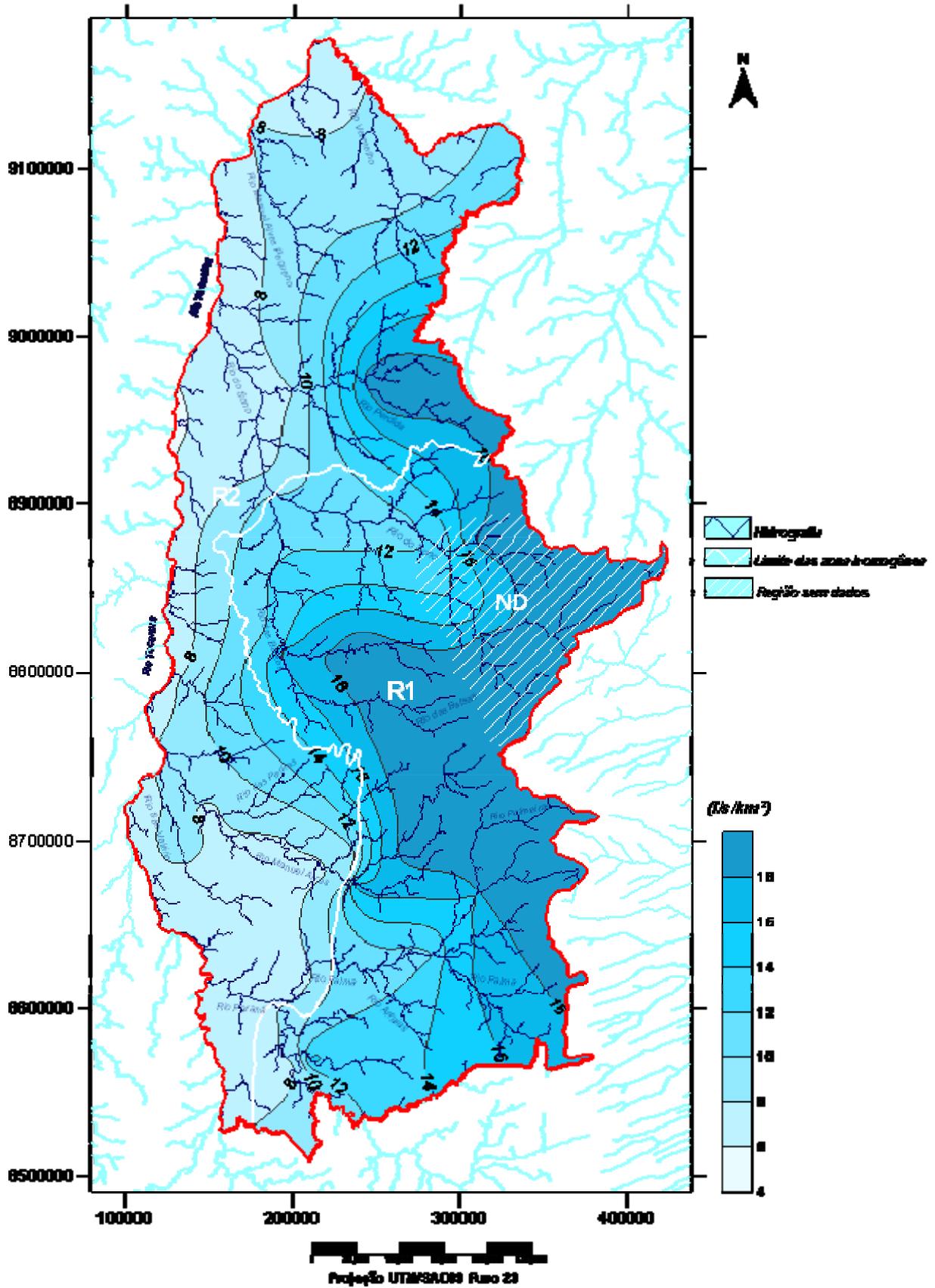


Figura 12.7 - Isolinhas das vazões mínimas médias específicas de 7 dias período úmido (q_{7u}).

Dada a forte sazonalidade existente nas bacias analisadas, optou-se por caracterizar a curva de permanência em três períodos:

- anual: considerando ano hidrológico para vazões mínimas, ou seja, coincidente com o ano civil;
- período úmido: abarca o período de chuva, se estende desde o 1 de novembro até o até o 30 de abril
- período seco: se estende desde o 1 de maio até o até o 31 de outubro.

Através da análise das curvas adimensionais dos postos fluviométricos analisados, foram identificadas três (3) regiões homogêneas para a regionalização das vazões de permanência (Figura 12.8).

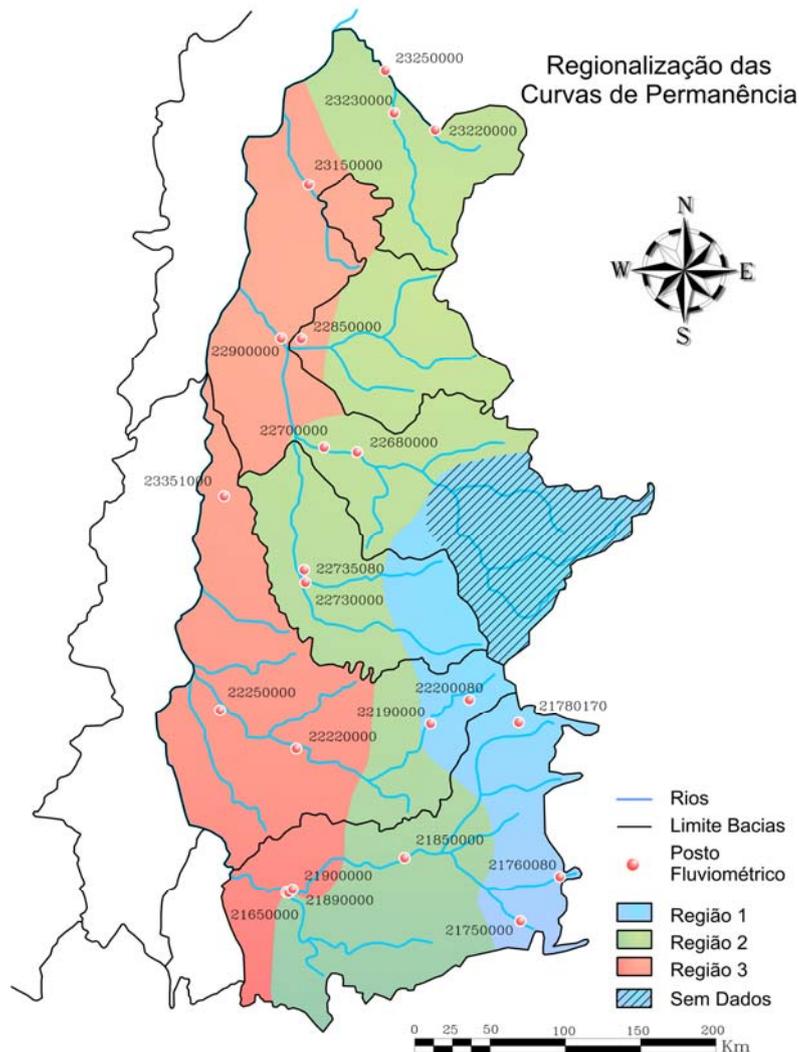


Figura 12.8 - Regiões homogêneas para as curvas de permanência.

As equações de regressão escolhidas para mapear esta variável hidrológica são apresentadas nos Quadros 12.5, 12.6 e 12.7.

Quadro 12.4 - Regressão das Vazões Específicas de Permanência de 90% período anual

Região	Equação	R ² ajustado
1	$q_{90a} = \frac{(0,1165 \cdot A^{0,737})}{A}$	0,90
2	$q_{90a} = \frac{(-13,7 + 0,00911 \cdot A)}{A}$	0,97
3	$q_{90a} = \frac{(0,0031 \cdot A^{1,03})}{A}$	0,94

obs.: A área da bacia contribuinte

Quadro 12.5 - Regressão das Vazões Específicas de Permanência de 90% período seco

Região	Equação	R ² ajustado
1	$q_{90s} = \frac{(0,121 \cdot A^{0,726})}{A}$	0,90
2	$q_{90s} = \frac{(-12,7 + 0,00934 \cdot A)}{A}$	0,96
3	$q_{90s} = \frac{(1,984 \times 10^{-33} \cdot A^{1,27} \cdot P^{9,08})}{A}$	0,99

obs.: P precipitação média da bacia contribuinte; A área da bacia contribuinte

Quadro 12.6 - Regressão das Vazões Específicas de Permanência de 90% período úmido

Região	Equação	R ² ajustado
1	$q_{90u} = \frac{(3,79 + 0,0172 \cdot A)}{A}$	0,85
2	$q_{90u} = \frac{(-14,1 + 0,0128 \cdot A)}{A}$	0,97
3	$q_{90u} = \frac{(8,70 + 0,00594 \cdot A)}{A}$	0,92

obs.: A área da bacia contribuinte

A espacialização das vazões específicas de permanência de 90% anuais (q_{90a}), para período seco (q_{90s}) e período úmido (q_{90u}) são apresentadas nas Figuras 12.9, 12.10 e 12.11 respectivamente.

Estas variáveis apresentam comportamento coerente com a realidade observada no campo e na confecção da regionalização, com as vazões específicas decrescendo de montante para jusante.

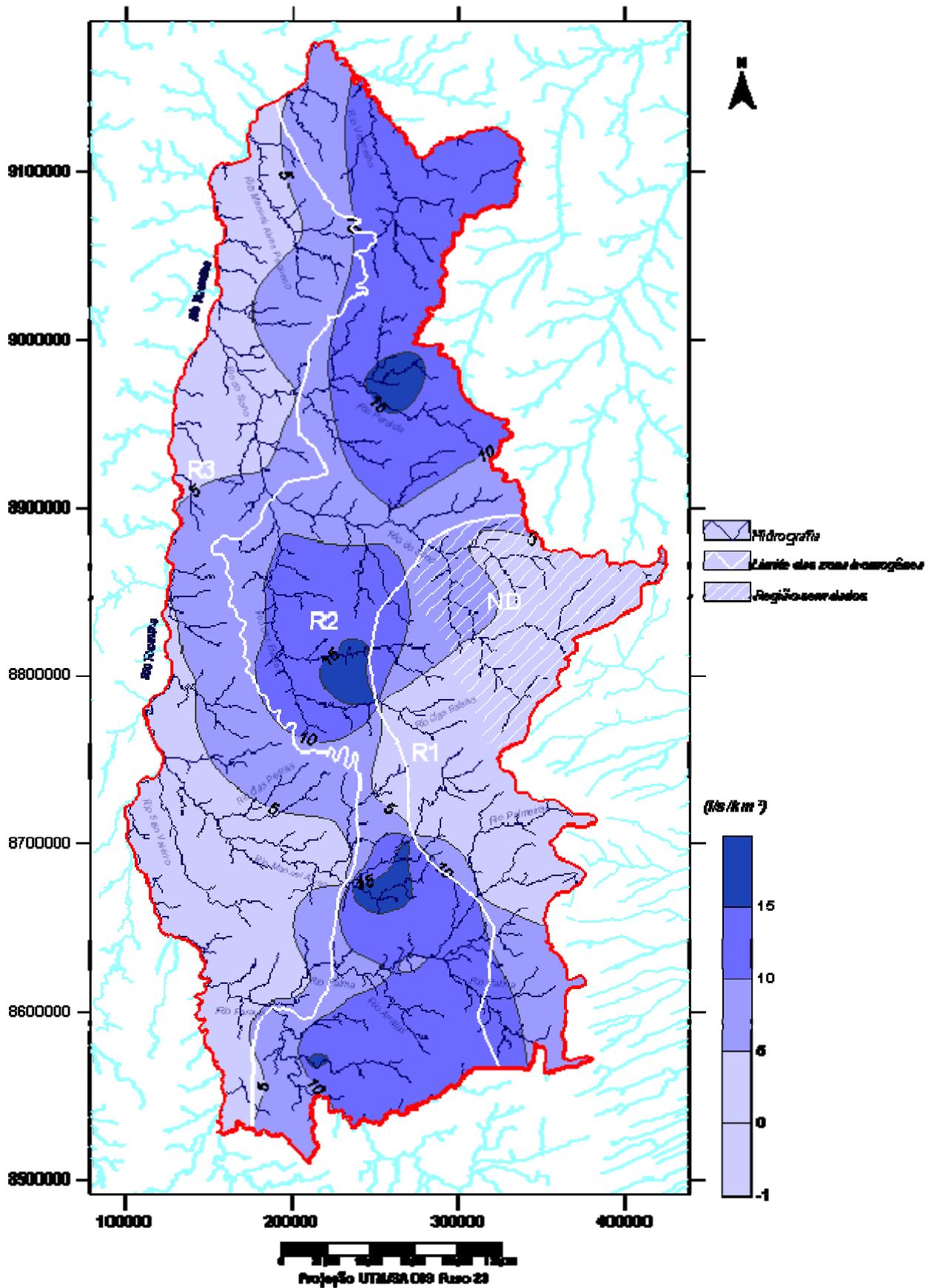


Figura 12.9 - Isolinhas das vazões específicas de permanência de 90% anuais (q_{90a}).

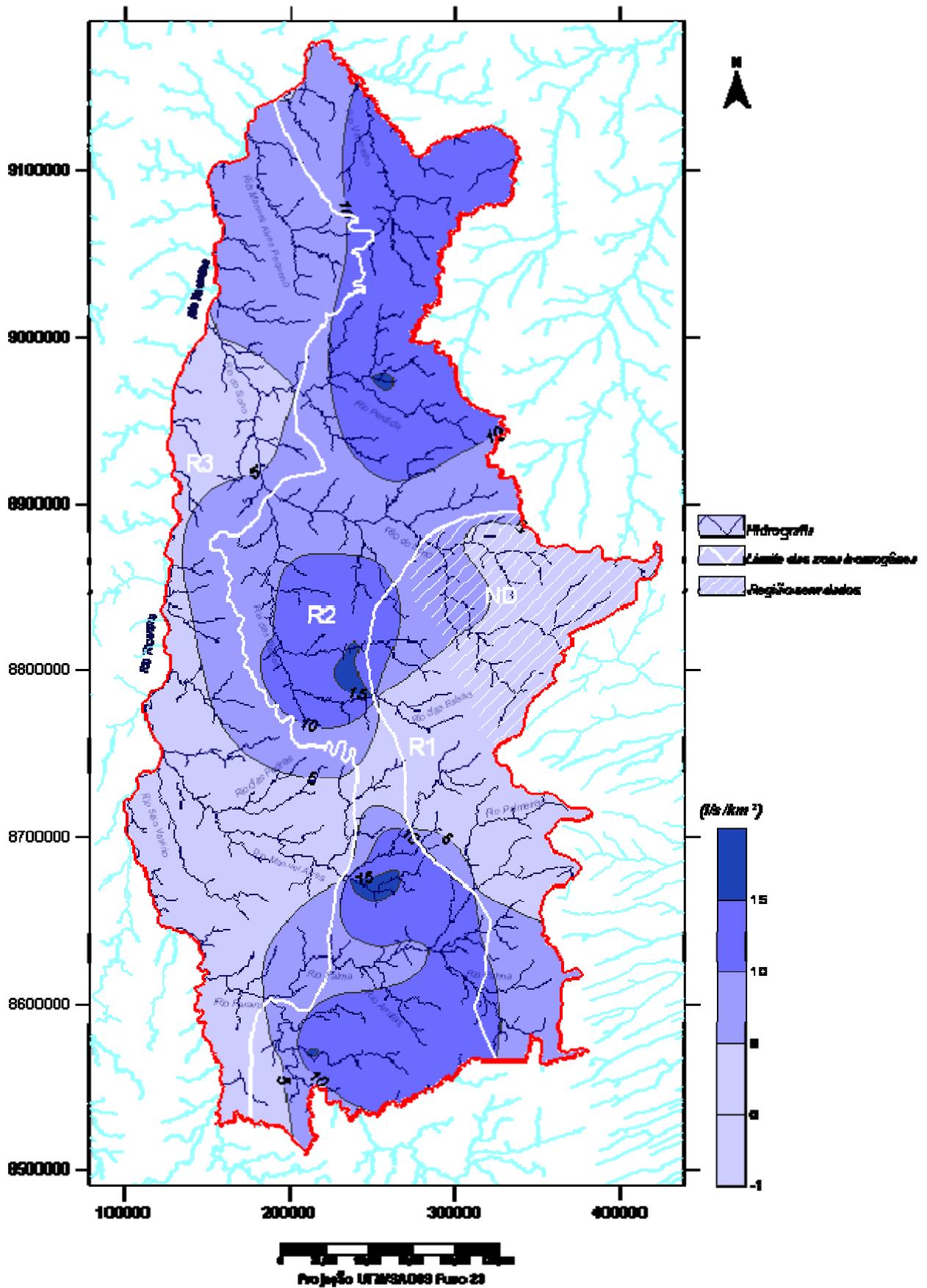


Figura 12.10 - Isolinas das vazões específicas de permanência de 90% período seco (q_{90s}).

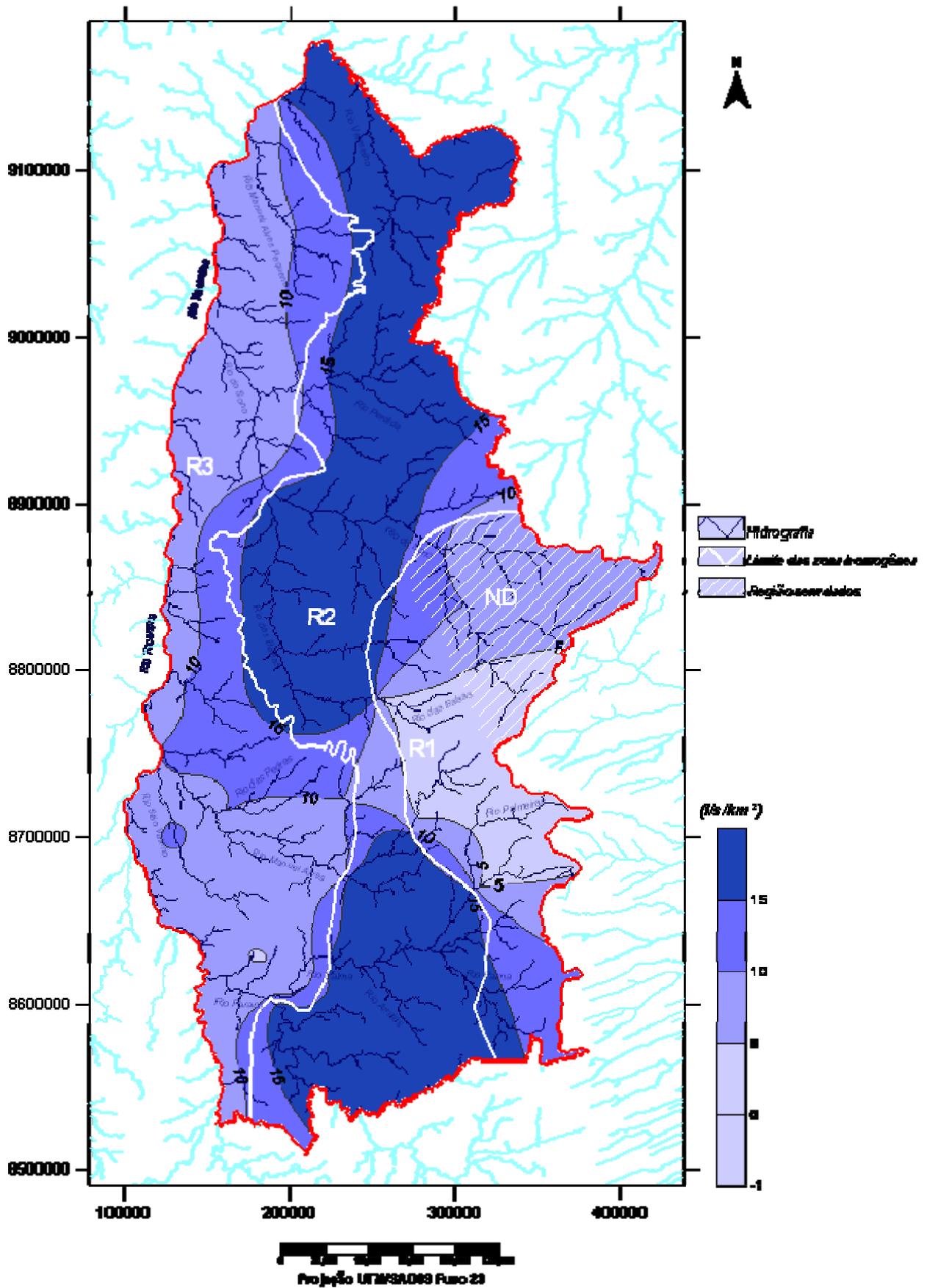


Figura 12.11 - Isolinhas das vazões específicas de permanência de 90% período úmido (q_{90u}).

A existência de núcleos isolados na região R2 é decorrência de dois processos:

a) descontinuidade na interface das regiões R1 e R2;

b) comportamento singular da bacia do rio Manuel Alves da Natividade: observa-se na figura 12.8 que não há nenhum posto fluviométrico pertencente à região R2 na bacia do rio Manuel Alves da Natividade. Esta faixa foi considerada como integrante da região R2 para manter um critério de continuidade espacial das regiões homogêneas. Como não há elementos suficientes para confirmar a homogeneidade no comportamento das variáveis regionalizadas nesta faixa da bacia do rio Manuel Alves da Natividade, o comportamento real pode configurar uma situação de continuidade ou de descontinuidade espacial da região. A existência de núcleos de valores de q_{90} separados pela bacia do rio Manuel Alves da Natividade confirma um comportamento singular desta bacia, retratado mesmo com o uso de equações regionalizadas para a região R2 contínua.

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- J. Neter, W. Wasserman, and M. Kutner (1985). Applied Linear Statistical Models. Richard D. Irwin, Inc.
- Silva, Eraly Alves. Tucci, Carlos Eduardo Morelli. Relação entre as vazões máximas diária e instantânea. In: Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos Vol. 3, n. 1(1998), p. 133-151
- Silva Junior, Omar Barbosa da. Bueno, Eduardo de Oliveira. Tucci, Carlos Eduardo Morelli. Castro, Nilza Maria dos Reis. (2003). Extrapolação espacial na regionalização da vazão. In: RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS: ABRH Vol. 8, n. 1(jan./mar. 2003), p. 21-37.
- Silveira, Geraldo Lopes da. Tucci, Carlos Eduardo Morelli. Silveira, André Luiz Lopes da. (1998). Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. In: RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS Vol. 3, n. 3(jul./set. 1998), p. 111-131.
- Tucci, Carlos Eduardo Morelli. (2002). Regionalização de Vazões. Editora Universidade. UFRGS. Porto Alegre, RS. 256pp.
- Tucci, Carlos Eduardo Morelli. (2002). Regionalização de Vazões. Editora Universidade. UFRGS. Porto Alegre, RS. 256pp.
- Tucci, Carlos Eduardo Morelli. Goldenfum, Joel Avruch. Bertoni, Juan Carlos. Lovatel, Ricardo. Troviscal, Alexandre P.. Lves, Cesar Augusto. Krebs, Claudio Moreira. Souza, Paulo Cesar Sena. Froes, Fernando. Regionalização de vazões do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1991. 2 v. em 4