

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA - PÓSGRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO E REDIMENSIONAMENTO DE REDES PARA O
MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO UTILIZANDO O
MÉTODO SHARP E O CONCEITO DE ENTROPIA**

Wilde Cardoso Gontijo Júnior

2007

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO E REDIMENSIONAMENTO DE REDES PARA
O MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO UTILIZANDO O
MÉTODO SHARP E O CONCEITO DE ENTROPIA**

WILDE CARDOSO GONTIJO JÚNIOR

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

**Profº. Sérgio Koide, PhD (UnB – FT/ENC)
(Orientador)**

**Profº. Oscar Cordeiro Netto, Doutor (UnB – FT/ENC)
(Examinador interno)**

**Profº. Alain Marie Bernard Passerat de Silans
(Examinador externo)**

Brasília, DF, 15 de junho de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

GONTIJO JÚNIOR, WILDE CARDOSO

Avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método Sharp e o conceito de entropia.

xix, 190, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, M.Sc., Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2007)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Redes de monitoramento; 2. Redes fluviométricas; 3. Método para projeto de redes; 4. Método Sharp; 5. Método com aplicação do conceito de entropia. I. Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONTIJO JR., Wilde Cardoso. (2007). Avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método Sharp e o conceito de entropia. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM-103/2007, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 190p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Wilde Cardoso Gontijo Júnior

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método Sharp e o conceito de entropia.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Wilde Cardoso Gontijo Júnior

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Wilde que sempre estará presente,
À minha mãe Zilca com quem aprendi a lutar, aos meus filhos Paula e Rafael e à minha
querida esposa Sandra aos quais agradeço sempre por tê-los perto de mim, a todas as
pessoas de bem que nos ajudam a melhorar esse mundo.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho só foi possível graças aos conhecimentos recebidos da equipe de professores da UnB, à sua dedicação e competência, principalmente ao professor Sérgio Koide, que confiou em mim no desenvolvimento do tema proposto.

Obrigado, professor Koide, pela paciência e orientação na busca do melhor caminho a trilhar na elaboração dessa dissertação.

Obrigado, colegas da Agência Nacional de Águas, pela troca de idéias durante a elaboração do trabalho e pela colaboração na busca de dados e materiais que muito me auxiliaram nas pesquisas que desenvolvi.

Obrigado, especialmente, aos colegas Valdemar Guimarães, Eurides de Oliveira, Raymundo Borges, Antônio Cardoso Neto e Marco Antônio Silva.

Agradeço à colega do Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Marília Carvalho, que me auxiliou na pesquisa dos dados das estações operadas pelo IGAM.

RESUMO

O conhecimento das características do regime hidrológico dos cursos d'água em uma bacia hidrológica é a base para que possam se desenvolver as ações de gestão dos recursos hídricos atendendo aos múltiplos usos aos quais devem servir.

A formação desse conhecimento se faz a partir da coleta das informações relativas às vazões fluviais durante determinado período por intermédio da instalação de estações fluviométricas de monitoramento. A rede formada pelas estações deverá ser suficiente para a geração das informações que atendam aos diversos usos e ser ótima em sua locação. Os dados coletados devem permitir modelar adequadamente o comportamento hidrológico na bacia garantindo, independentemente da existência de pontos de monitoramento em uma seção específica, a informação desejada naquele ponto.

A locação das estações, no entanto, tem sido realizada ao longo dos anos, no Brasil, de maneira majoritariamente empírica, sem o auxílio de métodos científicos que permitam o planejamento de suas instalação, operação e manutenção.

Esse trabalho pretende reunir os conceitos que devem nortear a construção de uma rede de monitoramento fluviométrico assim como os métodos disponíveis na bibliografia especializada e, assim, propor um procedimento que, de maneira bastante expedita, possa ser aplicado às redes instaladas e a outras a serem propostas.

Descritos e classificados tais métodos, optou-se pela proposição da aplicação do conceito de entropia tanto na locação de estações em bacias sem informações iniciais, utilizando-se o método Sharp, quanto na otimização de redes em bacias com dados coletados durante vários anos. Esse conceito e seus métodos associados permitem que, da análise da topologia da rede de drenagem e do comportamento estatístico das séries de dados, seja realizada uma rápida avaliação da rede a ser proposta ou otimizada.

A aplicação do procedimento proposto a três regiões hidrográficas na bacia do rio São Francisco, no Brasil, permitiu analisar as pertinências e dificuldades dos métodos utilizados para a avaliação e o redimensionamento de redes de monitoramento de vazões além da proposição de novos estudos para o aprimoramento científico correlato.

ABSTRACT

Information of the hydrologic regime characteristics of the watercourses in a hydrologic basin are the starting point for developing water resources management actions taking its multiple uses into account.

Setting up of such knowledge is carried out by means of information about the river discharges during certain period through the settlement of monitoring flow stations. The network composed by these stations should be enough for generating suitable information for giving support to the multiple purposes as well as being optimally located. The data generated should allow satisfactory modelling of the hydrologic behaviour of the basin, independently of the existence of monitoring points at specific sections, such as to ensure information at those points.

Nevertheless, the location of the stations in Brazil has been almost always carried out in empirical fashion without help of scientific methods that could allow planning their installation, operation and maintenance.

This work is aimed at joining up both the concepts that should guide the assembling of a flow monitoring network and the methodologies and methods available at the specialised bibliography in order to propose a procedure that, in a prompt way, could be applied to both the already existing networks and others to be suggested.

After describing and classifying such methods, it was chosen to apply the concept of entropy both in locating stations within basins that are not endowed with initial information, using the Sharp method, and in optimising networks within basins in which data have been collected during several years. This concept and its associated methods allow a quick evaluation for the network to be either proposed or optimised, starting from a topological analysis of the drainage network and data series statistic behaviour.

The procedure application proposed to the three hydrographic regions in the basin of the river São Francisco, in Brazil, allowed to analyze the relevancies and difficulties of the methods used for evaluation and readjusted of surface water monitoring networks beyond the proposal of new studies for respective scientific improvement.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO GERAL	4
3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4	REDE DE MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO	5
4.1	HISTÓRICO DA POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	5
4.2	A LEI DAS ÁGUAS E O MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	7
4.2.1	A bacia hidrográfica como unidade de planejamento	8
4.2.2	A garantia dos usos múltiplos	15
4.2.3	A gestão descentralizada	15
4.2.4	A relação entre os instrumentos de gestão e a rede de monitoramento	16
4.2.4.1	O plano de recursos hídricos	16
4.2.4.2	A outorga de direito de uso	17
4.2.4.3	A cobrança pelo uso da água	17
4.2.4.4	O enquadramento dos corpos d'água	17
4.2.4.5	O sistema de informações	18
4.3	REDE DE MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO	18
4.3.1	Breve histórico da rede brasileira de monitoramento	19
4.3.2	Situação atual da rede brasileira de monitoramento fluviométrico	23
4.3.3	Objetivos de uma rede de monitoramento	25
4.3.4	Redes básicas	29
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	32
5.1	AS VAZÕES FLUVIAIS	32
5.1.1	Características gerais	34
5.1.2	Características temporais	36
5.1.3	Características espaciais	37
5.1.4	Comportamento estatístico	40
5.1.4.1	A distribuição Log-Normal	42
5.1.5	Correlação das informações fluviométricas	44
5.2	ASPECTOS TOPOLÓGICOS DE UMA REDE DE DRENAGEM	46
5.2.1	Rede de drenagem	46
5.2.2	Ordenamento de uma rede de drenagem	46

5.2.3	Magnitude de uma rede de drenagem.....	50
6	METODOLOGIAS PARA REDES.....	52
6.1	PROCEDIMENTOS PARA PROJETO DE REDES FLUVIOMÉTRICAS.....	52
6.1.1	Procedimento OMM.....	53
6.1.2	Procedimento DNAEE.....	56
6.1.3	Procedimento Galvão.....	58
6.1.4	Procedimento do <i>Federal Institute of Hydrology</i> (Alemanha).....	59
6.1.5	Procedimento Llamas.....	63
6.2	MÉTODOS PARA PROJETO DE REDES FLUVIOMÉTRICAS.....	63
6.2.1	Método Dubreuil.....	63
6.2.2	Método da Cartografia Conjunta.....	64
6.2.3	Método Geoestatístico.....	66
6.2.4	Método Karasiev.....	69
6.2.5	Método Sharp.....	72
6.2.6	Método utilizando o conceito da Entropia.....	78
6.3	DEFINIÇÃO DE TIPOLOGIAS PARA APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS E MÉTODOS.....	86
6.3.1	Objetivos e interesses de uma rede fluviométrica.....	86
6.3.2	A escala temporal.....	87
6.3.3	A escala espacial.....	88
6.3.4	Tipologias para aplicação dos procedimentos e métodos.....	89
7	PROCEDIMENTO PROPOSTO.....	92
7.1	DESCRIÇÃO.....	93
7.2	FLUXOGRAMA.....	99
7.3	ESTUDOS DE CASO.....	101
7.3.1	Região Hidrográfica do Rio das Velhas.....	107
7.3.1.1	A potamografia.....	107
7.3.1.2	A rede de monitoramento existente.....	107
7.3.2	Região Hidrográfica do Alto Rio Grande.....	107
7.3.2.1	A potamografia.....	107
7.3.2.2	A rede de monitoramento existente.....	107
7.3.3	Região Hidrográfica Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro.....	108
7.3.3.1	A potamografia.....	108

7.3.3.2	A rede de monitoramento existente.....	108
8	RESULTADOS.....	113
8.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO SHARP.....	113
8.1.1	Região Hidrográfica do Rio das Velhas.....	113
8.1.2	Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	119
8.1.3	Região Hidrográfica Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro.....	125
8.2	APLICAÇÃO DA ANÁLISE DA ENTROPIA.....	129
8.2.1	Região Hidrográfica do Rio das Velhas.....	129
8.2.2	Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	140
8.2.3	Região Hidrográfica Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro.....	148
8.3	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	148
8.3.1	Método Sharp.....	149
8.3.2	Método de Dixon.....	154
8.3.3	Entropia Própria.....	154
8.3.4	Hierarquização pela entropia condicional.....	156
8.3.5	Otimização pelo transporte de informações.....	157
8.3.6	Otimização pela razão da entropia do sistema.....	158
8.3.7	Avaliação geográfica do transporte de informações.....	159
8.3.8	Critérios de gestão na avaliação da rede.....	160
8.4	REVISÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO.....	160
8.4.1	Novo fluxograma para o Método Sharp.....	161
8.4.2	Novo fluxograma para o Método utilizando o conceito de entropia.....	163
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	166
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
	APÊNDICE A – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE ΔX NA FÓRMULA DA ENTROPIA ASSOCIADA.....	177
	APÊNDICE B – FUNÇÕES DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – 1978 A 2006.....	180
	APÊNDICE C – FUNÇÕES DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO GRANDE – 1978 A 2006.....	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1	Bacias hidrográficas definidas pelo Projeto Hidrologia (ANEEL, 2003).....	8
Figura 4.2	Método Otto Pfafstetter (GALVÃO; MENESES, 2005).....	9
Figura 4.3	Região hidrográfica Paraná – divisão “Otto” nível 3 (ANA, 2002).....	10
Figura 4.4	Divisão hidrográfica nacional (CNRH, 2003).....	11
Figura 4.5	Regiões hidrográficas estabelecidas pelo CNRH e unidades estaduais de planejamento e gestão de recursos hídricos – UEPGRH (COELHO et al., 2005).....	13
Figura 4.6	Unidades nacionais de gestão de recursos hídricos (COELHO et al., 2005).....	14
Figura 4.7	Situação da rede fluviométrica até 1920 (ANA, 2005).....	19
Figura 4.8	Situação da rede fluviométrica até 1940 (ANA, 2005).....	20
Figura 4.9	Situação da rede fluviométrica até 1980 (ANA, 2005).....	22
Figura 4.10	Situação da rede fluviométrica até 2005 (ANA, 2005).....	23
Figura 5.1	Hidrograma típico de uma bacia (TUCCI, 2001).....	33
Figura 5.2	Variações de hidrogramas (TUCCI, 2001).....	33
Figura 5.3	Comportamento das vazões e precipitações - Verde Pequeno - (TUCCI, 2002).....	35
Figura 5.4	Escala dos processos hidroclimáticos (TUCCI, 2002).....	37
Figura 5.5	Variação da vazão média em função da alteração do plantio convencional para o plantio direto (SILVA JR, 2001).....	39
Figura 5.6	Escala espacial e temporal para processos hidrológicos (TUCCI, 2002).....	40
Figura 5.7	Distribuição Log-Normal (LANNA, 2001).....	43
Figura 5.8	Ordenamento de Horton.....	48
Figura 5.9	Ordenamento de Horton modificado.....	48
Figura 5.10	Ordenamento de Strahler.....	49
Figura 5.11	Ordenamento de Shreve.....	50
Figura 6.1	Procedimento OMM para redesenho de redes (WMO, 1994).....	54
Figura 6.2	Ferramentas para construção de rede hidrometeorológica (WMO, 1994).....	55
Figura 6.3	Usos das informações da rede hidrometeorológica (BELZ; ENGEL, 2003).....	61
Figura 6.4	Critérios para avaliação da locação das estações (BELZ; ENGEL, 2003).....	62
Figura 6.5	Diagrama de avaliação das estações (BELZ; ENGEL, 2003).....	62
Figura 6.6	Ilustração de um Semivariograma.....	68
Figura 6.7	Ilustração das áreas de Karasiev.....	71
Figura 6.8	Aplicação do método Sharp (LIMA, 2004).....	75

Figura 7.1	Fluxograma do procedimento proposto para avaliação e redimensionamento de redes fluviométricas através do método utilizando o conceito de entropia e do método Sharp.....	100
Figura 7.2	Mapa de declividades do terreno brasileiro (ANA, 2006).....	102
Figura 7.3	Avaliação da rede fluviométrica “ <i>on stream</i> ” cadastrada na ANA – segundo padrão OMM para a densidade de estações (ANA, 2006).....	102
Figura 7.4	Região Hidrográfica do rio São Francisco e sub-bacias (ANA, 2004).....	103
Figura 7.5	Distribuição pluviométrica na Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias (ANA, 2004).....	104
Figura 7.6	Balanco entre demanda e disponibilidade hídricas na Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias (ANA, 2004).....	105
Figura 7.7	Balanco entre demanda e disponibilidade hídricas na Região Hidrográfica do rio São Francisco e sub-bacias – previsão para 2015 (ANA, 2004).....	105
Figura 7.8	Classificação quanto aos aspectos conflitivos entre usos e usuários de recursos hídricos na Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias (ANA, 2004).....	106
Figura 8.1	Gráfico das vazões específicas médias pela área de drenagem da Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	113
Figura 8.2	Áreas de drenagem de estações e bifurcações da Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	114
Figura 8.3	Localção de estações fixas por nível hierárquico de centróide da Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	118
Figura 8.4	Gráfico das vazões específicas médias pela área de drenagem da Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	119
Figura 8.5	Áreas de drenagem de estações e bifurcações da Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	120
Figura 8.6	Localção de estações fixas por nível hierárquico de centróide da Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	124
Figura 8.7	Áreas de drenagem de estações e bifurcações da Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro.....	126
Figura 8.8	Localção de estações fixas por nível hierárquico de centróide da Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro.....	128
Figura 8.9	Comportamento da entropia própria pelo número de eventos da série de dados das estações fluviométricas da Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	130
Figura 8.10	Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede de estações fluviométricas na Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	134
Figura 8.11	Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede de estações fluviométricas na Região Hidrográfica do rio das Velhas – $\Delta X = 1$	135
Figura 8.12	Diagrama de fluxo do transporte de informações - Região Hidrográfica do rio das Velhas (transporte por etapa – TR%).....	137

Figura 8.13	Diagrama de fluxo do transporte de informações - Região Hidrográfica do rio das Velhas (razão da entropia - RH) – $\Delta X = 1$	137
Figura 8.14	Diagrama de fluxo da entropia associada - Região Hidrográfica do rio das Velhas (razão da entropia - RH).....	138
Figura 8.15	Diagrama de fluxo da entropia associada - Região Hidrográfica do rio das Velhas (transporte por etapa – TR%) – $\Delta X = 1$	138
Figura 8.16	Transporte de informações entre as estações, de montante para jusante, na Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	140
Figura 8.17	Comportamento da entropia própria pelo número de eventos da série de dados das estações fluviométricas da Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	142
Figura 8.18	Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede com 8 estações fluviométricas na Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	144
Figura 8.19	Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede com 8 estações fluviométricas na Região Hidrográfica do Alto rio Grande – $\Delta X = 1$	145
Figura 8.20	Diagrama de fluxo do transporte de informações - Região Hidrográfica do Alto rio Grande (transporte por etapa – TR%).....	145
Figura 8.21	Diagrama de fluxo do transporte de informações - Região Hidrográfica do Alto rio Grande (transporte por etapa – TR%) – $\Delta X = 1$	146
Figura 8.22	Diagrama de fluxo da entropia associada - Região Hidrográfica do Alto rio Grande (razão da entropia - RH).....	146
Figura 8.23	Diagrama de fluxo da entropia associada - Região Hidrográfica do Alto rio Grande (razão da entropia - RH) – $\Delta X = 1$	146
Figura 8.24	Transporte de informações entre as estações, de montante para jusante, na Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	148
Figura 8.25	Fluxograma para a aplicação do método Sharp visando à locação de estações para rede de monitoramento fluviométrico de vazões.....	162
Figura 8.26	Fluxograma para a aplicação do método utilizando o conceito de entropia visando à avaliação e redimensionamento de rede de monitoramento fluviométrico de vazões.....	164
Figura B.1	Função distribuição de frequência da estação 41890000.....	180
Figura B.2	Função distribuição de frequência da estação 41199998.....	180
Figura B.3	Função distribuição de frequência da estação 41940000.....	181
Figura B.4	Função distribuição de frequência da estação 41260000.....	181
Figura B.5	Função distribuição de frequência da estação 41780002.....	182
Figura B.6	Função distribuição de frequência da estação 41340000.....	182
Figura B.7	Função distribuição de frequência da estação 41410000.....	183
Figura B.8	Função distribuição de frequência da estação 41600000.....	183
Figura B.9	Função distribuição de frequência da estação 41650002.....	184
Figura B.10	Função distribuição de frequência da estação 41818000.....	184

Figura B.11	Função distribuição de frequência da estação 41990000.....	185
Figura C.1	Função distribuição de frequência da estação 46415000.....	186
Figura C.2	Função distribuição de frequência da estação 46490000.....	186
Figura C.3	Função distribuição de frequência da estação 46543000.....	187
Figura C.4	Função distribuição de frequência da estação 46570000.....	187
Figura C.5	Função distribuição de frequência da estação 46520000.....	188
Figura C.6	Função distribuição de frequência da estação 46550000.....	188
Figura C.7	Função distribuição de frequência da estação 46590000.....	189
Figura C.8	Função distribuição de frequência da estação 46455000.....	189
Figura C.9	Função distribuição de frequência da estação 46530000.....	190

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1	Divisão hidrográfica nacional (CNRH, 2003).....	12
Tabela 4.2	Unidades nacionais de gestão de recursos hídricos (COELHO et al., 2005)..	14
Tabela 4.3	Estações fluviométricas no banco de dados da ANA (ANA, 2007).....	24
Tabela 4.4	Estações hidrometeorológicas no banco de dados da ANA (ANA, 2007).....	25
Tabela 5.1	Escala dos processos hidrológicos (BECKER, 1992, <i>apud</i> TUCCI, 2002)....	38
Tabela 6.1	Densidade mínima para redes fluviométricas (WMO, 1994, e LLAMAS, 1996).....	56
Tabela 6.2	Localização de estações fluviométricas (DNAEE, 1995).....	58
Tabela 6.3	Localização de estações fluviométricas (DNAEE, 1983).....	58
Tabela 6.4	Otimização da macrolocalização de estações segundo SHARP (1971).....	76
Tabela 6.5	Tipologias para aplicação dos procedimentos e métodos para o planejamento e projeto de redes fluviométricas.....	91
Tabela 7.1	Estações fluviométricas da Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	109
Tabela 7.2	Estações selecionadas da Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	111
Tabela 7.3	Estações fluviométricas da Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	111
Tabela 7.4	Estações selecionadas da Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	112
Tabela 7.5	Estações fluviométricas na Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro.....	112
Tabela 7.6	Estações selecionadas na Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro.....	112
Tabela 8.1	Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) - Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	116
Tabela 8.2	Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a vazão média) - Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	117
Tabela 8.3	Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a vazão média) - Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	121
Tabela 8.4	Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) - Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	122
Tabela 8.5	Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) - Bacia do rio Carnaíba de Dentro.....	127
Tabela 8.6	Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) – Bacia do rio Santo Onofre.....	127

Tabela 8.7	Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (área de drenagem) – Bacia do rio Paramirim.....	127
Tabela 8.8	Avaliação preliminar das séries históricas das estações Região Hidrográfica do rio das Velhas	130
Tabela 8.9	Hierarquização de estações fluviométricas pela entropia própria das séries de dados na Região Hidrográfica do rio das Velhas.....	132
Tabela 8.10	Hierarquização de estações fluviométricas pela entropia própria das séries de dados na Região Hidrográfica do rio das Velhas – $\Delta X = 1$	132
Tabela 8.11	Avaliação preliminar das séries históricas das estações da Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	142
Tabela 8.12	Hierarquização de estações pela entropia própria de cada série - Região Hidrográfica do Alto rio Grande.....	143
Tabela 8.13	Hierarquização de estações pela entropia própria de cada série - Região Hidrográfica do Alto rio Grande – $\Delta X = 1$	143
Tabela 8.14	Características da locação das estações segundo resultados do método Sharp utilizando a variável área de drenagem.....	151
Tabela 8.15	Características da locação das estações segundo resultados do método Sharp utilizando a variável vazão.....	152

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BA	Bahia
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica (RS)
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CETESB	Companhia Tecnológica de Saneamento Ambiental
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (CE)
COHIDRO	Consultoria, Estudos e Projetos Ltda.
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CRA	Centro de Recursos Ambientais
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica (SP)
DNAE	Departamento Nacional de Águas e Energia
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A
ELETROPAULO	Eletricidade de São Paulo S/A
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural (SC)
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S/A
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão de Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITAIPU	Itaipu Binacional
MG	Minas Gerais
MMA	Ministério do Meio Ambiente

MME	Ministério de Minas e Energia
NP	Não operando
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OP	Operando
SF5	Unidade de Planejamento e Gestão de Minas Gerais São Francisco 5
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
SRH/BA	Superintendência de Recursos Hídricos (BA)
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PR)
UEGRH	Unidade Estadual de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
WMO	World Meteorological Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

Aa	assimetria de uma curva
Acor	área limite para correlação de dados
Agrad	área referente ao gradiente de vazões
Amin	área mínima
Ap	assimetria de Pearson
Aot	área ótima
As	coeficiente de assimetria
C	covariância da função estacionária
C	valor do determinante da matriz de covariância C
Cv	coeficiente de variação
d	distância entre dois pares amostrais
de	distância entre estações
Δt	intervalo de tempo
ΔX	intervalo de dados
E	evaporação
Ec	eficácia de cobertura
Ei	esforço para a informação
Ef	número de estações fixas
Fcpa	fator de correção para pequenas amostras
Gi	ganho de informação
H	entropia associada ou conjunta
Imax	informação máxima
Imed	informação média
γ	função do semivariograma
K	coeficiente da razão entre Qc e Qo
L	variável auxiliar
LN(x)	função densidade probabilidade Log-Normal
m	média da função estacionária
Mc'	centróide da parte inferior da bacia
Mc''	centróide da parte superior da bacia
mk	número de vezes que o evento ocorreu
Um	magnitude do exutório da parte superior da bacia

N	número de dados de uma série
N _s	número de amostras seqüenciais
N(d)	número de pares amostrais separados pela distância (d)
n _i	magnitude do trecho das estações fixas
P	precipitação
p _k	probabilidade de ocorrência de um evento
Q	escoamento superficial ou vazão
Q _o	vazão observada
Q _c	vazão calculada
q	vazão específica
R	redundância de informações
RH	razão entre a entropia parcial e a total em uma rede
r _b	coeficiente de bifurcação
σ	desvio-padrão
σ_0	desvio-padrão de uma função (x)
T	temperatura
TR	transporte de informações
u	magnitude do exutório da bacia
μ	média da função Ln(x)
μ_0	média de uma função (x)
x	variável
x_β	valor da variável em β
x_α	valor da variável em α
x _o	valor da variável inicial
x _i	vazões médias anuais
x _m	valor médio das vazões médias
x _i	valor verificado de um parâmetro
x _m	valor médio de um parâmetro
X _m	série de dados de uma estação M
x _{moda}	valor da moda de uma amostra
x _{med}	valor da mediana de uma amostra
z(x)	função aleatória
Z _{ks(x)}	função estacionária
∇q	gradiente de vazões

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento das águas superficiais nos rios é instrumento básico para o gerenciamento dos recursos hídricos em qualquer país. Para que esse conhecimento seja efetivo, é necessário que exista uma rede de monitoramento dos caudais fluviais, preferencialmente com longo tempo de operação ininterrupta, que possa coletar informações suficientes ao atendimento dos diversos usos, antrópicos ou ecológicos, a que estão sujeitas as águas dos rios.

O desenvolvimento de uma rede de monitoramento no Brasil tem obedecido aos ciclos de uso dos nossos rios. Inicialmente, eram os cursos d'água as estradas principais que adentravam ao interior e, assim, eram cuidadas pelo governo. É do século XIX a primeira classificação de domínio desses rios: segundo a Ordenação do Reino de Portugal, por meio de Alvará de 1804, "*os rios navegáveis e os que se faziam navegáveis, que eram caudais e corriam o tempo todo, pertenciam aos direitos reais. A utilização das águas dependia de autorização régia.*" (BRAGA, 2002). Não há registro sobre o monitoramento das águas nesse tempo.

Com a implantação das usinas hidrelétricas e com o crescente aumento dos potenciais hidráulicos explorados, muitas vezes necessitando da construção de reservatórios para regularização de vazões, o monitoramento e a predição de vazões que subsidiassem à instalação de máquinas de geração hidrelétrica iniciaram processo contínuo nos rios, previsto inclusive no Código das Águas, de 1934.

Pode-se dizer que a rede de monitoramento das águas no Brasil é heptagenária em alguns poucos rios e muito nova na sua grande maioria. Somente com o advento dos grandes projetos hidrelétricos e com a crescente demanda das águas para abastecimento das grandes cidades ou para projetos para irrigação, notadamente a partir dos anos 60, foram sendo instaladas estações em quase todos os rios nacionais. Ao mesmo tempo se expandia a rede para as regiões centro-oeste e norte, antes restrita às demais regiões, e institucionalizava-se o gerenciamento de uma rede de monitoramento para todo o país, por intermédio do Ministério de Minas e Energia e do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE.

O planejamento e o projeto das redes, principalmente aquelas fluviométricas, inicialmente inexistentes, foram internalizando processos e rotinas, na maioria das vezes, voltados ao atendimento exclusivo de determinado uso dos rios. A rede de monitoramento, instalada em áreas novas e com poucas informações sobre o comportamento hidrológico

anterior, constituía-se definida pela aplicação de parâmetros mundiais para locação das estações não podendo contar, até recentemente, com procedimentos científicos mais adequados para a sua contínua avaliação e seu redimensionamento.

Esta dissertação pretende propor um procedimento que, alicerçado em métodos aplicáveis tanto a regiões sem dados iniciais quanto às bacias já com farta coleta de informações, possibilite o projeto, a avaliação e o redimensionamento contínuo de redes, novas ou existentes.

O texto discorre brevemente sobre a história da implantação da rede brasileira e sobre as políticas nacionais de recursos hídricos. A política atual é destacada em função dos seus fundamentos de garantia do múltiplo uso das águas, da descentralização da gestão e da definição da bacia hidrográfica como unidade de planejamento para aplicação da política, importantes balizamentos para o estabelecimento dos objetivos da rede de monitoramento. No capítulo 4, em que se apresentam esses temas, discute-se, ainda, os principais conceitos relativos à construção de uma rede, tais como: redes básicas, estações primárias e secundárias, os tipos de estações e a importância das informações geradas por intermédio de uma rede fluviométrica para o gerenciamento dos recursos hídricos.

No capítulo 5, apresenta-se a vazão fluvial e suas características mais importantes, assim como o tratamento estatístico que representa essas vazões por intermédio de parâmetros específicos. Nesse capítulo, busca-se a fundamentação teórica para o ordenamento de uma rede de drenagem e possibilita-se, assim, que seja dado tratamento conjunto à vazão fluvial e à rede de drenagem visando ao estabelecimento de condições suficientes para a aplicação de procedimentos para locação das estações.

Os procedimentos mais freqüentemente utilizados para o projeto de redes são apresentados no capítulo 6, assim como os métodos e técnicas aplicáveis para a melhor locação das estações. Nesse capítulo, objetiva-se a classificação dos métodos e procedimentos visando à orientação adequada para que, estabelecidas as finalidades a serem atendidas por uma rede de monitoramento e as condições existentes relativas às informações sobre as vazões ou outras variáveis relacionadas com essas medidas, possa ser escolhida a melhor maneira de projetá-la.

Considerando as peculiaridades e diversidades presentes no território brasileiro, privilegiando às mínimas exigências necessárias à sua aplicação no planejamento de redes, foram escolhidos os métodos Sharp e outro utilizando o conceito de entropia para a formulação de um procedimento para redes fluviométricas. No capítulo 7, apresenta-se esse procedimento, analisa-se sua aplicação considerando os aspectos espacial e temporal,

e propõe-se sua validação por meio de estudos de caso. Definem-se, então, as bacias hidrográficas que servirão como casos a serem estudados pela aplicação desse procedimento.

Por fim, no capítulo 8, utilizando-se de estudo preliminar sobre a situação da rede de monitoramento instalada na bacia hidrográfica do rio São Francisco, para o qual foram utilizados os parâmetros da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para classificar unidades de planejamento quanto à densidade de estações por área de drenagem, apresenta-se a aplicação do procedimento proposto no capítulo 7. Esse procedimento, aplicado a três regiões com distintas disposições e densidades de estações fluviométricas, apresenta alternativas para a avaliação e o redimensionamento das redes, considerando a melhor alternativa topológica para locação das estações, a característica própria dos dados existentes em cada estação e as correlações entre as séries de dados das diversas estações existentes.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da dissertação é propor procedimento para a avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico nos aspectos quantitativos das vazões.

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos da dissertação:

1º analisar e classificar procedimentos e métodos utilizados para projetos e planejamento de redes para o monitoramento fluviométrico considerando os objetivos e interesses a serem alcançados, as escalas temporal e espacial, além das necessidades específicas relativas às informações requeridas por cada método; e

2º propor um procedimento para avaliação e redimensionamento de redes fluviométricas, baseado no método de Sharp e no conceito de entropia, que possa dar respostas às seguintes questões:

a) propor a locação de estações considerando, simplesmente, as características topológicas da rede de drenagem e as informações básicas existentes sobre as áreas de drenagem e, se houver, as vazões fluviais nos seus cursos d'águas;

b) verificar qualitativamente as informações disponíveis em cada uma das estações de forma a permitir o julgamento da necessidade de adequação da frequência de coleta em função da “entropia” das séries de dados; e

c) otimizar a rede fluviométrica com a verificação da redundância das informações coletadas nas séries existentes, permitindo que sejam descartadas estações seja em virtude da superposição de informações, ou adensada a rede quando as informações presentes nas séries de dados são muito diversas.

4 REDE DE MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO

4.1 HISTÓRICO DA POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Apesar de já existirem regulamentos sobre o uso dos rios no período colonial ou do império no Brasil, pode-se considerar que o estabelecimento de um aparato legal e institucional destinado ao controle e ordenamento dos usos dos recursos hídricos somente aconteceu com o advento da Proclamação da República, em 1891.

Segundo a primeira Constituição republicana, competia privativamente ao Congresso Nacional legislar sobre a navegação dos rios que banham mais de um Estado, numa referência indireta ao uso dos recursos hídricos. A preocupação em regulamentar o uso e as múltiplas finalidades dos recursos hídricos ficou relegada ao Código Civil, em 1916, 25 anos mais tarde, contendo disposições sobre as relações entre particulares e a prevenção ou solução de conflitos gerados pelo uso da água.

Com o crescente processo de urbanização e com o incremento do uso dos potenciais hidráulicos para geração energética, a Administração Federal percebe a necessidade de buscar a imposição de normas reguladoras, uma vez que os serviços concedidos para o atendimento das populações das cidades por água potável ou para a produção de energia permaneciam precários.

Era preciso, no entanto, superar a cultura marcada pelo patrimonialismo clássico expressa na Constituição de 1891 em cujo texto se reconhecia o direito à propriedade sem especificar o domínio das águas, entendendo-se que este acompanhava a propriedade do solo.

Por mais de vinte anos, foram discutidos os termos do que foi consagrado como o Código das Águas, de 1934. Tratava-se de um decreto presidencial, considerado inovador à época, sendo mundialmente respeitada como uma das mais completas normas legais sobre águas já concebidas¹. De acordo com esse Código, a água teve seu domínio dividido em águas públicas, águas comuns e águas particulares.

O Código das Águas regulou o uso dos recursos hídricos durante décadas, somente vindo a ser objeto de revisão após a promulgação da Constituição de 1988.

Em 1991, inicia-se a tramitação do projeto de lei federal que instituiria a política nacional de recursos hídricos. Após 6 (seis) anos de intensos debates, refletindo os princípios ambientais referendados na Conferência Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como ECO-92, foi promulgada a nova Lei das Águas (Lei n°

¹ Citação extraída do Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2006)

9.433, 1997). Essa lei reconhece a água como bem público natural e limitado, dotado de valor econômico, cuja gestão deve ser descentralizada e contar com a participação dos órgãos públicos, dos usuários e das comunidades.

O modelo de gerenciamento adotado no Brasil, desde então, incorpora novos princípios e instrumentos de gestão. Enquadra-se no modelo sistêmico de integração participativa, que determina a criação de uma estrutura, na forma de matriz institucional de gerenciamento, responsável pela execução de funções específicas, além de adotar como base territorial para o planejamento a bacia hidrográfica. A tomada de decisão dar-se-á por intermédio de deliberações de colegiados chamados Comitês de Bacia, os quais definirão as diretrizes sobre os usos das águas nessas bacias e a aplicação de instrumentos econômicos de regulação dos usos.

Os objetivos presentes na nova legislação visam: assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; promover a utilização racional e integrada dos recursos hídricos com vistas ao desenvolvimento sustentável e a defesa contra eventos hidrológicos críticos, sejam de origens naturais ou decorrentes do uso inadequado dos recursos hídricos.

A implementação da política deve desenvolver-se, dentre outras diretrizes, pela gestão sistemática dos recursos hídricos sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade, o que a notabiliza como integradora com a política ambiental vigente.

A nova lei das águas não se encerra em diretrizes gerais e, também, estabelece os instrumentos pelos quais deverão ser implementadas as ações de gestão. Plano de recursos hídricos, enquadramento dos corpos de água, outorga de direito de uso, cobrança pelo uso da água e um sistema de informações estruturam esse conjunto de instrumentos e tornam a política de recursos hídricos capaz de enfrentar o desafio de regular o uso de 12% das águas doces disponíveis no planeta (BRASIL, 2006)².

O sistema de informações visa principalmente à produção, sistematização e disponibilização de dados e informações sobre as condições hídricas das bacias e do país em termos de quantidade e qualidade de água para os diversos usos.

Cabe à entidade outorgante dos direitos de uso das águas (Agência Nacional de Águas - ANA, em rios de domínio da União, e a órgãos públicos com competência sobre os recursos hídricos de domínio dos estados federados) organizar, implantar e gerenciar o

² Segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos, levando em conta as águas oriundas de territórios estrangeiros, cerca de 18% das vazões de águas do planeta estão disponíveis no Brasil.

sistema de informações nos âmbitos nacional e estadual³. No âmbito da bacia hidrográfica, caberá à agência de água gerir o respectivo sistema. Esse sistema de informações é basilar para a aplicação de todos os instrumentos da política e para a disseminação de informações confiáveis: será a peça fundamental para a tomada de decisões seguras em um sistema compartilhado de decisão.

O sistema de informações, no entanto, será frágil se não contar com uma rede de monitoramento hidrometeorológico capaz de garantir a presteza, precisão e permanente informação sobre a situação dos recursos hídricos, “*sob pena de tentar-se gerenciar algo que não se conhece*” (MAGALHÃES, 2000).

Quando da promulgação da Lei nº 9.433, em 1997, havia no país extensa rede de monitoramento (ANA, 2005), cujo registro inicial de dados remonta o início do século XX. Essa rede tem características próprias adquiridas no processo histórico de sua construção e reflete as necessidades setoriais pelas informações hidrológicas que subsidiaram o desenvolvimento e implantação de projetos específicos. Na seção 4.3.1, será feita uma breve apresentação da evolução histórica dessa rede e os porquês da sua característica principal: atender a usos específicos sem que o múltiplo uso das águas fosse a preocupação central para a locação das estações.

4.2 A LEI DAS ÁGUAS E O MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

A Lei das Águas⁴ estabelece em seu art. 1º que:

“...

- I a água é um bem de domínio público;*
- II a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;*
- III em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;*
- IV a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;*
- V a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e para a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;*
- VI a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades.”*

³ Cabe à ANA, segundo a Lei nº 9984, de 2000, promover a coordenação das atividades desenvolvidas no âmbito da rede hidrometeorológica nacional, em articulação com órgãos e entidades públicas ou privadas que a integram, ou que dela sejam usuárias.

Para a avaliação de uma rede de monitoramento dos recursos hídricos devem ser levados em consideração, principalmente, os incisos IV, V e VI, da Lei das Águas, cuja relevância será destacada a seguir.

4.2.1 A bacia hidrográfica como unidade de planejamento

Segundo a Lei das Águas, a bacia hidrográfica constitui-se na unidade territorial de planejamento para o gerenciamento dos recursos hídricos. Porém, por mais precisa e correta que tenha sido tal instituição, tecnicamente não é trivial a definição dessa unidade, principalmente quando consideramos a escala geográfica a ser utilizada.

A primeira experiência brasileira para a definição de uma base territorial nacional de planejamento ocorreu no início da década de 70. O Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, então responsável pela gestão dos recursos hídricos no país, erigiu o Projeto Hidrologia (GALVÃO; MENESES, 2004). Esse projeto foi responsável pela divisão do território em 8 (oito) grandes bacias nacionais. Cada uma dessas bacias foi, então, dividida em 10 (dez) sub-bacias objetivando principalmente a codificação das estações fluviométricas (FREITAS *et al.*, 1999). A Figura 4.1 apresenta o resultado dessa proposta.



Figura 4.1 – Bacias hidrográficas definidas no Projeto Hidrologia (ANEEL, 2003)

⁴ Lei federal n° 9433, de 1997.

Em 1989, o engenheiro Otto Pfafstetter desenvolveu um método de classificação de bacias baseado na topografia da área drenada e na topologia da rede de drenagem (GALVÃO; MENESES, 2005). De acordo com seu método, as bacias são divididas em três tipos: bacias, interbacias e bacias internas. Uma bacia é uma área que não recebe drenagem de qualquer outra; uma interbacia é uma bacia que recebe fluxo de água de bacias a montante; e uma bacia interna é uma área de drenagem que não contribui com fluxo de água para outra subbacia ou para um corpo d'água. Esse método teve grande aceitação nacional tendo sido adotada pela extinta Secretaria Nacional de Irrigação (antecessora da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente). Sua aplicação principal foi orientar à codificação dos cursos d'água e das estações de monitoramento: por intermédio de simples código numérico, é possível identificar-se a bacia hidrográfica, suas contribuintes a montante e a jusante, inclusive com conectividade global. As Figuras 4.2 (GALVÃO; MENESES, 2005) e 4.3 (ANA, 2002) ilustram a aplicação desse método.

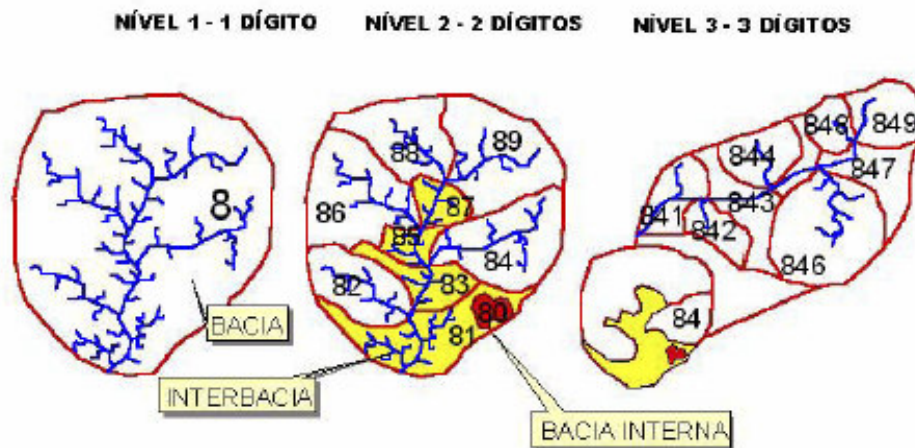


Figura 4.2 – Método Otto Pfafstetter (GALVÃO; MENESES, 2005)

Segundo Galvão e Meneses:

“... o método de classificação e codificação de bacias desenvolvido por Otto, no nível 5 ..., deve ser adotado ... para fins de planejamento de redes hidrométricas, por tratar-se de método natural, hierárquico, baseado na topografia da área drenada e na topologia da rede de drenagem, ... de aplicabilidade global, e de fácil integração com os Sistemas de Informação Geográfica – SIGs ... em especial, por permitir para o Brasil a individualização

e representação, na escala de 1:1.000.000, ... de sub-bacias com um tamanho médio de aproximadamente 6.200 km², constituindo uma excelente unidade de área para fins de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.”



Figura 4.3 – Região hidrográfica Paraná – divisão “Otto” nível 3 (ANA, 2002)

Em 2000, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE - propôs a classificação geral de bacias hidrográficas brasileiras a partir de critérios geográficos e de interflúvios principais definidos a partir de curvas de nível (IBIAPINA *et al.*, 1999). Os limites das bacias foram estabelecidos tendo por base o mapeamento do território na escala 1:1.000.000. Esta classificação dividiu o país em 10 (dez) grandes bacias e 57 (cinquenta e sete) sub-bacias.

Com a estruturação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), instituído o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), este promoveu ampla discussão sobre os sistemas de classificação e codificação de bacias,

buscando normalizar as propostas existentes e definir a divisão hidrográfica nacional para a aplicação da Política Nacional. Resultante dessas discussões, em 2002 foi publicada a Resolução CNRH n° 30, adotando-se para efeito de codificação de bacias a proposta das “Ottobacias”. Nesse mesmo ano, foi aprovada a Resolução CNRH n° 32, que instituiu a divisão hidrográfica nacional que consiste da definição de 12 (doze) regiões hidrográficas nacionais⁵. A Figura 4.4 e a Tabela 4.1 ilustram essa divisão hidrográfica.

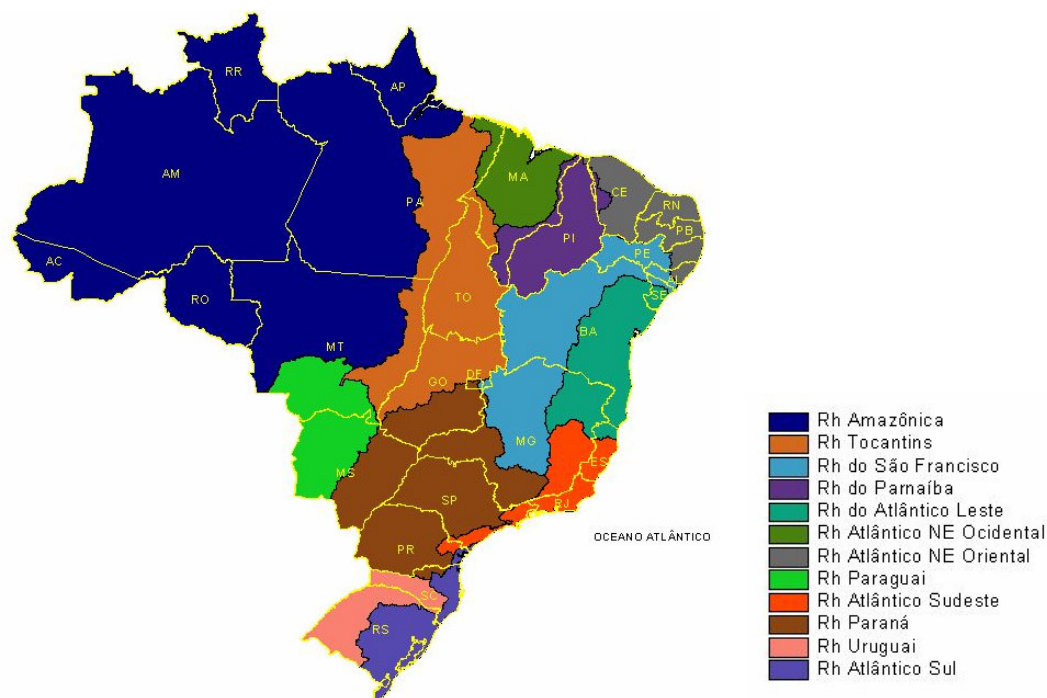


Figura 4.4 – Divisão hidrográfica nacional (BRASIL, 2003)

Além de ter a Lei n° 9433, de 1997, definido a bacia hidrográfica como unidade de planejamento do sistema de gerenciamento determinou, também, que a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos tivesse como diretriz de ação “a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do país.”⁶ Ou seja, tanto o Sistema Nacional de Gerenciamento quanto os instrumentos da política devem ser implementados obedecendo às especificidades do país: o modelo de gerenciamento pode não ser único para todas as regiões.

⁵ Considera-se como região hidrográfica o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

Tabela 4.1 – Divisão hidrográfica nacional (CNRH, 2003)

Região n° 1 Amazônica	Bacia hidrográfica do rio Amazonas situada no território nacional e, também, pelas bacias hidrográficas dos rios existentes na Ilha de Marajó, além das bacias hidrográficas dos rios situados no Estado do Amapá que deságuam no Atlântico Norte.
Região n° 2 Tocantins/Araguaia	Bacia hidrográfica do rio Tocantins até a sua foz no Oceano Atlântico.
Região n° 3 Atlântico Nordeste Ocidental	Bacias hidrográficas dos rios que deságuam no Atlântico - trecho Nordeste, estando limitada a oeste pela região hidrográfica do Tocantins/Araguaia, exclusive, e a leste pela região hidrográfica do Parnaíba.
Região n° 4 Parnaíba	Bacia hidrográfica do rio Parnaíba.
Região n° 5 Atlântico Nordeste Oriental	Bacias hidrográficas dos rios que deságuam no Atlântico - trecho Nordeste, estando limitada a oeste pela região hidrográfica do Parnaíba e ao sul pela região hidrográfica do São Francisco.
Região n° 6 São Francisco	Bacia hidrográfica do rio São Francisco.
Região n° 7 Atlântico Leste	Bacias hidrográficas de rios que deságuam no Atlântico - trecho Leste, estando limitada ao norte e a oeste pela região hidrográfica do São Francisco e ao sul pelas bacias hidrográficas dos rios Jequitinhonha, Mucuri e São Mateus, inclusive.
Região n° 8 Atlântico Sudeste	Bacias hidrográficas de rios que deságuam no Atlântico - trecho Sudeste, estando limitada ao norte pela bacia hidrográfica do rio Doce, inclusive, a oeste pelas regiões hidrográficas do São Francisco e do Paraná e ao sul pela bacia hidrográfica do rio Ribeira, inclusive.
Região n° 9 Paraná	Bacia hidrográfica do rio Paraná situada no território nacional.
Região n° 10 Uruguai	Bacia hidrográfica do rio Uruguai situada no território nacional, estando limitada ao norte pela região hidrográfica do Paraná, a oeste pela Argentina e ao sul pelo Uruguai.
Região n° 11 Atlântico Sul	Bacias hidrográficas dos rios que deságuam no Atlântico - trecho Sul, estando limitada ao norte pelas bacias hidrográficas dos rios Ipiranguinha, Irirí, Mirim, Candapuí, Serra Negra, Tabagaça e Cachoeria, inclusive, a oeste pelas regiões hidrográficas do Paraná e do Uruguai e ao sul pelo Uruguai.
Região n° 12 Paraguai	Bacia hidrográfica do rio Paraguai situada no território nacional.

⁶ Inciso II do art. 3° da Lei federal n° 9433, de 1997.

Sustentado pela diretriz da lei, o Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2006) propôs estudo que buscasse definir um detalhamento mais adequado das regiões hidrográficas, tendo em vista as suas grandes dimensões territoriais e a necessidade de se implementar ações em escala mais apropriada ao gerenciamento descentralizado.

Foi, então, desenvolvido estudo pela ANA (COELHO *et al.*, 2005) buscando à unidade de planejamento e gestão que congregasse as condições mais adequadas ao gerenciamento para atuação dos comitês e das agências de água das bacias, além da maior favorabilidade à aplicação dos instrumentos de gestão dos usos dos recursos hídricos. Segundo esse estudo:

“... a delimitação de uma base territorial para o gerenciamento dos recursos hídricos visa orientar as ações dos entes do SINGREH, de forma a direcionar os esforços da União e dos estados para a consolidação do sistema. Portanto, deve considerar o estabelecimento de diretrizes para a gestão e a sua vigência em toda sua área de abrangência.”

Há de se considerar que no âmbito de boa parte dos estados federados no Brasil encontram-se definidas divisões territoriais para a gestão e planejamento dos recursos hídricos, conforme apresentado na Figura 4.5.

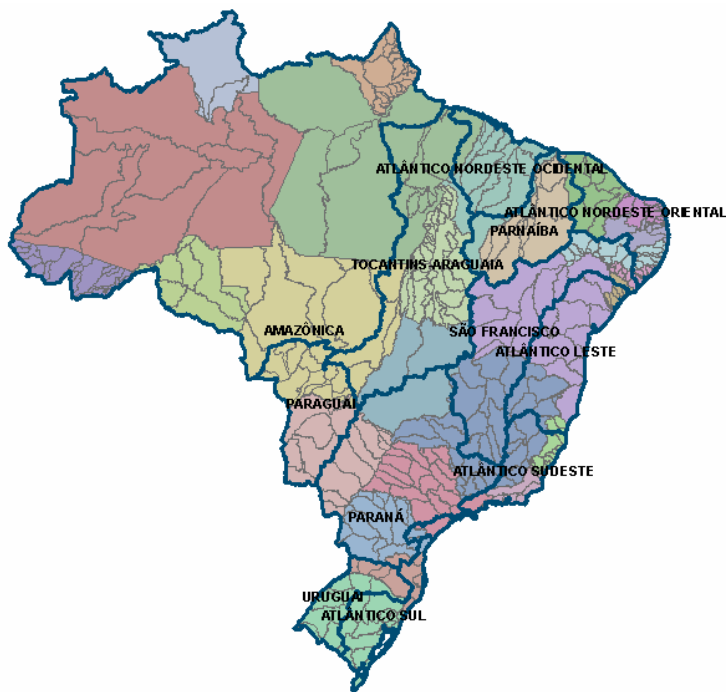


Figura 4.5 – Regiões hidrográficas estabelecidas pelo CNRH e unidades estaduais de planejamento e gestão de recursos hídricos – UEPGRH (COELHO *et al.*, 2005)

O resultado da proposta desenvolvida pela ANA é apresentado na Figura 4.6 e na Tabela 4.2. Essa base territorial busca definir, então, a unidade mínima necessária para o exercício planejado de ações de gestão dos recursos hídricos para uma ou mais bacias hidrográficas, segundo as condições atuais de usos.



Figura 4.6 – Unidades nacionais de gestão de recursos hídricos (COELHO *et al.*, 2005)

Tabela 4.2 – Unidades nacionais de gestão de recursos hídricos (COELHO *et al.*, 2005)

Nº	Nome	Nº	Nome
1	Amazônica	14	Paraguai
2	Curimataú (Trairi / Pirangi Jacú / Grajú / Cati)	15	Paraíba do Sul
3	Doce / Barra Seca	16	Paranaíba
4	Goiana / Litoral Sul PB	17	Parapanema
5	Grande	18	Parnaíba
6	Gurupi	19	PCJ
7	Iguaçu	20	Piranhas-Açu
8	Itabapoana / Itapemirim	21	Ribeira do Iguape / Litoral Sul SP
9	Itaúnas / São Mateus	22	São Francisco
10	Jequitinhonha / Pardo (Araçuaí / Extremo Sul BA - Baixo / Jucuruçu / Itanhaém / Buranhém)	23	Tocantins-Araguaia
11	Mampituba / Araranguá / Urussanga	24	Una / Jacuípe
12	Mucuri / Extremo Sul BA	25	Uruguai
13	Mundaú (Pratagi / Alagoas / São Miguel / CELMM)	26	Vaza Barris (Real/Piauí SE)
27 - 137	Demais Bacias Estaduais (Unidades Estaduais de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos)		

4.2.2 A garantia dos usos múltiplos

As disposições preliminares do Código das Águas estabeleciam a prioridade para o abastecimento público e que “... é permitido a todos usar de quaisquer águas públicas ...”, indicando a necessidade de atendimento aos vários usos a que se destina um corpo hídrico.

Está presente no Código, ainda, que os rios fossem locais obrigatórios para medições de descarga pelas concessionárias de instalações hidrelétricas e que a supervisão dos recursos hídricos seria feita pelo órgão “Serviços de Águas”, integrante do Departamento Nacional de Produção Mineral (IBIAPINA *et al*, 1999).

Nessa época⁷, o monitoramento hidrológico era realizado atendendo isoladamente as necessidades setoriais, tais como: para geração hidrelétrica (principalmente), para navegação, para a agricultura ou para o abastecimento das cidades. Algumas iniciativas, no entanto, já contemplavam os usos múltiplos das águas como foi o caso dos estudos desenvolvidos para as bacias dos rios São Francisco, Paraná e Paraíba do Sul que, buscando inventariar o potencial hidráulico, contemplavam também as possibilidades de outros usos (FREITAS *et al.*, 1999).

A realidade é que as redes de monitoramento específicas eram desintegradas. A ausência de sistemas de informações além de uma legislação que permitisse a articulação entre os usos e os usuários, na prática, não consagraram um sistema de monitoramento que garantisse os múltiplos usos das águas.

Eis um grande desafio da atual política de recursos hídricos: construir uma rede de monitoramento com capacidade para atender com dados e informações a todos os setores usuários, garantindo o compartilhamento dos recursos hídricos e os seus múltiplos usos.

4.2.3 A gestão descentralizada

A gestão descentralizada dos recursos hídricos é, além de fundamento da Lei das Águas, necessidade gerencial para um país com as dimensões territoriais do Brasil. Acresce-se a esse fato a imposição constitucional do duplo domínio dos cursos d'água, imputando competências e responsabilidades à União e aos estados em uma mesma bacia hidrográfica. Como estabelece a Lei n° 9433, em seu art. 4°, essas entidades federadas deverão se articular para o gerenciamento, provável causa de um indesejável infortúnio da nova política.

⁷ Década de 1930 a 1940.

Se a gestão deve ser descentralizada e atender às necessidades de planos de recursos hídricos elaborados por bacia hidrográfica e se cabe à ANA o papel⁸ de coordenadora da rede hidrometeorológica nacional, sinaliza-se, também, a necessária descentralização do sistema de informações e de suas bases de coletas de dados, mantida a coordenação nacional. Nesse sentido, há de se construir o arranjo para uma rede nacional “básica” como referência à gestão nas diversas bacias, garantindo a autonomia da gestão descentralizada, a integração e a coordenação das informações geradas em cada uma delas.

Nessa linha, acredita-se, sobressai a necessidade de que haja no país uma rede básica “coordenadora” e redes especialistas para o atendimento às necessidades diferenciadas de gestão em cada bacia hidrográfica. Uma rede de monitoramento hidrometeorológico descentralizada, coordenada e sinérgica.

4.2.4 A relação entre os instrumentos de gestão e a rede de monitoramento

A implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos deverá ser feita com a implantação de instrumentos técnicos previstos na Lei das Águas. A interrelação dos instrumentos com uma rede de monitoramento fornecedora das informações imprescindíveis para a gestão dos recursos hídricos é detalhada a seguir.

4.2.4.1 O plano de recursos hídricos

O plano de recursos hídricos é o plano diretor para a gestão dos usos e das ações a serem desenvolvidas em uma bacia hidrográfica, devendo estabelecer metas para médio e longo prazos. Além de apresentar um diagnóstico da situação dos recursos hídricos e seus prognósticos, cabe ao plano estabelecer diretrizes para a implementação dos instrumentos de regulação (outorga, enquadramento e cobrança pelo uso da água), além de propor indicadores de desempenho do planejamento.

Diante desses desafios, a rede de monitoramento é imprescindível tanto para a geração das informações para a elaboração do plano como para o acompanhamento da sua execução. Sem dados e informações relativas aos recursos hídricos e sem o acompanhamento do desenvolvimento dos seus aspectos quali-quantitativos não se pode diagnosticar, prever ou verificar a evolução da gestão dos recursos hídricos. Sem uma rede de monitoramento adequada pode-se afirmar que não será possível verificar a eficácia do planejamento e da gestão na respectiva bacia.

A competência legal para elaboração dos planos é das agências de águas, porém, devido à sua inexistência na grande maioria das bacias hidrográficas, os órgãos

⁸ Lei nº 9984, de 2000, inciso XIII do art. 4º.

cujas competências se relacionam com os recursos hídricos têm buscado a execução desses planos diretores e a orientação básica para a implementação das ações nas bacias.

4.2.4.2 A outorga de direito de uso

A outorga de direito de uso é uma autorização dada pelo poder público com competência legal para o controle dos usos dos recursos hídricos e para a garantia de direito a estes usos. Segundo a Lei nº 9433, “... *toda outorga estará condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e a respeitar a classe em que o corpo d’água estiver enquadrado ...*”.

Ou seja, como cabe aos poderes públicos outorgantes monitorar e fiscalizar o cumprimento das condições previstas nos instrumentos de outorga, além de estabelecerem⁹ os critérios para a concessão das autorizações de uso, torna-se imprescindível que haja o monitoramento das informações hidrológicas e o constante balanço entre a disponibilidade hídrica e as demandas pelos usos. Uma vez mais, vê-se que uma rede de monitoramento deverá estar adequada a fornecer as informações para a implementação e o acompanhamento da eficácia desse instrumento de gestão.

4.2.4.3 A cobrança pelo uso da água

A cobrança pelo uso da água é aplicável a todo uso sujeito à outorga de direito de uso e será estabelecida por proposição dos Comitês de Bacia e submetida à análise e aprovação do respectivo Conselho de Recursos Hídricos. É o instrumento de gestão mais claramente identificado com o fundamento segundo o qual a água é um bem dotado de valor econômico, tendo como principal objetivo a indução ao uso racional da água, reduzindo a captação e o consumo das águas, além de proteger os cursos d’águas contra a utilização insustentável para a diluição de efluentes com cargas poluidoras.

Como sua aplicação está vinculada à outorga de direito de uso, vislumbra-se aqui a obrigatoriedade de instalação de monitoramento dos cursos d’água que possam gerar as informações necessárias à implementação de critérios e mecanismos adequados ao alcance dos objetivos do instrumento.

4.2.4.4 O enquadramento dos corpos d’água

O enquadramento dos corpos d’água não pode ser confundido com a sua classificação. Aquele é um instrumento de planejamento que visa orientar à aplicação dos investimentos para recuperação ou conservação dos recursos hídricos além de estabelecer

⁹ A Constituição de 1988 estabelece que é competência da União instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso.

as referências, quantitativas e qualitativas, para os critérios de outorga de direito de uso. A instituição do enquadramento necessita de constante monitoramento quanto ao alcance das metas temporais e espaciais de qualidade, nele fixadas, sem o qual não haverá a possibilidade de verificação da eficácia do instrumento.

4.2.4.5 O sistema de informações

Vê-se que, sem o monitoramento não há como aplicar plenamente nenhum dos instrumentos de gestão previstos na política de recursos hídricos, assim como, sem um adequado sistema de informações, muito serão prejudicados os estudos e definições técnicas para a adequada gestão dos recursos hídricos. Trata-se o sistema de informações, dessa forma, de ferramenta sem a qual os dados coletados pelas redes não fornecerão as orientações básicas para aplicação da política nacional.

Segundo a Lei nº 9984, de 2000, cabe à ANA organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações, coordenando sua integração aos sistemas implantados nos estados e nas bacias hidrográficas.

Ora, vê-se que a política de recursos hídricos e os instrumentos estão aí para serem implementados e, como conclui Magalhães (2000):

“... o monitoramento das águas no país não necessita mais de instrumentos legais para sua efetivação já que o arcabouço legal brasileiro, no que tange aos recursos hídricos, é um dos mais avançados do mundo ... necessita-se realmente da aplicação destes instrumentos”.

4.3 REDE DE MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO

Para que haja uma rede de monitoramento fluviométrico eficiente há de se ter a instalação de uma adequada densidade e distribuição espacial de estações em uma região permitindo que, por interpolação entre as séries de dados de diferentes estações, torne-se possível determinar com suficiente precisão para fins práticos, as características básicas dos elementos hidrológicos de qualquer parte dessa região (WMO, 1994).

Uma rede de monitoramento é composta por estações especialistas que permitem a reunião de dados necessários à caracterização hidrometeorológica da bacia hidrográfica em questão, tanto sob os aspectos quantitativos quanto qualitativos. Para o dimensionamento e quantificação das estações devem, preliminarmente, ser definidos os usos para os quais se destina a rede, os parâmetros de interesse a serem coletados assim como a precisão necessária para as informações geradas. Esses fatores definirão os tipos de estações que devem compor o sistema de coleta de dados. O projeto de uma rede deve, então, atentar para todas essas características além dos aspectos técnicos da especificação

dos equipamentos de coleta, suas características gerais e para as tecnologias de transmissão dos dados. As estações de uma rede de monitoramento fluvial, ou “*on stream*”, apresentam as seguintes configurações mais frequentes:

- a) fluviométricas: nas quais são registradas informações sobre vazões em águas superficiais numa seção de rio, em determinado instante;
- b) fluviográficas: com capacidade de registrar graficamente vazões durante um período de tempo, de forma contínua;
- c) linimétricas: que registra o nível da água em determinado corpo d’água;
- d) sedimentométrica: que possibilita a análise da descarga de sólidos ou fluxo de sedimentos em determinado curso, e
- e) de qualidade, nas quais são verificados parâmetros relativos às características físicas, químicas ou biológicas do corpo d’água.

4.3.1 Breve histórico da rede brasileira de monitoramento

No Brasil, as primeiras estações para o monitoramento hidrometeorológico de que se tem registro foram instaladas no final do século XIX, voltadas principalmente para orientar o Departamento Nacional de Obras Contradas Secas – DNOCS – e o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET - na execução das suas competências. Consistiam basicamente de estações pluviométricas destinadas ao monitoramento das precipitações atmosféricas anuais acumuladas.



Figura 4.7 – Situação da rede fluviométrica até 1920 (ANA, 2005)

Em 1920, foi criada a Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas, integrante do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, vinculada ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. Essa Comissão foi a responsável por estudos hidrológicos baseados, principalmente, em dados pluviométricos e pelo inventário dos desníveis hidráulicos de vários rios no país. Nesse período, houve grande expansão do atendimento de energia elétrica às maiores cidades brasileiras o que motivou o conhecimento do comportamento dos rios e a implantação de reservatórios para a instalação de usinas hidrelétricas. A Figura 4.7 ilustra a situação da rede fluviométrica nesse período.

Na década de 30, aconteceu o que pode ser chamada de primeira grande revolução no tratamento dos recursos hídricos, alicerçada pela promulgação da nova Constituição¹⁰, na qual surge pela primeira vez na história das cartas magnas brasileiras a palavra “água”. É sancionado, também, o Código das Águas, que propõe a regulação dos usos dos recursos hídricos. Nesse Código aparece, explicitamente, a exigência de monitoramento das descargas de água em usinas hidrelétricas por intermédio de linímetros.

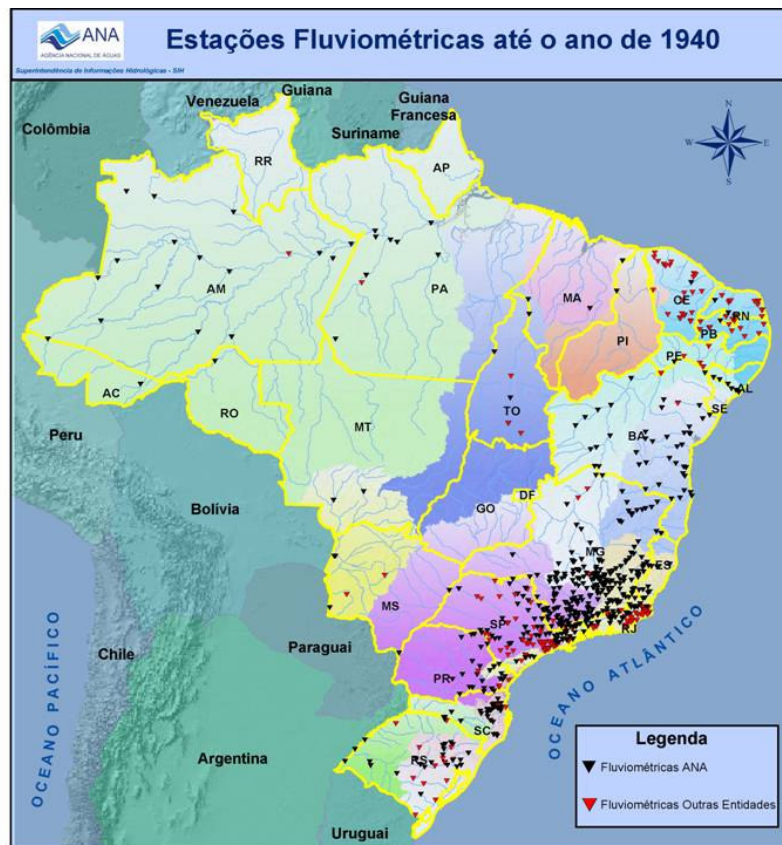


Figura 4.8 - Situação da rede fluviométrica até 1940 (ANA, 2005)

¹⁰ Constituição de 1934.

As mudanças legais no âmbito federal promoveram, então, vários ajustes nos organismos cuja competência estava ligada à gestão dos recursos hídricos. Após sucessivas alterações na estrutura organizacional, em 1940, a Divisão de Águas do Departamento Nacional de Pesquisa Mineral – DNPM - foi designada como órgão competente para administrar a hidrometria no país. Nessa década, houve um crescimento muito expressivo da rede fluviométrica (Figura 4.8), principalmente na região sudeste do Brasil, em áreas próximas à capital (Rio de Janeiro), à cidade de São Paulo e ao sul mineiro.

O período compreendido entre o início do século XX à década de 60 caracteriza-se para o setor elétrico como aquele no qual os sistemas elétricos do país eram considerados de pequeno porte, com raras exceções no torno das cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo. A construção e operação das usinas hidrelétricas cabiam a uma grande quantidade de agentes, privados e governamentais, que atuavam em sistemas isolados, não havendo um agente planejador de âmbito nacional (ALQUÉRES, 1997).

O desenvolvimento do setor elétrico, desintegrado, com múltiplos operadores e sem um planejamento central, foi o grande responsável, nessa primeira fase, pela inexistência de uma política nacional para a coleta de dados e para a operação de uma rede hidrométrica para todo o país. Somente em 1960, com a criação do Ministério de Minas e Energia – MME, que incorporou as atribuições do DNPM, e com a criação do Departamento Nacional de Águas e Energia – DNAE, em 1965, foi centralizada a informação sobre os dados hidrométricos. É do DNAE a iniciativa da publicação dos primeiros Boletins Fluviométricos (IBIAPINA *et al.* 1999), importante instrumento para a disseminação das informações coletadas nos rios do país.

O período entre 1963 e 1974 é marcado pela elaboração de planos regionais para o setor elétrico (ALQUÉRES, 1997), com os quais são estabelecidas as bases para grandes investimentos em barragens e geradoras hidrelétricas. O DNAE, então transformado no DNAEE¹¹, inicia sua estruturação e cria o Sistema de Informações Hidrológicas. Em 1972, esse novo órgão institui o “Projeto Hidrologia” (IBIAPINA *et al.*, 1999) com o intuito de implantar um sistema de informações incorporando as técnicas mais modernas disponíveis à época. O crescimento da implantação das estações fluviométricas, até 1980, é apresentado na Figura 4.9.

¹¹ Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.

A operação e a manutenção da rede de monitoramento foram reservadas à Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM, criada em 1968 e que, ainda hoje, é a responsável por prestar esse serviço em grande parte da rede nacional (GALVÃO, 2004).

Em 1996, após a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, foram a ela transferidas as atividades de hidrologia referentes aos aproveitamentos hidráulicos e, também, a administração da rede hidrométrica nacional. Essa função foi exercida pela ANEEL até a criação e instalação da Agência Nacional de Águas – ANA, em 2001, atual responsável pelo serviço. À ANA, por intermédio da Lei nº 9984, de 2000, foi atribuída a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e a coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento.

A migração das funções relativas à coordenação da rede hidrometeorológica para a ANA ainda não apresentou os frutos esperados. Dificuldades operacionais, financeiras e conceituais têm impossibilitado que a ANA tenha feito até o momento uma avaliação mais crítica sobre o perfil da atual rede frente às necessidades impostas pela nova política de recursos hídricos.



Figura 4.9 - Situação da rede fluviométrica até 1980 (ANA, 2005)

Segundo Galvão (2004):

“Numa tentativa de integrar esforços para o planejamento e a administração da rede hidrometeorológica nacional, foi criado ... Grupo de Trabalho ..., com a atribuição de coordenar a administração, a operação, a expansão e a atualização tecnológica da rede. ... Tal ação demonstrou ... a atuação isolada dos órgãos federais envolvidos com ... redes hidrométricas ... e a atuação isolada da ANA no planejamento e operação da rede ...”.

A expectativa de mudanças e de que a ANA tenha realmente um papel importante na estruturação da rede de monitoramento e do sistema nacional de informações é expressa por Soares (2001), *“Talvez, agora, com a criação da ANA, ... , esse aspecto importante¹² do gerenciamento dos recursos hídricos comece a ter seu lugar de destaque no cenário nacional.”*

4.3.2 Situação atual da rede brasileira de monitoramento fluviométrico

Magalhães (2000) apresenta um estudo bastante detalhado sobre a situação da rede hidrometeorológica nacional, principalmente aquela operada por organismos do governo federal. Por outro lado, um acervo importante à respeito das estações de monitoramento encontra-se no banco de dados administrado pela ANA.



Figura 4.10 - Situação da rede fluviométrica até 2005 (ANA, 2005)

¹² O monitoramento hidrometeorológico.

A Figura 4.10 ilustra o estado atual da rede fluviométrica no país. Observa-se que há uma distribuição das estações por todo o território nacional, porém, com grande concentração, ainda, nas regiões sul, sudeste e nordeste do país. Da análise visual comparativa entre as Figuras 4.9 e 4.10 pode-se verificar que a rede vem sendo ampliada em direção às novas fronteiras econômicas nas regiões norte e centro-oeste do Brasil.

As estações fluviométricas e pluviométricas cujos dados são encontrados no acervo da ANA estão quantificadas na Tabela 4.3, apresentadas para cada uma das 12 (doze) regiões hidrográficas definidas na divisão hidrográfica nacional¹³.

Tabela 4.3 – Estações fluviométricas no banco de dados da ANA (ANA, 2007)

REGIÕES HIDROGRÁFICAS	FLUVIOMÉTRICAS			PLUVIOMÉTRICAS		
	OP	NP	TOTAL	OP	NP	TOTAL
Amazônica	436	281	717	620	215	835
Tocantins	213	181	394	263	63	326
Atlântico Nordeste Ocidental	70	40	110	160	120	280
Do Parnaíba	80	49	129	128	277	405
Atlântico Nordeste Oriental	487	215	702	1.191	578	1.769
Do São Francisco	588	465	1.053	829	785	1.614
Atlântico Leste	418	232	650	702	566	1.268
Atlântico Sudeste	552	842	1.394	625	671	1.296
Paraná	1.544	1.002	2.546	2.536	1.503	4.039
Paraguai	265	92	357	145	64	209
Uruguai	200	149	349	268	94	362
Atlântico Sul	464	459	923	669	459	1.128
TOTAL	5.317	4.007	9.324	8.136	5.395	13.531

Fonte: HIDRO. Ag.Nacional de Águas - ANA. Jun 2007.

OP – OPERANDO
NP – NÃO OPERANDO

No Capítulo 7, desta dissertação, são apresentadas as análises relativas à aplicação dos critérios de densidade para uma rede mínima, segundo a Organização Meteorológica Mundial – OMM - (WMO, 1994) e, também, classificadas as unidades de planejamento e gestão dos recursos hídricos quanto ao atendimento das densidades propostas.

É importante observar da Tabela 4.3 que aproximadamente 42% das estações estão inoperantes, o que pode representar a falta de planejamento na sua locação, a suficiência dos dados coletados ou, ainda, a falta de recursos financeiros para sua manutenção e operação. Verifique-se que em apenas duas das regiões hidrográficas

¹³Conforme a Resolução CNRH nº 32.

(Paraná e Atlântico Sudeste) estão concentradas cerca de 40% das estações, que, correlacionadas com a capacidade geradora de energia nestas bacias, cerca de 63% do total instalado no país (ANEEL, 2003), nos dá uma indicação de que essa rede deve estar mais fortemente voltada ao serviço da geração hidrelétrica no país.

A operação da rede é descentralizada e tem sido realizada por entidades públicas e privadas. A ANA é responsável pela administração dos recursos necessários a boa parte da operação das estações e tem buscado parcerias com as demais entidades do país no sentido de que haja no seu banco de dados informações suficientes para atender às demandas dos diversos usos. A Tabela 4.4. mostra o estágio atual das estações presentes no banco de dados da ANA, por entidade e em operação.

Tabela 4.4 – Estações hidrometeorológicas no banco de dados da ANA (ANA, 2007)

ENTIDADE	RESPONSÁVEL			%
	ANA	Entidade	TOTAL	
ANA	3448	0	3.448	30,48
SUDERSHA	334	533	867	7,7
FCTH/DAEE-SP	132	1.215	1.347	11,9
IGAM	104	303	407	3,60
FURNAS	178	75	253	2,24
EPAGRI	145	10	155	1,37
ELETRONORTE	107	25	132	1,17
COHIDRO	231	0	231	2,04
ITAIPU	4	76	80	0,71
AESA	4	0	4	0,04
CAESB-DF		113	113	1,00
CEEE		157	157	1,39
CEMIG		276	276	2,44
CESP		180	180	1,59
CETESB		295	295	2,61
COGERH		114	114	1,01
COPASA		239	239	2,11
COPEL		249	249	2,20
CRA		177	177	1,56
DNOCS		710	710	6,28
ELETROPAULO		118	118	1,04
EMATER		131	131	1,16
FUNCEME		451	451	3,99
INMET		469	469	4,15
SRH-BAHIA		221	221	1,95
SUDENE		81	81	0,72
OUTRAS		4	4	0,04
PAÍSES ESTRANGEIROS		405	405	3,58
TOTAL	4.687	6.627	11.314	100

Fonte: HIDRO. Ag.Nacional de Águas - ANA. Jun. 2007.

4.3.3 Objetivos de uma rede de monitoramento

Galvão (2004) acredita que “*diferenças de conceito, diferenças no nível de desenvolvimento e diferenças de objetivos são alguns dos fatores que dificultam a classificação das redes.*” Guimarães *et al.* (1983, *apud* GALVÃO, 2004) propõe a seguinte classificação para uma rede fluviométrica, segundo seus objetivos:

- a) tipo A: produzem dados para definir tendências de longo termo;
- b) tipo B: produzem dados para planejamento e projetos de longo termo;
- c) tipo C: produzem dados para uso corrente.

Para Soares (2001), uma rede de monitoramento pode ter dois objetivos: gerenciamento dos recursos hídricos e conhecimento do regime fluvial. Por sua vez, Chapman (1992) e Benetti (1993), *apud* Soares (2001), detalham mais os objetivos de uma rede, classificando-os como a seguir¹⁴:

- a) avaliação da qualidade da água para determinar sua adequação aos usos;
- b) acompanhamento da evolução de tendências de curto, médio e longo prazos;
- c) avaliação indireta sobre uso do solo da bacia de drenagem;
- d) medição, previsão e controle de poluentes;
- e) gerenciamento de medidas de proteção da qualidade da água;
- f) estudos de variações climáticas;
- g) avaliação global do ambiente aquático, entre outros.

A definição clara de objetivos é ressaltada, também, pelo DNAEE (1983) quando afirma que “... *o projeto de uma rede é facilitado por uma clara exposição de objetivos da rede.*” Acrescenta, ainda, que “*é raro encontrar uma rede que tenha sido projetada cientificamente, sendo, em geral, o seu desenvolvimento resultante das necessidades locais de atender problemas particulares*”.

O reconhecimento dessas afirmações encontra-se na classificação da rede hidrométrica realizada pela ANEEL (IBIAPINA *et al.*, 1999) quando divide a rede em grupos “*conforme o objetivo*” (sic), a seguir apresentados:

- a) rede básica: objetiva o levantamento das informações básicas para o desenvolvimento de projetos relacionados aos recursos hídricos e seus respectivos estudos hidrológicos;

¹⁴ Objetivos adaptados por este autor.

b) rede de interesse energético: objetiva avaliar o potencial hidroenergético de uma região ou otimizar seu aproveitamento;

c) rede de interesse da navegação: objetiva informar sobre os níveis e velocidade das águas em trechos de rios navegáveis;

d) rede de interesse da irrigação: objetiva informar aos usuários em projetos de irrigação e drenagem sobre vazões e variações nos níveis dos corpos d'água;

e) rede estratégica: objetiva informar sobre a situação de pontos que necessitam de maior controle, confiabilidade das informações e rapidez no envio destas; em sua maioria têm equipamentos registradores e telemétricos e atendem a sistemas de alerta hidrológicos para enchentes; e

f) rede hidrogeológica¹⁵: objetiva a aquisição de dados sobre a qualidade de águas no país para o controle ambiental.

As redes, também, são instaladas visando subsidiar a elaboração de projetos e estudos hidrológicos e se constituem em importante instrumento para aumentar o conhecimento sobre o ciclo hidrológico e a relação das águas com o uso e a ocupação dos solos. Essas redes são muito utilizadas no monitoramento de experimentos em bacias representativas, notadamente para construção de modelos hidrológicos, pesquisas acadêmicas e bases de análise para a implantação de políticas públicas.

Outras redes importantes são aquelas que fornecem informações aos sistemas de alertas de eventos críticos: inundações ou secas. Essas redes são implantadas em regiões naturalmente favoráveis a tais acontecimentos, normalmente conjugadas com redes climatológicas ou pluviométricas. A tipologia de sistemas de alerta pode servir também ao monitoramento de fontes potencialmente poluidoras ou de regiões sujeitas aos danos provocados por estas fontes.

A moderna legislação européia sobre os recursos hídricos, por sua vez, define na publicação “*Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Rivers*” (UN/ECE, 2000), que os objetivos das informações relativas aos rios na Europa são:

a) avaliação da situação atual da bacia por intermédio de comparação com padrões definidos para diversos usos humanos e para as necessidades ecológicas;

b) acompanhamento de lançamentos de águas ou esgotos nos rios;

¹⁵ Segundo Magalhães (2000)

c) verificação da efetividade das medidas reguladoras, indicando o grau de implementação dessas medidas, identificando tendências de longo termo no nível das águas, concentrações e cargas poluentes nos rios;

d) previsões de inundações ou acidentes com poluentes;

e) investigação e diagnóstico dos problemas relativos à qualidade e quantidade das águas (por exemplo, aqueles gerados por processos erosivos ou pela presença de elementos tóxicos nos rios).

Segundo Vogt (2003), o projeto de redes de monitoramento, visando atender aos atuais padrões europeus para o gerenciamento das fronteiras entre os países membros, gerados pela *Water Framework Directive*¹⁶, deve atender a três objetivos:

a) monitoramento para fiscalização: verificar o primeiro impacto da taxaço dos rios, providenciar informações para revisões da rede e estimar mudanças de longo termo;

b) monitoramento operacional: verificar o estado dos corpos d'água buscando atender a determinados usos, prever danos e acompanhar as mudanças geradas pelas medidas reguladoras; e

c) monitoramento investigativo: verificar as prováveis causas de eventos diversos na bacia, agir para soluções provisórias entre a fiscalização e o monitoramento operacional e apurar a magnitude e o impacto de acidentes com poluentes.

Vê-se que, enquanto as referências brasileiras citam objetivos específicos que atendem a interesses dos setores usuários, as normas européias definem o monitoramento com objetivos gerenciais e reguladores.

Em algumas bacias brasileiras¹⁷, a proposta de implantação de um marco regulador dos usos das águas, devidamente harmonizado entre bacias afluentes e principais, impõe a necessidade do monitoramento quanto aos aspectos quantitativos para a conciliação de potenciais conflitos, principalmente quando se tratam de regiões com baixa disponibilidade hídrica. Pelo lado da qualidade da água, com o advento da implementação do enquadramento dos corpos d'água, certamente, cada vez mais presentes estarão as estações localizadas em trechos cujos parâmetros da água devem atender às metas de qualidade. Essas redes são tipicamente gerenciais e muito se aproximam dos objetivos expressos para as redes européias (VOGT, 2003).

¹⁶ Norma produzida pela Comissão Européia em 2000 (2000/EC/60) para a regulação das águas visando o seu uso sustentável e propondo metas a serem alcançadas para a sua qualidade, considerando os aspectos sociais, econômicos e ambientais, além da participação social no gerenciamento das bacias hidrográficas.

¹⁷ Na bacia do rio São Francisco, no seu Plano de Recursos Hídricos (2004-2014), foi prevista tal tipologia de rede.

De maneira geral, pode-se afirmar que nos países desenvolvidos, que já conhecem suficientemente o comportamento dos seus rios e seus usos, as redes se especializam para atender à gestão dos recursos hídricos, enquanto no nosso país, que se esforça para obter as mínimas informações necessárias à construção do conhecimento de seus recursos hídricos, as redes são, ainda, voltadas para usos específicos e não para a gestão dos usos múltiplos.

Ibiapina *et al.* (1999) opina que “*após o planejamento (sic) de uma rede hidrométrica, deve ser considerada, principalmente, sua finalidade para, então, definir-se a densidade de estações, sua distribuição, sua operação e quais os parâmetros a serem levantados*”. Ora, há necessidade de se ter claro seus objetivos.

Algumas questões devem, então, ser debatidas para a implementação dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, quais sejam:

- a) quais serão os objetivos de uma rede nacional diante da nova Lei das Águas?
- b) como fazer com que uma rede nacional possa ser a garantia de informações necessárias aos múltiplos usos?
- c) como operar a rede entendendo a necessidade de descentralizar o seu gerenciamento e manter a coordenação nacional?
- d) caberá à entidade nacional o monitoramento de interesse nacional e aos setores usuários os monitoramentos das redes de interesse específico?

Essas questões estão em aberto¹⁸ e cabe aos gestores da Política Nacional de Recursos Hídricos a urgente definição.

4.3.4 Redes básicas

Segundo a OMM (WMO, 1994):

“... o objetivo de uma rede de dados hidrológicos é permitir que, por interpolação entre séries de dados de diferentes estações, torne-se possível determinar com suficiente precisão, para fins práticos, as características básicas dos elementos hidrológicos e meteorológicos em qualquer ponto desta região”.

Para a OMM, no entanto, a primeira etapa na criação de uma rede hidrológica é o estabelecimento de uma rede composta por um número mínimo de estações que a experiência coletiva de serviços hidrológicos de diversos países tem indicado como

¹⁸ Entrevista concedida por Almício Vieira Ibiapina deixa claro que a rede instalada no país foi montada prioritariamente para atender aos interesses do setor elétrico e que o histórico da sua implantação não proporcionou a necessária articulação para o atendimento das necessidades dos demais usos da água no país.

necessária para o planejamento estratégico do país com relação aos usos dos seus recursos hídricos.

Segundo Santos *et al.* (2001) essas redes mínimas, também chamadas de básicas, podem ser definidas como aquelas nas quais são instaladas as estações principais “... de período longo de observação, sem interrupções e com dados de boa qualidade”, diferentemente das estações secundárias, definidas como aquelas “... de apoio, que não atendem a esses requisitos, e cuja função é estender o período ou preencher lacunas nas estações principais ...”.

Llamas (1996) endossa essa posição declarando que uma rede básica (ou mínima) é a que atende ao mínimo necessário para o desenvolvimento e a administração dos recursos hídricos numa escala mensurável e num dado nível de crescimento do país. Nessa perspectiva, só as estações consideradas de longo prazo de observação, estações primárias, deveriam compor uma rede básica para atender a propósitos gerais nacionais.

Ramalho e Srinivansan, *apud* Galvão (2004), afirmam que um país em desenvolvimento raramente tem condições de projetar e instalar, diretamente, uma rede ótima, satisfazendo todas as suas necessidades. Assim, o planejamento de uma rede mínima e a repartição adequada dos postos em uma região, constituiria a primeira fase de uma rede hidrometeorológica nesses países.

A ANEEL (FREITAS *et al.*, 1999) definiu uma rede básica como:

“...conjunto de estações instaladas em caráter permanente, com o objetivo de levantamento das informações básicas ao desenvolvimento de projetos relacionados com recursos hídricos, aos estudos para o conhecimento e o acompanhamento do regime hidrometeorológico e a outros estudos que demandam conhecimento de séries históricas de longo período.”

Esse conceito de rede básica vem sendo adotado pela ANA (ANA, 2005), atual coordenadora da rede nacional. Segundo o diagnóstico da rede brasileira, apresentado no Capítulo 7, nesta dissertação, as estações integrantes da chamada rede básica coincidem em praticamente 100% com aquelas da rede de interesse energético. Esse fato pode ser explicado pela defesa de Ibiapina *et al.* (1999), quando diz que:

“... rede hidrométrica básica de interesse energético ... deve ser mantida pelo Estado ... pois a mesma demanda grandes investimentos anuais em um trabalho de longo prazo, mas essencial para levantamento de dados indispensáveis para o desenvolvimento do inventário dos potenciais hidráulicos e implantação de seus aproveitamentos.”

Quando se considera a extensão continental do Brasil, a definição de uma rede básica parece mais importante ainda, haja vista a necessidade de que o planejamento nacional dos recursos hídricos possa fornecer informações e diretrizes para os planos em bacias de âmbito regional. Na escala de trabalho definida para um plano nacional de recursos hídricos não há necessidade, muitas vezes, de maior detalhamento das quantidades hidrológicas ou das qualidades das águas. Há necessidade, entretanto, de fomento a estudos macroregionais e de informações que permitam a definição clara de vazões e dos parâmetros de qualidade das águas a serem observados nas bacias hidrográficas. Isso permitirá que as diretrizes nacionais possam ser implementadas localmente sem interferir na descentralização dos processos decisórios para o uso das águas nas bacias.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 AS VAZÕES FLUVIAIS

Pode-se considerar, de forma resumida, que o ciclo hidrológico é composto pelas seguintes etapas: precipitação atmosférica, interceptação vegetal, infiltração no solo, armazenamento no terreno, evapotranspiração e escoamentos¹⁹. A essa última componente são reservados os estudos mais importantes visando à gestão dos usos antrópicos e ambientais da água.

Dentre os escoamentos, o escoamento superficial é o mais significativo, principalmente, se consideramos seu menor tempo de circulação no ciclo hidrológico e o atendimento da maior parte dos usos.

Impulsionado pela força gravitacional para cotas inferiores do terreno, o escoamento superficial inicia-se em pequenos movimentos de águas livres sobre o solo, moldando a rede de drenagem até o deságüe em cursos d'água estáveis, sejam rios ou lagos, normalmente se encontrando com os oceanos nos exutórios das bacias hidrográficas.

Os cursos d'água formados inicialmente pelo escoamento da chuva sobre o terreno são, também, alimentados por escoamentos subsuperficiais originados na camada superior do subsolo ou por escoamentos subterrâneos, sendo esses últimos os principais responsáveis pela perenização dos cursos d'água nas épocas de secas ou estiagens prolongadas.

O volume de água escoado por unidade de tempo em determinada seção de um curso d'água superficial é denominado vazão fluvial. Em hidrologia, as vazões são representadas em gráficos que correlacionam estas com o tempo em que ocorrem. A Figura 5.1 ilustra um desses gráficos, denominado hidrograma típico do comportamento de uma bacia (TUCCI, 2001) após a ocorrência de uma precipitação. Pode-se verificar que no início da precipitação não há uma reação imediata da curva do hidrograma, representando a fase na qual a água infiltra-se no solo ou se acumula nas depressões do terreno. Após essa fase, com a capacidade de infiltração atendida e com a saturação do terreno, inicia-se o escoamento superficial que é crescente e função do tempo de concentração²⁰ da bacia de drenagem. Destaca-se no hidrograma o escoamento subterrâneo como contribuinte preponderante na fase final do escoamento superficial. O escoamento subsuperficial, normalmente, coincide com o superficial razão pela qual não é discriminado.

¹⁹ Escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo.

²⁰ Tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia possa se deslocar até a seção objeto da medição do hidrograma.

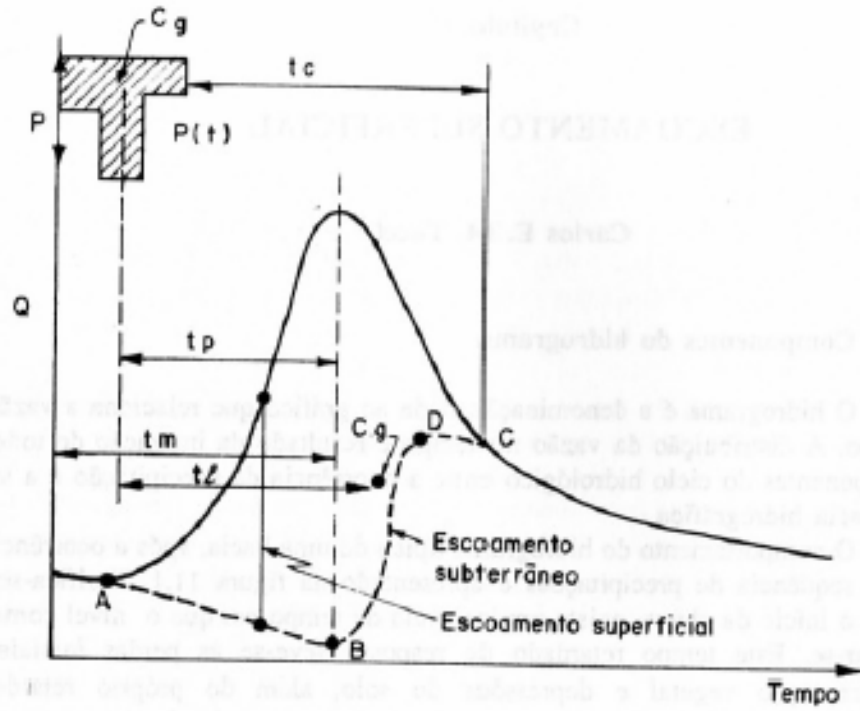


Figura 5.1 – Hidrograma típico de uma bacia (TUCCI, 2001)

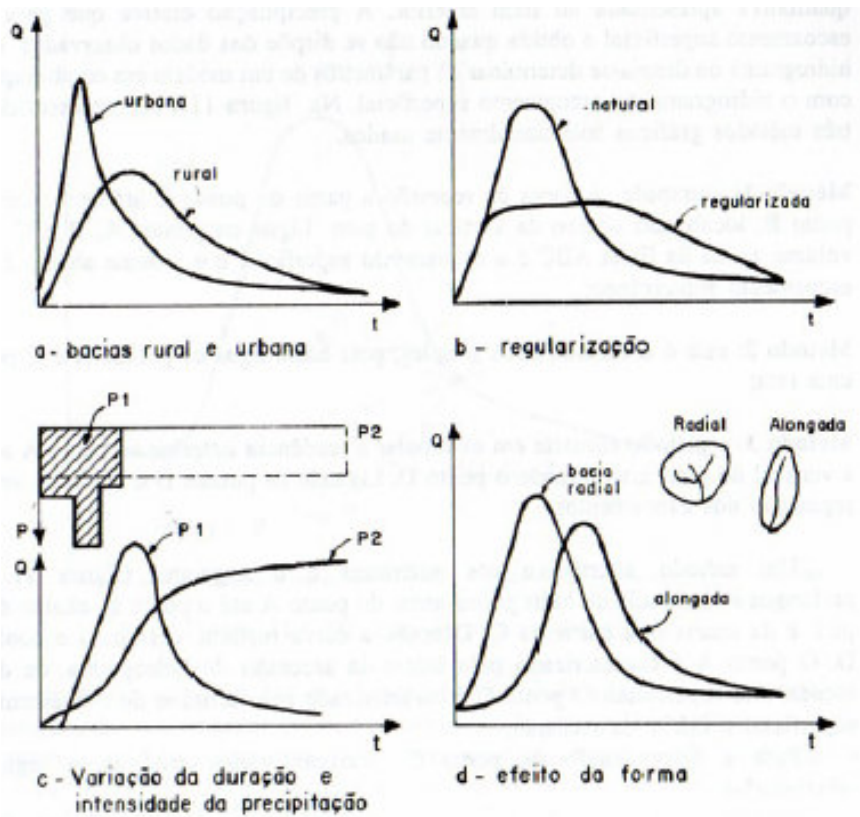


Figura 5.2 – Variações de hidrogramas (TUCCI, 2001)

Segundo Martins (1967), os hidrogramas variam significativamente em função da área de drenagem, da conformação topográfica da bacia, das condições da superfície do solo, da constituição geológica e das obras de controle das vazões a montante, conforme representa Tucci na Figura 5.2.

Nas seções a seguir, são descritas as principais características das vazões fluviais e os fatores supervenientes ao seu comportamento temporal e espacial.

5.1.1 Características gerais

De modo geral, segundo Martins (1967), considerados individualmente cada um dos fatores que interferem nos hidrogramas das vazões, esses se comportam como a seguir descritos:

- “a) a descarga fluvial cresce de montante para jusante a medida que cresce a área da bacia hidrográfica;*
- b) em uma determinada seção, as variações das vazões instantâneas são tanto maiores quanto menor a área da bacia hidrográfica;*
- c) as vazões máximas instantâneas em uma seção dependerão de precipitações tanto mais intensas quanto menor for a área da bacia; para as bacias de pequena área as precipitações causadoras das vazões máximas têm grande intensidade e pequena duração, para as bacias de área elevada as precipitações terão menor intensidade e maior duração;*
- d) para uma mesma área de contribuição, as variações das vazões instantâneas serão tanto maiores e dependerão tanto das chuvas de alta intensidade quanto maior a declividade do terreno, menores as detenções da superfície, mais retilínios os cursos d’água, menor a quantidade de água infiltrada e menor a área coberta por vegetação;*
- e) o coeficiente de deflúvio²¹ relativo a uma dada precipitação será tanto maior quanto menores forem a capacidade de infiltração e os volumes de água interceptados pela vegetação e obstáculos ou retidos nas depressões do terreno; e*
- f) o coeficiente de deflúvio em um longo intervalo de tempo depende, principalmente, das perdas por infiltração, evaporação e transpiração.”*

²¹ Relação entre a vazão escoada em um curso d’água e a vazão precipitada sobre a bacia drenada.

Outra importante descrição das características gerais do regime fluvial é apresentada por Tucci (2002), quando afirma que:

“A relação entre as variáveis de entrada e saída dos sistemas hidrológicos apresentam um comportamento não-linear. A alteração da precipitação apresenta impacto relativo diferenciado sobre a vazão da bacia hidrográfica. Observa-se nos dados²² que nos anos com valores extremos (inundações e secas) a resposta da bacia se amplifica com relação à variação adimensional da precipitação ... Nos anos mais úmidos o aumento da precipitação produz maior aumento da vazão já que a infiltração aumenta pouco e a evapotranspiração diminui ... o que aumenta ... o escoamento. ... nos anos secos, a redução da precipitação e o aumento da evapotranspiração reduz em maior magnitude a vazão”.

A Figura 5.3 ilustra o comportamento descrito acima e demonstra a variabilidade das vazões com as precipitações. Em longos períodos as vazões podem, também, ser fortemente influenciadas por alterações climáticas locais ou globais.

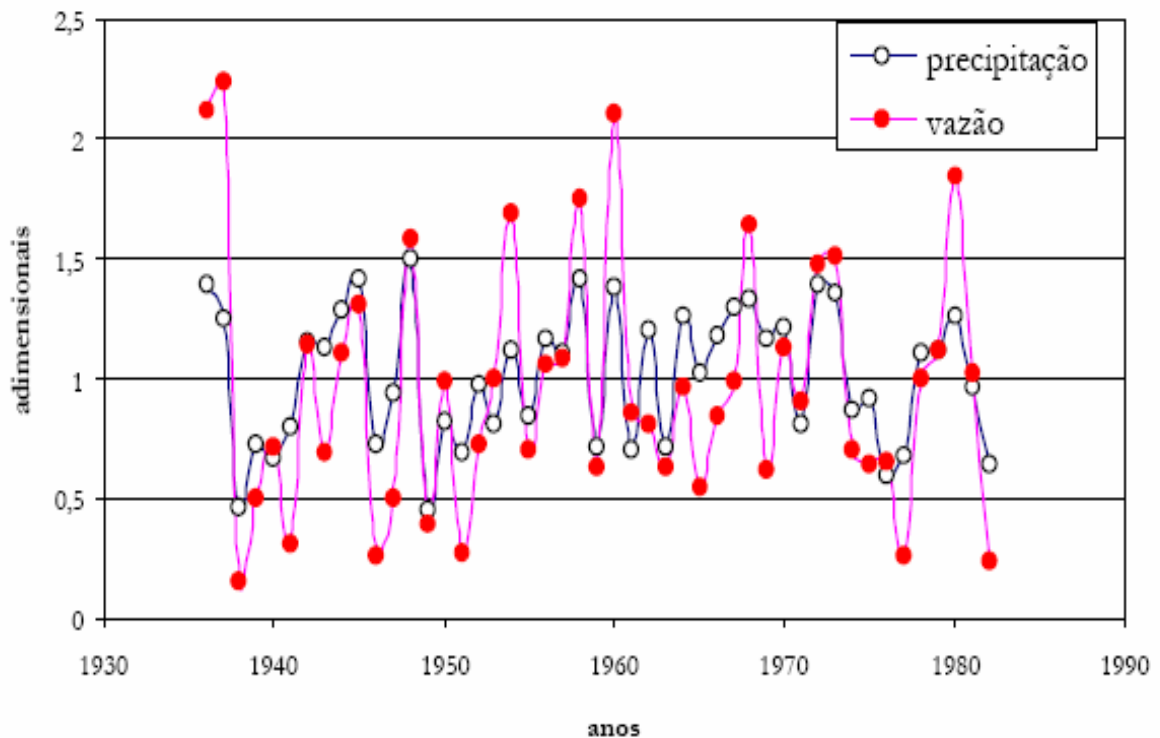


Figura 5.3 – Comportamento das vazões e precipitações - Verde Pequeno (TUCCI, 2002)

5.1.2 Características temporais

A gestão dos recursos hídricos pode ser subsidiada por dados cuja freqüência de coleta é de algumas horas (para o estudo de precipitações e fluviogramas em áreas urbanas, quando se estudam inundações), de alguns meses ou anuais (quando se trata de apoiar a gestão de atividades agrícolas) ou de 2 a 3 anos (para projetos de importantes para sistemas hídricos no semi-árido brasileiro). Normalmente, séries de dados de 10 a 30 anos de coleta são suficientes para a maioria dos casos sujeitos à gestão dos recursos hídricos, sendo consideradas “séries estacionárias”, ou seja, aquelas cujas características estatísticas não variam no tempo (TUCCI, 2002).

O desenvolvimento da hidrologia no século vinte foi baseado em técnicas que consideravam as séries históricas das vazões estacionárias. Vários estudos têm demonstrado que sob determinadas condições a não-estacionaridade dos dados coletados pode, no entanto, ocorrer devido a um dos seguintes fatores citados por Tucci:

- a) variabilidade climática do período da amostra; ou
- b) modificação no uso do solo.

A dificuldade em se medir a sensibilidade a esses fatores se dá em função da indisponibilidade de séries históricas de longo termo e de, ainda, serem incipientes os estudos sobre o impacto das mudanças climáticas globais ou localizadas no comportamento do ciclo hidrológico (e conseqüentemente, nas vazões fluviais). Quanto ao segundo fator acima citado, vários estudos vêm sendo desenvolvidos em bacias representativas²³ demonstrando que a alteração da cobertura vegetal pode impactar sobremaneira as vazões, devendo ser consideradas as mudanças de superfície (desmatamento, reflorestamento e impermeabilização), o seu uso (urbanização, reflorestamento para retirada de madeira, culturas anuais e sazonais) e o método de alteração da cobertura do terreno (queimada manual ou por equipamentos).

Entenda-se por bacias aquelas com comportamento hidrológico bem determinado e localizadas em regiões onde o ciclo hidrológico não esteja muito perturbado pelo homem mas que não sejam tomadas precauções especiais para proibir qualquer intervenção humana que possa determinar repercussões de caráter hidrológico. (Decênio Hidrológico Internacional, apud VILLELA, 1975).

²² Experimento realizado para a análise da relação entre a precipitação e a vazão no rio Verde Pequeno (TUCCI, 2002)

²³

Tucci (2002) apresenta extenso estudo sobre a variabilidade climática envolvendo a avaliação de diversos parâmetros que indicam que, para períodos maiores, as séries de vazões podem ser influenciadas perdendo suas características estacionárias.

Mediondo e Tucci (1997, *apud* TUCCI, 2002), apresentam a Figura 5.4 que relaciona a bacia hidrográfica e eventos climáticos às escalas temporal e espacial, propondo períodos ou áreas que são mais fortemente correlacionados e podem influenciar significativamente o ciclo hidrológico.

5.1.3 Características espaciais

O comportamento das vazões em uma determinada área de drenagem está mais diretamente relacionado com as variações de precipitações e da cobertura do solo quanto menores é essa área. Assim, a escala espacial a ser considerada para a coleta dos dados determina os fenômenos e objetivos a atendidos por determinada rede fluviométrica. Becker (1992, *apud* TUCCI, 2002) propõe a classificação das áreas de drenagem frente aos processos hidrológicos (Tabela 5.1).

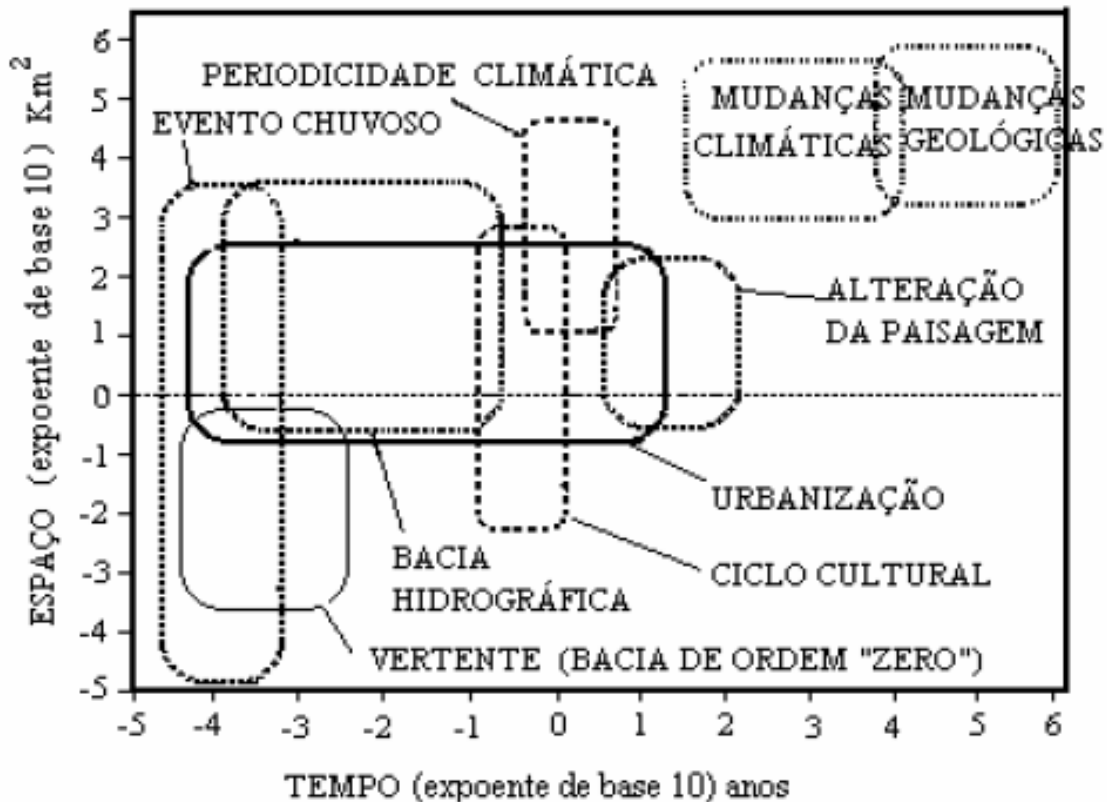


Figura 5.4 – Escalas espacial e temporal dos processos hidroclimáticos (TUCCI, 2002)

Tabela 5.1 – Escala dos processos hidrológicos (BECKER, 1992, *apud* TUCCI, 2002)

Escala	Dimensão da área de drenagem
Macro	> 10.000 km ²
Transição α	1.000 a 10.000 km ²
Meso	10 a 1.000 km ²
Transição γ	0,1 a 10 km ²
Micro	0,1 km ²

Nas escalas “Micro” e “Transição γ ” os processos hidrológicos são facilmente percebidos pela população (inundações, variações bruscas de vazão) enquanto na escala “Meso” são típicos os usos para irrigação e abastecimento urbano. No Brasil, bacias com áreas inferiores a 1.000 km² apresentam reduzida quantidade de informações hidrológicas. Quando existem, não são confiáveis (TUCCI, 2002).

As informações mais comuns referente aos processos hidrológicos no Brasil são relativas às escalas “Transição α ” e “Macro” (área acima de 1.000 km²), principalmente nesta última, em virtude do principal uso a que serve a atual rede de monitoramento no país: viabilização de empreendimentos hidrelétricos.

Atualmente, tem sido estudado o comportamento das vazões com a alteração da cobertura vegetal do terreno, principalmente em função de desmatamentos ou da implantação de culturas agrícolas. Um trabalho importante foi realizado por Silva Jr. (2001, *apud* TUCCI, 2002), com relação ao comportamento das vazões frente à implantação do plantio direto²⁴ como prática agrícola de manejo do solo. Os resultados apontam para uma redução das vazões médias para pequenas áreas e para um aumento em áreas integradoras das vertentes. Silva Jr. propõe que esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da infiltração no solo em virtude da nova prática e do surgimento do escoamento subsuperficial em seções dos cursos d’água mais a jusante. A Figura 5.5 ilustra essas observações na qual pode ser notado que para bacias com área de drenagem

²⁴ O plantio direto é uma técnica que busca evitar o gradeamento do solo ou sua remoção quando da renovação das culturas temporárias. Mantém-se, assim, o solo coberto por um período maior evitando a erosão laminar, aumentando a infiltração no solo e reduzindo a evaporação na camada superior do solo.

superiores a cerca de 300 hectares (3 km²), com a existência do plantio direto, há um aumento do escoamento superficial nos cursos d'água.

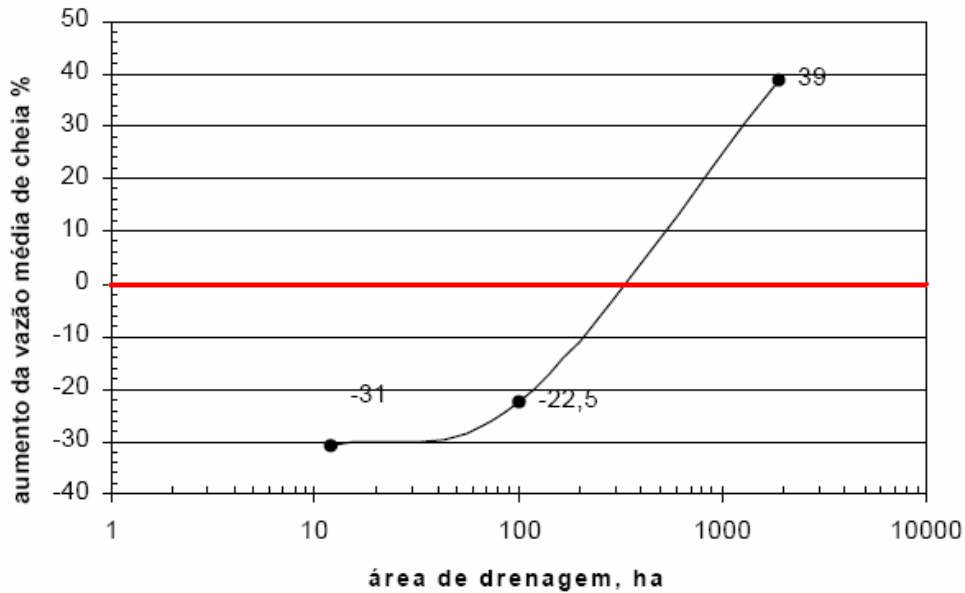


Figura 5.5 – Variação da vazão média em função da alteração do plantio convencional para o plantio direto (SILVA JR, 2001, *apud* TUCCI, 2002)

A dependência das vazões com relação à escala das áreas de drenagem impõe muitos cuidados quando da extrapolação de dados para bacias de áreas de diferentes dimensões, impedindo, muitas vezes, esta utilização. Há de se ter maior preocupação quanto ao monitoramento das vazões visando atender aos objetivos do uso das informações geradas já que diferentes usos podem ser mais importantes em diferentes escalas espaciais.

Tucci (2001) apresenta a Figura 5.6 na qual propõe uma relação entre a área da bacia (escala espacial) e as necessidades de análise dos processos hidrológicos. Alerta que “*é muito perigoso (especialmente em modelagem hidrológica) reunir dados adquiridos numa escala espacial definida com processos analisados ou métodos elaborados dentro do quadro de uma escala maior ou menor*”.

As afirmações desta seção e a conclusão de Galvão e Menezes (2005)²⁵ propõem que a área mais adequada para o monitoramento hidrológico em uma bacia hidrográfica, para fins de gerenciamento dos usos desta bacia, deve estar compreendida entre 1.000 e 6.000 km², valores coerentes com a proposta da OMM para densidade de estações.

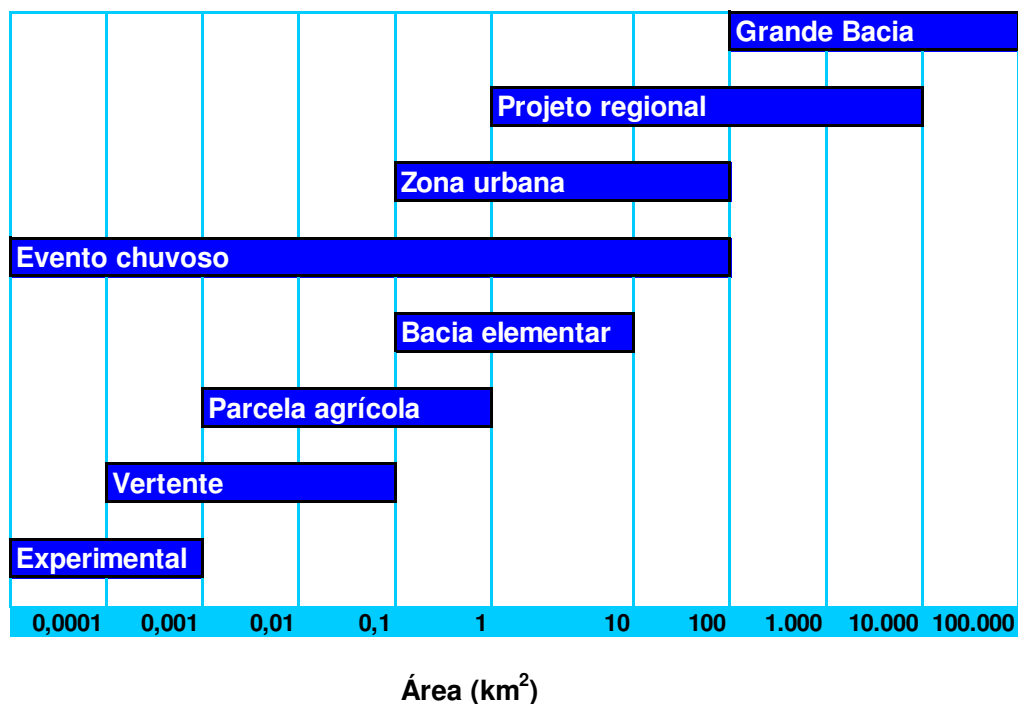


Figura 5.6 – Escala espacial para processos hidrológicos (TUCCI, 2001)

5.1.4 Comportamento estatístico

Os processos hidrológicos são aleatórios: não é possível saber precisamente quais valores serão observados no futuro. No entanto, pode-se utilizar da teoria das probabilidades e da análise estatística para que modelos teóricos possam estimar tais valores. Há de se observar o comportamento estatístico das variáveis hidrológicas. Quanto maior o conhecimento do comportamento progressivo das variáveis, melhor a caracterização dos parâmetros estatísticos e, conseqüentemente, mais preciso poderá vir a ser o modelo teórico.

Os processos hidrológicos são representados por funções variáveis no tempo e no espaço. A representação gráfica dessas funções, usualmente, é feita por intermédio de curvas-padrão sendo as mais importantes o hidrograma, a curva de permanência e o histograma de frequência, conforme abaixo definidos:

a) hidrograma: representação temporal ou espacial do comportamento das variáveis hidrológicas, normalmente dispostas no eixo das ordenadas;

b) curva de permanência: relaciona a variável hidrológica (no eixo das ordenadas) com o tempo de permanência de seus valores, em porcentagem, no eixo das abscissas; e

²⁵ Ver seção 4.2.1 desta dissertação.

c) histograma de frequência: relaciona os valores hidrológicos (abscissa) com a frequência com que ocorrem (ordenada).

O comportamento dessas curvas apresenta características estatísticas que podem definir, de maneira sintética, as observações realizadas. Costuma-se utilizar os seguintes parâmetros característicos (GARCEZ, 1967; TUCCI, 2001):

a) tendência central ou dominante: definida pela média²⁶, pela mediana²⁷ ou pela moda²⁸ da série amostral;

b) desvio-padrão (σ) ou variância (σ^2): valor que representa a dispersão ou flutuação dos valores da série em torno da média aritmética;

c) coeficiente de variação: representa o desvio-padrão dividido pela média (ou valor central dominante);

d) desvio-médio-provável: é uma medida mais adequada para o desvio-padrão quando as amostras são pequenas, obtida pelo desvio-padrão de N-1 valores;

e) assimetria: comportamento da curva diante de valores maiores ou menores que a moda, podendo ser positiva, quando a curva é deslocada para a direita (maiores que a moda), ou negativa, quando a curva é deslocada para a esquerda (menores que a moda);

f) coeficiente de assimetria: é igual ao valor da assimetria dividido pelo cubo do desvio-padrão;

g) covariância: característica da observação de duas séries estatísticas, definida pelas equações 5.1, para série de dados, ou 5.2 e 5.3 para histogramas de frequência ou, também chamadas, funções distribuição de frequência:

$$cov(xy) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (x_i - xm)(y_i - ym) \right] \quad 5.1$$

$$cov(xy) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q [f_{ij} (x_i - xm)(y_j - ym)] \right\} \quad 5.2$$

$$cov(xy) = \frac{1}{N} \left\{ \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q f_{ij} x_i y_j \right] - \left[\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^p f_{i \cdot} x_i \right) \left(\sum_{j=1}^q f_{\cdot j} y_j \right) \right] \right\} \quad 5.3$$

²⁶ média é o valor da média aritmética dos valores da série (SPIEGEL, 1985).

²⁷ mediana é o valor que divide o gráfico da série em duas áreas iguais (SPIEGEL, 1985).

²⁸ moda é o valor que ocorre com a maior frequência, ou mais comum de uma série (SPIEGEL, 1985).

A covariância é positiva ou negativa se a comparação dos valores elevados de uma série corresponde aos valores elevados de outra ou aos seus valores menores, respectivamente. A covariância é nula ou quase nula se há compensação entre as parcelas relativas positivas e negativas. O valor nulo resulta da independência das séries;

j) coeficiente de correlação: mede a nitidez da ligação existente entre duas séries estatísticas, desde que esta relação seja linear ou aproximadamente linear; este coeficiente pode ser expresso em função da covariância das duas séries e dos desvios-padrão (ou variâncias) de cada uma, conforme a equação 5.4, sendo seu sinal igual ao da covariância, variando entre 1 e -1.

$$R_{xy} = \frac{cov(xy)}{\sigma(x)\sigma(y)} \quad 5.4$$

Nas equações acima:

x_i = valor verificado

x_m = valor médio

N = número de dados da série

f_i = frequência de ocorrência do evento

f_{ij} = frequência de ocorrência de um evento i dado j

Para a análise dos histogramas de frequência, são utilizadas funções teóricas chamadas de densidade de probabilidade - FDP. A FDP representa, em determinado intervalo de tempo, a probabilidade de ocorrência de um evento. No caso da vazão fluvial, é muito utilizado o modelo probabilístico contínuo baseado na distribuição Log-Normal.

5.1.4.1 A distribuição Log-Normal

Segundo Lanna (2001), vazões médias anuais em pequenas bacias se ajustam melhor à distribuição Normal do que as vazões médias anuais em grandes bacias. A razão, segundo o mesmo autor, é que no primeiro caso a autocorrelação das vazões médias diárias é menor que no segundo, devido à menor capacidade de regularização da própria bacia.

Para bacias maiores, Lanna propõe que deve ser utilizada a distribuição Log-Normal. Esta distribuição representa bem o comportamento de uma vazão em determinado dia que seria composto por fração da vazão no dia anterior (fator de acumulação, regularização ou amortecimento em uma bacia hidrográfica) e outra parte decorrente de

eventos mais recentes como, por exemplo, precipitações em área de contribuição da bacia de drenagem da seção observada.

A equação 5.5 define a função densidade probabilidade Log-Normal.

$$LN(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{-0.5\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad 5.5$$

Na qual:

x = variável sob análise (maior ou igual a zero)

σ = desvio-padrão da função $\ln(x)$

μ = média da função $\ln(x)$

A Figura 5.7 ilustra o comportamento dessa função. Vê-se que a variação combinada da média “ μ ” com o desvio-padrão “ σ ” altera bastante a forma da curva, diferentemente do que ocorre na função probabilidade Normal; nesta última, estas características estão diretamente relacionadas à translação ou achatamento da curva-padrão.

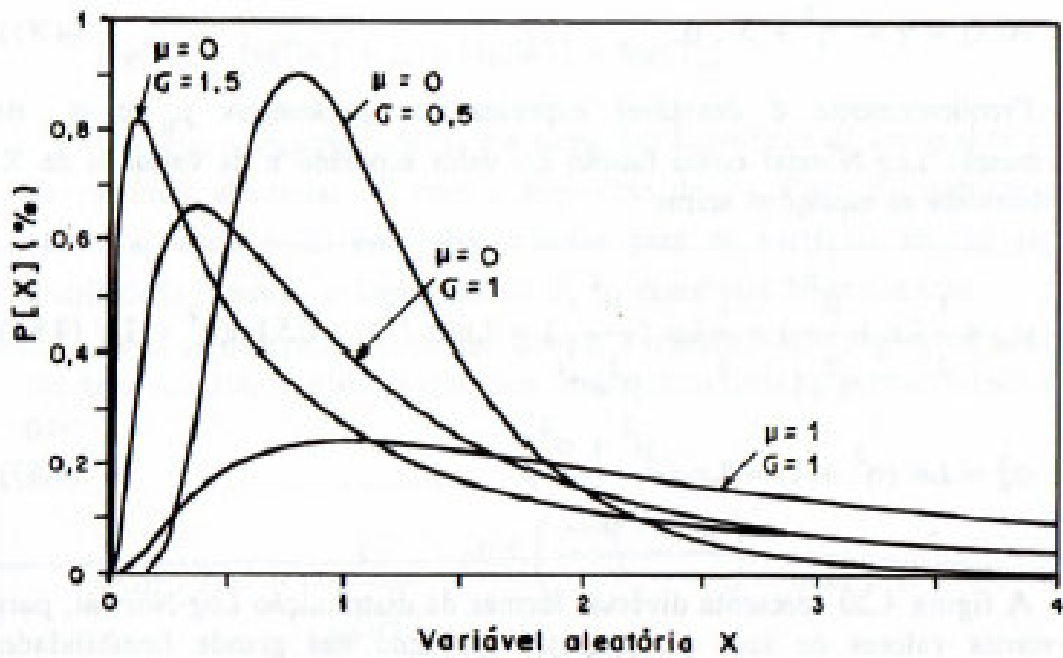


Figura 5.7 – Distribuição Log-Normal (LANNA, 2001)

Pode-se calcular a média e o desvio padrão da função LN(x) diretamente dos valores calculados para a função de “x”, conforme as equações a seguir:

$$\mu = \frac{1}{2} \text{Ln} \left(\frac{\mu o^4}{\mu o^2 + \sigma o^2} \right) \quad 5.6$$

$$\sigma^2 = \text{Ln} \left(\frac{\mu o^2 + \sigma o^2}{\mu o^2} \right) \quad 5.7$$

Nas quais:

μo = média da função (x)

σo = desvio-padrão da função (x)

5.1.5 Correlação de informações fluviométricas

A vazão específica é, por definição, a razão da vazão fluviométrica pela área drenada em determinada seção de um curso d’água da bacia hidrográfica. A vazão específica calculada nos trechos da rede de drenagem pode caracterizar regiões homogêneas com relação aos aspectos hidrológicos e é muito útil na extrapolação de modelos probabilísticos ou de registros na ausência de dados suficientes em determinada bacia correlacionada.

Segundo Tucci (2001), a tendência natural é de que a vazão específica reduza-se com o aumento da área de drenagem. Essa regra geral é mais visível para vazões altas e médias e se explica graças às razões a seguir:

a) na cabeceira das bacias se concentram as maiores precipitações e, também, as maiores declividades dos rios, gerando maiores velocidades de fluxo e, conseqüentemente, maiores vazões;

b) à medida que o escoamento caminha para jusante, maior é o seu amortecimento em função do efeito de armazenamento e do atrito com o leito do curso d’água, reduzindo as vazões específicas; e

c) em rios onde ocorre o extravasamento do seu leito o efeito do armazenamento é mais visível gerando forte redução da vazão específica com o aumento da área da bacia a montante.

As regiões com mesma vazão específica podem ser chamadas de regiões hidrologicamente homogêneas. Nos processos de regionalização de vazões²⁹, a homogeneidade tem como critério principal a semelhança da resposta representada nas funções regionais, sendo estas definidas pelas curvas de probabilidade adimensional que caracterizam o comportamento regional de mesma tendência em cada posto fluviométrico.

Ou seja, a análise das séries de dados de postos fluviométricos sequenciais pode indicar que as informações coletadas a jusante trazem forte correlação com aquelas observadas a montante, podendo ser tão semelhantes que, regionalizada a vazão com relação a algumas variáveis da bacia, possa ser estimada com grande precisão a vazão em qualquer ponto deste trecho da rede de drenagem. Essa dependência espacial é muito importante para a definição de áreas mínimas a serem monitoradas.

É preciso, então, pesquisar a correlação entre as vazões fluviométricas e as características da área de drenagem. Para isso, são utilizadas equações de regressão que buscam definir a vazão em função de variáveis, tais como: área de drenagem (A), precipitação média anual (P), declividade do rio (D), densidade de drenagem (DD) e comprimento do rio (L). Um exemplo de equação de regressão é mostrado na equação 5.8, a seguir:

$$Q_m = a A^b P^c D^d DD^e L^f \quad 5.8$$

Os parâmetros dessa equação podem ser determinados pelo método dos mínimos quadrados através da aplicação de logaritmos em ambos os lados e sua subsequente representação como uma equação linear. O modelo mais eficiente será aquele que permitir estimar com pequeno erro as vazões e, também, incluir um menor número de variáveis. Dependendo dos objetivos da regionalização³⁰ as variáveis podem ter mais ou menos peso na equação determinada por esse processo. Segundo Tucci (2000), Politano e Pissara (2003), *apud* Andrade *et al.* (2004):

“Em geral, a área é a variável explicativa com mais peso na regressão e, usualmente, embute as informações referentes a outras variáveis físicas como a declividade e o comprimento do rio”.

²⁹ A regionalização de vazões consiste num conjunto de ferramentas que busca determinar as características hidrológicas de determinadas bacias, nas quais os dados hidrológicos não são disponíveis, tendo por base o comportamento estatístico de informações existentes e sua correlação com aspectos físicos e climáticos.

³⁰ A regionalização é utilizada para a determinação de equações que visam descrever o comportamento de vazões máximas, médias, mínimas e curvas de permanência.

5.2 ASPECTOS TOPOLÓGICOS DE UMA REDE DE DRENAGEM

5.2.1 Rede de drenagem

Uma rede de drenagem é formada pelo conjunto de canais por onde escoam as águas superficiais em uma bacia hidrográfica. Pode-se considerar, então, que as características de uma rede de drenagem serão descritas topologicamente como uma malha interligada desde as cabeceiras até o exutório da bacia. Para essa descrição Scheidegger (1970) propõe a definição dos seguintes conceitos:

- a) rede: conjunto interligado de ramos em determinada área;
- b) ramo: qualquer trecho dos canais drenantes entre duas bifurcações ou entre uma bifurcação e uma nascente;
- c) nascente: ponto inicial de um ramo com uma só bifurcação;
- d) bifurcação: ponto onde dois ramos se encontram.

Scheidegger propõe que “*para uma racional explanação do desenvolvimento de uma bacia de drenagem é necessário descrever suas características em termos numéricos*”, principalmente quanto à ordem da rede, à densidade de drenagem, ao comprimento do escoamento superficial, à curva hipsométrica, à classificação dos ramos e outras características descritas na literatura (BORSATO; MARTONI, 2004). Na seção 5.2.2, é detalhado o aspecto relativo ao ordenamento da rede de drenagem e como seu tratamento numérico poderá ser importante para o conhecimento do regime fluvial na bacia.

5.2.2 Ordenamento de uma rede de drenagem

O ordenamento de uma rede de drenagem é considerado por vários autores como a característica fundamental dessa rede. Horton (1945, *apud* BORSATO; MARTONI, 2004) foi pioneiro em propor esse ordenamento, inspirando todos os demais estudos realizados posteriormente sobre o tema.

Segundo Horton, os cursos d'água de primeira ordem são aqueles que não recebem nenhuma contribuição de curso tributário; o de segunda ordem recebe somente tributários de primeira ordem; o de terceira ordem pode receber tributários de ordem inferior ou igual a dois; e assim sucessivamente, um curso d'água de ordem “N” pode receber contribuintes de ordem inferior ou igual a “N -1”. Esse ordenamento está ilustrado na Figura 5.8 e permite uma boa noção da ramificação da rede, considerando somente o número de ordem do ramo analisado.

O estudo de Horton introduziu, também, o conceito de relação de bifurcação como a razão do número de trechos com ordem imediatamente inferior ao do exutório da bacia pelo número de trechos com a mesma ordem desse exutório, conforme equação 5.9.

$$rb = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad 5.9$$

A relação de bifurcação é muito utilizada na construção de modelos que visam caracterizar a rede sob os aspectos relativos à sua entropia, conforme detalhado na seção 6.2.6, nesta dissertação. Segundo Strahler (1964, *apud*, BORSATO e MARTONI, 2004):

"... a relação de bifurcação não será exatamente a mesma de uma ordem a outra por causa das variações na geometria da bacia mas tenderá a ser constante. ... A relação de bifurcação ... varia normalmente entre 3 e 5. Já segundo Linsley et al. (1975), ela varia entre 2 e 4, com um valor médio próximo a 3,5."

O ordenamento de Horton atribui uma ordem maior ao curso principal no seu exutório. Por uma pequena modificação da proposta de Horton, poderiam os ramos da rede ser renumerados, conforme proposto na Figura 5.9. Assim, após o ordenamento inicial, de jusante para montante, seria procedida a substituição da ordem do ramo de numeração imediatamente inferior, em cada bifurcação na qual houvesse mudança da ordem da rede, pela ordem do exutório; e, assim, sucessivamente, para a identificação do curso principal nas sub-bacias de drenagem seria procedido da mesma forma a partir da bifurcação com o curso principal da rede.

Vê-se que, de acordo com a aplicação que se fizer do ordenamento, poderá ser utilizada uma ou outra proposta: para o estudo da ramificação da bacia utiliza-se a primeira e para a classificação dos cursos principais a segunda.

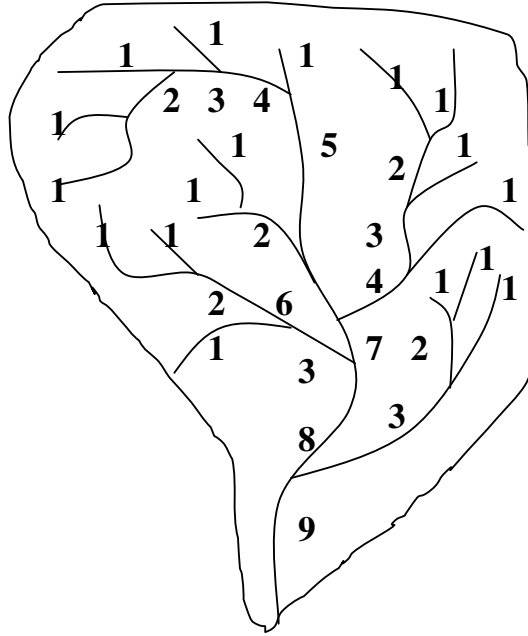


Figura 5.8 – Ordenamento de Horton

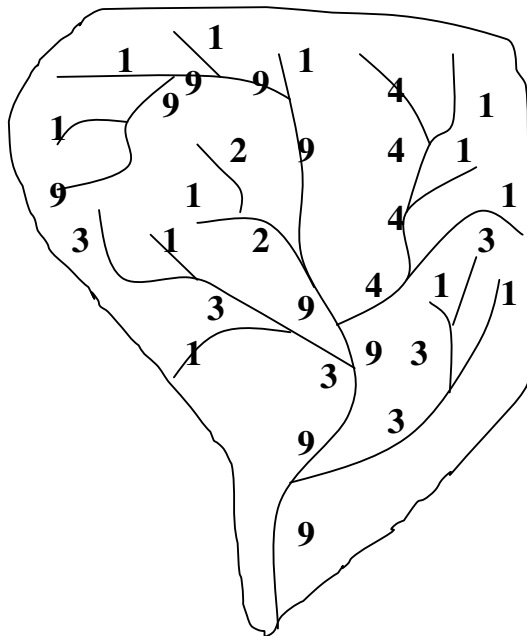


Figura 5.9 – Ordenamento de Horton modificado

Strahler (1957, *apud* SCHEIDEGGER, 1970) propôs uma segunda forma de se ordenar redes de drenagem, ilustrada na Figura 5.10.

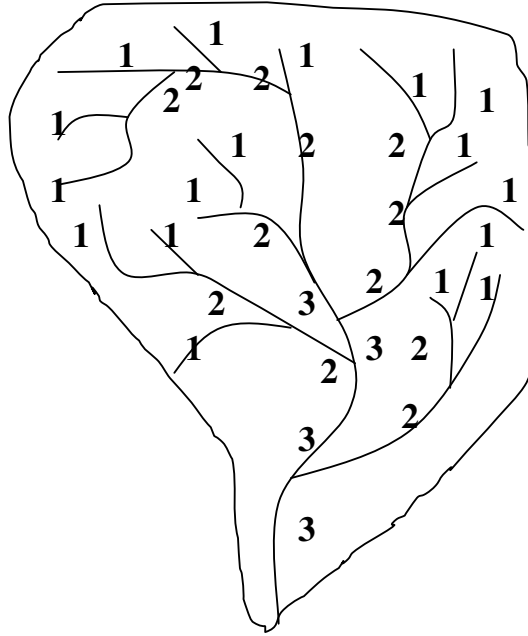


Figura 5.10 – Ordenamento de Strahler

Na proposta de Strahler, da mesma forma que Horton, os ramos ligados às nascentes serão numerados com “1”, porém, a ordem dos ramos só será alterada quando dois ramos de ordens iguais se encontrarem em uma bifurcação. Algebricamente, se o encontro entre os ramos “N” e “P” for denotado por “&”, tem-se:

$$N \& P = N + 1 \quad \text{se } N = P \quad 5.10$$

$$N \& P = \max(N, P) \quad \text{se } N \neq P \quad 5.11$$

Os ordenamentos de Horton e Strahler têm a desvantagem de não “memorizarem” a lei do ordenamento, ou seja, identificado um determinado trecho com uma ordem definida não se tem certeza da ordem do trecho imediatamente a montante. Esse fato levou Scheidegger (1965) a propor um ordenamento “consistente” para os rios no qual a lei distributiva é guardada, independentemente da ordem do rio. A equação 5.12, proposta por Scheidegger, define o valor “I” chamado de inteiro associado do ramo em questão e é igual ao dobro do número de nascentes que alimenta o referido ramo. Essa proposta impõe ao ramo da nascente o inteiro associado (ordem) “2” e não “1”, diferindo das demais propostas. Scheidegger propõe a seguinte formulação:

$$N \& P = \log_2(2^N + 2^P) = \log_2(I) \quad \text{para quaisquer } N \text{ e } P \quad 5.12$$

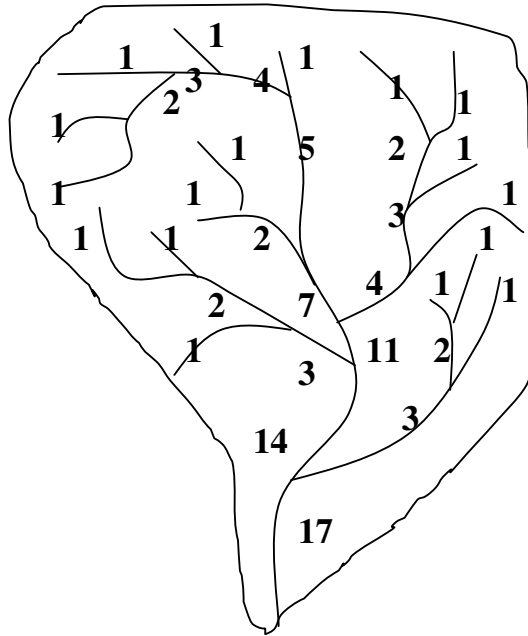


Figura 5.11 – Ordenamento de Shreve

A proposta de Scheidegger apoiou-se nos estudos de Shreve (1967, *apud* SCHEIDEGGER, 1970, e SOARES, 2001) que definiram a ordem de um ramo como igual à soma das ordens dos ramos em uma bifurcação. A essa ordem, Shreve chamou de magnitude. A proposta de Shreve tem como resultado que se a bacia contiver N nascentes a magnitude do exutório será igual a N. A Figura 5.11 ilustra esse ordenamento e a equação 5.13 define algebricamente essa proposta.

$$N \& P = N + P \quad \text{para quaisquer } N \text{ e } P \quad 5.13$$

5.2.3 Magnitude de uma rede de drenagem

O ordenamento de uma rede de drenagem, conforme detalhado na seção 5.2.2, pode servir tanto à definição do curso principal quanto do grau de ramificação dessa rede.

Baseando-se nas classificações de Scheidegger (1965) e Shreve (1967), Sharp (1971) estabeleceu as bases para a macrolocalização de estações de monitoramento de uma bacia hidrográfica, utilizando principalmente o conceito de magnitude de um ramo

definido por Shreve. Na seção 6.2.5 descreve-se o desenvolvimento proposto por Sharp que embasou a aplicação de um método para definição de locação para estações fluviométricas.

Sanders (1983) propõe que a magnitude poderá ser definida contemplando outros critérios, tais como: o número de cargas pontuais de poluentes e a quantidade de cargas transportadas pelos tributários. Esta última proposição necessita, no entanto, de informações anteriores relativas a dados fluviais além do conhecimento das cargas em todos os lançamentos afluentes à rede de drenagem. Tal consideração é importante porque nos remete à proposição de que não somente as cargas transportadas mas também as vazões dos tributários poderão vir a se constituir quantidades a serem consideradas para a definição da magnitude de uma rede de drenagem.

6 METODOLOGIAS PARA REDES

6.1 PROCEDIMENTOS PARA PROJETO DE REDES FLUVIOMÉTRICAS

Guimarães *et al.* (1983, *apud* GALVÃO, 2004) afirmam que os projetos de redes hidrométricas têm sido negligenciados pela hidrologia e dizem, textualmente:

“Alguns aspectos da hidrologia têm sido objeto de estudo e investigação por um longo período de tempo enquanto outros têm sido largamente negligenciados e ignorados, destacando-se, neste caso, o planejamento de redes hidrométricas. Essa negligência é surpreendente se considerarmos que o sistema de planejamento (sic) de redes empregado para conseguir os dados e informações é a característica fundamental na criação do conhecimento hidrológico.”.

A extensa citação acima foi inserida por expressar com intensidade a grande preocupação com o desenvolvimento científico de procedimentos para o planejamento e o projeto de redes de monitoramento hidrometeorológico, o que reforça o intento desta dissertação.

Há, realmente, poucos procedimentos disponíveis que permitem um tratamento adequado ao planejamento de redes, principalmente quando se considera a necessidade de que o processo contemple as seguintes etapas:

- a) levantamento das necessidades e definição dos objetivos da rede;
- b) locação das estações;
- c) definição da tecnologia a ser empregada na coleta dos dados;
- d) procedimentos para o acompanhamento dos resultados e das informações geradas; e
- e) técnicas de avaliação do atendimento aos objetivos propostos.

Segundo Harmancioglu *et al.*, *apud* Soares (2001), existe atualmente³¹ um projeto multilateral conduzido pelo grupo de países constituído pelos Estados Unidos, Canadá, Itália, Turquia, Hungria e Rússia, que busca estabelecer diretrizes básicas para o redimensionamento de redes de monitoramento tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, cujos objetivos específicos são:

- a) desenvolver procedimento para avaliação das redes existentes com relação à eficiência do sistema e sua adaptação a novos objetivos;

³¹ 1998.

b) propor procedimentos para o desenvolvimento de novas redes, considerando a necessidade dos dados, os objetivos do monitoramento e as restrições econômicas;

c) desenvolver procedimento para avaliação de novos objetivos ou práticas de monitoramento, atendendo a novos projetos;

d) estabelecer medidas da eficiência e ganho de informação de redes existentes ou redes planejadas visando verificar a flexibilidade e a adaptação no caso da rede ser modificada para a coleta de novos dados e objetivos; e

e) testar e avaliar esses procedimentos com os dados de campo.

Não foi possível durante o período de desenvolvimento desta dissertação o acesso aos resultados obtidos com o trabalho desse grupo. Essa iniciativa mostra, porém, a preocupação internacional com o tema na busca de dotar o planejamento de redes com ferramentas sólidas e adequadas à geração de informações hidrológicas.

Nas seções a seguir são apresentados vários métodos e procedimentos, de usos mais frequentes atualmente, utilizados com o objetivo de avaliar e dimensionar redes de monitoramento fluviométrico.

6.1.1 Procedimento OMM

Segundo a OMM (WMO, 1994), uma rede ótima poderia ser definida como:

“Um adequado sistema de monitoramento de dados hidrometeorológicos é planejado de forma que, dentro de certos níveis de precisão pré-estabelecidos, os parâmetros de projetos utilizados no planejamento, controle e gerenciamento dos recursos hídricos possam ser perfeitamente caracterizados e definidos, de forma direta, em qualquer ponto da bacia hidrográfica. Nessas condições, seria possível afirmar que existe uma rede ótima de estações de monitoramento.”

Na análise que propõe-se neste estudo será buscada a melhor definição para uma rede básica. O planejamento e o projeto de uma rede básica de monitoramento confundem-se em quase todos os países com a análise da rede existente. Dificilmente se depara com regiões onde não há qualquer informação hidrológica oriunda de estações já instaladas. A OMM propõe um procedimento para análise e rearranjo de uma rede, apresentada na Figura 6.1.

Entenda-se na Figura 6.1 que o gestor da rede é a instituição responsável pelo monitoramento; o objetivo geral da rede é a finalidade de sua implantação sob o ponto de vista dos usos e usuários dos dados e informações geradas; os objetivos específicos e as redes especialistas são os tipos de redes de monitoramento a serem implantadas; as

prioridades entre as redes especialistas definem a escala hierárquica entre os tipos de rede de monitoramento; a avaliação da rede existente é a etapa na qual são realizadas as análises quantitativas e qualitativas para o atendimento dos objetivos propostos na implantação da rede além da avaliação comparativa com redes instaladas em outras bacias; o projeto de nova rede consiste no rearranjo da rede visando corrigir as distorções apresentadas na avaliação precedente; e os custos financeiros para implementação do novo projeto são aqueles compatíveis com os recursos disponibilizados.

A avaliação financeira deve considerar os aspectos relativos à implantação ou modernização de equipamentos, a frequência de visitação às estações, a coleta dos dados e a estrutura operacional necessária para todas as ações pertinentes. A tomada de decisão é realizada pela instância competente e responsável pela rede assim como os encaminhamentos necessários à implementação do novo projeto.

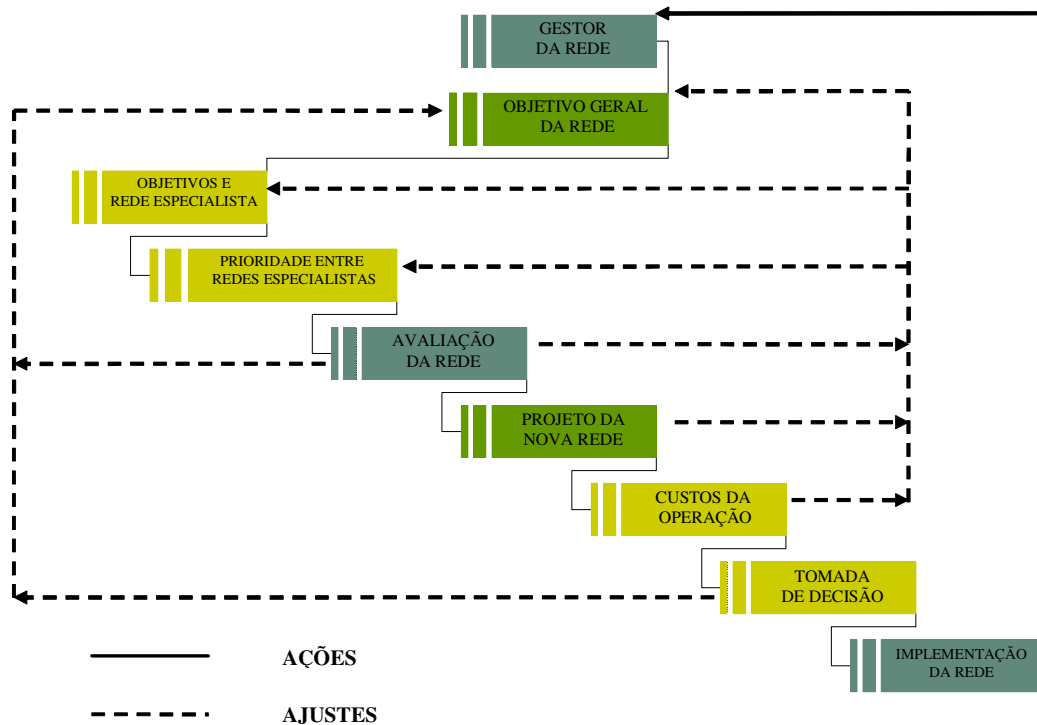


Figura 6.1 – Procedimento OMM³² para redesenho de redes (WMO, 1994)

Vê-se que tal proposta é abrangente e considera fatores que tornam extremamente complexa a decisão a ser tomada.

³² A Figura 6.1 foi adaptada daquela apresentada em (WMO, 1994) na página 266, item 20.1.5.

Um aspecto basilar em todo o processo é a avaliação da rede. Dependendo dessa avaliação e dos objetivos definidos, várias técnicas para o planejamento de uma rede poderão ser aplicadas, desde a análise das características hidrológicas básicas, análises de regressão ou análises mais complexas utilizando métodos de otimização (WMO, 1994).

Segundo a OMM, um completo desenho (ou redesenho) de uma rede deve responder às seguintes perguntas relativas aos dados a serem coletados:

- a) que variáveis hidrológicas necessitam ser observadas?
- b) onde deverão ser locados os postos de observação?
- c) qual a frequência necessária para as observações?
- d) qual a duração do programa de observações?
- e) quão precisas devem ser as observações?

Propõe a OMM que as respostas a essas questões poderiam ser obtidas segundo as atividades presentes na Figura 6.2. Nela, a base é o conhecimento hidrológico da área a ser observada, sem o qual haverá pequena chance de que as informações geradas pela rede possam ser eficazes. No lado direito da Figura 6.2, apresentam-se métodos estatísticos para o tratamento da incerteza, característica própria dos dados hidrológicos. O tratamento dos dados e a redução da incerteza são elementos chave no uso das informações geradas. No meio e no lado esquerdo da Figura 6.2, encontram-se a teoria de otimização e as análises socioeconômicas. A otimização de processos deve ser utilizada tanto para o tratamento dos dados hidrológicos quanto para os aspectos socioeconômicos envolvidos na implantação e operação de uma rede de monitoramento. No topo da Figura 6.2, apresenta-se a teoria de apoio à decisão que integraria os resultados dos componentes abaixo e permitiria um maior conhecimento do impacto das decisões a serem tomadas.

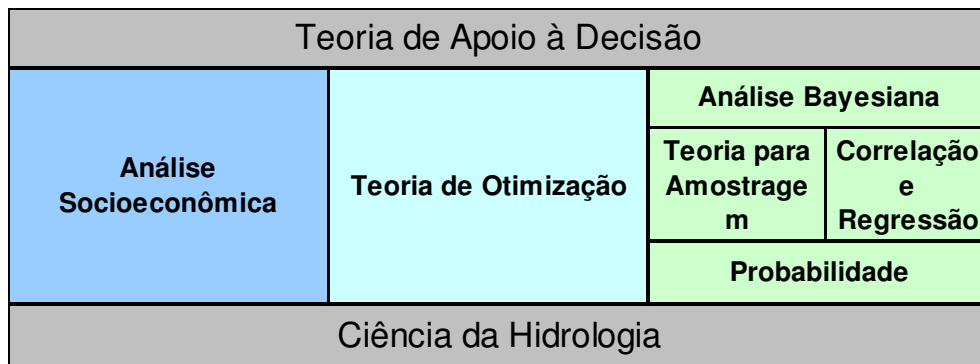


Figura 6.2 – Ferramentas para avaliação de rede hidrometeorológica (WMO, 1994)

A construção de uma rede para o monitoramento em determinada bacia hidrográfica pode não ser suficiente para embasar todas as decisões que precisam ser tomadas em processos de planejamentos integrados dos recursos hídricos visando a ações otimizadas. Não se podendo instalar uma rede que atenda a todas as demandas necessárias³³, deve ser instalada pelo menos uma rede mínima que possa ser ampliada, modificada ou modernizada em processos sucessivos e contínuos, que busquem alcançar a construção de uma rede ótima.

O procedimento proposto pela OMM sugere uma avaliação preliminar (apresentada na Tabela 6.1) na qual são sugeridas densidades mínimas para a locação das estações fluviométricas³⁴, considerando diferentes condições fisiográficas de relevo. Foi acrescentada à tabela proposta pela OMM uma linha de corte visando definir correntes de água principais e pequenas em uma bacia de drenagem (LLAMAS, 1996). As correntes principais são aquelas cuja área é maior que a área “A” da Tabela 6.1, sendo as demais correntes consideradas pequenas. Essa orientação adicional é importante porque “*para uma amostragem adequada deve haver pelo menos tantas estações nas correntes pequenas como nas correntes principais*”, ressalta Llamas.

Tabela 6.1 – Densidade mínima para redes fluviométricas (WMO, 1994; LLAMAS, 1996)

Condições fisiográficas de relevo	Densidade mínima de estações (km²/ estação)	Área que divide as correntes principais das pequenas (km²)
Zona costeira	2.750	-
Relevo montanhoso	1.000	100
Planícies interiores	1.875	3.000 a 5.000
Ondulações leves	1.875	3.000 a 5.000
Pequenas ilhas	300	-
Área polar ou árida	20.000	10.000

6.1.2 Procedimento DNAEE

O procedimento elaborado pelo DNAEE para o planejamento de redes (DNAEE/MME, 1983) visa responder a três questões:

- a) quantas são as estações necessárias para a obtenção dos dados?
- b) onde localizá-las?
- c) qual a duração da coleta dos dados?

³³ Situação comum em países em desenvolvimentos onde as disponibilidades financeiras são, normalmente, insuficientes (SOARES, 2001).

³⁴ A OMM sugere tabelas análogas para as redes pluviométricas, sedimentométricas e outras, que não são citadas aqui por não serem objeto deste trabalho.

Vê-se na simplificação dessa proposta frente àquela da OMM uma preocupação objetiva com a elaboração de arranjos de rede (que deve ser subsidiada pela resposta às duas primeiras questões) e com a operação dessa rede (para a qual a resposta à terceira questão se mostra importante insumo). A documentação existente não detalha os objetivos e, tampouco, o embasamento que norteou a elaboração dessa proposta pelo DNAEE.

Segundo o DNAEE, para avaliar ou projetar uma nova rede, o número de estações a serem locadas deve respeitar às orientações da OMM apresentadas na Tabela 6.1. Em uma segunda etapa, o procedimento do DNAEE sugere a utilização de três técnicas: mapeamento da bacia de drenagem visando relacionar as características fisiográficas com as variáveis hidrológicas; regionalização das características hidrológicas visando identificar regiões homogêneas³⁵; e análise sistêmica para a identificação do melhor custo-benefício na instalação das estações.

Em texto produzido pelo DNAEE (1995) sobre aspectos relevantes da rede hidrológica brasileira, são apresentados dois métodos expeditos utilizados pelo órgão para a locação de estações: o primeiro é resumido na Tabela 6.2 e estabelece uma orientação para a locação da estação considerando a área de drenagem a ser monitorada e as condições operacionais para instalação (e operação³⁶); o segundo método, apresentado na Tabela 6.3, propõe critérios para a locação de estações primárias e secundárias em cursos d'água com fluxos naturais (ou não regularizados) e, também, para bacias cujas vazões são regularizadas por reservatórios ou outras obras hidráulicas.

Consideram-se estações primárias aquelas permanentes, de longo tempo de observação, entre 25 e 30 anos, em cursos d'água principais das bacias. As estações secundárias são aquelas instaladas por tempo determinado, com período de coleta entre 5 e 10 anos, em cursos d'água secundários, área menor que 1.000km², com o objetivo de complementar as informações coletadas nas estações principais.

Nas bacias com vazões regularizadas “o programa de coleta de dados deverá estar voltado para a aquisição das informações relativas à operação dos reservatórios, registros sobre derivações existentes, etc” (DNAEE/MME, 1983). Essas bacias contam com o apoio de legislação normativa que regula a instalação de estações para monitoramento dos cursos d'água, como se verifica no Código das Águas (art. 153, alínea d) e na Resolução ANEEL n° 396, de 1998.

³⁵ Considera-se região homogênea aquela área da bacia onde há uma forte correlação entre as variáveis hidrológicas observadas por diferentes estações pluviométricas ou pluviométricas.

³⁶ Acréscimo deste autor.

Tabela 6.2 – Locação de estações fluviométricas 1 (DNAEE, 1995)

Condições relativas à instalação e operação da estação	Área a montante da primeira estação (km ²)	Critério para locação das demais estações
Normais	200	Estações a jusante da primeira com o dobro da área de drenagem da estação à sua montante
Difíceis	1.000	
Muito difíceis	5.000	

Estabelece o DNAEE, também, que a coleta de dados deve ser feita durante período mínimo ininterrupto de 25 a 30 anos para as estações primárias e de 5 a 10 anos para as estações secundárias.

Tabela 6.3 – Locação de estações fluviométricas 2 (DNAEE, 1995)

Classificação das estações	Critérios para locação das estações
Secundárias	Em função de processos de regionalização
Primárias	1° A primeira estação com área de drenagem de 1.000 km ²
	2° As estações seguintes dobrando-se a área de drenagem da estação a montante (2.000, 4.000, 8.000 km ² , etc.)
	3° Inclusão de uma estação quando de bifurcação de tributário importante (conceito do nó hidrológico)

6.1.3 Procedimento Galvão

Com o avanço das tecnologias para tratamentos das informações surgiram os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) que vêm promovendo muitas facilidades para o cruzamento de dados que possam ser representados geograficamente. Galvão (2004) propõe utilizar esses sistemas para definir o que chamou de “*mapa de potencial à locação de estações ... fluviométricas*”, por meio do procedimento apresentado a seguir:

a) identificação e seleção de variáveis geoambientais, de natureza fisiográfica, hidrológica, meteorológica ou socioeconômica, utilizadas nos processos de locação de estações fluviométricas: por intermédio de pesquisa junto aos planejadores de redes são verificados os principais critérios utilizados nos projetos e, assim, selecionadas, com base em pesos estatísticos, aquelas mais diretamente relacionadas com processos empíricos de locação de estações;

b) digitalização das informações geoambientais em SIG, visando à utilização das ferramentas disponíveis para o tratamento dessas informações;

c) aplicação da técnica de inferência espacial para a geração do mapa de potencial locação de estações fluviométricas: a técnica “classificador neural

supervisionado – função de base radial” é aplicada ao conjunto das variáveis selecionadas, no ambiente SIG, visando determinar classes regionais para a melhor locação das estações.

Esse procedimento foi aplicado por Galvão à rede fluviométrica da bacia do rio São Francisco, apresentou resultados convergentes com os processos empíricos e mostrou-se uma ferramenta com grande potencial de contribuição ao processo de planejamento de redes. Galvão propõe, no entanto, que a técnica seja aplicada a outras bacias buscando sua maior validação.

6.1.4 Procedimento do *Federal Institute of Hydrology* (Alemanha)

A Alemanha possui desde a metade do século XIX completa³⁷ (sic) rede de monitoramento dos seus rios, que vem gerando informações praticamente ininterruptas até os dias atuais (BELZ; ENGEL, 2003). Em virtude de demandas do governo alemão, visando à otimização de custos de manutenção dessa rede, foi elaborado um procedimento que busca identificar a significância das estações para a geração das informações hidrológicas e para a gestão dos recursos hídricos naquele país.

A abordagem desse procedimento vem ao encontro da legislação brasileira quanto ao fundamento da garantia dos múltiplos usos da água: a sua premissa principal é que uma rede de monitoramento deve ser compartilhada pelos diversos usuários assim como as informações oriundas dessa rede. A proposta metodológica é descrita a seguir:

a) mapeamento dos usos das informações produzidas pela rede de monitoramento, dividido em dois tipos básicos de dados: níveis da água nos corpos d’água e vazões verificadas (Figura 6.3);

b) elaboração de critérios para avaliar as estações de monitoramento quanto aos seus usos (Figura 6.4) separando-as em dois grupos: grupo A, estação com destacada importância; e B, estação com importância específica; se os critérios 1 a 5 são aplicáveis e o 9 não, a estação poderá ser classificada no Grupo A ou B, indiferentemente; se são aplicáveis os critérios 6 a 8 e o 9 não, a estação deverá ser classificada no Grupo B; e se for aplicável somente o critério 9, a estação não é necessária do ponto de vista hidrológico;

c) julgamento quanto à avaliação da estação considerando os procedimentos apresentados na Figura 6.5.

Importante notar a presença do conceito de redundância das informações no processo decisório final para otimização da rede, proposto por Belz e Engel, quando afirmam que “*uma estação é dispensável sob o ponto de vista hidrológico quando os dados*

³⁷ Avaliação dos autores Jörg Belz e Heinz Engel

de uma estação vizinha coincidem ou há uma forte correlação entre os mesmos”. Alertam, no entanto, que a tomada de decisão não deve ser feita somente sob o ponto de vista hidrológico e que devem ser considerados os usos específicos da estação em questão, inclusive quanto ao período a ser contemplado pelo planejamento dos recursos hídricos.

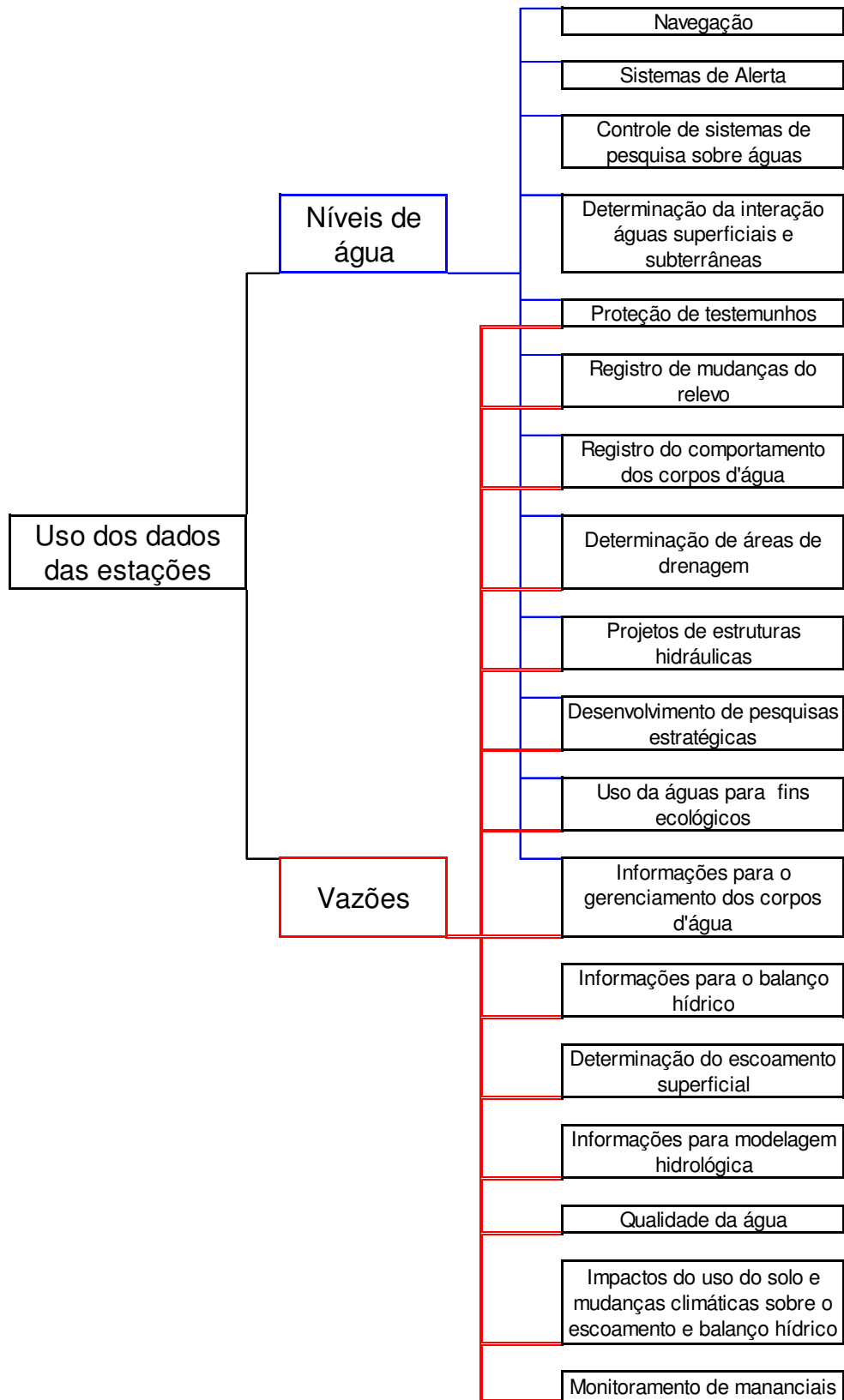


Figura 6.3 – Usos das informações da rede hidrometeorológica (BELZ; ENGEL, 2003)

Os dados das estações ...		
1	São necessários à navegação	sim ou não
2	São necessários para sistemas de alerta	sim ou não
3	São importantes para a gestão integrada com outros países ou bacias	sim ou não
4	São necessários para o conhecimento hídrico da bacia e ações de gerenciamento	sim ou não
5	São utilizados por pelo menos 5 dos usos da Figura 6.3	sim ou não
6	São a base para a determinação do escoamento superficial	sim ou não
7	São estações primárias situadas em pontos característicos dos cursos d'água	sim ou não
8	São estações com longo período de observação	sim ou não
9	Podem ser substituídas por estações próximas	sim ou não

Figura 6.4 – Critérios para avaliação da locação das estações (BELZ; ENGEL, 2003)

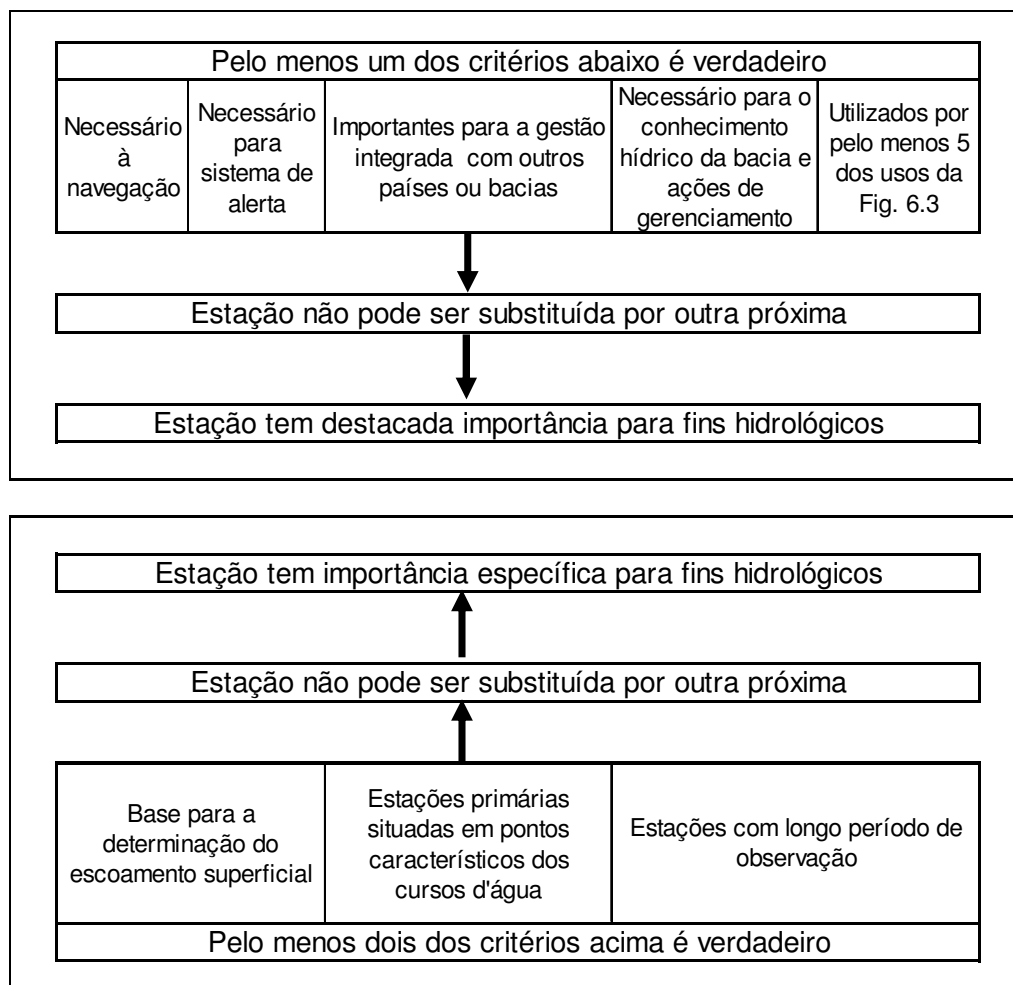


Figura 6.5 – Diagrama de avaliação das estações (BELZ; ENGEL, 2003)

6.1.5 Procedimento Llamas

Segundo Llamas (1996), para se localizarem estações fluviométricas em uma rede de monitoramento, devem ser considerados os seguintes critérios preliminares:

- a) verificação das condições geográficas e hidrológicas predominantes, particularmente as variações espaciais, o regime das precipitações e o regime hidrológico;
- b) cálculo da densidade de drenagem da bacia;
- c) mapeamento de condições locais especiais de fluxo natural ou regularizado;
- d) levantamento das seções de controle mais importantes para a gestão dos recursos hídricos, definidas por planos de recursos hídricos ou outros instrumentos de planejamento e gestão;
- e) verificação da necessidade de subsidiar as estações de monitoramento de qualidade das águas em pontos específicos.

Llamas recomenda que sejam considerados, ainda, o tamanho da bacia hidrográfica e a densidade mínima de estações por área territorial, sugeridas pela OMM, de acordo com a característica fisiográfica da bacia, conforme já apresentado na Tabela 6.1.

6.2 MÉTODOS PARA PROJETO DE REDES FLUVIOMÉTRICAS

Vários métodos foram desenvolvidos para auxiliar a locação de estações em uma rede de monitoramento fluviométrico, cada qual com necessidades e aplicações diferenciadas. A seguir, apresentam-se alguns daqueles mais citados na literatura visando elaborar uma análise comparativa entre eles.

6.2.1 Método Dubreuil

O método de Dubreuil, *apud* Llamas (1996), consiste na elaboração de um plano de localização de estações para uma rede de monitoramento fluviométrica, construído em três etapas subseqüentes:

1ª Estudos das condições físicas e climáticas predominantes: inclui o levantamento dos fatores condicionantes do comportamento hidrológico previsto para a região, dentre os quais:

- a) fatores perenes (sic)³⁸: morfologia, localização geográfica, distribuição da rede fluviométrica existente, aspectos pedológicos e geológicos;
- b) fatores variáveis no tempo: clima, cobertura vegetal e umidade do solo.

Dubreuil sugere tratamentos diferenciados a cada um dos condicionantes, buscando estabelecer faixas de influência no comportamento hidrológico. A construção de

³⁸ a extensão temporal deve ser relativizada uma vez que todos estes fatores também variam em diferentes medidas de tempo, afetando o comportamento hidrológico da área sob estudo.

mapas específicos para cada tema tratado e a superposição final de todos os mapas escolhidos permite elaborar um documento síntese e, assim, definir regiões da bacia que poderiam ser consideradas homogêneas relativamente aos aspectos considerados.

2ª Estudos das realidades regionais condicionantes das vazões fluviais buscando construir o mapeamento das zonas fisicoclimáticas homogêneas: nessa etapa deverão ser escolhidos critérios físicos, econômicos e hidrológicos que permitem melhor localizar as estações; utilizando o mapa das regiões homogêneas, construído na primeira etapa, ou utilizando critérios consagrados na literatura³⁹ busca-se localizar estações na rede de drenagem; ao término dessa etapa pretende-se elaborar uma alternativa de arranjo para a rede.

3ª Elaboração do plano de localização das estações tendo em vista as zonas homogêneas, os usos da água e projetos de desenvolvimento regionais: nessa etapa deve-se proceder à análise comparativa entre a localização das estações existentes e aquela proposta na segunda etapa e, incluindo considerações relativas à operação e gestão da rede, definir qual o melhor arranjo a ser proposto.

Com o desenvolvimento das tecnologias de informações e com o apoio dos computadores e de programas computacionais, que possibilitam o manuseio de mapas com informações relacionadas, tornaram-se possíveis o cruzamento das informações representadas em mapas temáticos, sua superposição com pesos e equações diferenciados e a rápida apresentação do mapa resultante dessas combinações. Essas técnicas, além da rapidez inserida no processo, permitem aumentar sensivelmente a precisão no resultado final do trabalho assim como a flexibilidade na proposição de novas alternativas de projeto.

A utilização desses sistemas na elaboração de propostas para a construção das redes de monitoramento não permite esquecer, porém, que as facilidades de alterações virtuais podem comprometer a visão da realidade e, conseqüentemente, o alcance de uma solução exequível.

6.2.2 Método da Cartografia Conjunta

A cartografia conjunta é aplicada aos processos de otimização de redes fluviométricas. Essa técnica permite a interação entre variáveis climatológicas e hidrológicas com a conseqüente alteração da localização e densidade das redes propostas, após sucessivas iterações.

³⁹ Refere-se aqui às confluências principais, à relação logarítmica entre as vazões e às áreas de drenagem ou seções fluviais de controle.

A sua aplicação é auxiliada por sistemas de informação geográfica para que o objeto específico de trabalho possa ser uma quadrícula no mapa, tão local quanto possível, e possam ser inseridas informações que permitam o cálculo dos escoamentos superficiais em cada uma delas. Para cada quadrícula, são necessárias as seguintes informações:

- a) características fisiográficas;
- b) características hidrográficas;
- c) variáveis climáticas; e
- d) variáveis hidrológicas.

Sugere-se a execução das seguintes etapas na aplicação da técnica:

1ª Elaborar a análise de regressão linear entre a temperatura média anual de cada estação climatológica e as características fisiográficas, o que pode resultar na definição da temperatura média anual em cada quadrícula.

2ª Elaborar a análise de regressão linear entre a precipitação média anual registrada em cada estação pluviométrica e as características fisiográficas, o que deve resultar na precipitação média em cada quadrícula.

3ª Estimar a evaporação potencial utilizando a fórmula de Turc, *apud* Llamas (1996), conforme equações 6.1 e 6.2:

$$E = \left(\frac{P}{0,9 - P^2 L^2} \right)^{1/2} \quad 6.1$$

$$L = 300 + 25 \times T - 0,05 \times T^3 \quad 6.2$$

Nas quais:

E = evaporação média anual em cada quadrícula da malha (mm)

P = idem para a precipitação média anual (mm)

T = idem para a temperatura média anual (°C)

L = variável auxiliar

4ª Calcular o valor preliminar para o escoamento superficial em cada quadrícula utilizando-se da equação simplificada do balanço hídrico 6.3:

$$Q = P - E \quad 6.3$$

Na qual:

Q = escoamento superficial (mm)

5ª Calcular, por integração dos escoamentos das quadrículas, o escoamento superficial Q_c na seção das estações hidrométricas existentes e, comparando com o escoamento observado Q_o , calcular para cada área de drenagem das estações a relação entre o escoamento calculado e aquele observado, ou seja:

$$K = \frac{Q_o}{Q_c} \quad 6.4$$

6ª Por intermédio do fator “K”, faz-se nova estimativa da precipitação, utilizando-se da expressão 6.5 e, com este novo valor de P, recalculam-se as etapas 3ª, 4ª e 5ª, até a estabilização do valor “K” com sua convergência para 1.

$$P = K \times Q + E \quad 6.5$$

7ª Por fim, visando verificar o erro de interpolação, será feita a eliminação de “m” estações hidrométricas existentes: refazendo as etapas descritas anteriormente e calculando as diferenças entre os valores de Q_o e Q_c , estas diferenças devem ser utilizadas para que se estabeleça uma relação entre a densidade das estações e os erros, o que permitirá calcular a densidade ideal, otimizando a locação das estações da rede.

6.2.3 Método Geoestatístico

Para a análise e otimização de redes pluviométricas tem sido muito utilizado o método geoestatístico. A geoestatística permite avaliar os fenômenos naturais consideradas suas características aleatórias e espaciais, sendo muito aplicada a estudos sobre o comportamento pluviométrico em determinada área.

Krige (1951, *apud* TRARBACH, 2004), estudando a correlação espacial entre amostras de solo com concentração aurífera, afirmou que deveria haver uma dependência entre as variâncias dessas concentrações e a distância entre os locais onde foram coletadas as amostras. Seus estudos motivaram Matheron (1963, *apud* TRARBACH, 2004) a desenvolver uma teoria para variáveis regionalizadas, fundamentando cientificamente a geoestatística.

Os estudos de Krige permitiram, também, definir o que hoje chamamos de técnica de krigagem que se baseia no número de dados, na qualidade dos dados em cada ponto, na posição da coleta dos dados, na continuidade espacial e na distância entre estes pontos amostrais. Segundo Matheron trata-se do “... *melhor preditor linear não viciado de uma variável desconhecida.*” A krigagem simples utiliza-se da aplicação da equação 6.6 abaixo:

$$Z_{ks}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \times m \quad 6.6$$

Na qual λ são os pesos para minimizar a variância da estimativa, calculados pelo sistema de equações lineares expresso na fórmula 6.7, abaixo.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \times C(x_i\beta - x_i\alpha) = C(x_0 - x_0\alpha) \quad 6.7$$

Nas quais:

- $Z_{ks}(x)$ = função estacionária
- m = média da função estacionária
- C = covariância da função estacionária
- $x\beta$ = valor da variável em β
- $x\alpha$ = valor da variável em α
- x_0 = valor da variável inicial
- α e β = coordenadas de dois pontos diferentes

Uma variável regionalizada pode ser definida como aquela cuja equação que representa seu comportamento espacial apresenta continuidade aparente com relação à distância. Quando duas amostras são correlacionadas esta correlação dependerá do vetor que une os pontos de coleta das amostras “ x ” e “ $x+d$ ” e, também, da natureza da variável sob análise.

A aplicação da técnica está condicionada à verificação da similaridade das amostras (no tempo e no espaço) quando da redução da distância entre os pontos de coleta, além da análise se o processo estocástico gerador dos dados é intrinsecamente estacionário, ou seja, seu comportamento cíclico não depende do período em que coletamos as amostras.

A geoestatística consiste, então, de método que, aplicado às amostras coletadas em redes de monitoramento, permite avaliar a dependência espacial entre as mesmas. Por meio da equação 6.8, pela qual se define uma curva chamada semivariograma, pode-se avaliar as magnitudes da correlação entre duas amostras e a sua similaridade com a variação da distância entre as mesmas. A Figura 6.6 ilustra o comportamento dessa curva. Pode-se verificar que acima de determinada distância (A, na Figura) o valor da função é alto o que indica correlação desprezível entre as amostras. Na mesma Figura, verifica-se, também, o chamado “efeito pepita”, valor definido para a distância zero.

$$\gamma = \frac{1}{2N(d)} \times \sum_{x=1}^{N(d)} [z(x) - z(x+d)]^2 \quad 6.8$$

Na qual:

γ = função semivariograma

$N(d)$ = número de pares amostrais separados pela distância (d)

d = distância entre duas amostras

$z(x)$ = função da variável regionalizada

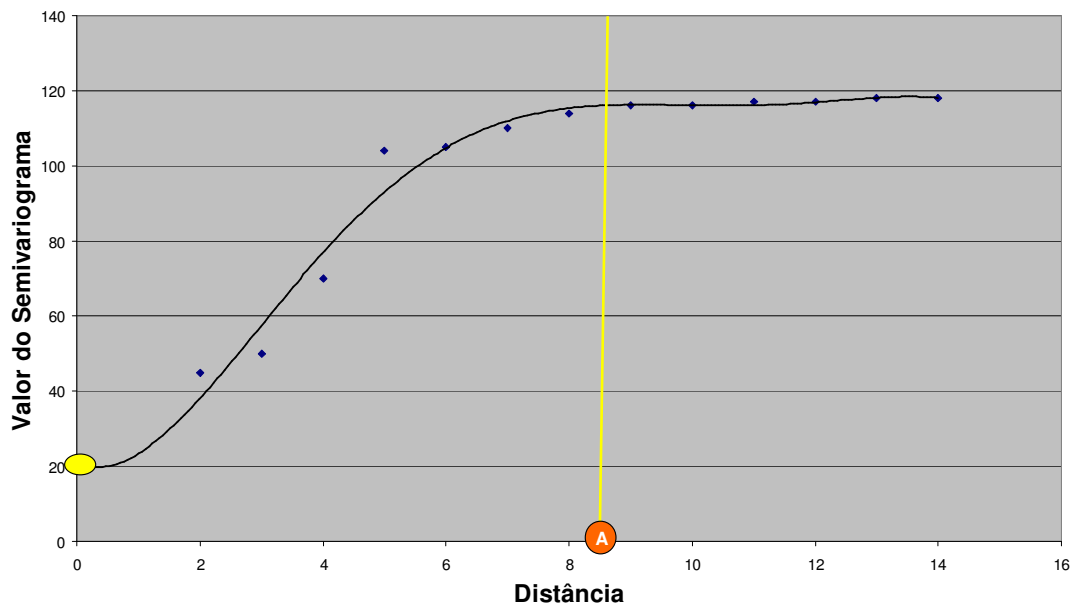


Figura 6.6 – Ilustração de um semivariograma

Assim, conhecido o semivariograma e aplicando-se a técnica de krigagem, podem ser estimados os valores nos locais não amostrados de uma rede. Para a aplicação dessa técnica visando à avaliação de uma rede fluviométrica pode-se utilizar a vazão específica como a variável a ser regionalizada e, considerando a função dessa variável no tempo como aleatória e estacionária, serem aplicadas as seguintes etapas:

- a) construção do semivariograma da função das vazões específicas;
- b) aplicação da técnica de krigagem;
- c) eliminação progressiva de estações em regiões mais densas;
- d) cálculo dos valores pela krigagem para o local das estações retiradas;
- e) avaliação dos erros e rearranjo da rede.

6.2.4 Método Karasiev

Karasiev, *apud* Llamas (1996) e Mollinedo (2000), elaborou um método para otimização das observações de uma rede baseando-se nos trabalhos desenvolvidos por Drozdov, Shepelevski, Gandin e Kogan, *apud* Mollinedo (2000). O objetivo do método é definir a área ótima para a locação de estações fluviométricas. Devem ser definidas, inicialmente, regiões que tenham características geográficas e hidrológicas relativamente homogêneas. Três critérios são utilizados para o cálculo da densidade ótima das estações, baseados nas áreas de drenagem da bacia homogênea sob análise:

a) área mínima - *Amin*: aquela cuja superfície seja considerada pouco sensível às variações locais de uso e ocupação do solo, sendo representativa das condições climáticas e hidrológicas em um longo período;

b) área relativa à variabilidade hidrológica - *Agrad*: superfície que garante que em 95% das vezes a diferença entre as vazões específicas anuais de duas bacias subseqüentes é maior que o desvio-padrão das vazões; essa área pode ser calculada pela equação 6.9.

$$Agrad = 8 \times \sigma^2 \times \frac{q^2}{(\nabla q)^2} \quad 6.9$$

Na qual:

σ = desvio padrão das vazões anuais

q = vazão específica média anual

∇q = gradiente das vazões específicas médias anuais

Com esse critério pode-se definir, então, a área de drenagem para a qual se torna importante a instalação de estações de monitoramento com otimização das informações coletadas. No entanto, isso pode levar a arranjos com densidade muito grande de estações, razão pela qual Karasiev propõe um terceiro critério: impõe uma correlação mínima entre os dados coletados por duas estações subseqüentes em um curso e numa rede, denominado *Acor*.

c) área relativa à correlação hidrológica mínima - *Acor*: superfície máxima que assegura a correlação entre as estações e, conseqüentemente, um erro máximo admitido para valores medidos em cada uma das estações; essa área é calculada pela equação 6.10.

$$Acor = \sigma^4 \times \frac{de^2}{(Cv)^4} \quad 6.10$$

Sendo que:

$$Cv = 100 \times \frac{\sigma}{xm} \quad e \quad 6.11$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right) \sum_{i=1}^N (xi - xm)^2} \quad 6.12$$

Nas quais:

de = distância entre as seções para a qual é nula a correlação entre os valores médios anuais de vazões

Cv = coeficiente de variação das vazões médias anuais (%)

N = número de estações existentes

xi = vazões médias anuais

xm = valor médio das vazões médias anuais

σ = desvio-padrão das vazões anuais

Karasiev define, então, a área de drenagem ótima (*Aot*) para a localização de uma estação aquela que preserve a desigualdade representada pela fórmula 6.13 e ilustrada pela Figura 6.7.

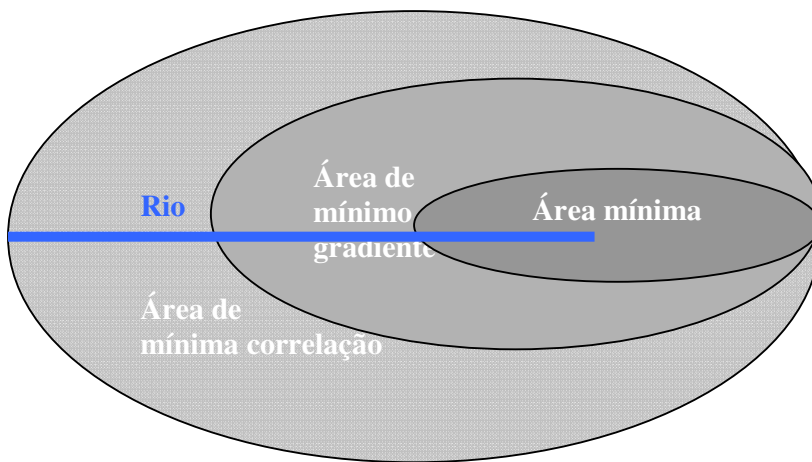


Figura 6.7 – Ilustração das áreas de Karasiev

Considerando que para cada área ótima há a necessidade de instalação de uma estação fluviométrica, pode-se estimar o número de estações suplementares (N) requerido para toda a bacia sob análise, segundo Karasiev, utilizando-se o ordenamento de Horton, conforme a equação 6.14.

$$N = \sum_{i=u_{ot}+1}^u rb^{i-1} \quad 6.14$$

Na qual:

- N = número estimado de estações suplementares para a bacia
- rb = coeficiente de bifurcação definido por Horton
- u = ordem de Horton para o exutório da bacia
- u_{ot} = ordem de Horton para a bacia de área ótima para rede

O método de Karasiev sugere, ainda, que uma rede de monitoramento ótima deveria possuir entre 15 e 30% das estações instaladas em bacias de drenagem com ordem inferior àquela da área ótima.

6.2.5 Método Sharp

O método desenvolvido por Sharp (1971) é utilizado para a macrolocalização⁴⁰ de estações e consiste na análise topológica da rede de drenagem para a definição da seqüência ótima de amostragem.

Sharp (1970) afirma que o ordenamento de uma rede de drenagem é uma medida direta da sua entropia e que a incerteza de que a fonte geradora de um parâmetro detectado no exutório da bacia seja identificada é igual a “u-i”; onde “u” é a ordem⁴¹ de Horton do exutório e “i” é a ordem do ramo na qual está localizada a fonte poluente. O resultado dessa diferença é o número mínimo de amostras para que a fonte poluente seja identificada.

Os estudos desenvolvidos por Sharp estabeleceram, ainda, que o número mínimo de amostragens, da moda e o número máximo para se identificar uma fonte poluidora sejam calculados pelas equações 6.15, 6.16 e 6.17, respectivamente.

$$N_{min} = \log_3(u) \quad 6.15$$

$$N_{moda} = 1 + \log_2(u) \quad 6.16$$

$$N_{max} = 2 \times [1 + \log_3(u)] \quad 6.17$$

O conhecimento do número mínimo, da moda ou do máximo de amostragens não satisfaz à necessidade de se ter um procedimento para localizar as estações. Utilizando-se do conceito de magnitude de uma rede drenagem, segundo estudos de Shreve (1967) e Scheidegger (1965), *apud* Sharp (1971), Sharp propôs o método de amostragem seqüencial, cujas etapas são apresentadas abaixo:

- a) classificar a rede de drenagem definindo como magnitude de cada ramo o número de tributários externos ou nascentes do respectivo ramo (por exemplo: um curso d'água formado por dois tributários de magnitudes “m” e “n” terá magnitude “m+n”);
- b) identificar o exutório da bacia e definir sua magnitude;
- c) dividir a magnitude do exutório por dois visando encontrar o primeiro centróide da bacia (quando não houver curso com essa magnitude busca-se o curso de magnitude mais próxima);

⁴⁰ A macrolocalização de estações de monitoramento representa a distribuição de pontos de amostragem em uma bacia hidrográfica, abstraindo-se das condições específicas locais mais adequadas para a instalação de uma estação, conforme abordado nesta dissertação na seção 5.1.3.

⁴¹ Ver magnitude de uma rede de drenagem na seção 5.3.4 desta dissertação.

d) se uma rede é dividida em duas partes pelo primeiro centróide, o centróide da parte superior da bacia pode ser determinado da mesma maneira pela qual foi determinado o centróide de toda a bacia;

e) para a parte inferior da bacia, no entanto, o centróide pode ser determinado pela renumeração completa das magnitudes dos ramos dessa área e, daí por diante, conforme definido para a bacia como um todo; alternativamente, pode-se utilizar as equações 6.18 e 6.19 para essa definição.

$$Mc' = \left[\frac{u - Mu + 1}{2} \right] \quad 6.18$$

$$Mc'' = Mc' + Mu \quad 6.19$$

Nas quais:

- u = magnitude do exutório da bacia
- Mc' = centróide da parte inferior da bacia
- Mc'' = centróide da parte superior da bacia
- Mu = magnitude do exutório da parte superior da bacia

f) repetir o procedimento acima até que toda a rede de drenagem seja dividida;

g) o primeiro centróide definirá o nível hierárquico n° 1, dividindo a rede em duas metades; o segundo centróide definirá o nível hierárquico n° 2, dividindo a rede em quatro partes; o terceiro centróide dividirá a rede em oitavas, definindo o nível hierárquico n° 3; e assim sucessivamente;

h) as amostragens seqüenciais são definidas como aquelas necessárias à identificação da fonte poluente a partir da última estação fixa, ou centróide mais próximo das nascentes.

A Figura 6.8 ilustra os procedimentos e valores utilizados no estabelecimento dos centróides em uma rede de drenagem existente (bacia hidrográfica do rio Descoberto, *apud* LIMA, 2004); nesse caso, todos os ramos e bacias estão bem definidos, caso freqüente, mas que pode não se repetir sempre⁴².

Após a proposição das estações fixas (centróides) da rede é necessário que se proceda à sua otimização. Sharp (1971), baseado no compromisso entre estações fixas e

amostragens seqüenciais, sugere que sejam observados o custo e os recursos disponíveis para a implantação da rede. Assim, utilizando-se o conceito de máximo ganho de informação “Gi” com o mínimo esforço necessário “Ei” e, considerando a eficácia da cobertura da coleta dos dados “Ec”, propõe que o custo, de cada arranjo combinado de estações fixas e amostragens seqüenciais, seja calculado pela expressão 6.20. Assim, dentre todos os custos, deve ser escolhida a configuração de estações que apresente o menor valor.

$$Gi = Ec - Ei \quad 6.20$$

Definindo-se a eficácia da cobertura do monitoramento em função do número de estações fixas “Ef” (ou seja, quanto maior o número de estações fixas instalado, mais próxima a 1 será a eficácia da cobertura da rede), tem-se:

$$Ec = 1 - \frac{1}{Ef} \quad 6.21$$

⁴² há configurações naturais nas quais a bacia hidrográfica não está perfeitamente definida pelos ramos da rede, proporcionando dificuldades na definição da magnitude dos mesmos.



Figura 6.8 – Aplicação do método Sharp (LIMA, 2004)

O esforço necessário para localizar uma fonte poluidora em uma bacia de exutório de magnitude “u”, considerando o número de estações fixas e o número de amostragens seqüenciais “Nas”, é calculado pela equação 6.22.

$$Ei = \frac{Ef + Nas}{u} \quad 6.22$$

Substituindo as equações 6.21 e 6.22 em 6.20, tem-se:

$$Gi = \left(1 - \frac{1}{Ef}\right) - \left(\frac{Ef + Nas}{u}\right) \quad 6.23$$

Nesse procedimento de otimização, o ganho de informação para o projeto misto (estações fixas e amostragens seqüenciais) é calculado para diferentes combinações, possibilitando a escolha daquela que maximize esse ganho, conforme mostra a Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Otimização da macrolocalização de estações segundo Sharp (1971)

Hierarquia da estação	Nº de estações adicionadas	Nº total de estações de monitoramento	Nº de amostragens seqüenciais	Procura seqüencial (%)	Ganho de informação (%)
Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6
0	1	1	J – Col 1 – 1	Col 1 / (J-1)	-
...	=	=	...
J	...	u	=	100	-

Outro procedimento de otimização do método de Sharp foi proposto por Dixon *et al.* (1999) e se baseia na afirmação de que o custo da detecção de determinado parâmetro de monitoramento por uma estação fixa depende do número de amostras seqüenciais a serem realizadas até se encontrar a fonte do parâmetro. Dixon postula que a distribuição ótima dos locais de amostragem é aquela que representa um custo mínimo e que este seria proporcional à razão entre a magnitude do trecho já coberto pela estação fixa e a magnitude total da rede de drenagem.

Com essas considerações, Dixon propõe que para cada razão entre as magnitudes⁴³ seja definido um custo igual ao logaritmo na base 2 da magnitude do trecho em que se localiza a estação fixa, o que determina a proposição da equação 6.24 como o custo total do arranjo em questão.

$$Custo = \sum_{i=1}^u \left(\frac{ni}{u} \right) \log_2 (ni) \quad 6.24$$

Na qual:

u = magnitude do exutório da bacia

ni = magnitude do trecho das estações fixas

O método Sharp, inicialmente desenvolvido para a identificação de fontes desconhecidas de poluição, utiliza a quantidade de “nascentes” de uma rede de drenagem como a magnitude dessa rede e foi adaptado por Sanders (1983). Sanders considera cada descarga individual de poluente como sendo um tributário externo de ordem 1 (um), definindo, então, uma nova maneira de se calcular a magnitude e, também, de se determinar a configuração topológica de uma rede a ser analisada. Com essa modificação, os centróides da rede podem ser especificados em função das atividades populacionais ou industriais da bacia hidrográfica representadas por suas cargas poluentes lançadas nos corpos d’água.

Uma outra adaptação possível para a definição da magnitude de uma rede seria considerar a concentração de cargas poluentes de cada tributário como a ordem do mesmo (SOARES, 2001). Sabendo-se que a concentração é a medida quantitativa de poluentes por unidade de volume, vislumbra-se a possibilidade de que a vazão fluvial (unidade de volume por unidade de tempo) possa se constituir em parâmetro de análise do método e, assim, orientar a magnitude.

Assim, poderia ser aplicado o método Sharp para a locação de estações fluviométricas tanto considerando a área drenada quanto a vazão fluvial como medida da magnitude dos trechos da rede. Na seção 5.1.1 desta dissertação, as características básicas

⁴³ Magnitude do trecho sobre magnitude do exutório da bacia.

do regime fluvial, principalmente a relação direta entre a vazão e a área drenada⁴⁴, corroboram com essa proposição.

6.2.6 Método utilizando o conceito da Entropia

Shannon e Weaver (1962), ao desenvolverem a teoria matemática da informação, propuseram um tratamento análogo entre os conceitos de informação e de entropia. A entropia é um conceito definido fisicamente pela termodinâmica e é entendido como o aumento da desordem interna de um sistema enquanto a reserva interna de energia livre diminui (EPSTEIN, 1988). Essa definição, quando adaptada para sua aplicação em hidrologia, poderia ser interpretada como o grau de ramificação de uma rede de drenagem. Segundo Sharp (1971), tendo por base o conceito de Horton, “*o ordenamento⁴⁵ de uma rede de drenagem é uma medida de entropia*”.

Shannon, quando do desenvolvimento da teoria matemática da informação, restringiu sua aplicação às chamadas séries ergódicas, assim chamadas aquelas nas quais os eventos são estatisticamente estacionários, ou seja, nas séries em que “*uma amostra de dimensões razoáveis retirada entre 2 pontos de uma série exibirá as mesmas propriedades, aproximadamente, do que uma outra tomada entre quaisquer outros 2 pontos.*” (EPSTEIN, 1988). Nas séries ergódicas, as probabilidades de frequência são invariáveis no tempo.

Ao sistema que não possua essas características não é aplicável à teoria matemática da informação. Nos estudos hidrológicos pode-se reconhecer um comportamento estatístico não-ergódico em vazões fluviais nos cursos d’água regularizados, o que equivaleria dizer, em termos hidrológicos, que nesses canais suas séries históricas não têm comportamento aleatório.

Outro conceito importante refere-se à informação intrínseca do evento, representada matematicamente por $I = -\log_2 p_k$ e denominada auto-informação. Como p_k é a probabilidade de ocorrência do evento, com valor definido entre 0 e 1, o valor de I será tanto maior quanto mais raro o evento (ou menor sua probabilidade de ocorrer). É comum utilizar-se a base 2 para esse logaritmo e estabelecer que a quantidade de informação associada à seleção de um entre dois eventos equiprováveis ($p_k = 0,5$) é igual a 1 bit.⁴⁶

A teoria de Shannon define a informação contida em uma série de dados como o resultado da seguinte equação matemática:

⁴⁴ Ver seção 5.2.2, quando a regionalização de vazões acredita a relação entre a vazão dos cursos d’água e a área de drenagem.

⁴⁵ Dos cursos d’água.

$$I_t = - \sum_{k=1}^N \log_2 p_k \times m_k \quad 6.25$$

Na qual:

p_k = probabilidade de ocorrência de um evento

m_k = número de vezes que o evento ocorreu

N = número de eventos únicos da série

Segundo Epstein, “se a cada evento “ ek ” for associada a quantidade de informação expressa por $I(ek) = - \log_2 p_k$, a informação trazida por este elemento ao longo de toda a série será de $- m_k \log_2 p_k$, sendo m_k o número de vezes que “ ek ” ocorreu.” Com essas definições pode-se introduzir, então, a representação da informação média associada a uma série hidrológica pela equação 6.26, ou entropia própria da série, abaixo:

$$I_{med} = - \frac{\sum_{k=1}^N m_k \times \log_2 p_k}{N} = - \left(\sum_{k=1}^N p_k \times \log_2 p_k \right) \quad 6.26$$

Na qual:

p_k = probabilidade de ocorrência de um evento

m_k = número de vezes que o evento ocorreu

N = número total de eventos únicos da série

Segundo Shannon, a informação média será máxima (I_{max}) quando a probabilidade de ocorrência de todos os eventos for a mesma, ou seja, quando há a máxima incerteza ou máxima entropia da série. Nesse caso, se $p_k = 1/N$, $I_{max} = \log_2 N$. Assim, quanto mais desiguais forem as probabilidades de ocorrência dos dados numa série ergódica, menor será a quantidade média de informações da série.

Quando se analisa uma curva representativa de uma série de dados, a percepção visual da disposição dos dados pode indicar a forma de uma curva para a qual tenderia sua distribuição. Nesse caso, o estado entrópico dos dados não é tão desordenado como poderia

⁴⁶ bit é a abreviatura, em inglês, de *binary digit*.

ser e deve seguir um comportamento previsível. Chamamos esse “bom” comportamento de redundância ou sobreposição de informações contidas na série. A teoria da informação sugere que se possa medir essa redundância como a diferença entre a máxima informação que poderia ser transportada e a informação média verificada na série. Essa redundância própria de cada série é calculada pela equação 6.27.

$$R = \frac{I_{max} - I_{med}}{I_{max}} = \frac{(\log_2 N) + \left(\sum_{k=1}^N pk \times \log_2 pk \right)}{\log_2 N} \quad 6.27$$

Por outro lado, quando são analisadas duas séries de dados sequenciais essas podem conter informações independentes ou trazer redundâncias nas informações que transportam. Nestes casos, a quantidade de informação transportada pelas duas séries é menor que se quantificadas separadamente. Por exemplo, ao compararmos duas séries fluviométricas sequenciais haverá uma quantidade de informação que foi “transportada” da série a montante para a de jusante. A essa “redundância” denomina-se entropia condicional.

Uma maneira efetiva de expressar a informação sobre a média é utilizando-se de uma distribuição de probabilidades e definindo-se uma nova quantidade chamada entropia da distribuição (SOARES, 2001).

Segundo Fisher, citado por Reckhow e Chapra (1983), *apud* Soares (2001), a informação do valor médio “xm” de uma distribuição probabilística Normal, com variância “ σ^2 ” é calculada por:

$$I(xm) = \frac{1}{\sigma^2} \quad 6.28$$

Isso significa que a informação da média de um conjunto de dados normalmente distribuídos é inversamente proporcional à variância, ou seja, o aumento da variância fará com que a informação da sua média diminua.

Por sua vez, o aumento da variância equivale ao aumento da entropia própria da série, pois, a entropia será grande quando os valores dos eventos possuírem alta variabilidade, ou seja, quando há muitos resultados prováveis, o valor esperado é muito

incerto, ou seja, a quantidade de informação da média é baixa, porém, a informação fornecida pela série é alta.

A aplicação desses conceitos pode ser avocada quando da análise de funções densidade de frequência de séries de dados hidrológicos. Nesse caso, estuda-se a entropia da distribuição de probabilidades utilizando-se distribuições-padrão que venham a melhor representar o comportamento de variáveis hidrológicas em uma bacia hidrográfica. Soares (2001) utilizou esse conceito para propor o redimensionamento da macrolocalização de estações de monitoramento de redes de qualidade de água.

Diante dessas considerações, remete-se às seguintes características dos dados coletados em redes fluviométricas: quando temos estações que possuem série de dados “bem comportada”, as novas informações coletadas nestes pontos não são tão importantes quanto naquelas estações cujos valores coletados não se submetem ao mesmo bom comportamento ou a uma variância maior. Ou seja, um valor de entropia da distribuição alto em uma série dá uma indicação objetiva de que se precisa conhecer mais sobre a amostra coletada naquela estação.

Soares (2001) propõe que *“A entropia associada representa fisicamente a soma das incertezas de alguma variável particular da bacia hidrográfica, que poderá ser reduzida pela amostragem nas M estações.”*

Pode-se resumir a teoria revisada para aplicação à análise de séries fluviométricas com as seguintes definições quanto ao conceito de entropia:

a) entropia própria: característica intrínseca de uma série de dados, analisada isoladamente das demais séries coletadas em diferentes locais em uma bacia hidrográfica, é resultado da equação 6.29;

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx \quad 6.29$$

b) entropia associada ou conjunta: característica relativa à redundância de informações contida em várias séries de dados, considerando a análise conjunta dessas séries, é resultado da equação 6.30;

$$H(x,y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x,y) \log p(x,y) dx dy \quad 6.30$$

c) entropia condicional: característica relativa à redundância seqüencial contida em uma série de dados, considerando a existência de uma outra série, é resultado das equações 6.31 e 6.32.

$$H_x(y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x,y) \log \left(\frac{p(x,y)}{p(x)} \right) dx dy \quad 6.31$$

$$H_y(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x,y) \log \left(\frac{p(x,y)}{p(y)} \right) dx dy \quad 6.32$$

d) entropia da distribuição: característica relativa à média da informação presente em uma função distribuição de probabilidades.

Soares desenvolveu matematicamente a quantificação da entropia associada, cujo comportamento possa ser representado pelas funções distribuição multivariada Normal ou Log-Normal, e propôs a equação 6.33.

$$H(X_m) = \left(\frac{M}{2} \right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2} \right) \ln |C| + \frac{M}{2} - M \ln(\Delta X) \quad 6.33$$

Na qual:

- H = entropia associada ou conjunta
- M = número de amostras (ou estações)
- X_m = vetor de M séries de dados
- |C| = determinante da matriz das covariâncias C (que mede a dependência entre as séries amostrais associadas)
- ΔX = intervalo de amostragem dos dados, assumido o mesmo para todas as estações M

Soares (2001) utilizou essa equação no tratamento de séries de dados de parâmetros de qualidade da água. Para sua aplicação às séries de dados fluviais há de se considerar que estas se comportam em uma bacia hidrográfica com forte “redundância” quanto aos seus valores em função da acumulação das vazões de montante para jusante.

Para o cálculo da entropia condicional, Soares propõe a equação 6.34.

$$H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1} | X_j) = H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}, X_j) - H(X_j) \quad 6.34$$

Na qual:

$$H(X_1, \dots, X_j) = \left(\frac{j}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln|C| + \frac{j}{2} - j \ln(\Delta X) \quad 6.35$$

Nas quais:

$H(X/Y)$ = entropia condicional de X, dado Y

j = número de amostras (ou estações)

$|C|$ = determinante da matriz de covariâncias C (que mede as dependências entre as séries amostrais associadas)

ΔX = intervalo de amostragem dos dados, assumido o mesmo para todas as estações M

Soares propõe, então, o seguinte procedimento para a determinação do redimensionamento de rede de monitoramento da qualidade de água constituída por M estações em uma mesma bacia hidrográfica:

Premissas

1° considerar um mesmo período de tempo (Δt) para todas as séries amostrais das estações, privilegiando aqueles períodos suscetíveis a menores influências com relação à dependência espacial e temporal dos dados coletados;

2° considerar um mesmo intervalo de valores para os dados das amostras (ΔX) para todas as estações (o número de dados “N” nesse intervalo poderá ser menor que o número máximo já que podem existir valores perdidos ou intervalos sem amostragem na série considerada);

3° selecionar o tipo de função densidade de probabilidade que melhor se ajusta aos dados da série, para todas as estações (para os parâmetros relacionados à vazão fluvial sugere-se que seja utilizada a função Log-Normal);

Cálculo da entropia própria de cada série (ou estação)

4° para distribuições multivariadas Normal ou Log-Normal, calcular a entropia própria de cada estação pela equação 6.33, igualando o valor do parâmetro M (n° de estações) na fórmula a 1, conforme equação 6.36;

$$H(x) = \left(\frac{1}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln|C| + \frac{1}{2} - \ln(\Delta X) \quad 6.36$$

5° classificar as estações em ordem decrescente do valor da entropia própria (a estação com maior valor de H será aquela em cujos dados novos coletados se obtém a maior quantidade de informações);

6° numerar as estações em ordem crescente, de 1 a M, definindo a de maior entropia própria com o número 1, a de segunda maior entropia com o número 2 e, assim, sucessivamente;

7° nessa etapa é possível selecionar as estações privilegiando aquelas estações com maior entropia e, conseqüentemente, reduzindo o trabalho seguinte de verificação de redundâncias entre as séries;

Hierarquização das estações pelo cálculo da entropia condicional

8° calcular o menor transporte de informações (TR) entre a estação de maior entropia e cada uma das demais estações ordenadas no passo 6°, por intermédio da equação 6.37, utilizando-se o conceito de entropia condicional;

$$\min [TR(X_1, X_j)] = \min [H(X_1) - H(X_1 | X_j)] \quad 6.37$$

Na qual a entropia condicional é calculada substituindo-se $j=2$ na equação 6.35. Assim tem-se:

$$H(X_1 | X_j) = \left[\ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln|C| + 1 - 2 \ln(\Delta X) \right] - H(X_j) \quad 6.38$$

9° renumerar as estações, a partir da estação n° 2, classificando a estação cujo par com a n° 1 apresenta o menor de transporte de informações como a n° 2, a segunda de menor transporte de informações como a n° 3, e assim por diante;

10° repetir os passos 8° e 9°, sucessivamente, com todas as estações renumeradas até a estação M; esse procedimento resultará na hierarquização final das estações utilizando-se os conceitos de entropia própria e condicional (fisicamente, o significado desse transporte de informação é a dependência de uma estação de monitoramento com relação à informação gerada pela outra, ou seja, quanto maior o transporte de informação entre as estações, quando estas se associam, mais redundante ou desnecessária será a informação);

11° nessa etapa é possível, depois da renumeração final, reduzir mais uma vez o número de estações retirando aquelas que apresentem o maior transporte de informações com as demais;

Cálculo do transporte de informações por associação sucessiva de séries

12° calcular todos os transportes de informações (TR) na cadeia hierarquizada de estações definida no passo 11°, com a associação sucessiva de estações, conforme equação 6.39;

$$TR \left[(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}), X_j \right] = H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}) - \left[H(X_1, X_2, \dots, X_j) - H(X_j) \right] \quad 6.39$$

Na qual “j” variará de 2 a M.

13° elaborar o fluxo do transporte de informações a cada passo, desde a n° 1 até a estação M’ (M’ é igual a M estações menos aquelas que tenham sido retiradas nos passos 7° e 11°), calculando-se a informação percentual transferida, pela equação 6.40;

$$TR \% (X_1, X_j) = \frac{TR \left[(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}), X_j \right]}{H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1})} \quad 6.40$$

14° nesse ponto, pode-se estabelecer qual o valor máximo percentual será aceito na rede de monitoramento (quando o valor do transporte de informações for negativo estará identificado que a estação é muito necessária para a produção das informações relevantes na rede);

15° alternativamente, uma avaliação poderá ser feita por meio da razão (RH) da entropia associada a “k” estações e a entropia associada a todas as estações da rede (M’),

conforme equação 6.41; pode-se estabelecer um valor máximo dessa razão visando orientar a escolha da melhor associação de estações;

$$RH(X1, Xj) = \frac{H(X1, X2, \dots, Xj)}{H(X1, X2, \dots, XM')} \quad 6.41$$

16° para selecionar a melhor combinação de estações pode-se utilizar as alternativas indicadas pelas avaliações de diferentes valores para TR% e RH e calcular o custo respectivo representado por cada uma delas.

6.3 DEFINIÇÃO DE TIPOLOGIAS PARA APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

Nas seções precedentes, verificou-se que os procedimentos e os métodos existentes têm necessidades e exigências específicas para sua aplicação. Podem atender a diversos propósitos ou a objetivos bastante singulares. Há necessidade, então, de que sejam propostos critérios para o julgamento sobre a aplicação de cada um deles visando atender aos interesses dos usuários das informações produzidas em virtude da instalação de uma rede fluviométrica.

Como apresentado na seção 6.1, todos os procedimentos propostos para o planejamento e projeto de redes para o monitoramento fluviométrico devem ser subsidiados pelas respostas às seguintes perguntas:

- a) quais são os objetivos da rede?
- b) a quem interessa as informações a serem disponibilizadas?
- c) qual escala temporal deve ser considerada na coleta dos dados?
- d) qual escala espacial deve ser considerada para o projeto da rede?

Considerando os métodos apresentados neste capítulo, fazem-se nas seções seguintes investigações sobre as prováveis respostas a cada uma dessas questões buscando classificar os métodos para a sua aplicação mais adequada.

6.3.1 Objetivos e interesses de uma rede fluviométrica

Os objetivos a serem atendidos com a instalação de uma rede fluviométrica estão diretamente relacionados com os interesses ou usos que se fazem das informações disponibilizadas por ela. Podem ser resumidos em dois grandes grupos: objetivos hidrológicos e de gestão.

Os objetivos hidrológicos visam atender à necessidade de conhecimento do comportamento dos cursos d'água de uma bacia hidrográfica, minimamente para as seguintes finalidades:

- a) estudos hidrológicos específicos para a implantação de projetos e obras hidráulicas;
- b) estudos hidrológicos para modelagem do comportamento hídrico da bacia;
- c) correlações entre os cursos d'água e o uso e ocupação do solo; e
- d) correlações entre os cursos d'água e as mudanças climáticas globais.

Os objetivos de gestão visam a obter informações que possam subsidiar a tomada de decisão quanto aos usos dos recursos hídricos em determinada bacia, atendendo aos seguintes interesses:

- a) subsídios para o planejamento de uso dos recursos hídricos, atendendo aos múltiplos usuários, às metas de qualidade e quantidade expressas no enquadramento dos corpos d'água e à compatibilização com as demais políticas públicas correlatas;
- b) subsídios à regulação dos usos, principalmente quanto: à alocação dos recursos hídricos, à autorização de seus usos por intermédio da outorga de direito, à fiscalização dos usos e à investigação de fontes clandestinas; e
- c) monitoramento preventivo para sistemas de alerta.

6.3.2 A escala temporal

Como foi visto na seção 5.1.2 desta dissertação, as características do regime fluvial têm forte dependência com a escala temporal devendo-se, inicialmente, defini-la de acordo com os interesses específicos dos usos de recursos hídricos. Podem ser resumidos esses interesses em três grupos: alterações climáticas globais e grandes projetos hidráulicos, usos de recursos hídricos mais freqüentes e usos para alerta.

Para o atendimento às necessidades de estudos sobre alterações climáticas globais e a grandes projetos hidráulicos (que alteram fortemente o regime hidráulico das bacias) devem ser previstas redes com longo tempo de observação, freqüentemente maior que trinta anos de coleta ininterrupta de dados, que não se caracterizam como séries ergódicas ou estacionárias.

Quanto aos usos de recursos hídricos mais freqüentes, aqueles que necessitam de informações em prazo inferior a trinta anos, podem ser listados os seguintes:

- a) usos sazonais para culturas permanentes ou temporárias na agricultura;
- b) regulação de usos para a gestão dos recursos hídricos;
- c) acompanhamento da implementação de planos de recursos hídricos; e

d) subsídio a projetos hidráulicos de pequeno e médio porte.

Por sua vez, os interesses de sistemas de alerta de qualidade e de quantidade, notadamente aqueles necessários a subsidiarem alertas contra enchentes, secas ou acidentes que venham comprometer a qualidade das águas, exigem que a rede fluviométrica seja projetada com maior rigor com relação à escala temporal. Deve ser observado o comportamento hidrodinâmico dos cursos d'água, com implicações tanto na definição específica de locais para instalação das estações quanto na simulação dos parâmetros hidrológicos, assim como, devem ter especial tratamento a especificação dos equipamentos de transmissão de dados a serem tratados e os sistemas de comunicação para a efetividade do sinal de alerta.

6.3.3 A escala espacial

Subsidiado pelas informações da seção 5.1.3, nesta dissertação, vê-se que a escala espacial também deve atender a interesses específicos. Becker (1992, *apud* TUCCI, 2002), conforme apresentado na Tabela 5.1, dá uma importante colaboração para a definição da escala espacial e dos usos e interesses correlatos. Lima (2004) e Santos *et al.* (2001), também contribuem para que possa ser proposto resumir os interesses relativos à escala espacial a três grupos: macrolocalização, microlocalização e locais representativos.

A macrolocalização é utilizada para a determinação de trechos de rios a serem monitorados em uma bacia, em várias escalas, porém, sendo mais importantes para áreas superiores a 1.000 km² e inferiores a 6.000 km², atendendo aos seguintes interesses:

- a) gestão de bacias hidrográficas e regulação de seus usos;
- b) empreendimentos hidráulicos, como barragens e reservatórios;
- c) projetos agrícolas;
- d) abastecimento urbano e industrial;
- e) navegação; e
- f) monitoramento ambiental.

A microlocalização consiste na determinação da seção mais adequada para a instalação de estações, já determinados os trechos a serem monitorados para atender aos usos específicos. Trata-se, então, do detalhamento do projeto da rede e, segundo Santos *et al.* (2001), os locais para instalação das estações nos cursos d'água devem atender aos seguintes requisitos básicos:

- a) trecho reto, margens bem definidas, altas e estáveis;
- b) local de fácil acesso durante cheias e secas;

c) leito regular e estável, preferencialmente rochoso, visando garantir as características morfométricas da seção;

d) local de águas tranquilas, protegido contra ações depredadoras oriundas de grandes cheias;

e) preferencialmente localizadas próximas e a montante de controles hidráulicos (corredeiras, vertedores naturais ou artificiais, longe de remansos, etc.);

f) existência de observador local;

g) boas condições de acesso, interligado a rodovias e outros modos de transporte que garantam sua manutenção e operação em qualquer época do ano.

O projeto de uma rede poderá, ainda, considerar situações específicas quanto à locação representativa. Nesse caso, tanto interesses relativos à gestão dos recursos hídricos quanto aqueles que sejam necessários ao atendimento de sistemas de alerta deverão exigir uma preocupação adicional quanto à escala espacial a ser utilizada.

6.3.4 Tipologias para aplicação dos procedimentos e métodos

A Tabela 6.5 apresenta a correlação dos procedimentos e métodos apresentados nessa dissertação com as propostas de critérios a serem observados, apresentados nas seções 6.3.1 a 6.3.3. Buscou-se classificar cada um deles de acordo com a aplicabilidade ou não do método, da seguinte maneira:

a) quanto aos objetivos/interesses: verificação se o método permite projetar uma rede para atender aos grupos de objetivos;

b) quanto à escala temporal: verificação se o método permite atender à escala temporal, coletando informações suficientes para a análise naqueles períodos;

c) quanto à escala espacial: verificação se o método permite locar as estações atendendo à escala espacial expressa na tabela.

A classificação busca, ainda, verificar as informações que são necessárias para a aplicação do método. Quando não aplicável o método ao objetivo específico ou não necessárias as informações, a célula do quadro não é preenchido.

Dessa forma, permite a Tabela 6.5 que se possa escolher o método mais adequado ao uso que se pretende para uma rede de monitoramento, adequando-o às informações disponíveis para a bacia em questão.

Vê-se dessa análise que a aplicação do método Sharp permite locar estações para objetivos hidrológicos, nas escalas temporais necessárias para estudos de alterações climáticas e que atendam aos usos frequentes de recursos hídricos nas bacias. Esse método não atende, porém, às necessidades específicas das redes de alerta de eventos críticos. O

método Sharp é adequado para a macrolocalização das estações e necessita simplesmente de informações topológicas.

O método utilizando o conceito de entropia, por sua vez, mostra-se aplicável ao atendimento tanto dos objetivos hidrológicos quanto de gestão, assim como para estudos em todas as escalas temporais, menos aquela necessária aos sistemas de alerta. É aplicável, também, a processos para a macrolocalização de estações e para locação representativa quanto à gestão. A grande vantagem desse método seria a mínima necessidade de informações para sua aplicabilidade, somente necessitando de informações fluviométricas iniciais. Essa vantagem, no entanto, é relativa já que, conforme apresentado na seção 6.3.2, somente bacias com séries ergódicas (estacionárias) podem ser objeto da aplicação desse método. As informações sócio-econômicas, apesar de não imprescindíveis, são importantes para a definição do custo-benefício da instalação das estações ou de sua retirada da rede existente.

Tabela 6.5 – Tipologias para aplicação dos procedimentos e métodos para planejamento e projeto de redes fluviométricas

Métodos e Procedimentos	Objetivos e interesses		Escala temporal			Escala espacial			Informações requeridas					
	Hidrológicos	Gestão	Alterações climáticas	Usos de recursos hídricos	Alerta	Macro localização	Micro localização	Locais representativos	Fluviométricas iniciais	Pluviométricas	Cartográficas e topológicas	Ambientais	Gestão	Sociais e econômicas
Procedimento OMM	A	A	A	A	A	A	A	A	N	N	N	N	N	N
Procedimento DNAEE	A	A	A	A		A		A	N	N	N	N	N	N
Procedimento Galvão	A	A	A	A		A			N	N	N	N	N	N
Procedimento FIH (Alemanha)	A	A	A	A	A	A		A					N	
Procedimento Llamas	A	A	A	A	A	A		A	N	N	N	N	N	N
Método Dubreuil	A	A	A	A	A	A		A	N	N	N	N	N	N
Método Cartografia Conjunta	A		A	A		A			N	N	N			
Método Geoestatístico	A		A	A		A			N		N			
Método Karasiev	A		A	A		A			N		N			
Método Sharp	A		A	A		A					N			
Método utilizando entropia	A	A	A	A		A		A	N					
LEGENDA	A – ATENDE		N – NECESSÁRIO			SEM PREENCHIMENTO – NÃO APLICÁVEL OU NÃO-REQUERIDO								

7 PROCEDIMENTO PROPOSTO

Conforme definido dentre os objetivos específicos desta dissertação, e de acordo com a proposta de classificação dos procedimentos e métodos utilizados para o planejamento e o projeto de redes de monitoramento fluviométrico, detalhada na seção 6.3, pretende-se elaborar um procedimento baseado no método de Sharp e utilizando o conceito de entropia que permita atender aos seguintes objetivos básicos:

a) propor a locação de estações considerando, simplesmente, as características topológicas da rede de drenagem e as informações básicas existentes sobre as áreas de drenagem e, se houver, as vazões fluviais nos seus cursos d'águas;

b) verificar qualitativamente as informações disponíveis em cada uma das estações de forma a permitir o julgamento da necessidade de adequação da frequência de coleta em função da “entropia” das séries de dados; e

c) otimizar a rede fluviométrica com a verificação da redundância das informações coletadas nas séries existentes, permitindo que sejam descartadas estações seja em virtude da superposição de informações, ou adensada a rede quando as informações presentes nas séries de dados são muito diversas.

O procedimento deve ser aplicável utilizando-se as informações disponíveis, fato que poderá ser muito adequado na grande maioria das bacias hidrográficas, além de necessitar de ferramentas de cálculo menos sofisticadas, principalmente no que se refere ao processamento de informações georeferenciadas.

Diante dessas características, pretende-se que o método Sharp possa dar a resposta mais expedita e adequada ao lançamento inicial de um arranjo de estações em rede, e que o método utilizando o conceito de entropia possa, utilizando-se das informações constantes em séries de dados existentes, avaliar a qualificação das estações e determinar a melhor seleção dentre as estações e, conseqüentemente, o melhor arranjo para a rede.

A aplicação consorciada dos métodos citados poderá permitir que, dado o melhor conjunto de estações em rede pelo método utilizando o conceito da entropia essas estações sejam privilegiadas quanto à coleta dos dados e que, com a análise comparativa do arranjo proposto pelo método Sharp, possam ser avaliadas as alternativas para o adensamento ou descarte de estações.

7.1 DESCRIÇÃO

Definidos os objetivos da rede de monitoramento, o procedimento proposto é constituído das etapas a seguir:

1ª etapa – coleta de informações

- a) escolher a melhor escala geográfica necessária para a potamografia;
- b) lançar no mapa as estações fluviométricas existentes, ativas e inativas;
- c) reunir as séries de dados de vazões médias mensais dessas estações;
- d) selecionar as bacias hidrográficas sem controle artificial de vazões para definição das estações nas quais as séries de dados possam ser consideradas ergódicas⁴⁷;
- e) verificar o custo de instalação, operação e manutenção das estações da rede;
- f) definir a área mínima de monitoramento a montante da primeira estação.

2ª etapa – tratamento das informações coletadas

- a) demarcar as bifurcações da rede de drenagem;
- b) calcular a área de drenagem de cada ramo das bifurcações;
- c) calcular a área de drenagem de cada estação existente;
- d) calcular a vazão média de cada série e estação;
- e) calcular a vazão específica média de cada série e estação;
- f) calcular a vazão específica média nas bifurcações, devidamente ponderada pelas áreas de drenagem.

3ª etapa – aplicação do método Sharp

- a) ordenar a rede de drenagem definindo como magnitude do ramo a sua área de drenagem;
- b) ordenar a rede de drenagem definindo como magnitude do ramo a vazão média nessa seção (igual à vazão específica média na bifurcação do exutório do ramo multiplicada pela área de drenagem da bacia a montante), no caso da existência destes dados;
- c) identificar o exutório da bacia e definir sua magnitude;
- d) dividir as magnitudes do exutório por dois visando encontrar os primeiros centróides da bacia⁴⁸;

⁴⁷ Podem ser utilizadas nesse método as séries de vazões naturais reconstituídas, expurgados os valores oriundos de vazões controladas.

e) se uma rede é dividida em duas partes pelo primeiro centróide, o centróide da parte superior da bacia pode ser determinado da mesma maneira pela qual foi determinado o primeiro centróide;

f) para a parte inferior da bacia, no entanto, o centróide pode ser determinado pela renumeração completa das magnitudes dos ramos desta área e, daí por diante, conforme definido para toda a bacia; alternativamente, podem-se utilizar as equações 7.1 e 7.2 para essa definição.

$$Mc' = \left[\frac{u - Mu + 1}{2} \right] \quad 7.1$$

$$Mc'' = Mc' + Mu \quad 7.2$$

Nas quais:

- u = magnitude do exutório da bacia
- Mc' = centróide da parte inferior da bacia
- Mc'' = centróide da parte superior da bacia
- Mu = magnitude do exutório da parte superior da bacia

g) repetir o procedimento acima até que toda a rede de drenagem seja dividida;

h) o primeiro centróide definirá o nível hierárquico n° 1, dividindo a rede em duas metades; o segundo centróide definirá o nível hierárquico n° 2, dividindo a rede em quatro partes; o terceiro centróide dividirá a rede em oitavas, definindo o nível hierárquico n° 3; e, assim, sucessivamente;

i) definir as redes ótimas utilizando a proposta de Dixon, pela qual se verifica o custo⁴⁹ mínimo para a instalação das estações, entre todos os níveis hierárquicos determinados pelo arranjo de Sharp, calculado pela equação 7.3.

$$\min \left\{ \text{Custo} = \sum_{i=1}^u \left(\frac{ni}{u} \right) \log_2 (ni) \right\} \quad 7.3$$

⁴⁸ Ao se utilizar a magnitude igual à área de drenagem ou à vazão média estimada, funções descontínuas na bacia, deve-se estabelecer qual a diferença aceitável para a locação de cada um dos centróides.

⁴⁹ Segundo Dixon, o custo para cada centróide é definido pela multiplicação do logaritmo na base 2 da magnitude do ramo em que se localiza pela razão entre esta magnitude e a magnitude do exutório da bacia.

Na qual:

u = magnitude do exutório da bacia

n_i = magnitude do trecho das estações fixas

j) no final dessa etapa poderão ser apresentados dois arranjos de rede: um para cada uma das variáveis utilizadas, seja a área de drenagem ou as vazões médias quando existirem dados anteriores.

4ª etapa – premissas para a aplicação do método de otimização de rede fluviométrica utilizando o conceito de entropia

a) selecionar estações localizadas nas bacias com comportamento hidrológico ergódico e cuja área de drenagem seja superior à área mínima definida na 1ª etapa;

b) considerar um mesmo período de tempo (Δt) para todas as séries amostrais das estações, privilegiando aqueles períodos suscetíveis a menores influências com relação à dependência espacial e temporal dos dados coletados;

c) utilizar a vazão específica como a variável a ser analisada;

e) selecionar o tipo de função densidade de probabilidade que melhor se ajusta aos dados da série para todas as estações⁵⁰.

5ª etapa - cálculo da entropia própria de cada série (ou estação)

a) para distribuições multivariadas Normal ou Log-Normal, calcular a entropia própria de cada estação pela equação 7.4, abaixo;

$$H(x) = \left(\frac{1}{2}\right) \ln(2) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln\{\sigma^2\} + \frac{1}{2} - \ln(\Delta X_i) \quad 7.4$$

Na qual:

$H(X)$ = entropia própria de X

σ^2 = variância da série amostral

ΔX_i = intervalo de amostragem dos dados (sugere-se que, dentro do mesmo intervalo de tempo, considerando-se que as séries amostrais serão representadas

por uma função distribuição de probabilidades com mesmo número de faixas de valores, seja considerado ΔX igual a 1 para a série com o menor número de valores na faixa e, nas séries em que haja número maior, ΔX deve ser igual à razão entre o número de valores da faixa desta série pelo menor número dentre todas as demais).

- b) classificar as estações em ordem decrescente do valor da entropia própria⁵¹;
- c) numerar as estações em ordem crescente, de 1 a M, definindo a de maior entropia própria como número 1, a de segunda maior entropia como número 2 e, assim, por diante;
- d) nessa etapa é possível selecionar as estações privilegiando aquelas com maior entropia e, conseqüentemente, reduzindo o trabalho seguinte de verificação de redundâncias para o cálculo da entropia condicional. Resultam, então, M' estações.

6ª etapa - hierarquização das estações pelo cálculo da entropia condicional

a) calcular o menor transporte de informações (TR), por intermédio da equação 7.5, entre a estação de maior entropia (número 1) e cada uma das demais estações ordenadas na 5ª etapa, utilizando-se o conceito de entropia condicional;

$$\min [TR(X_1, X_j)] = \min [H(X_1) - H(X_1 | X_j)] \quad 7.5$$

A entropia condicional será calculada, substituindo-se j por 2 na equação 7.6. Assim, tem-se:

$$\min \{TR(X_1, X_j)\} = \min \left\{ H(X_1) - \left[\ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln|C| + 1 - 2 \ln(\Delta X) - H(X_j) \right] \right\} \quad 7.6$$

Na qual:

$$\Delta X = (X_1 X_j)^{1/2} \text{ (ver Apêndice A)}$$

j = de 2 a M', onde M' é igual às M estações da rede menos aquelas que tenham sido retiradas na 5ª etapa.

⁵⁰ Normalmente, para os parâmetros relacionados à vazão fluvial, pode ser utilizada a função Log-Normal.

⁵¹ A estação com maior valor de H(x) será aquela em cujos dados novos coletados se obtém a maior quantidade de informação.

b) renumerar as estações, a partir da estação número 2 da 5ª etapa, classificando a estação cujo par com a n° 1 apresenta o menor de transporte de informações como novo número 2;

c) repetir os passos “a” e “b” com todas as estações renumeradas até a estação M’, resultando esse procedimento na hierarquização final das estações utilizando-se os conceitos de entropia própria e condicional, conforme representado na equação 7.7;

$$\min \left\{ TR(X_k, X_j) \right\} = \min \left\{ H(X_k) - \left[\ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln|C| + 1 - 2 \ln(\Delta X) - H(X_j) \right] \right\} \quad 7.7$$

Na qual “k” é igual à última estação hierarquizada no passo anterior. O “k” varia de 2 a “M’-2” e o “j” varia de “k+1” a M’.

d) nessa etapa, pode ser reduzido o número de estações retirando àquelas que apresentem o maior transporte de informações relativamente às demais, após a renumeração final. Resultam, então, M’’ estações.

Quando o número de amostragens das séries for muito diferente entre estas, dentro de um mesmo período, deve-se utilizar ΔX igual a 1 para todos os cálculos de entropia própria e associada e proceder à execução desta etapa e das etapas posteriores, também, considerando esta hierarquização alternativa.

7ª etapa – otimização das estações pelo cálculo do transporte de informações

a) calcular todos os transportes de informações (TR) na cadeia hierarquizada de estações definida na 6ª etapa, com a associação sucessiva de estações, conforme equação 7.8;

$$TR \left[(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}), X_j \right] = H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}) - \left[H(X_1, X_2, \dots, X_j) - H(X_j) \right] \quad 7.8$$

Na qual “j” variará de 2 a M’’ e a entropia associada calculada pela equação 7.9.

$$H(X_1, \dots, X_j) = \left(\frac{j}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln|C| + \frac{j}{2} - j \ln(\Delta X) \quad 7.9$$

Na qual:

$$\Delta X = (X_1 X_j)^{1/j} \text{ (ver Apêndice A)}$$

b) construir o diagrama de fluxo do transporte das informações, a cada passo, desde a estação número 1 até a estação M'', calculando-se a informação percentual transferida, pela equação 7.10;

$$TR \% (X_1, X_j) = \frac{TR \left[(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}), X_j \right]}{H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1})} \quad 7.10$$

c) nesse ponto, pode-se estabelecer o valor máximo percentual que se aceitará na rede de monitoramento⁵²;

d) alternativamente, por meio da razão da entropia associada (RH) a "j" estações e a entropia associada a todas as estações da rede (M''), conforme equação 7.11, pode-se estabelecer um valor máximo para essa razão visando à escolha da melhor associação de estações;

$$RH(X_1, X_j) = \frac{H(X_1, X_2, \dots, X_j)}{H(X_1, X_2, \dots, X_{M''})} \quad 7.11$$

e) para selecionar a melhor combinação de estações devem ser analisadas as alternativas indicadas nas alíneas "c" e "d", para TR%(X1,Xj) e RH(X1,Xj), respectivamente, e calcular o custo de cada uma delas, considerando o valor apresentado na alínea "e" da 1ª etapa desse procedimento.

8ª etapa – análise comparativa dos resultados do método Sharp e do método utilizando o conceito de entropia

⁵² Quando o valor do transporte de informações for negativo estará identificado que esta estação é muito necessária para a produção das informações relevantes na rede.

a) analisar a alternativa de rede ótima segundo o método Sharp, definida na 1ª etapa, e aquela definida na 7ª etapa após a aplicação do método utilizando o conceito de entropia;

b) verificar o atendimento às diretrizes de gestão para a bacia e elaborar a proposta de arranjo para a rede.

7.2 FLUXOGRAMA

Apresenta-se na Figura 7.1 o fluxograma resumido correspondente à descrição detalhada do procedimento apresentado na seção 7.1.

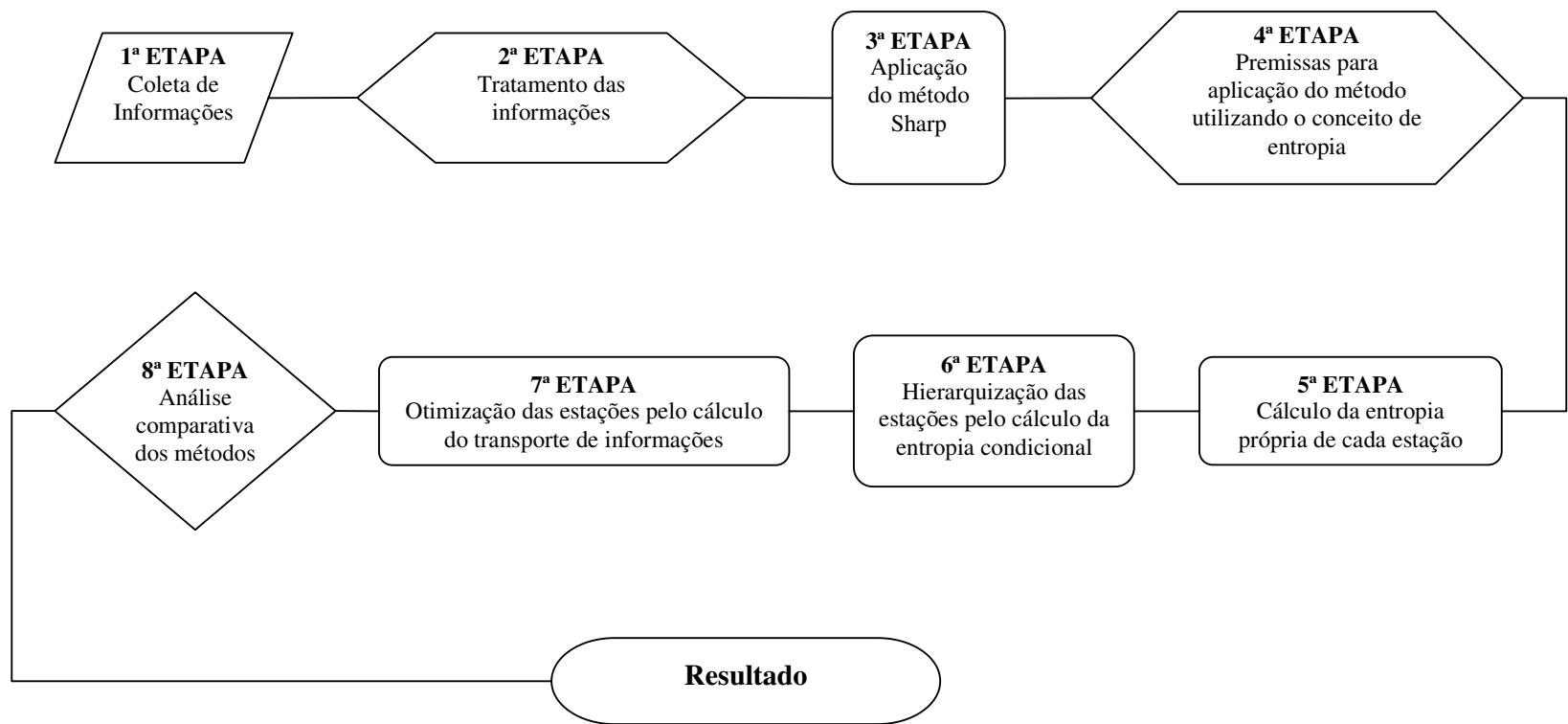


Figura 7.1 – Fluxograma do procedimento proposto para a avaliação e o redimensionamento de redes fluviométricas através do método utilizando o conceito de entropia e do método Sharp

7.3 ESTUDOS DE CASO

Visando a aplicação do procedimento proposto para avaliação e redimensionamento de uma rede fluviométrica, foram estudadas regiões hidrográficas que, dentre suas sub-bacias, tivessem as características topológicas e hidrológicas adequadas e, também, as informações necessárias requeridas por este procedimento.

Utilizando-se do procedimento OMM para definição de padrão de densidades de estações fluviométricas, consideradas as condições de relevo da bacia, foi elaborada avaliação preliminar de toda a rede cadastrada na ANA considerando a divisão hidrográfica nacional e as unidades de planejamento e gestão definidas no âmbito de cada estado federado.

A proposta da OMM é descrita na seção 6.1.1 desta dissertação.

Inicialmente, foi elaborado mapa das declividades do terreno no Brasil e classificadas essas declividades quanto às condições fisiográficas de relevo previstas na Tabela 6.1, para cada uma das unidades de planejamento e gestão apresentadas por Coelho *et al.* (2005).

A Figura 7.2 apresenta o mapa das declividades e a Figura 7.3 o resultado da aplicação do procedimento OMM. As unidades de planejamento foram classificadas segundo o atendimento aos valores padrão para a densidade mínima de estações fluviométricas, aqui consideradas todas aquelas que estão localizadas “*on stream*” (no próprio corpo d’água), segundo as seguintes condições:

a) unidades de MÉDIA densidade: $0,5VP < DE < 1,5VP$ 7.12

b) unidades SUBDENSAS: $DE < 0,5 VP$ 7.13

c) unidades SUPERDENSAS: $DE > 1,5 VP$ 7.14

Nas quais:

VP = densidade padrão OMM

DE = densidade verificada de estações na unidade espacial

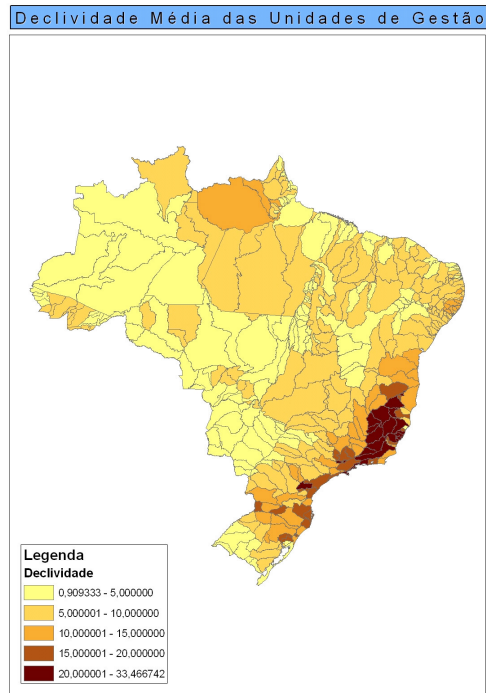


Figura 7.2 – Mapa de declividades do terreno brasileiro (ANA, 2006)

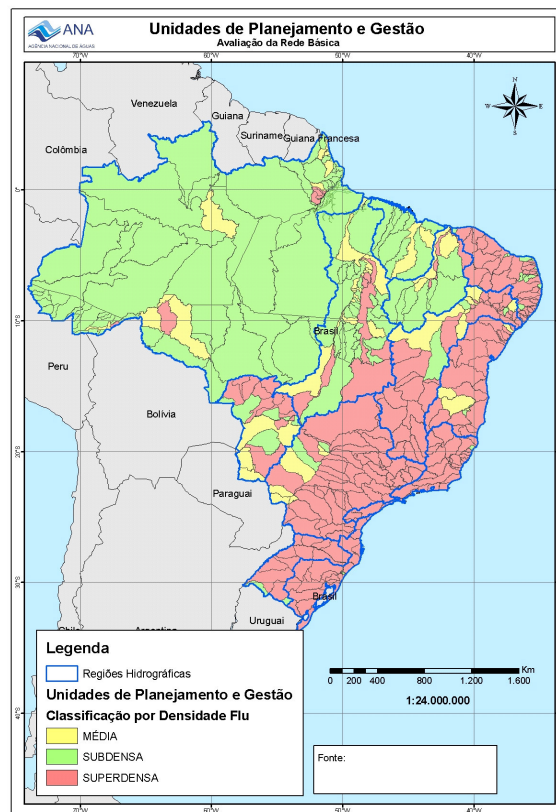


Figura 7.3 – Avaliação da rede fluviométrica “on stream” cadastrada na ANA – segundo padrão OMM para a densidade de estações (ANA, 2006)

A Região do rio São Francisco (RHSF) foi, então, escolhida por contar com diferentes avaliações da rede instalada em suas sub-bacias, além de possuir todas as condições requeridas pelo procedimento proposto. A Figura 7.4 apresenta um mapa geral dessa região com suas unidades de planejamento e gestão.



Figura 7.4 – Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias (ANA, 2004)

A RHSF é dividida em 4 (quatro) grandes regiões, assim denominadas: Alto, Médio, Submédio e Baixo. Essas regiões apresentam características hídricas peculiares quanto à disponibilidade hídrica, aos usos das águas e às necessidades de gerenciamento desses recursos. A região do Alto é caracterizada por maior ocupação econômica e demográfica, pela urbanização mais intensa, com índices pluviométricos maiores e relevo mais acidentado. A região do Médio possuiu uma ocupação urbana menor, uma pluviometria decrescente, áreas com agricultura irrigada intensiva e relevo menos acidentado. A região do Submédio possui os mais baixos índices pluviométricos registrados na bacia do São Francisco, regiões mais acidentadas geograficamente, áreas de

intensa irrigação, grandes empreendimentos hidrelétricos e a represa de Sobradinho, maior reservatório artificial construído no país. Por último, a região do Baixo caracteriza-se pelo clima fortemente influenciado por chuvas mais intensas no litoral, vazões fluviais controladas e uma média ocupação humana.

O plano de recursos hídricos da bacia do rio São Francisco, elaborado pela ANA e aprovado pelo Comitê da Bacia, reúne importante diagnóstico sobre seus recursos hídricos e as figuras ilustrativas que se apresentam a seguir: Figura 7.5 apresenta as isoietas pluviométricas e sua distribuição nessas regiões; Figura 7.6 apresenta um balanço entre os usos e a disponibilidade hídrica.

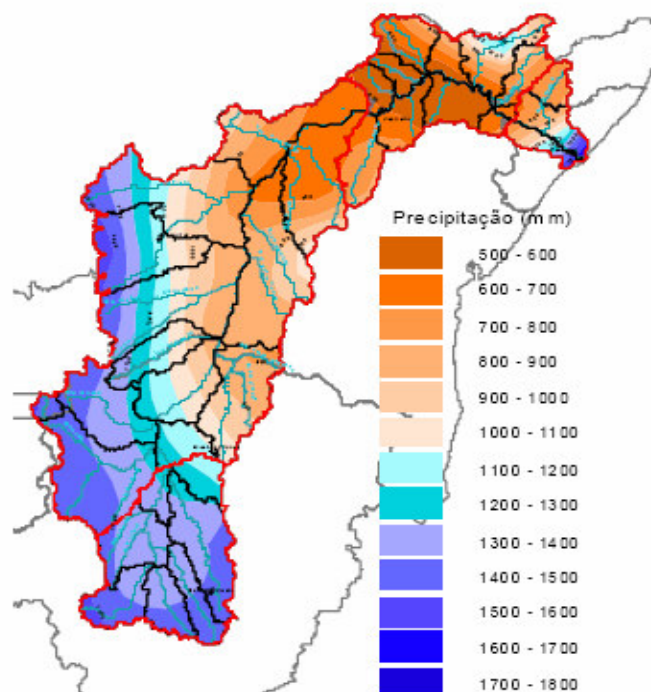


Figura 7.5 – Distribuição pluviométrica na Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias (ANA, 2004)

Observa-se na Figura 7.6 a clara identificação da margem direita do rio São Francisco como a região de menor disponibilidade hídrica aos diversos usos. Nas bacias afluentes da margem esquerda, somente nas regiões do Alto Grande e do Paracatu há, atualmente, indícios de uso mais intenso.

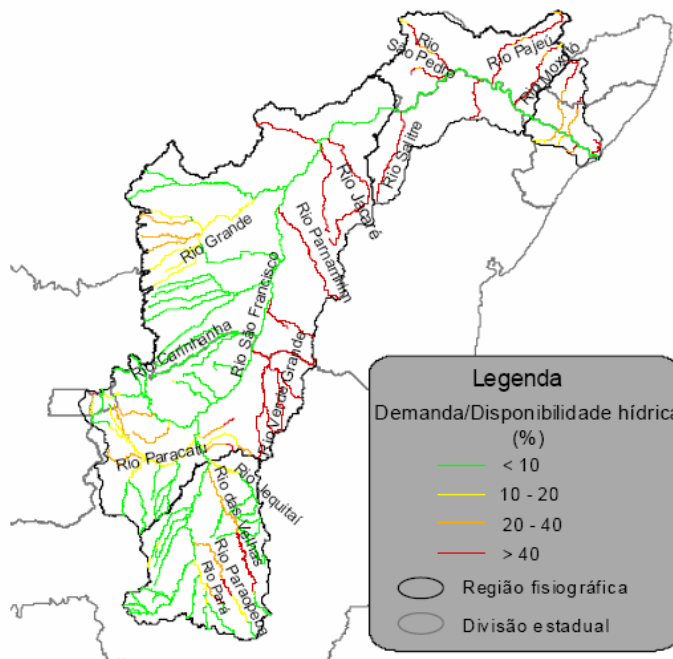


Figura 7.6 – Balanço entre demanda e disponibilidade hídricas na Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias – 2004 (ANA, 2004)

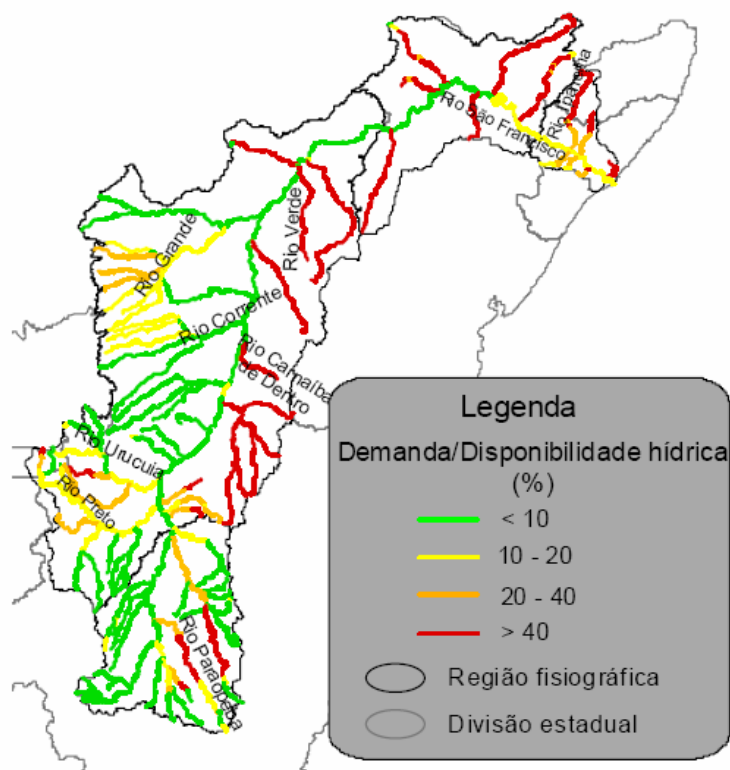


Figura 7.7 – Balanço entre demanda e disponibilidade hídricas na Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias – previsão para 2015 (ANA, 2004)

O prognóstico dos usos para 2015 é apresentado na Figura 7.7. Observa-se a intensificação das deficiências hídricas em algumas sub-bacias, indicando as áreas mais sujeitas aos conflitos pelo uso dos recursos hídricos, conforme mostra a Figura 7.8.

As situações acima apresentadas e a necessidade de verificar a adequação da rede de monitoramento fluviométrico para a gestão dos recursos hídricos, principalmente quanto à alocação das águas e ao controle dos conflitos, orientaram que fossem escolhidas as seguintes bacias para aplicação do procedimento proposto: rio das Velhas, Alto Grande e Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro. Nas seções seguintes serão melhor detalhadas cada uma dessas regiões.

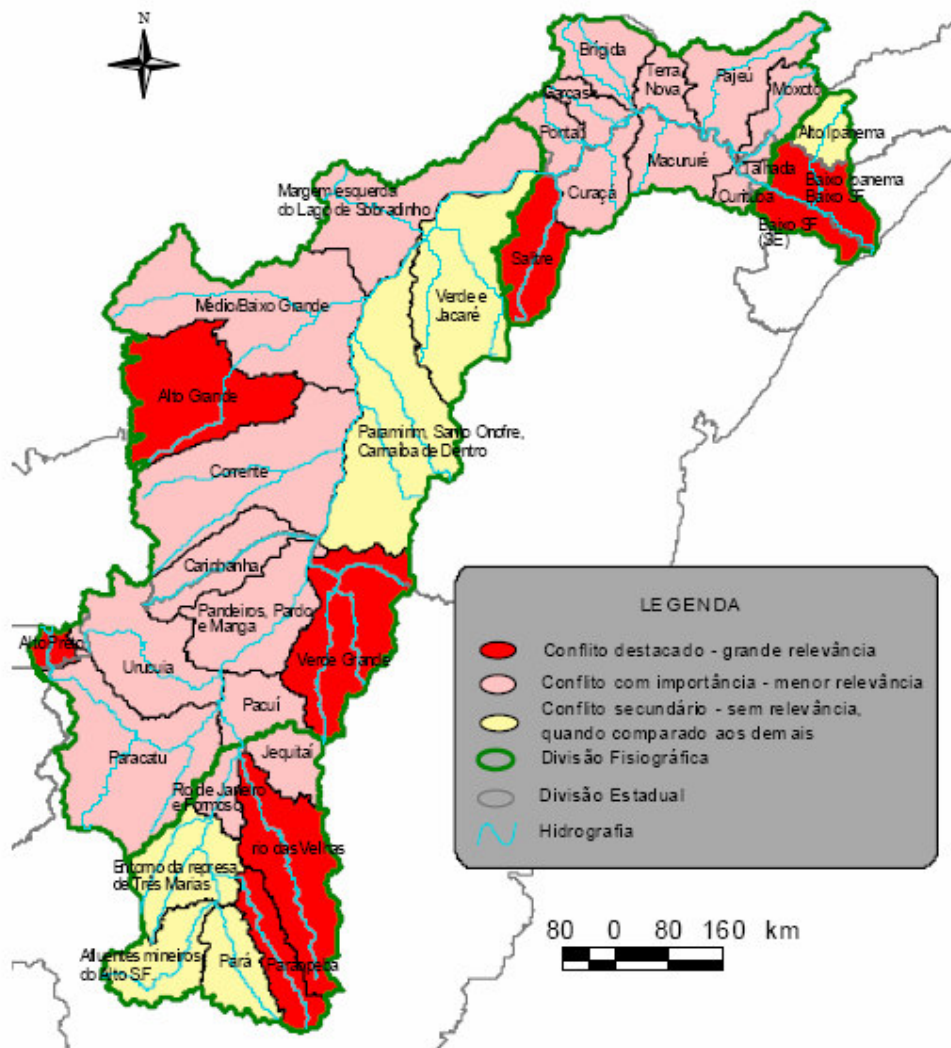


Figura 7.8 – Classificação quanto aos aspectos conflitivos entre usos e usuários de recursos hídricos na Região Hidrográfica do rio São Francisco e suas sub-bacias (ANA, 2004)

7.3.1 Região Hidrográfica do Rio das Velhas

7.3.1.1 A potamografia

A região hidrográfica do rio das Velhas tem área de drenagem de 27.815 km² e densidade de drenagem de 0,29 km/km². O curso principal é o rio das Velhas, com 688 km de extensão e vazão média anual de 320 m³/s. Seus cursos d'água não possuem barramentos significativos para a regularização das vazões.

7.3.1.2 A rede de monitoramento existente

A rede de monitoramento fluviométrico é constituída das estações apresentadas na Tabela 7.1, num total de 105 estações. Segundo esse quantitativo, pelos padrões OMM, essa bacia é considerada superdensa relativamente à locação de estações, com 265 km²/estação. Observa-se que apenas 29 (27%) estações possuem medição de descarga líquida e, dessas, 12 (11%) estações apresentam área de drenagem superior a 1.000 km². Há uma predominância de estações com medição de parâmetros de qualidade (67 estações) o que sinaliza uma necessidade de gestão mais acentuada sob o aspecto da qualidade da água nessa bacia.

Para efeito de estudo foram selecionadas as estações com área de drenagem superior a 1.000 km² e com tempo de coleta superior a 36 meses (ou 3 anos), conforme apresentadas na Tabela 7.2.

Quanto ao tempo de coleta dos dados de descarga líquida das 11 estações selecionadas, pode-se observar que todas possuem tempo superior a 28 anos, porém, com períodos diferentes de medição.

O custo anual de operação e manutenção de estações será considerado de R\$ 4.000,00 reais⁵³.

7.3.2 Região Hidrográfica do Alto Rio Grande

7.3.2.1 A potamografia

A região hidrográfica do Alto rio Grande tem área de drenagem de 33.544,13 km² e densidade de drenagem de 0,13 km/km². O curso principal é o rio Grande, com 204 km de extensão e vazão média anual de 155 m³/s. Seus cursos d'água não possuem barramentos significativos para a regularização das vazões.

7.3.2.2 A rede de monitoramento existente

A rede de monitoramento fluviométrico é constituída das estações apresentadas na Tabela 7.3. Segundo esse quantitativo, pelos padrões OMM, essa bacia é considerada

⁵³ Valor médio utilizado pela ANA para a estimativa dos custos de operação e manutenção. O custo de instalação é muito variável em virtude do tipo de estação e da sua localização.

superdensa relativamente à locação de estações. Observa-se que, 22 (88%) estações possuem medição de descarga líquida e, dessas, 12 (48%) estações apresentam área de drenagem superior a 1.000 km². Há uma predominância de estações com medição de descarga o que pode sinalizar uma necessidade de gestão mais acentuada sob o aspecto do controle quantitativo nessa bacia.

Para efeito de estudo foram escolhidas as estações com área de drenagem superior a 1.000 km² e com tempo de coleta superior a 36 meses (ou 3 anos), conforme apresentadas na Tabela 7.4.

Quanto ao tempo de coleta dos dados de descarga líquida das 9 estações selecionadas, 7 estações possuem tempo superior a 28 anos e 2 estações possuem dados entre 3 e 6 anos. O custo anual de operação e manutenção de estações será considerado de R\$ 4.000,00 reais.

7.3.3 Região Hidrográfica Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro

7.3.3.1 A potamografia

A região hidrográfica, formada pelas bacias dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro, tem área de drenagem de 46.494 km² e densidade de drenagem de 0,19 km/km². Seus cursos d'água não possuem barramentos significativos quanto à regularização de vazões, sendo muitos deles considerados intermitentes. Trata-se de uma região com muitos rios intermitentes e baixa vazão específica.

7.3.3.2 A rede de monitoramento existente

A rede de monitoramento fluviométrico é constituída das estações apresentadas na Tabela 7.5. Segundo esse quantitativo, pelos padrões OMM, essa bacia é considerada subdensa relativamente à locação de estações. Observa-se que, 10 (72%) estações possuem medição de descarga líquida e, dessas, apenas 2 estações apresentam área de drenagem superior a 1.000 km². A escassez de estações não sinaliza a necessidade de gestão expressa nas Figuras 7.5 e 7.6, que aponta uma disponibilidade hídrica insuficiente aos usos registrados.

Para efeito de estudo foram escolhidas as estações com área de drenagem superior a 1.000 km² e com tempo de coleta superior a 36 meses (ou 3 anos), conforme apresentadas na Tabela 7.6. Quanto ao tempo de coleta dos dados pode-se observar que uma única estação foi selecionada por possuir cerca de 16 anos de medições realizadas.

Nas Tabelas 7.1 a 7.6, o tipo de estação F é relativo àquelas sem medições de descarga líquida, FD àquelas com medição de descarga líquida e Q àquelas com medição somente de parâmetros de qualidade da água.

Tabela 7.1 – Estações fluviométricas da Região Hidrográfica do rio das Velhas
folha 1 – 2

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	TIPO DE ESTAÇÃO	TOTAL POR TIPO
41152000	FAZENDA VERTENTES	-20,2340	-43,7370	F	
41185550	RIO ITABIRITO (jus. cidade It	-20,2240	-43,8030	F	
41185450	CÓRREGO DA ONÇA (mont. rio It	-20,2230	-43,8090	F	
41140080	UHE RIO DE PEDRAS	-20,2140	-43,7320	F	
41237500	PCH MARZAGÃO	-19,8860	-43,8790	F	
41320000	PCH MADAME DENISE	-19,6430	-43,6910	F	
41718000	PCH QUARTEL	-18,6500	-43,8500	F	
41719080	PCH PARAUNA (HULHA BRANCA)	-18,6330	-43,9670	F	
41990002	VÁRZEA DA PALMA	-17,5960	-44,7170	F	9
41179500	RIBEIRÃO MATA PORCOS (conf. r	-20,3140	-43,7880	FD	
41153100	RIO MARACUJÁ (próx. rep. rio	-20,2620	-43,6970	FD	
41180500	AVH-040	-20,2240	-43,8030	FD	
41193000	UHE E NOVA - JUSANTE	-20,1250	-43,8650	FD	
41194000	PONTE MG-030	-20,0280	-43,8280	FD	
41196010	RIBEIRÃO DOS MACACOS (mont. R	-20,0270	-43,8270	FD	
41199998	HONÓRIO BICALHO - MONTANTE	-20,0240	-43,8230	FD	
41200455	RIBEIRÃO DA PRATA (próx. conf	-19,9680	-43,8030	FD	
41210000	CAETÉ	-19,9030	-43,6660	FD	
41260000	PINHÕES	-19,7050	-43,8150	FD	
41300000	TAQUARAÇU	-19,7050	-43,6870	FD	
41250000	VESPASIANO	-19,6870	-43,9210	FD	
41340000	PONTE RAUL SOARES	-19,5590	-43,9120	FD	
41380000	PONTE PRETA	-19,4640	-43,9020	FD	
41440000	REPRESA - RIBEIRÃO JEQUITIBA	-19,3833	-44,1500	FD	
41440005	REPRESA - JUSANTE	-19,3710	-44,1530	FD	
41539998	FAZENDA DA CONTAGEM - MONTANT	-19,2920	-44,1300	FD	
41690000	PCH PACÍFICO MASCARENHAS	-19,2830	-43,5830	FD	
41410000	JEQUITIBA	-19,2310	-44,0250	FD	
41716000	UCAT	-19,0500	-43,6670	FD	
41600020	FAZENDA CAPÃO DO GADO	-19,0290	-44,1940	FD	
41600000	PIRAPAMA	-19,0110	-44,0380	FD	
41650002	PONTE DO LICÍNIO - JUSANTE	-18,6730	-44,1940	FD	
41780002	PRESIDENTE JUSCELINO - JUSANT	-18,6450	-44,0500	FD	
41685000	PONTE DO PICÃO	-18,6050	-44,2840	FD	
41818000	SANTO HIPÓLITO (ANA/CEMIG)	-18,3060	-44,2220	FD	
41940000	PONTE DO BICUDO	-18,1960	-44,5700	FD	
41890000	ESTAÇÃO DE CURIMATAI	-17,9960	-44,1780	FD	
41990000	VÁRZEA DA PALMA	-17,5940	-44,7140	FD	29
41172000	RIBEIRÃO DO SILVA (mont. cór.	-20,3610	-43,8980	Q	
41179000	RIBEIRÃO MATA PORCOS (próx. c	-20,3170	-43,7850	Q	
41149000	RIO DAS VELHAS (Mont. São Bar	-20,3140	-43,5760	Q	
41151000	FAZENDA ÁGUA LIMPA - JUSANTE	-20,3050	-43,6160	Q	
41151200	RIO DAS VELHAS (Jus. Ribeirão	-20,3040	-43,6150	Q	
41180000	ITABIRITO - LINIGRAFO	-20,3010	-43,7980	Q	
41181100	RIBEIRÃO CARIOCA (mont. confl	-20,2890	-43,8050	Q	
41185300	RIO ITABIRITO (Mont. Itabirit	-20,2780	-43,8020	Q	
41153000	RIO MARACUJÁ (Mont. Conf. Cór	-20,2730	-43,7080	Q	
41185400	CÓRREGO CARIOCA (mont. cidade	-20,2560	-43,8210	Q	
41186000	RIO ITABIRITO	-20,2330	-43,8000	Q	
41185500	CÓRREGO DA ONÇA (mont. rio It	-20,2240	-43,8040	Q	
41171000	REPRESA RIO DE PEDRAS (corpo	-20,2130	-43,7310	Q	
41171500	RIO DAS VELHAS (Mont. rio Ita	-20,2070	-43,7470	Q	
41185600	RIO ITABIRITO (jus. Cór. da O	-20,2020	-43,8060	Q	
41190400	RIBEIRÃO CONGONHAS (mont. rep	-20,1820	-43,8910	Q	
41185700	CÓRREGO MOLEQUE (mont. rio It	-20,1810	-43,8140	Q	
41190500	CORPO DA BARRAGEM LAGOA GRAND	-20,1770	-43,9420	Q	
41190600	CÓRREGO LAGOA GRANDE (mont. r	-20,1740	-43,9260	Q	

Tabela 7.1 – Estações fluviométricas da Região Hidrográfica do rio das Velhas
folha 2 – 2

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	TIPO DE ESTAÇÃO	TOTAL POR TIPO
41181000	RIO DAS VELHAS (mont. foz rio	-20,1670	-43,7830	Q	
41190700	LAGOA DAS CODORNAS	-20,1650	-43,8910	Q	
41190300	CÓRREGO FAZENDA VELHA (mont.	-20,1460	-43,7940	Q	
41190200	RIO DAS VELHAS (jus. rio Itab	-20,1380	-43,7930	Q	
41190800	RIBEIRÃO CAP. DA MATA (mont.	-20,1370	-43,8930	Q	
41191000	RIO DAS VELHAS (jus. fos do l	-20,1330	-43,8000	Q	
41193200	RIO DO PEIXE (mont. rio das V	-20,1240	-43,8690	Q	
41195100	RIO DAS VELHAS (jus. rio Acim	-20,0880	-43,7890	Q	
41195300	CÓRREGO FECHOS (barragem prin	-20,0730	-43,9640	Q	
41195500	CÓRREGO SECO (captação Fecho	-20,0660	-43,9620	Q	
41195400	CÓRREGO FECHOS (barragem auxi	-20,0660	-43,9530	Q	
41196000	RIBEIRÃO MACACOS (mont. Rio	-20,0270	-43,8270	Q	
41200050	RIO DAS VELHAS (em Bela Fama,	-20,0190	-43,8290	Q	
41200010	RIO DAS VELHAS (em BELA FAMA)	-20,0170	-43,8170	Q	
41200320	CÓRREGO MUTUCA (cap. mutuca-b	-20,0110	-43,9680	Q	
41200350	CÓRREGO CAPÃO DO BOI (cap. mu	-20,0090	-43,9690	Q	
41200060	RIO DAS VELHAS (em Bela Fama,	-20,0080	-43,8310	Q	
41200070	RIBEIRÃO ÁGUA SUJA (mont. foz	-20,0020	-43,8880	Q	
41200450	RIO DAS VELHAS (jus. cór. da	-19,9840	-43,8180	Q	
41200370	RIBEIRÃO ÁGUA SUJA (mont. rio	-19,9820	-43,8240	Q	
41200420	CÓRREGO DA MINA (mont. rio da	-19,9790	-43,8210	Q	
41200360	CÓRREGO DA BARRAGEM (em Nova	-19,9770	-43,8620	Q	
41200460	RIBEIRÃO DA PRATA (mont. Rio	-19,9740	-43,7960	Q	
41200400	RIO DAS VELHAS (jus. rib. ÁGU	-19,9670	-43,8170	Q	
41229000	RIO DAS VELHAS (mont. foz rib	-19,9170	-43,8330	Q	
41200500	RIO DAS VELHAS (mont. rib. Sa	-19,9050	-43,8180	Q	
41236000	RIBEIRÃO ARRUDAS (prox. foz)	-19,9000	-43,8500	Q	
41230500	RIBEIRÃO SABARÁ (prox. foz)	-19,8830	-43,8170	Q	
41237000	RIO DAS VELHAS (jus. ribeirão	-19,8500	-43,8670	Q	
41237300	RIBEIRÃO DO ONÇA (mont. foz r	-19,8380	-43,9240	Q	
41261000	RIO DAS VELHAS (jus. rib. do	-19,8010	-43,8700	Q	
41250500	RIBEIRÃO DA MATA (prox. foz)	-19,7000	-43,8830	Q	
41251000	RIO DAS VELHAS (jus. rib.da M	-19,7000	-43,8170	Q	
41250100	RIBEIRÃO DAS NEVES (mont. rib	-19,6290	-44,0360	Q	
41300800	RIO TAQUARAÇU (prox. foz)	-19,6170	-43,8000	Q	
41350000	RIO DAS VELHAS (pte.Raul Soar	-19,5400	-43,9020	Q	
41380200	RIO DAS VELHAS (jus. rib. Jab	-19,3500	-44,0000	Q	
41460001	RIBEIRÃO JEQUITIBA (prox. foz	-19,2330	-44,0170	Q	
41600010	SANTANA DO PIRAPAMA (Rio das	-19,0170	-44,0330	Q	
41600100	RIBEIRÃO SANTO ANTÔNIO (prox.	-18,7000	-44,2170	Q	
41730000	RIO CIPÓ (mont. foz rio parau	-18,6830	-43,9830	Q	
41660000	RIO DAS VELHAS (mont. rio Par	-18,6780	-44,2120	Q	
41780005	RIO PARAUNA (prox. foz)	-18,6330	-44,0500	Q	
41825100	RIO DAS VELHAS (entre Rio Par	-18,3000	-44,2330	Q	
41826000	RIO DAS VELHAS (jus. Rio Pard	-18,2170	-44,3500	Q	
41950000	RIO BICUDO (prox. foz)	-18,1330	-44,5330	Q	
41990050	RIO DAS VELHAS (cidade Várzea	-17,6120	-44,7020	Q	
41990100	VÁRZEA DA PALMA			Q	67
					105

Tabela 7.2 – Estações selecionadas da Região Hidrográfica do rio das Velhas

CÓDIGO	NOME	INÍCIO DA SÉRIE	ÚLTIMA LEITURA	MESES LIDOS	"ANOS" LIDOS	VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA (l/s/km ²)	ÁREA (km ²)
41890000	ESTAÇÃO DE CURIMATAI	jul/65	jun/06	461	38,42	12,18	1.431,00
41199998	HONÓRIO BICALHO - MONTANTE	jan/73	jun/06	393	32,75	18,40	1.642,00
41940000	PONTE DO BICUDO	mai/73	jun/06	348	29,00	9,60	1.922,00
41260000	PINHÕES	out/75	jun/06	357	29,75	15,94	3.928,00
41780002	PRESIDENTE JUSCELINO - JUSAN	jan/78	jun/06	343	28,58	19,46	3.944,19
41340000	PONTE RAUL SOARES	fev/38	jun/06	711	59,25	15,84	4.780,00
41410000	JEQUITIBA	jun/65	jun/06	492	41,00	14,92	6.292,00
41600000	PIRAPAMA	jul/56	jun/06	567	47,25	13,16	7.838,00
41650002	PONTE DO LICÍNIO - JUSANTE	mai/76	jun/06	359	29,92	12,25	10.980,00
41818000	SANTO HIPÓLITO (ANA/CEMIG)	jan/43	jun/06	718	59,83	12,63	16.528,00
41990000	VÁRZEA DA PALMA	jun/38	jun/06	795	66,25	11,56	25.940,00

Tabela 7.3 – Estações fluviométricas da Região Hidrográfica do Alto rio Grande

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	TIPO DE ESTAÇÃO	TOTAL POR TIPO
46416000	BR-020	-12,6890	-45,9280	FD	
46430000	FAZENDA SÃO JOÃO	-12,4880	-45,8880	FD	
46417000	PONTE DO MOSQUITO	-12,6900	-45,8510	FD	
46440000	FAZENDA SOYA	-12,7150	-45,6160	FD	
46561500	PONTE RIO CACHORRO	-11,9970	-45,5800	FD	
46561000	FAZENDA SÃO ROQUE	-11,9510	-45,4390	FD	
46431000	FEMEAS GRANDES	-12,4720	-45,2510	FD	
46425000	ESTIVAS	-12,4900	-45,2000	FD	
46452080	UHE ALTO FEMEAS	-12,4520	-45,1900	FD	
46420000	RODA VELHA DE BAIXO	-12,7150	-45,8450	FD	
46400000	CASA REAL	-13,0010	-45,6310	FD	
46570000	PONTE SERAFIM - MONTANTE	-11,8950	-45,6080	FD	
46784000	SAVANA	-11,7880	-45,6020	FD	
46530000	LIMOEIRO	-12,2870	-45,5490	FD	
46520000	RIO DE PEDRAS	-12,1940	-45,4900	FD	
46455000	DEROCAL	-12,4110	-45,1220	FD	
46590000	NOVA VIDA - MONTANTE	-11,8540	-45,1210	FD	
46543000	FAZENDA REDENÇÃO	-12,1360	-45,1030	FD	
46415000	SÍTIO GRANDE	-12,4310	-45,0860	FD	
46550000	BARREIRAS	-12,1530	-45,0090	FD	
46490000	FAZENDA COQUEIRO	-12,4040	-44,9530	FD	
46555000	BREJO NOVO	-12,2300	-44,9330	FD	22
46542000	CAPTAÇÃO RIO DE ONDAS	-12,1160	-45,0880	Q	
46541000	CAPTAÇÃO DE ÁGUAS DA CARGIL	-12,1230	-45,0870	Q	
46552000	PONTE DO RIO GRANDE	-12,1490	-45,0030	Q	3
					25

Tabela 7.4 – Estações selecionadas da Região Hidrográfica do Alto rio Grande

CÓDIGO	NOME	INÍCIO DA SÉRIE	ÚLTIMA LEITURA	MESES LIDOS	"ANOS" LIDOS	VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA (l/s/km ²)	ÁREA (km ²)
46520000	RIO DE PEDRAS	dez/00	few/06	62	5,17	13,38	1.215,00
46530000	LIMOEIRO	ago/02	jul/06	41	3,42	13,13	1.409,50
46570000	PONTE SERAFIM - MONTANTE	jan/77	ago/06	341	28,42	6,95	2.099,00
46490000	FAZENDA COQUEIRO	few/05	ago/06	342	28,50	1,47	4.470,00
46415000	SÍTIO GRANDE	jan/77	ago/06	339	28,25	6,64	4.983,00
46543000	FAZENDA REDENÇÃO	jan/77	ago/06	324	27,00	9,55	5.200,00
46455000	DEROCAL	jan/77	ago/06	353	29,42	8,76	5.750,00
46590000	NOVA VIDA - MONTANTE	jan/77	ago/06	349	29,08	7,43	6.918,00
46550000	BARREIRAS	abr/34	ago/06	818	68,17	4,62	23.250,00

Tabela 7.5 – Estações fluviométricas da Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	TIPO DE ESTAÇÃO	TOTAL POR TIPO
46110000	TAMBURIL	-12,6670	-42,9980	F	
47016000	XIQUE-XIQUE	-10,8170	-42,7300	F	
46240000	FAZENDA TAMBORIL	-13,0410	-42,5880	F	
46220000	FAZENDA CACHOEIRA	-13,4190	-42,1610	F	4
45480000	BOM JESUS DA LAPA	-13,2570	-43,4350	FD	
46035000	GAMELEIRA	-12,8690	-43,3800	FD	
46035001	GAMELEIRA	-12,8680	-43,3800	FD	
45460000	URTIGA	-13,9890	-43,2940	FD	
46360000	MORPARÁ	-11,5580	-43,2830	FD	
46150000	IBOTIRAMA	-12,1830	-43,2230	FD	
46105000	PARATINGA	-12,6890	-43,1890	FD	
46998000	BARRA	-11,0920	-43,1360	FD	
46295000	PONTE BR-242	-12,2450	-42,7640	FD	
46200000	ÉRICO CARDOSO	-13,4160	-42,1400	FD	10
46003000	PORTO	-13,0890	-43,4640	Q	
45300000	BARRINHA - GRUTA	-13,2550	-43,4350	Q	
46150002	CAPTAÇÃO DA SAAE - IBOTIRAMA	-12,1880	-43,2240	Q	
46104000	CAPTAÇÃO DA SAAE - PARATINGA	-12,6890	-43,1910	Q	
46968000	FOZ DO RIO GRANDE	-11,0930	-43,1400	Q	5
					19

Tabela 7.6 – Estações selecionadas da Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro

CÓDIGO	NOME	INÍCIO DA SÉRIE	ÚLTIMA LEITURA	MESES LIDOS	"ANOS" LIDOS	VAZÃO ESPECÍFICA MÉDIA (l/s/km ²)	ÁREA (km ²)
46295000	PONTE BR-242	jan/77	ago/06	202	16,83	0,96	11.952,00

8 RESULTADOS

8.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO SHARP

Apresenta-se, a seguir, o desenvolvimento da 2ª e 3ª etapas do procedimento proposto, referente à aplicação do método Sharp, para as três regiões hidrográficas.

8.1.1 Região Hidrográfica do Rio das Velhas

2ª etapa – tratamento das informações coletadas

- demarcar as bifurcações da rede de drenagem;
- calcular a área de drenagem de cada ramo das bifurcações;
- calcular a área de drenagem de cada estação existente;

A Figura 8.2 apresenta os resultados referentes aos itens acima para áreas de drenagem superiores a 1.000 km².

- calcular a vazão média de cada série e estação;
- calcular a vazão específica média de cada série e estação;
- calcular a vazão específica média nas bifurcações, devidamente ponderada pelas áreas de drenagem.

O gráfico das vazões específicas médias das estações é apresentado na Figura 8.1, assim como a equação da curva de tendência $q \times A$. Esse gráfico é uma alternativa para a determinação das vazões em regiões desprovidas de estações de monitoramento.

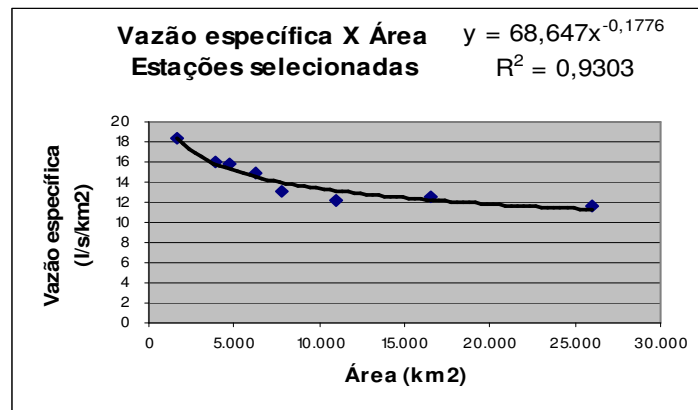


Figura 8.1 – Gráfico das vazões específicas médias pela área de drenagem Região Hidrográfica do rio das Velhas

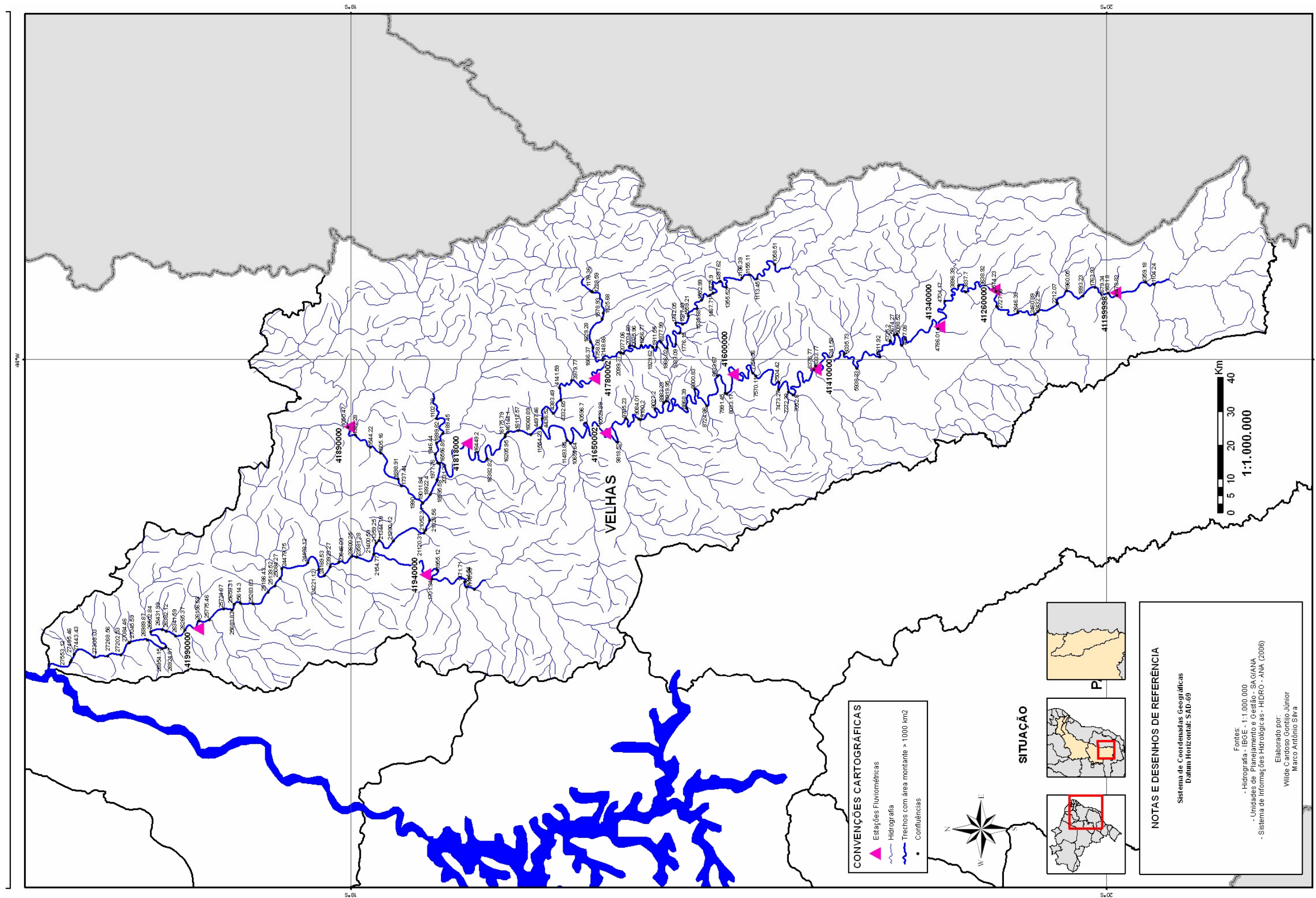


Figura 8.2 – Áreas de drenagem de estações e bifurcações
Região Hidrográfica do rio das Velhas

3ª etapa – aplicação do método Sharp

a) ordenar a rede de drenagem definindo como magnitude do ramo a sua área de drenagem;

b) ordenar a rede de drenagem definindo como magnitude do ramo a vazão média nesta seção (igual à vazão específica média na bifurcação do exutório do ramo multiplicada pela área de drenagem da bacia a montante), no caso da existência desses dados;

c) identificar o exutório da bacia e definir sua magnitude;

d) dividir as magnitudes do exutório por dois visando encontrar os primeiros centróides da bacia;

e) se uma rede é dividida em duas partes pelo primeiro centróide, o centróide da parte superior da bacia pode ser determinado da mesma maneira pela qual foi determinado o primeiro centróide;

f) para a parte inferior da bacia, no entanto, o centróide pode ser determinado pela renumeração completa das magnitudes dos ramos desta área e, daí por diante, conforme definido para toda a bacia;

g) repetir o procedimento acima até que toda a rede de drenagem seja dividida⁵⁴;

h) o primeiro centróide definirá o nível hierárquico n° 1, dividindo a rede em duas metades; o segundo centróide definirá o nível hierárquico n° 2, dividindo a rede em quatro partes; o terceiro centróide dividirá a rede em oitavas, definindo o nível hierárquico n° 3; e, assim, sucessivamente;

i) definir as redes ótimas utilizando a proposta de Dixon, pela qual se verifica o custo mínimo para a instalação das estações, entre todos os níveis hierárquicos determinados pelo arranjo de Sharp, calculado pela equação 6.42.

$$\min \left\{ \text{Custo} = \sum_{i=1}^u \left(\frac{ni}{u} \right) \log_2 (ni) \right\} \quad 6.42$$

Na qual:

u = magnitude do exutório da bacia

ni = magnitude do trecho das estações fixas

⁵⁴ Ao se utilizar a magnitude igual à área de drenagem ou à vazão média estimada, funções descontínuas na bacia, estabeleceu-se a diferença aceitável para a locação de cada um dos centróides menor que 10%.

j) no final dessa etapa poderão ser apresentados dois arranjos de rede: um para cada uma das variáveis utilizadas, seja a área de drenagem ou as vazões médias quando existirem dados anteriores.

A Região Hidrográfica do Rio das Velhas apresenta dados de vazões que possibilitam o lançamento de centróides considerando as duas variáveis: área de drenagem e vazão média. As Tabelas 8.1 e 8.2 apresentam os resultados da aplicação do método de Dixon. Conforme pode-se observar, utilizando-se ambas as variáveis, esse método indica que a melhor locação das estações fixas seria segundo o nível hierárquico 2, aquela que apresenta o maior custo benefício para a implantação da rede de monitoramento nessa bacia. Os valores, no entanto, são muito próximos daqueles previstos para os níveis 3 e 4 o que sugere uma avaliação mais detalhada das alternativas. Neste estudo, buscando uma rede mais abrangente, optou-se pelo nível hierárquico 4.

Tabela 8.1 – Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) - Região Hidrográfica do rio das Velhas

Nível hierárquico	Sub-nível	Área do centróide (km ²)	Área (km ²)	Magnitude do trecho - Mi	Razão Mi / u	LOG2 (Mi)	Custo por nível (Dixon)
1	1.1	13.907,50	13.907,50	14,19	0,50	9,54	4,77
Custo total Nível 1							4,77
2	2.1	6.953,75	6.953,75	7,10	0,25	2,83	0,71
2	2.2	20.861,25	20.861,25	21,29	0,75	4,41	3,31
Custo total Nível 2							2,01
3	3.1	3.476,88	3.476,88	3,55	0,13	1,83	0,23
3	3.2	10.430,63	10.430,63	10,64	0,38	3,41	1,28
3	3.3	17.384,38	17.384,38	17,74	0,63	4,15	2,59
3	3.4	24.338,13	24.338,13	24,83	0,88	4,63	4,06
Custo total Nível 3							2,04
4	4.1	1.738,44	1.738,44	1,77	0,06	0,83	0,05
4	4.2	5.215,31	5.215,31	5,32	0,19	2,41	0,45
4	4.3	8.692,19	8.692,19	8,87	0,31	3,15	0,98
4	4.4	12.169,06	12.169,06	12,42	0,44	3,63	1,59
4	4.5	15.645,94	15.645,94	15,97	0,56	4,00	2,25
4	4.6	19.122,81	19.122,81	19,51	0,69	4,29	2,95
4	4.7	22.599,69	22.599,69	23,06	0,81	4,53	3,68
4	4.8	26.076,56	26.076,56	26,61	0,94	4,73	4,44
Custo total Nível 4							2,05

Tabela 8.2 – Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a vazão média) - Região Hidrográfica do rio das Velhas

Nível hierárquico	Sub-nível	Vazão média do centróide (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Magnitude do trecho - Mi	Razão Mi / u	LOG2 (Mi)	Custo por nível (Dixon)
1	1.1	160,84	160,84	8,12	0,50	5,08	2,54
Custo total Nível 1							2,54
2	2.1	80,42	80,42	4,06	0,25	2,02	0,51
2	2.2	241,25	241,25	12,19	0,75	3,61	2,71
Custo total Nível 2							1,61
3	3.1	40,21	40,21	2,03	0,13	1,02	0,13
3	3.2	120,63	120,63	6,09	0,38	2,61	0,98
3	3.3	201,04	201,04	10,16	0,63	3,34	2,09
3	3.4	281,46	281,46	14,22	0,88	3,83	3,35
Custo total Nível 3							1,64
4	4.1	20,10	20,10	1,02	0,06	0,02	0,00
4	4.2	60,31	60,31	3,05	0,19	1,61	0,30
4	4.3	100,52	100,52	5,08	0,31	2,34	0,73
4	4.4	140,73	140,73	7,11	0,44	2,83	1,24
4	4.5	180,94	180,94	9,14	0,56	3,19	1,80
4	4.6	221,15	221,15	11,17	0,69	3,48	2,39
4	4.7	261,36	261,36	13,20	0,81	3,72	3,02
4	4.8	301,57	301,57	15,23	0,94	3,93	3,68
Custo total Nível 4							1,65

A Figura 8.3 apresenta a locação dos centróides na bacia, com sua devida magnitude e nível hierárquico, para ambas as variáveis consideradas. Nem todos centróides apresentados nas Tabelas 8.1 e 8.2 puderam ser lançados por estarem localizados em magnitude maior que 10% daquela prevista nas respectivas Tabelas.

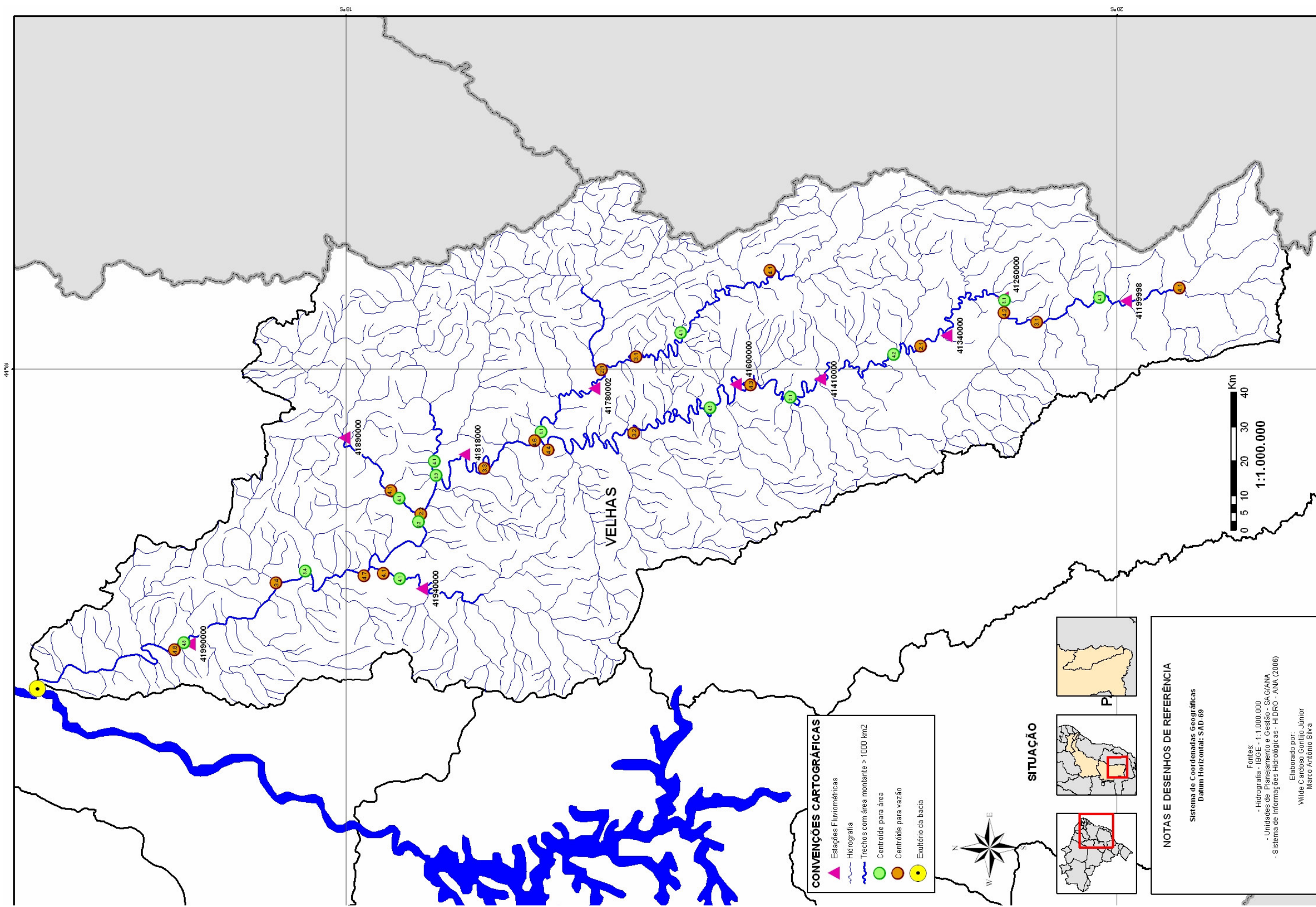


Figura 8.3 – Localização de estações fixas por nível hierárquico de centróide Região Hidrográfica do rio das Velhas

8.1.2 Região Hidrográfica do Alto rio Grande

Para os resultados apresentados nessa seção repetiram-se as etapas 2ª e 3ª detalhadas na seção 8.1.1.

O gráfico das vazões específicas médias das estações é apresentado na Figura 8.4, assim como a equação da curva de tendência $q \times A$. Esse gráfico é uma alternativa para a determinação das vazões em regiões desprovidas de estações de monitoramento.

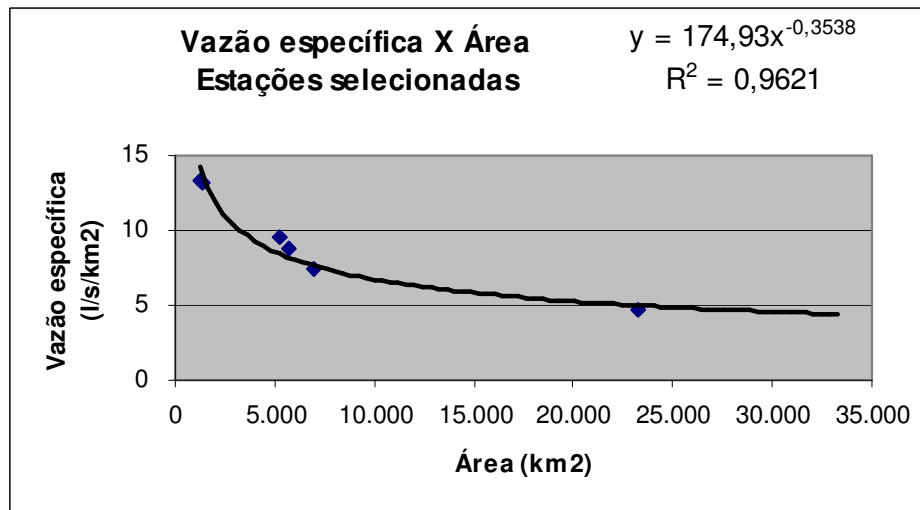


Figura 8.4 – Gráfico das vazões específicas médias pela área de drenagem Região Hidrográfica do Alto rio Grande

A Figura 8.5 apresenta os resultados para áreas de drenagem superiores a 1.000 km².

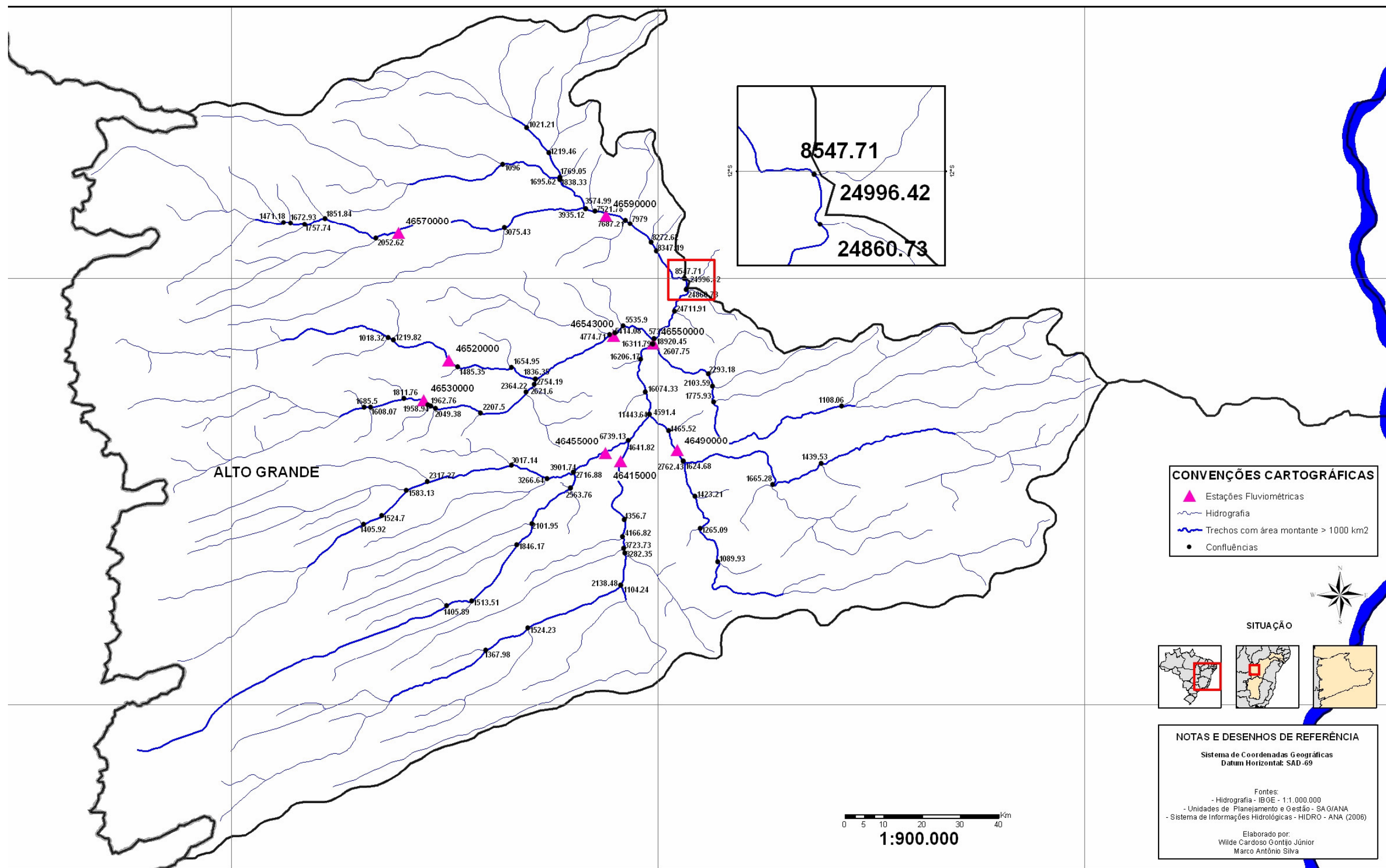


Figura 8.5 – Áreas de drenagem de estações e bifurcações
Região Hidrográfica do Alto rio Grande

As Tabelas 8.3 e 8.4 apresentam os resultados da aplicação do método de Dixon, utilizando-se as variáveis vazão média e área de drenagem, respectivamente.

Pode-se observar, na Figura 8.4, que a relação entre a área de drenagem e a vazão média varia muito nessa região: áreas muito pequenas são responsáveis por vazões médias altas e áreas muito grandes possuem uma vazão, comparativamente à vazão a montante, pequena. Isto, em verdade, reflete as diferenças existentes entre as cabeceiras da bacia, ora em regiões montanhosas e com boa precipitação média, ora em regiões com relevo mais ameno e com índice pluviométrico semi-árido.

Esse fato impactou bastante a resposta da aplicação do método Sharp para as diferentes variáveis utilizadas. A Tabela 8.3 mostra que a razão da magnitude máxima sobre a magnitude mínima resulta num valor próximo daquele apresentado para a região do rio das Velhas, no entanto, quando comparamos com a amplitude das magnitudes considerando a área de drenagem (Tabela 8.4), este valor é muito inferior, fato que não ocorre na região do rio das Velhas. Dessa forma, há a proposição de muitos mais centróides na Tabela 8.4.

Tabela 8.3 – Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a vazão média) - Região Hidrográfica do Alto rio Grande

Nível hierárquico	Sub-nível	Vazão média do centróide (m3/s)	Vazão (m3/s)	Magnitude do trecho - Mi	Razão Mi / u	LOG2 (Mi)	Custo por nível (Dixon)
1	1.1	77,71	77,71	8,01	0,50	4,35	2,18
Custo total Nível 1							2,18
2	2.1	38,86	38,86	4,00	0,25	2,00	0,50
2	2.2	116,57	116,57	12,01	0,75	3,59	2,69
Custo total Nível 2							1,60
3	3.1	19,43	19,43	2,00	0,13	1,00	0,13
3	3.2	58,28	58,28	6,01	0,38	2,59	0,97
3	3.3	97,14	97,14	10,01	0,63	3,32	2,08
3	3.4	135,99	135,99	14,01	0,88	3,81	3,33
Custo total Nível 3							1,63
4	4.1	9,71	9,71	1,00	0,06	0,00	0,00
4	4.2	29,14	29,14	3,00	0,19	1,59	0,30
4	4.3	48,57	48,57	5,01	0,31	2,32	0,73
4	4.4	68,00	68,00	7,01	0,44	2,81	1,23
4	4.5	87,42	87,42	9,01	0,56	3,17	1,78
4	4.6	106,85	106,85	11,01	0,69	3,46	2,38
4	4.7	126,28	126,28	13,01	0,81	3,70	3,01
4	4.8	145,71	145,71	15,02	0,94	3,91	3,66
Custo total Nível 4							1,64

Tabela 8.4 – Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) - Região Hidrográfica do Alto rio Grande

Nível hierárquico	Sub-nível	Área do centróide (km ²)	Área (km ²)	Magnitude do trecho - Mi	Razão Mi / u	LOG2 (Mi)	Custo por nível (Dixon)
1	1.1	16.808,00	16.808,00	33,62	0,50	9,73	4,86
Custo total Nível 1							4,86
2	2.1	8.404,00	8.404,00	16,81	0,25	4,07	1,02
2	2.2	25.212,00	25.212,00	50,42	0,75	5,66	4,24
Custo total Nível 2							2,63
3	3.1	4.202,00	4.202,00	8,40	0,13	3,07	0,38
3	3.2	12.606,00	12.606,00	25,21	0,38	4,66	1,75
3	3.3	21.010,00	21.010,00	42,02	0,63	5,39	3,37
3	3.4	29.414,00	29.414,00	58,83	0,88	5,88	5,14
Custo total Nível 3							2,66
4	4.1	2.101,00	2.101,00	4,20	0,06	2,07	0,13
4	4.2	6.303,00	6.303,00	12,61	0,19	3,66	0,69
4	4.3	10.505,00	10.505,00	21,01	0,31	4,39	1,37
4	4.4	14.707,00	14.707,00	29,41	0,44	4,88	2,13
4	4.5	18.909,00	18.909,00	37,82	0,56	5,24	2,95
4	4.6	23.111,00	23.111,00	46,22	0,69	5,53	3,80
4	4.7	27.313,00	27.313,00	54,63	0,81	5,77	4,69
4	4.8	31.515,00	31.515,00	63,03	0,94	5,98	5,60
Custo total Nível 4							2,67
5	5.1	1.050,50	1.050,50	2,10	0,03	1,07	0,03
5	5.2	3.151,50	3.151,50	6,30	0,09	2,66	0,25
5	5.3	5.252,50	5.252,50	10,51	0,16	3,39	0,53
5	5.4	7.353,50	7.353,50	14,71	0,22	3,88	0,85
5	5.5	9.454,50	9.454,50	18,91	0,28	4,24	1,19
5	5.6	11.555,50	11.555,50	23,11	0,34	4,53	1,56
5	5.7	13.656,50	13.656,50	27,31	0,41	4,77	1,94
5	5.8	15.757,50	15.757,50	31,52	0,47	4,98	2,33
5	5.9	17.858,50	17.858,50	35,72	0,53	5,16	2,74
5	5.10	19.959,50	19.959,50	39,92	0,59	5,32	3,16
5	5.11	22.060,50	22.060,50	44,12	0,66	5,46	3,59
5	5.12	24.161,50	24.161,50	48,32	0,72	5,59	4,02
5	5.13	26.262,50	26.262,50	52,53	0,78	5,71	4,46
5	5.14	28.363,50	28.363,50	56,73	0,84	5,83	4,92
5	5.15	30.464,50	30.464,50	60,93	0,91	5,93	5,37
5	5.16	32.565,50	32.565,50	65,13	0,97	6,03	5,84
Custo total Nível 5							2,67

Conforme pode-se observar, utilizando-se ambas as variáveis, esse método indica que a melhor locação das estações fixas seria segundo o nível hierárquico 2, aquela que apresenta o maior custo benefício para a implantação da rede de monitoramento nessa bacia. Os valores, no entanto, são muito próximos daqueles previstos para os níveis 3 e 4, na Tabela 8.3, e 3 a 5, na Tabela 8.4, o que sugere uma avaliação mais detalhada das alternativas. Neste

estudo, buscando uma rede mais abrangente, optou-se pelo nível hierárquico 4, quando consideramos a vazão média e pelo nível hierárquico 5, para as áreas de drenagem como variável a ser considerada.

A Figura 8.6 apresenta a locação dos centróides na bacia, com sua devida magnitude e nível hierárquico, para ambas as variáveis consideradas. Nem todos os centróides apresentados nas Tabelas 8.3 e 8.4 puderam ser lançados por estarem localizados em magnitude maior que 10% daquela prevista nas respectivas Tabelas.

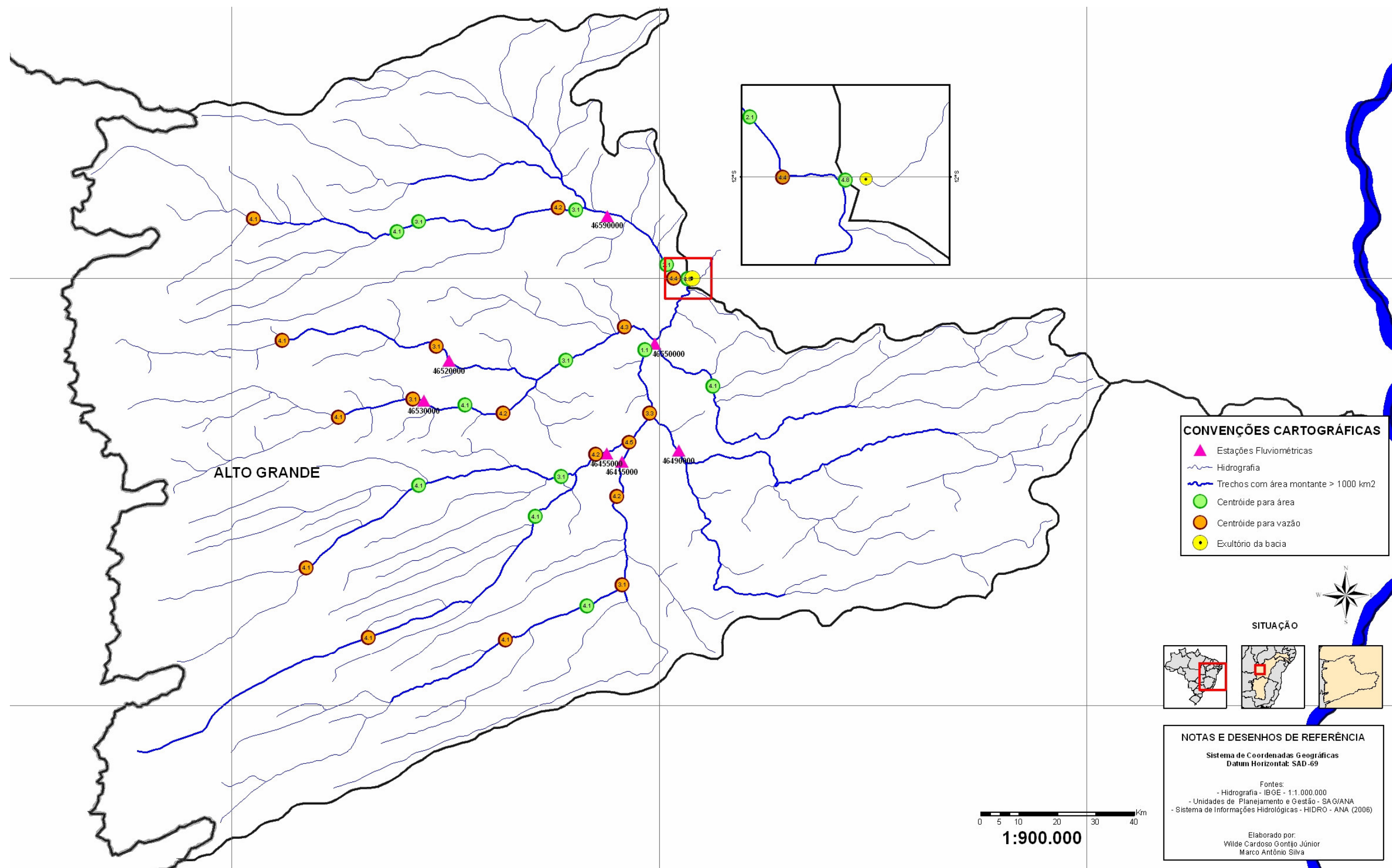


Figura 8.6 – Localização de estações fixas por nível hierárquico de centróide Região Hidrográfica do Alto rio Grande

8.1.3 Região Hidrográfica Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro

Para os resultados apresentados nessa seção repetiram-se as etapas 2ª e 3ª detalhadas na seção 8.1.1. A Figura 8.7 apresenta os resultados para áreas de drenagem superiores a 1.000 km². Nessas bacias não há rede de monitoramento e informações suficientes para que seja analisado o comportamento hidrológico dos cursos d'água utilizando-se dados de vazão. Assim, a 2ª etapa prevista no procedimento proposto não é aplicável.

As três bacias que nomeiam a região têm áreas de 7.209,78 km² (Carnaíba de Dentro), 5.068,71 km² (Santo Onofre) e 17.144,72 km² (Paramirim). A área total dessas bacias é de 29.423,21 km², ou seja, 63,28% de toda a região hidrográfica. Outras 7 bacias com área superior a 1.000 km² fazem parte dessa região. Considerando a área abrangida pelas 3 bacias principais bastante significativa, foi aplicado nestas o método Sharp utilizando-se a área de drenagem para a definição da magnitude, separadamente, o que proporcionou a apresentação dos resultados do método de Dixon, conforme se vê nas Tabelas 8.5, 8.6 e 8.7.

Como era de se esperar em função das diferenças entre as áreas de cada uma das bacias, a aplicação do método Sharp apresenta níveis hierárquicos diferentes para cada uma delas. Para a bacia do rio Carnaíba de Dentro, com amplitude máxima da magnitude igual a 8,01, a Tabela 8.5 apresenta a sugestão de nível hierárquico 2, com possibilidade de que o nível hierárquico 3 possa também ser utilizado. Para a bacia do rio Santo Onofre, com amplitude máxima da magnitude igual a 5,63, a Tabela 8.6 sugere o nível hierárquico 2 como máximo, enquanto, para a bacia do rio Paramirim, com maior área e amplitude da magnitude, a Tabela 8.7 sugere o nível hierárquico ótimo 2, com possibilidade de que os níveis 3 e 4 sejam utilizados.

A Figura 8.8 apresenta a locação desses centróides na bacia, com sua devida magnitude e nível hierárquico, além dos exutórios das demais bacias com área superior a 1.000km² nesta região. Nem todos centróides apresentados nas Tabelas 8.5, 8.6 e 8.7 puderam ser lançados por estarem localizados em magnitude maior que 10% daquela prevista nas respectivas Tabelas.

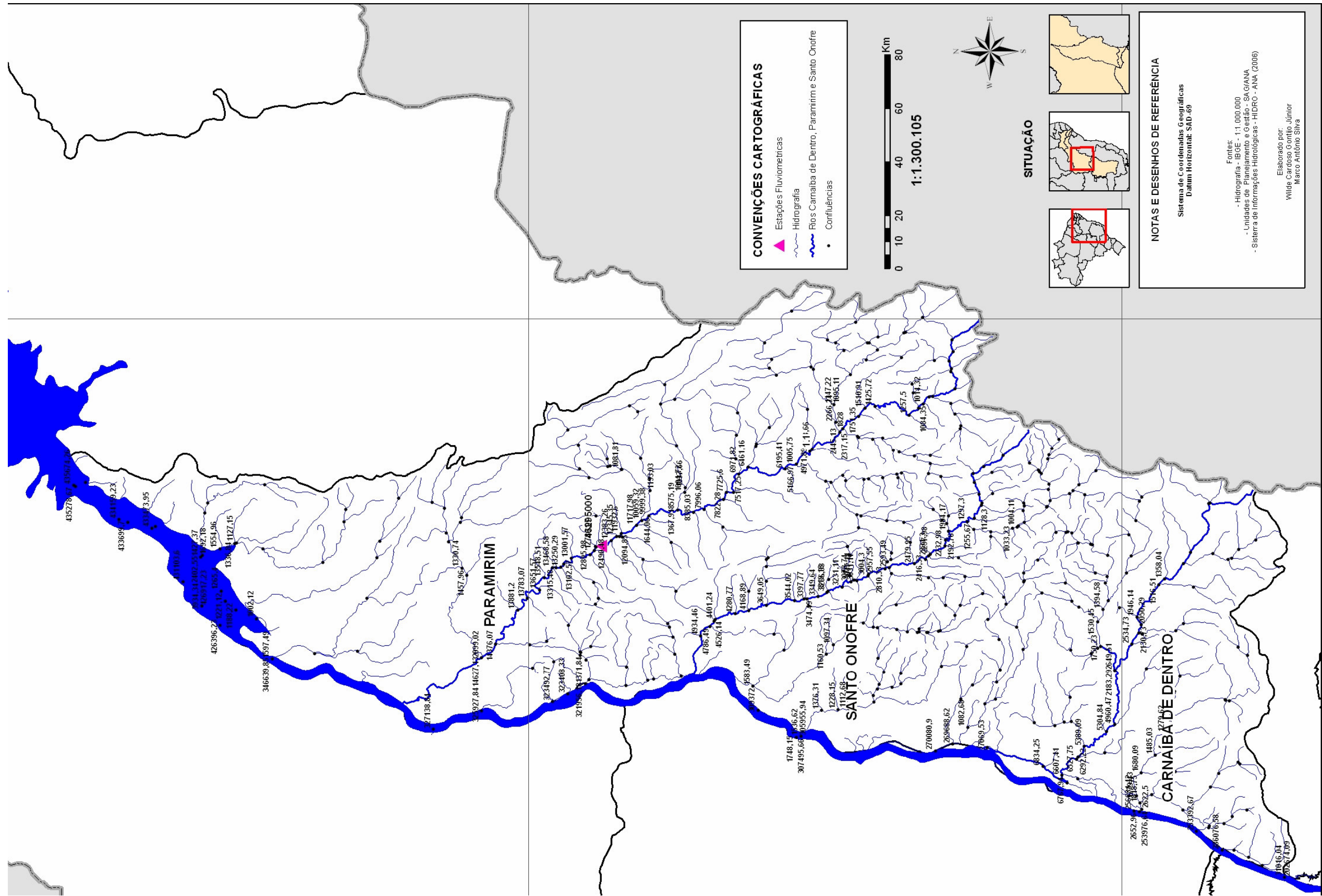


Figura 8.7 – Áreas de drenagem de estações e bifurcações
Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro

Tabela 8.5 – Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) - Bacia do rio Carnaíba de Dentro

Nível hierárquico	Sub-nível	Área do centróide (km ²)	Área (km ²)	Magnitude do trecho - Mi	Razão Mi / u	LOG2 (Mi)	Custo por nível (Dixon)
1	1.1	3.604,89	3.604,89	4,01	0,50	8,19	4,10
Custo total Nível 1							4,10
2	2.1	1.802,45	1.802,45	2,00	0,25	1,00	0,25
2	2.2	5.407,34	5.407,34	6,01	0,75	2,59	1,94
Custo total Nível 2							1,10
3	3.1	901,22	901,22	1,00	0,13	0,00	0,00
3	3.2	2.703,67	2.703,67	3,00	0,38	1,59	0,60
3	3.3	4.506,11	4.506,11	5,01	0,63	2,32	1,45
3	3.4	6.308,56	6.308,56	7,01	0,88	2,81	2,46
Custo total Nível 3							1,13

Tabela 8.6 – Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) – Bacia do rio Santo Onofre

Nível hierárquico	Sub-nível	Área do centróide (km ²)	Área (km ²)	Magnitude do trecho - Mi	Razão Mi / u	LOG2 (Mi)	Custo por nível (Dixon)
1	1.1	2.534,36	2.534,36	2,82	0,50	7,84	3,92
Custo total Nível 1							3,92
2	2.1	1.267,18	1.267,18	1,41	0,25	0,49	0,12
2	2.2	3.801,53	3.801,53	4,22	0,75	2,08	1,56
Custo total Nível 2							0,84

Tabela 8.7 – Aplicação do método de Dixon para determinação do arranjo ótimo da rede pelo método Sharp (utilizando a área de drenagem) – Bacia do rio Paramirim

Nível hierárquico	Sub-nível	Área do centróide (km ²)	Área (km ²)	Magnitude do trecho - Mi	Razão Mi / u	LOG2 (Mi)	Custo por nível (Dixon)
1	1.1	8.572,36	8.572,36	9,52	0,50	9,06	4,53
Custo total Nível 1							4,53
2	2.1	4.286,18	4.286,18	4,76	0,25	2,25	0,56
2	2.2	12.858,54	12.858,54	14,29	0,75	3,84	2,88
Custo total Nível 2							1,72
3	3.1	2.143,09	2.143,09	2,38	0,13	1,25	0,16
3	3.2	6.429,27	6.429,27	7,14	0,38	2,84	1,06
3	3.3	10.715,45	10.715,45	11,91	0,63	3,57	2,23
3	3.4	15.001,63	15.001,63	16,67	0,88	4,06	3,55
Custo total Nível 3							1,75
4	4.1	1.071,55	1.071,55	1,19	0,06	0,25	0,02
4	4.2	3.214,64	3.214,64	3,57	0,19	1,84	0,34
4	4.3	5.357,73	5.357,73	5,95	0,31	2,57	0,80
4	4.4	7.500,82	7.500,82	8,33	0,44	3,06	1,34
4	4.5	9.643,91	9.643,91	10,72	0,56	3,42	1,92
4	4.6	11.787,00	11.787,00	13,10	0,69	3,71	2,55
4	4.7	13.930,09	13.930,09	15,48	0,81	3,95	3,21
4	4.8	16.073,18	16.073,18	17,86	0,94	4,16	3,90
Custo total Nível 4							1,76

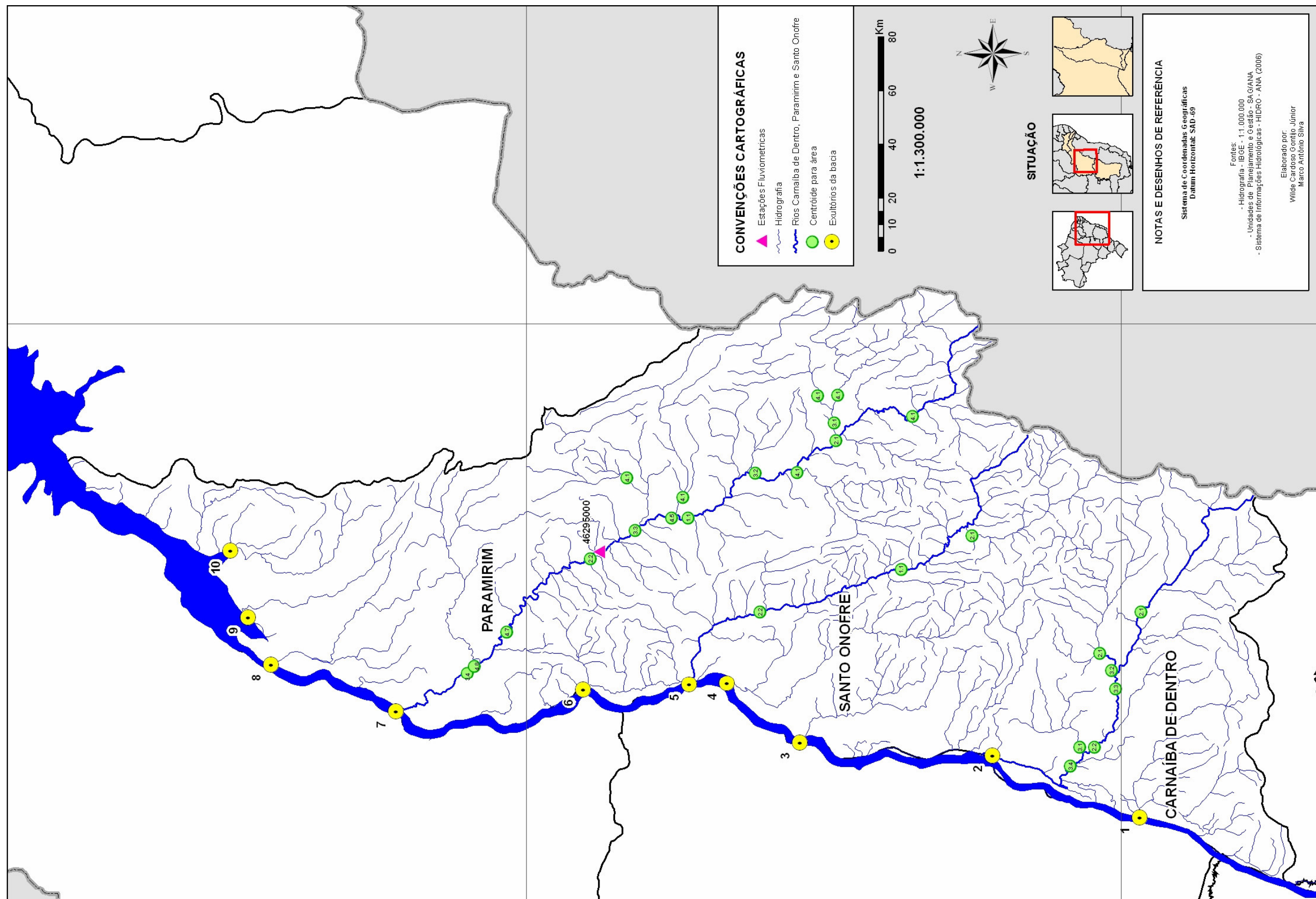


Figura 8.8 – Localização de estações fixas por nível hierárquico de centróide Região Hidrográfica dos rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro

8.2 APLICAÇÃO DA ANÁLISE DA ENTROPIA

Apresenta-se a seguir o desenvolvimento do procedimento proposto, referente às etapas 4ª a 7ª, para as três regiões hidrográficas.

8.2.1 Região Hidrográfica do Rio das Velhas

4ª etapa – premissas para a aplicação do método de otimização de rede fluviométrica utilizando o conceito de entropia

a) selecionar estações das bacias consideradas com comportamento hidrológico ergódico e cuja área de drenagem seja superior à área mínima definida na 1ª etapa (1.000km²);

Ver Tabela 7.2.

b) considerar um mesmo período de tempo (Δt) para todas as séries amostrais das estações, privilegiando aqueles períodos suscetíveis a menores influências com relação à dependência espacial e temporal dos dados coletados;

A Tabela 8.8 e a Figura 8.9, associada àquela Tabela, apresentam análise preliminar dos dados das séries de dados das estações com destaques para a vazão específica média, para o número de eventos e para a entropia própria, sempre calculados para um determinado período da série. Vê-se na Figura 8.9 que a entropia própria é reduzida com o aumento do número de eventos (o que já era de se esperar, em função da característica de séries com comportamentos Normal ou Log-Normal).

O período a ser considerado será aquele relativo aos anos de 1978 a 2006, intervalo no qual, à exceção da estação 41780002, todas as demais possuem número relevante de amostragens. Essa definição deve-se, ainda, ao histórico do número das estações, com leituras concentradas nesse período e que, tendo em vista as mudanças ocorridas na ocupação socioeconômica nessa região hidrográfica, que abrange área muito impactada pela aglomeração urbana da cidade de Belo Horizonte (MG), uma série abrangendo períodos muito longos poderia ser bastante suscetível às mudanças espaciais ocorridas.

Tabela 8.8 – Avaliação preliminar das séries históricas das estações da Região Hidrográfica do rio das Velhas

Estação	1938 a 1943			1938 a 1956			1938 a 1965			1938 a 1973			1938 a 1978			1938 a 2006			Delta X	Delta X relativo	Entropia própria de Shannon	Variância da FDP	
	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada					
41890000										9,33	62	5,11	9,37	120	4,68	12,18	461	3,66	23,05	1,34	1,62	158,36	
41199998													14,56	60	5,03	18,40	393	3,39	19,65	1,15	2,04	68,15	
41940000													8,77	55	5,50	9,60	348	3,88	17,40	1,01	1,61	140,01	
41260000													10,37	27	5,93	15,94	357	3,47	17,85	1,04	2,13	65,07	
41780002																19,46	343	3,91	17,15	1,00	1,64	144,90	
41340000	15,01	58	5,15	16,56	203	4,72	16,50	310	3,64	15,74	398	3,40	15,30	455	3,29	15,84	711	2,83	35,55	2,07	2,02	72,43	
41410000										12,34	90	4,68	11,77	150	4,22	14,92	492	3,18	24,60	1,43	2,01	69,50	
41600000										11,01	107	4,59	10,53	163	4,14	10,42	223	3,83	13,16	1,65	1,84	85,87	
41650002													8,51	20	6,39	12,25	359	3,60	17,95	1,05	1,86	85,30	
41818000				13,79	142	4,40	13,81	225	3,98	12,74	316	3,62	12,19	376	3,48	12,63	718	3,02	35,90	2,09	1,77	107,04	
41990000	11,89	52	5,45	12,53	201	4,11	11,96	303	3,76	11,30	394	3,43	11,00	454	3,30	11,56	795	2,92	39,75	2,32	1,67	108,50	
																			17,15	1,00			

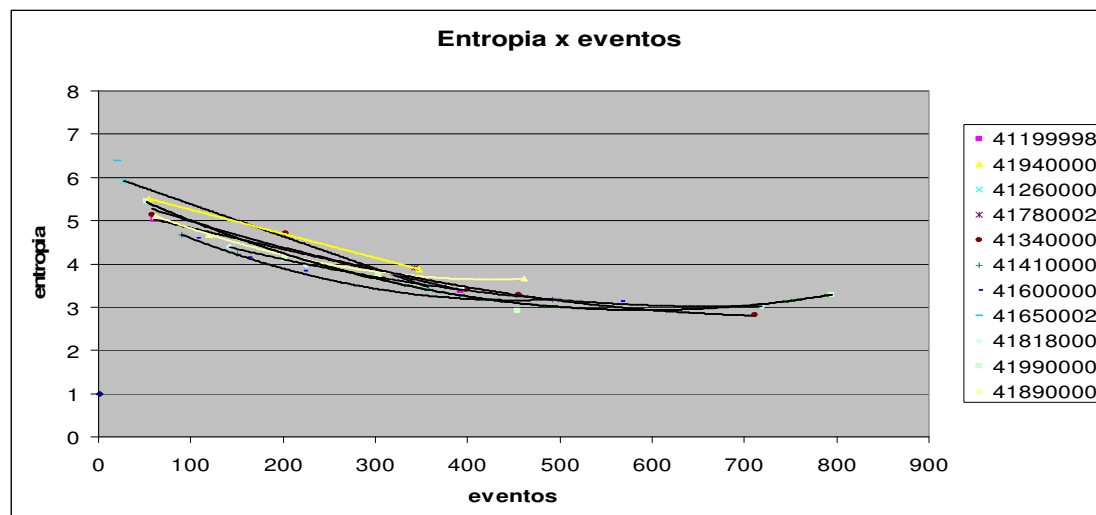


Figura 8.9 – Comportamento da entropia própria pelo número de eventos da série de dados das estações fluviométricas da Região Hidrográfica do rio das Velhas

- c) utilizar a vazão específica como a variável a ser analisada;
- d) considerar o intervalo dos dados das amostras (ΔX_i) para cada uma das M estações da rede;

Foi considerado o intervalo amostral relativo ΔX_i para o cálculo das entropias próprias e ΔX igual a $(X_1 \dots X_n)^{1/n}$ para o cálculo das entropias associadas. O Apêndice A apresenta o desenvolvimento desta equação.

- e) selecionar o tipo de função densidade de probabilidade que melhor se ajusta aos dados da série para todas as estações.

Foi utilizada a função densidade de probabilidade Log-Normal como a que melhor se ajusta aos padrões de distribuição das frequências das séries de dados das estações nessa bacia. O Apêndice B mostra as representações gráficas de todas as séries para o período de 1978 a 2006, para as estações da bacia hidrográfica do rio das Velhas.

5ª etapa - cálculo da entropia própria de cada série (ou estação)

- a) para distribuições multivariadas Normal ou Log-Normal, calcular a entropia própria de cada estação pela equação 6.36, abaixo;

$$H(x) = \left(\frac{1}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln\{\sigma^2\} + \frac{1}{2} - \ln(\Delta X) \quad 6.36$$

- b) classificar as estações em ordem decrescente do valor da entropia própria;
- c) numerar as estações em ordem crescente, de 1 a M, definindo a de maior entropia própria como número 1, a de segunda maior entropia como número 2 e, assim, por diante;
- d) nessa etapa é possível selecionar as estações privilegiando aquelas com maior entropia e, conseqüentemente, reduzindo o trabalho seguinte de verificação de redundâncias para o cálculo da entropia condicional. Resultam, então, M' estações.

A Tabela 8.9 apresenta os resultados dessa etapa. Em função dos valores das entropias próprias apresentarem-se muito próximos resolveu-se manter todas as estações

como prioritárias para o monitoramento. No caso do destaque de algumas, optaria-se por descartar aquelas de menor valor da entropia própria associada, ou seja, as estações 41260000, 41199998 e 41410000.

Tabela 8.9 – Hierarquização de estações fluviométricas pela entropia própria das séries de dados na Região Hidrográfica do rio das Velhas

Hierarquia inicial	Estação	Intervalo amostral relativo	Entropia própria 1978 a 2006
1	41940000	1,14	3,75
2	41890000	1,33	3,67
3	41780002	1,34	3,61
4	41990000	1,33	3,60
5	41340000	1,00	3,56
6	41818000	1,34	3,53
7	41650002	1,32	3,44
8	41600000	1,34	3,33
9	41410000	1,34	3,26
10	41199998	1,30	3,26
11	41260000	1,29	3,22

Tabela 8.10 – Hierarquização de estações fluviométricas pela entropia própria das séries de dados na Região Hidrográfica do rio das Velhas – $\Delta X = 1$

Hierarquia inicial	Estação	Intervalo amostral relativo	Entropia própria 1978 a 2006
1	41890000	1,00	3,96
2	41780002	1,00	3,91
3	41990000	1,00	3,89
4	41940000	1,00	3,89
5	41818000	1,00	3,82
6	41650002	1,00	3,72
7	41600000	1,00	3,63
8	41340000	1,00	3,56
9	41410000	1,00	3,55
10	41199998	1,00	3,52
11	41260000	1,00	3,48

Com a utilização de ΔX igual a 1, para todas as séries, os resultados dessa primeira hierarquização seriam aqueles apresentados na Tabela 8.10. Vê-se que, dadas as proximidades

entre os valores apresentados entre si, assim como se verifica na Tabela 8.9, as estações com menor valor de entropia são as mesmas.

6ª etapa - hierarquização das estações pelo cálculo da entropia condicional

a) calcular o menor transporte de informações (TR), por intermédio da equação 6.37, entre a estação de maior entropia (número 1) e cada uma das demais estações ordenadas na 5ª etapa, utilizando-se o conceito de entropia condicional;

$$\min [TR(X_1, X_j)] = \min [H(X_1) - H(X_1 | X_j)] \quad 6.37$$

Pela qual a entropia condicional será calculada substituindo-se $j=2$ na equação 6.35. Assim, tem-se:

$$\min \{TR(X_1, X_j)\} = \min \left\{ H(X_1) - \left[\ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln |C| + 1 - 2 \ln(\Delta X) - H(X_j) \right] \right\} \quad 6.43$$

Na qual:

$$\Delta X = (X_1 X_j)^{1/2}$$

j = de 2 a M' , onde M' é igual às M estações da rede menos aquelas que tenham sido retiradas na 5ª etapa.

b) renumerar as estações, a partir da estação número 2 da 5ª etapa, classificando a estação cujo par com a nº 1 apresenta o menor de transporte de informações como novo número 2;

c) repetir os passos “a” e “b” com todas as estações renumeradas até a estação M' , resultando esse procedimento na hierarquização final das estações utilizando-se os conceitos de entropia própria e condicional, conforme representado na equação 6.44;

$$\min \{TR(X_k, X_j)\} = \min \left\{ H(X_k) - \left[\ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln |C| + 1 - 2 \ln(\Delta X) - H(X_j) \right] \right\} \quad 6.44$$

Na qual “k” é igual à última estação hierarquizada no passo anterior. O “k” varia de 2 a “ $M'-2$ ” e o “j” varia de “ $k+1$ ” a M' .

d) nessa etapa, pode ser reduzido o número de estações retirando àquelas que apresentem o maior transporte de informações relativamente às demais, após a renumeração final. Resultam, então, M'' estações.

As Figuras 8.10 e 8.11, considerando os valores de ΔX próprios e de ΔX igual a 1, respectivamente, apresentam a hierarquização das estações, a entropia própria de cada uma e o fluxo de informações.

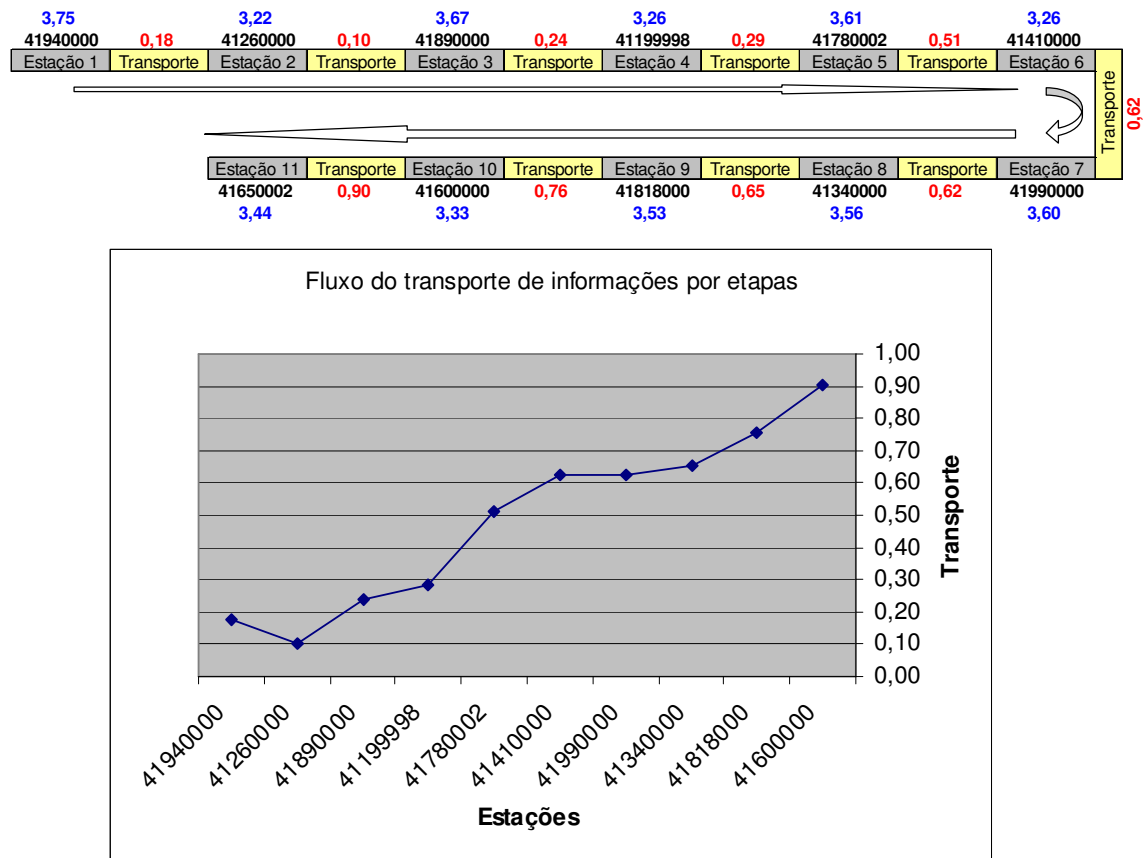


Figura 8.10 – Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede de estações fluviométricas na Região Hidrográfica do rio das Velhas (no fluxo: azul – entropia; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

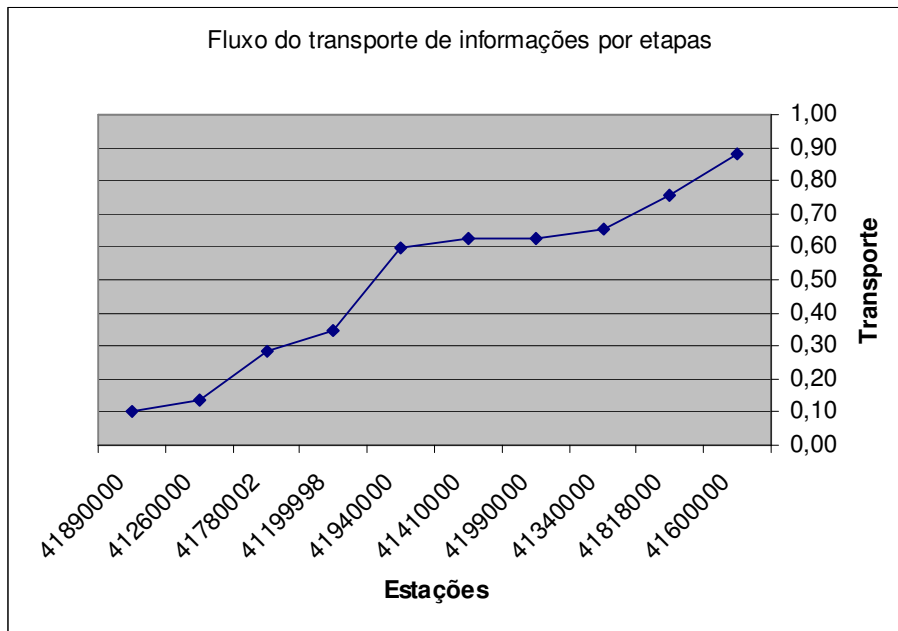
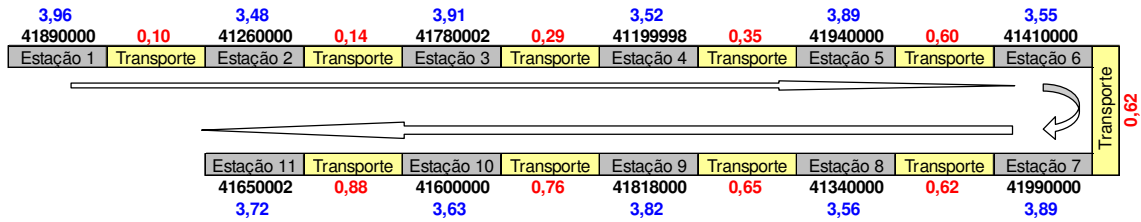


Figura 8.11 – Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede de estações fluviométricas na Região Hidrográfica do rio das Velhas – $\Delta X = 1$ (no fluxo: azul – entropia; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

Vê-se que, o transporte de informações torna-se mais significativo entre as estações 41818000, 41650002 e 41600000. Nenhuma destas estações, porém, seria descartada na 5ª etapa, na qual seriam as estações 41260000, 41199998 e 41410000. Isto pode indicar que foi prudente a não eliminação destas estações naquela etapa. Em função dos valores apresentados resolveu-se não retirar nenhuma das estações do processo final de otimização, apresentado na etapa a seguir.

7ª etapa – otimização das estações pelo cálculo do transporte de informações

a) calcular todos os transportes de informações (TR) na cadeia hierarquizada de estações definida na 6ª etapa, com a associação sucessiva de estações, conforme equação 6.45;

$$TR \left[(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}), X_j \right] = H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}) - \left[H(X_1, X_2, \dots, X_j) - H(X_j) \right] \quad 6.45$$

Na qual “j” variará de 2 a M” e a entropia associada calculada pela equação 6.35, onde $\Delta X = (X_1 \dots X_j)^{1/j}$.

$$H(X_1, \dots, X_j) = \left(\frac{j}{2} \right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2} \right) \ln|C| + \frac{j}{2} - j \ln(\Delta X) \quad 6.35$$

b) construir o diagrama de fluxo do transporte das informações, a cada passo, desde a estação número 1 até a estação M”, calculando-se a informação percentual transferida, pela equação 6.46;

$$TR \% (X_1, X_j) = \frac{TR \left[(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}), X_j \right]}{H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1})} \quad 6.46$$

c) nesse ponto, pode-se estabelecer o valor máximo percentual que se aceitará na rede de monitoramento;

As Figuras 8.12 e 8.13 apresentam os diagramas de fluxo do transporte das informações com as taxas TR% em cada passo da rede hierarquizada na 6ª etapa, para os casos de intervalo amostral relativo próprio considerado e para este definido igual a um.

d) alternativamente, por meio da razão da entropia associada (RH) a “j” estações e a entropia associada a todas as estações da rede (M”), conforme equação 6.47, pode-se estabelecer um valor máximo para essa razão visando à escolha da melhor associação de estações;

$$RH(X_1, X_j) = \frac{H(X_1, X_2, \dots, X_j)}{H(X_1, X_2, \dots, X_{M''})} \quad 6.47$$

As Figuras 8.14 e 8.15 apresentam os diagramas de fluxo da razão da entropia associada em cada passo da rede hierarquizada na 6ª etapa, para os casos de intervalo amostral relativo próprio considerado e para este definido igual a um.

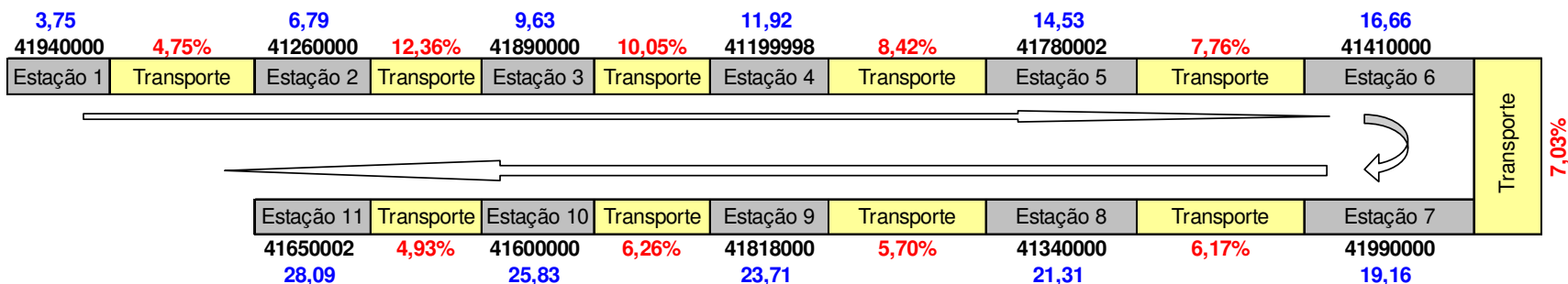


Figura 8.12 – Diagrama de fluxo do transporte de informações
 Região Hidrográfica do rio das Velhas (transporte por etapa – TR%)
 (no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

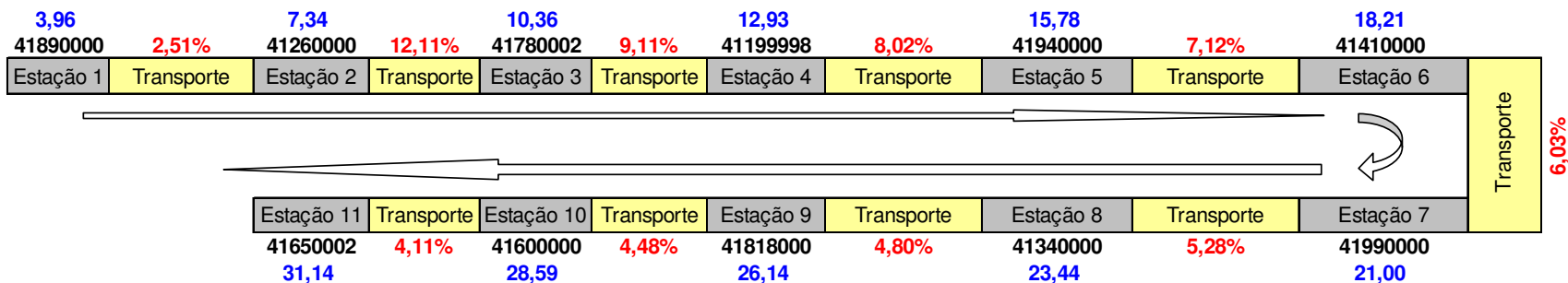


Figura 8.13 – Diagrama de fluxo do transporte de informações
 Região Hidrográfica do rio das Velhas (transporte por etapa – TR%) – $\Delta X = 1$
 (no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

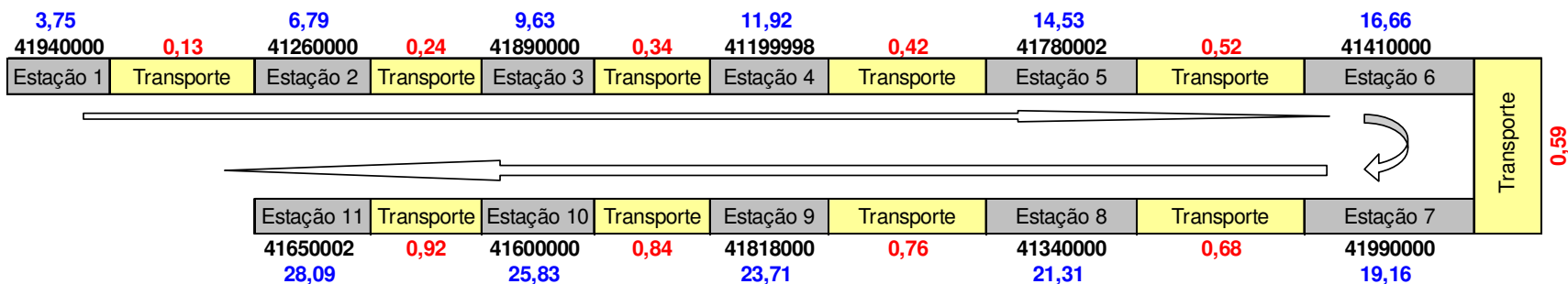


Figura 8.14 – Diagrama de fluxo da entropia associada
Região Hidrográfica do rio das Velhas (razão da entropia - RH)
(no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – razão da entropia; preto – número da estação)

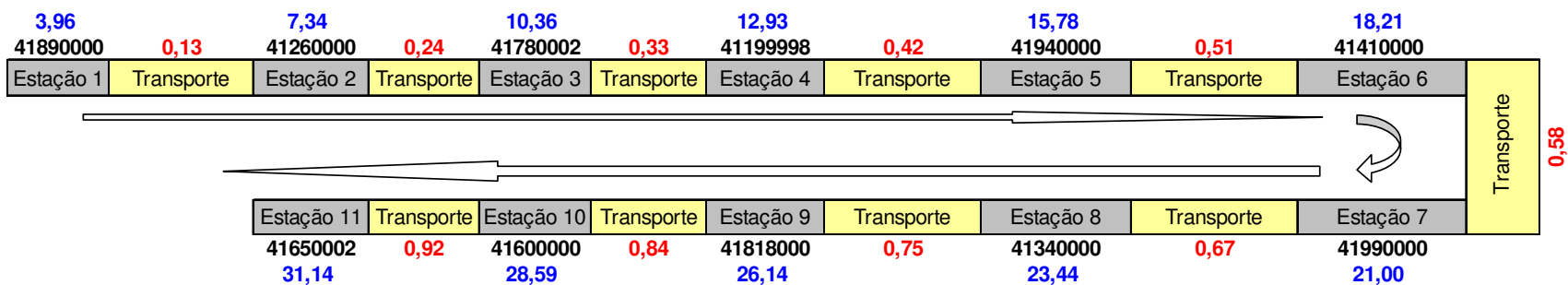


Figura 8.15 – Diagrama de fluxo da entropia associada
Região Hidrográfica do rio das Velhas (razão da entropia - RH) – $\Delta X = 1$
(no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – razão da entropia; preto – número da estação)

Vê-se nos diagramas de fluxo de transporte de informações que há um comportamento muito parecido entre as simulações apresentadas nas Figuras 8.12 e 8.14, porém, as estações que estão sujeitas aos maiores valores de transporte de informações não são as mesmas. A análise desses resultados será feita na seção 8.3 deste trabalho.

e) para selecionar a melhor combinação de estações devem ser analisadas as alternativas indicadas nas alíneas “c” e “d”, para $TR\%(X1,Xj)$ e $RH(X1,Xj)$, respectivamente, e calcular o custo de cada uma delas, considerando o valor apresentado na alínea “e” da 1ª etapa desse procedimento.

Considerando que um valor máximo do transporte de informações não pudesse ultrapassar 10% ($TR\% < 10\%$ - avaliação a ser feita com o acúmulo de experiência na aplicação deste procedimento), pela Figura 8.12 as estações a serem descartadas são 41890000 e 41199998. Para a Figura 8.13, somente a estação 41780002 seria descartada.

Se, por outro lado, for considerado que o valor máximo da razão das entropias na rede (RH) deve ser igual a 0,9, em ambas as Figuras 8.14 e 8.15, que mostram entropia associada sempre crescente, a estação a ser descartada seria a 41650002.

Uma avaliação adicional a ser realizada é a verificação da transferência de informações entre as estações, considerando a locação relativa entre elas. Isto é importante, principalmente, quando analisamos as diferentes regiões hidrológicas em que se situam as mesmas. Ou seja, deve ser analisado o fluxo de informações de montante para jusante em toda a bacia. A Figura 8.16 apresenta o resultado dessa simulação. Observa-se que, para essa simulação não há resultados diferentes, considerando ou não o valor de ΔX .

Vê-se na Figura 8.16 que há um menor transporte de informações entre as estações 41260000 e 41340000. Dada a pequena diferença entre as áreas de drenagem (852 km²), sugere-se que se trata de uma zona de transição quanto às características hidrológicas da bacia. Verifica-se, também, que a transferência de informações entre as estações 41650002 e 41818000 é grande, em que pese a grande diferença entre as áreas de drenagem (5.548 km²). Esse fato sugere que a estação 41650002, conforme já indicavam as Figuras 8.13 e 8.15, poderia ser considerada descartável para a formação de uma rede ótima.

As estações 41780002, 41890000 e 41199998, porém, abrangem regiões de cabeceiras necessitando de uma avaliação mais detalhada sobre o seu descarte.

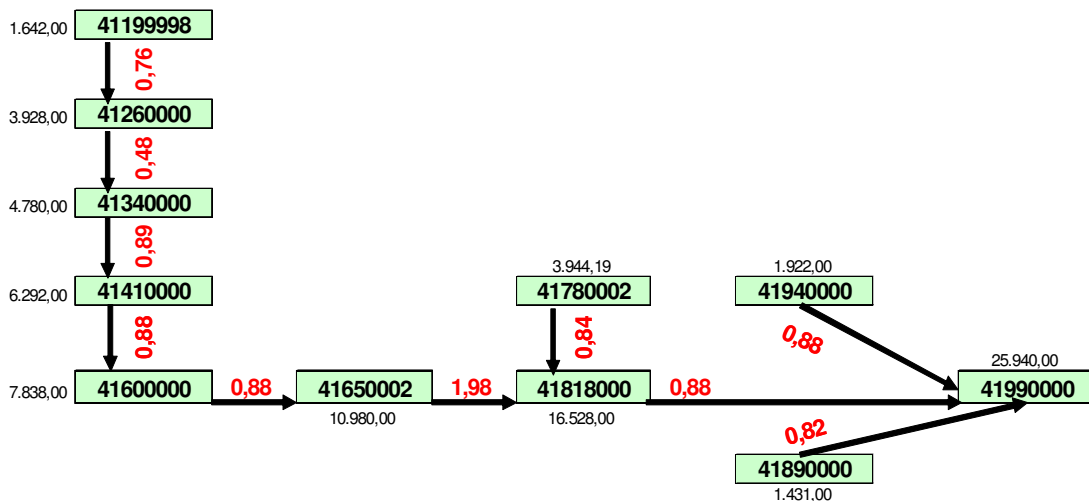


Figura 8.16 – Transporte de informações entre as estações, de montante para jusante, na Região Hidrográfica do rio das Velhas (em vermelho o transporte de informações e ao lado da estação a área de drenagem)

Além dessas análises são necessários que os aspectos relativos às necessidades do monitoramento para a gestão dos recursos hídricos, para o atendimento às necessidades de usos específicos e aquelas relativas ao custo-benefício de sua operação sejam considerados antes da decisão final de descarte das estações.

8.2.2 Região Hidrográfica do Alto rio Grande

4ª etapa – premissas para a aplicação do método de otimização de rede fluviométrica utilizando o conceito de entropia

Para os resultados apresentados nessa etapa repetiram-se os procedimentos da seção 8.2.1 considerando-se as séries de dados da Tabela 7.4.

A Tabela 8.11 e a Figura 8.17, associada àquela Tabela, apresentam uma análise preliminar dos dados das séries de dados das estações com destaques para a vazão específica média, para o número de eventos e para a entropia própria, sempre calculados para um determinado período da série. Vê-se na Figura 8.17 que a entropia própria é reduzida com o aumento do número de eventos (o que já era de se esperar, em função da característica de séries com comportamentos Normal ou Log-Normal).

O período a ser considerado será aquele relativo aos anos de 1978 a 2006. Essa definição deve-se ao histórico do número das estações, com leituras concentradas neste

período e que, tendo em vista as mudanças ocorridas na ocupação socioeconômica nesta região hidrográfica, que abrange área muito impactada por projetos de irrigação (oeste baiano), é prudente não utilizar os dados da estação 46550000 para o período entre 1934 e 1978. Uma série abrangendo períodos muito longos poderia ser bastante suscetível às mudanças espaciais ocorridas..

Foi utilizada a função densidade de probabilidade Log-Normal como a que melhor se ajusta aos padrões de distribuição das frequências das séries de dados das estações nessa bacia. O Apêndice C mostra as representações gráficas de todas as séries para o período de 1978 a 2006, para a bacia hidrográfica do Alto rio Grande.

Tabela 8.11 – Avaliação preliminar das séries históricas das estações da Região Hidrográfica do Alto rio Grande

Estação	1934 a 1977			1934 a 2001			1934 a 2006			Delta X	Delta X relativo	Entropia própria de Shannon	Variância da FDP
	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada	Vazão específica média (l/s/km ²)	Número de eventos	Entropia própria associada				
46415000				6,92	288	1,05	6,64	339	0,88	16,95	8,27	2,52	23,15
46490000				1,51	287	1,72	1,47	342	1,61	17,10	8,34	1,81	101,03
46543000				9,81	260	0,95	9,55	339	0,88	16,95	8,27	2,65	16,52
46570000				7,02	288	0,77	6,95	341	0,62	17,05	8,32	2,68	14,13
46520000							13,38	62	2,33	3,10	1,51	2,73	14,21
46550000	5,17	473	0,39	4,72	754	(0,04)	4,62	818	(0,04)	40,90	19,95	2,57	21,40
46590000				7,63	286	1,22	7,43	349	1,06	17,45	8,51	2,32	35,36
46455000				9,00	286	1,23	8,76	352	1,04	17,60	8,59	2,30	34,44
46530000							13,13	41	2,72	2,05	1,00	2,73	13,45
										2,05	1,00		

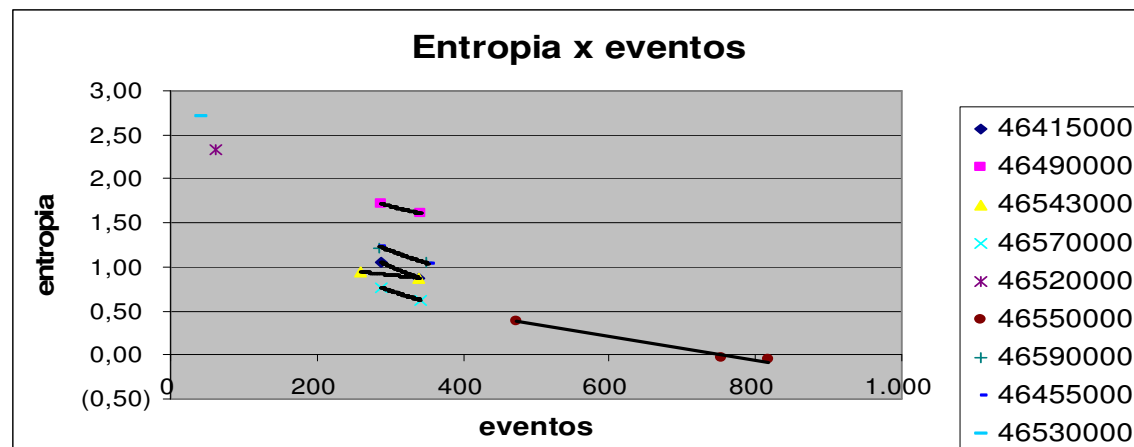


Figura 8.17 – Comportamento da entropia própria pelo número de eventos da série de dados das estações fluviométricas da Região Hidrográfica do Alto rio Grande

5ª etapa - cálculo da entropia própria de cada série (ou estação)

A Tabela 8.12 apresenta os resultados dessa etapa. Observa-se uma grande variação dos valores das entropias próprias o que sugere que, nesta etapa, torna-se necessário averiguar o impacto das diferenças do intervalo amostral relativo nas entropias.

Tabela 8.12 – Hierarquização de estações pela entropia própria de cada série
Região Hidrográfica do Alto rio Grande

Hierarquia inicial	Estação	Intervalo amostral relativo	Entropia própria 1978 a 2006
1	46530000	1,00	2,72
2	46520000	1,51	2,33
3	46490000	8,05	1,64
4	46550000	8,12	1,11
5	46590000	8,27	1,07
6	46455000	8,29	1,07
7	46415000	7,68	0,93
8	46543000	7,61	0,77
9	46570000	8,02	0,65

Tabela 8.13 – Hierarquização de estações pela entropia própria de cada série
Região Hidrográfica do Alto rio Grande – $\Delta X = 1$

Hierarquia inicial	Estação	Intervalo amostral relativo	Entropia própria 1978 a 2006
1	46490000	1,00	3,72
2	46550000	1,00	3,21
3	46590000	1,00	3,19
4	46455000	1,00	3,19
5	46415000	1,00	2,97
6	46543000	1,00	2,79
7	46520000	1,00	2,75
8	46570000	1,00	2,73
9	46530000	1,00	2,72

Com a utilização de ΔX igual a 1, para todas as séries, os resultados dessa primeira hierarquização seria aquela apresentado na Tabela 8.12. Vê-se que a estação 46530000 se

apresenta como a estação número 1 na Tabela 8.12 e a última hierarquizada na Tabela 8.13. Diferentemente, a estação 46570000 encontra-se entre as últimas em ambas as Tabelas.

Nesse estudo de caso, optou-se pela retirada somente da estação 46570000 de ambos os estudos e para as simulações das etapas posteriores.

6ª etapa - hierarquização das estações pelo cálculo da entropia condicional

As Figuras 8.18 e 8.19 apresentam, para a rede com as 8 estações sugeridas na etapa anterior, a hierarquização das estações, a entropia própria de cada uma e o fluxo de informações que sugeriram tal avaliação. A primeira figura refere-se à utilização do valor próprio do intervalo amostral relativo (ΔX) enquanto a segunda com este valor igual a 1.

Vê-se que o transporte de informações é pouco significativo entre as estações 46530000 e 46415000, em ambos os diagramas de fluxo de transporte de informações. A partir deste último ponto na rede, com a associação da estação 46520000, há uma transferência importante de informações ou uma redundância maior na coleta dos dados.

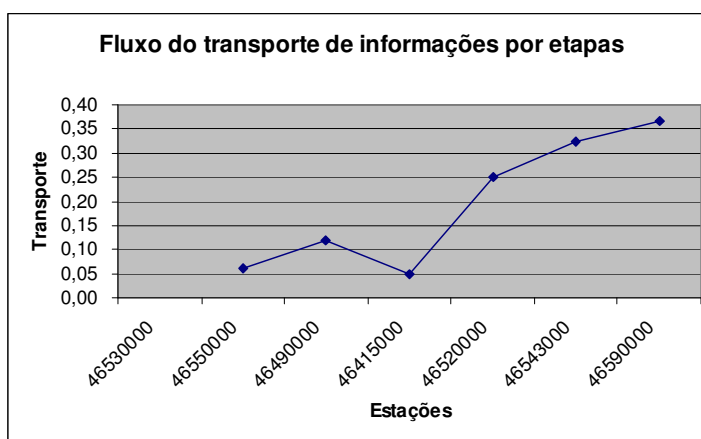
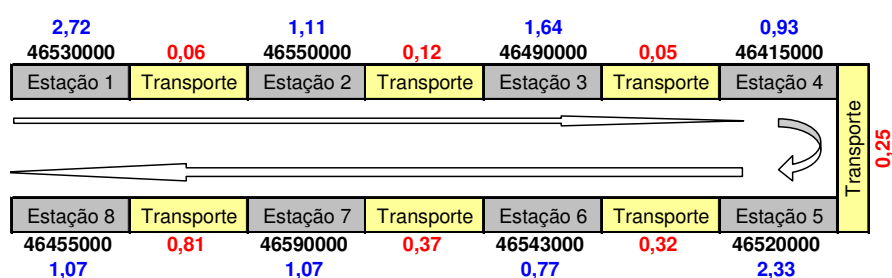


Figura 8.18 – Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede com 8 estações fluviométricas na Região Hidrográfica do Alto rio Grande (no fluxo: azul – entropia; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

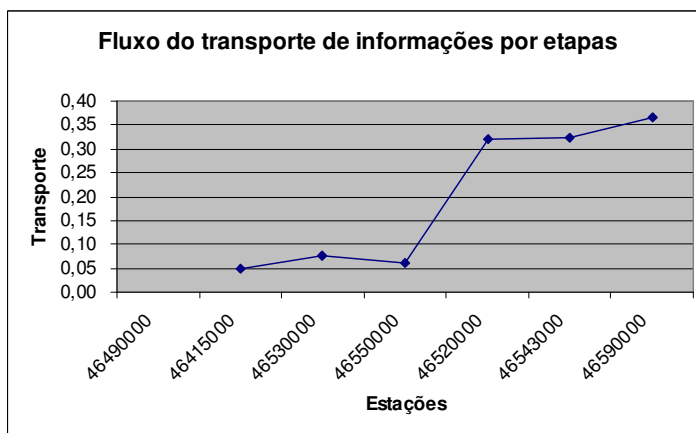
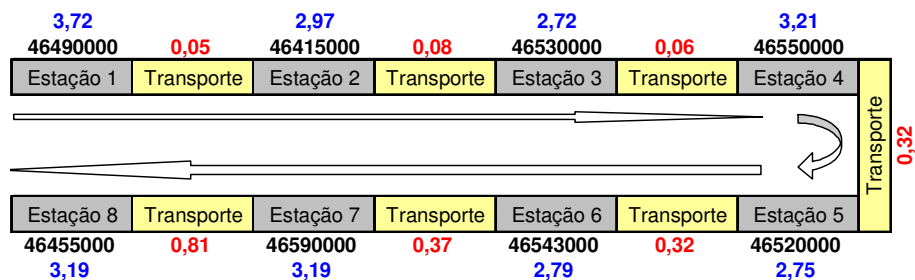


Figura 8.19 – Hierarquização de estações e fluxo de informações na rede com 8 estações fluviométricas na Região Hidrográfica do Alto rio Grande – $\Delta X = 1$ (no fluxo: azul – entropia; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

7ª etapa – otimização das estações pelo cálculo do transporte de informações

As Figuras 8.20 e 8.21 apresentam os diagramas de fluxo do transporte das informações com as taxas TR% em cada passo da rede hierarquizada na 6ª etapa, para os casos de intervalo amostral relativo próprio considerado e para este definido igual a um.

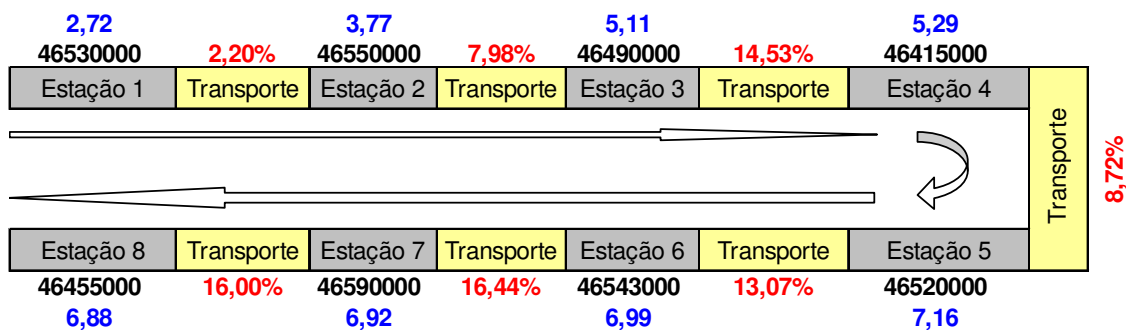


Figura 8.20 – Diagrama de fluxo do transporte de informações Região Hidrográfica do Alto rio Grande (transporte por etapa – TR%) (no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

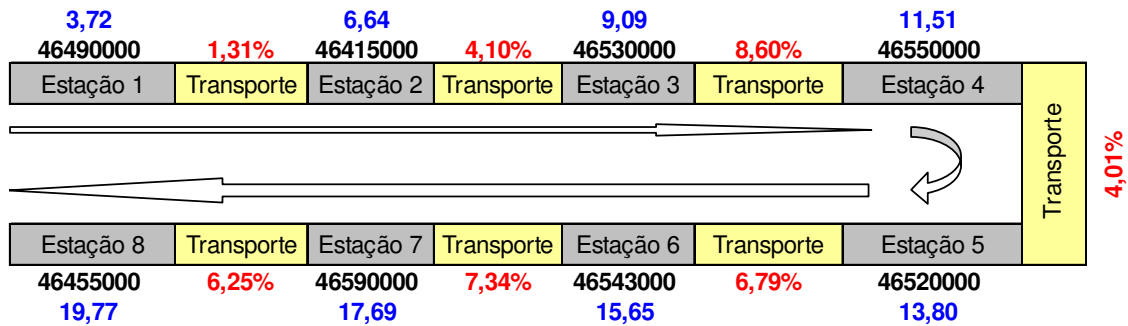


Figura 8.21 – Diagrama de fluxo do transporte de informações
 Região Hidrográfica do Alto rio Grande (transporte por etapa – TR%) – $\Delta X = 1$
 (no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – transporte de informações; preto – número da estação)

As Figuras 8.22 e 8.23 apresentam os diagramas de fluxo da razão da entropia associada em cada passo da rede hierarquizada na 6ª etapa, para os casos de intervalo amostral relativo próprio considerado e para este definido igual a um.

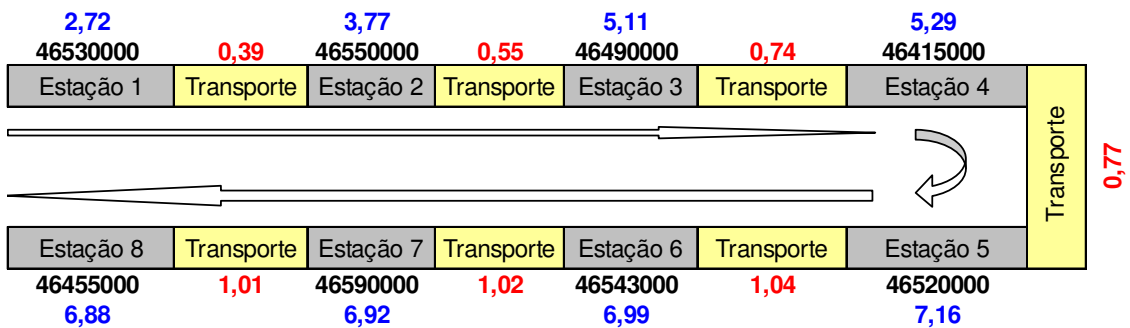


Figura 8.22 – Diagrama de fluxo da entropia associada
 Região Hidrográfica do Alto rio Grande (razão da entropia - RH)
 (no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – razão da entropia; preto – número da estação)

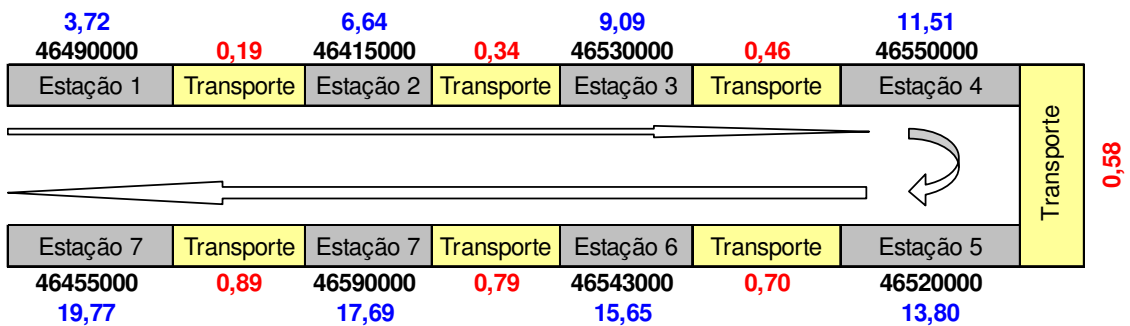


Figura 8.23 – Diagrama de fluxo da entropia associada
 Região Hidrográfica do Alto rio Grande (razão da entropia - RH) – $\Delta X = 1$
 (no fluxo: azul – entropia associada; vermelho – razão da entropia; preto – número da estação)

Se considerado que o valor máximo do transporte de informações não deve ultrapassar 10% ($TR\% < 10\%$), segundo os resultados apresentados na Figura 8.20 seriam descartadas as estações 46415000, 46543000, 46590000 e 46455000. Considerando os resultados da Figura 8.21 não haveria estações a serem descartadas.

Se, por outro lado, for considerado que o valor máximo da razão das entropias na rede (RH) deve ser igual a 0,9, em ambas as Figuras 8.22 e 8.23, o resultado da avaliação do máximo transporte de informações se repete com exclusão da estação 46415000.

Uma avaliação adicional a ser realizada é a verificação da transferência de informações entre as estações, considerando a locação relativa entre elas. Isto é importante, principalmente, quando analisamos as diferentes regiões hidrológicas em que se situam as mesmas. Ou seja, deve ser analisado o fluxo de informações de montante para jusante em toda a bacia. A Figura 8.24 apresenta o resultado desta simulação. Observa-se que, para esta simulação não há resultados diferentes, considerando ou não o valor de ΔX .

Vê-se, pela Figura 8.24, que a estação 46550000 é a que possui maior redundância nas informações relativas às estações 46543000, 46415000 e 46455000, no entanto, possui pouca informação da estação 46490000. Observa-se que as áreas de drenagem dessas estações são relativamente próximas o que não parece ter ajudado para que houvesse um comportamento próximo entre as suas informações. Ressalte-se que a estação 46490000 coleta informações de uma região bastante diferente das demais sob aspectos hídricos. Por sua vez, a estação 46590000 possui pequena redundância com a estação 46570000 e nenhuma relação física com as demais. Assim, considerando essas informações adicionais, vê-se que o descarte das estações, proposto pela análise dos resultados apresentados nas Figuras 8.20 e 8.22, não seria prudente pelo menos para a estação 46590000. Uma melhor avaliação dos resultados será feita na seção 8.3 deste trabalho.

Observando-se a Figura 8.24, no entanto, é visível a necessidade de que haja uma estação próxima ao exutório, o que, provavelmente, proporcionaria o descarte de alguma estação a montante.

Além dessas análises são necessários que os aspectos relativos às necessidades do monitoramento para a gestão dos recursos hídricos, para o atendimento às necessidades de usos específicos e aquelas relativas ao custo-benefício de sua operação sejam considerados antes da decisão final de descarte das estações.

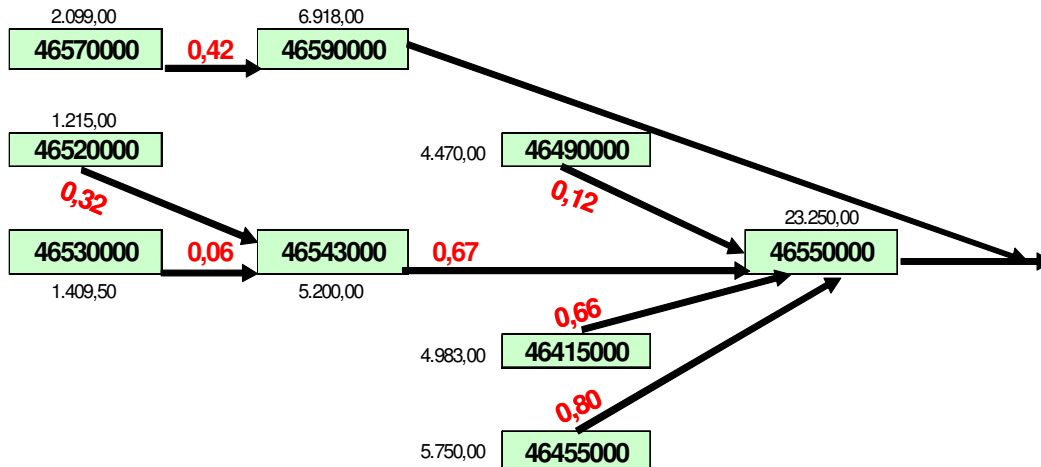


Figura 8.24 – Transporte de informações entre as estações, de montante para jusante, na Região Hidrográfica do Alto rio Grande (em vermelho o transporte de informações e ao lado da estação a área de drenagem)

8.2.3 Região Hidrográfica Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro

4ª etapa – premissas para a aplicação do método de otimização de rede fluviométrica utilizando o conceito de entropia

Conforme pode ser visto na Tabela 7.6, essa região hidrográfica é desprovida de estações de monitoramento, tendo sido selecionada somente uma estação que possui área de drenagem superior a 1.000 km², o que impossibilita a aplicação do procedimento de otimização utilizando o conceito de entropia.

8.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção, pretende-se promover uma análise mais detalhada dos resultados apresentados na seção anterior, aprofundando a avaliação preliminar da aplicação dos métodos feita na seção 8.2. Para isto, serão analisados os métodos utilizados, separadamente, para as três regiões de estudo e avaliados os seguintes aspectos:

- locação das estações pelo método Sharp utilizando-se da variável área de drenagem e sua comparação com a rede de monitoramento selecionada;
- locação das estações pelo método Sharp utilizando-se da variável vazão e sua comparação com a rede de monitoramento selecionada;
- resultados expressos pela aplicação do conceito de entropia própria, considerando a utilização, ou não, do valor do intervalo amostral relativo;

d) resultados expressos pela aplicação do conceito de entropia condicional, considerando a utilização, ou não, do valor do intervalo amostral relativo;

e) resultados expressos pela aplicação do processo de otimização da rede utilizando-se do conceito de transporte de informações, considerando a utilização, ou não, do valor amostral relativo; e

f) resultados expressos pela aplicação do processo de otimização da rede utilizando-se do conceito de razão de entropia associada, considerando a utilização, ou não, do valor amostral relativo.

8.3.1 Método Sharp

É importante ressaltar que, neste estudo, a rede de monitoramento fluviométrico selecionada é constituída pelas estações que abrangem uma área de drenagem superior a 1.000 km² e que têm série histórica com mais de 36 valores amostrados. A rede selecionada para a bacia do rio das Velhas foi apresentada na Tabela 7.2.

A bacia do rio das Velhas, conforme Figura 7.5, apresenta uma distribuição das precipitações atmosféricas variando entre 1300 e 1500 mm ao ano, podendo ser considerada homogênea sob esse aspecto. Possui ainda uma área de drenagem com formato alongado, com menor índice de compacidade (cerca de 0,015), o que sugere um comportamento mais distribuído das vazões no curso principal. Além dessas características, observa-se na Figura 7.8 que a relação entre a vazão específica e a área de drenagem sugere um comportamento aproximadamente linear entre a vazão e a área drenada, principalmente no curso final da bacia. É de se esperar que, com essa tipologia, a aplicação do método Sharp para locação das estações, utilizando-se as variáveis área de drenagem ou vazão, expresse resultados próximos em vários trechos da bacia, notadamente na parte inferior da mesma.

Por outro lado, a bacia do Alto rio Grande apresenta uma variação bem maior na distribuição das precipitações em sua área de drenagem: a região oeste da bacia apresenta índices de até 1500 mm ao ano enquanto na região leste os valores chegam próximos a 900 mm ao ano, uma faixa de valores 3 vezes maior que aquela apresentada para a bacia do rio das Velhas. O formato da bacia do Alto rio Grande aproxima-se mais de uma bacia compacta (índice de compacidade igual a 6,15), com menor dimensão do curso principal e uma área de drenagem pouco maior que a do rio das Velhas. Com essas características, a aplicação do método Sharp deverá apresentar valores diversos ao se considerarem as variáveis área de drenagem ou vazões.

As bacias da região hidrográfica Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro, por sua vez, estão localizadas em região com baixo índice pluviométrico (800 mm ao ano), porém, com uma distribuição muito regular em toda a área. Os resultados da aplicação do método Sharp para essa região somente consideraram a área de drenagem em função da inexistência de dados fluviométricos consistentes. O índice de compacidade das três bacias principais que emprestam o nome à região são iguais a 0,013 , 0,025 e 0,018.

As Figuras 8.3, 8.6 e 8.8 apresentam a locação de todas as estações até o nível hierárquico 4 para as três regiões de estudo e para as duas variáveis utilizados pelo método. As Tabelas 8.14 e 8.15 apresentam, por nível hierárquico alguns dados que podem ser interessantes na análise de cada um dos resultados apresentados.

Vê-se que as bacias com índice de compacidade pequeno têm comportamento parecido entre si quando consideramos a locação das estações utilizando-se a variável área de drenagem: os números totais de estações localizadas em todos os níveis hierárquicos e aquelas dos níveis superiores (1 e 2) são muito próximos do número de centróides propostos; todos os níveis hierárquicos possuem estações localizadas e os números de cada nível também são muito parecidos. Para a bacia do Alto rio Grande, com índice de compacidade maior, verifica-se um número total de estações localizadas inferior ao número médio das demais bacias, com uma representação dessas estações mais rarefeita no nível hierárquico inferior (4). Esse comportamento poderia induzir à avaliação que a maior quantidade de cursos d'água com menor área de drenagem, no caso de uma bacia com maior índice de compacidade, não implicaria em uma maior locação de estações nesses cursos.

Uma outra análise a ser feita é quanto à coincidência das estações propostas pelo método utilizando a variável área de drenagem com as estações existentes na rede de monitoramento selecionada para cada bacia. Vê-se na Tabela 8.14 que na bacia do rio das Velhas há uma coincidência total de 5 em 14 postos (35%) enquanto na bacia do Alto rio Grande este valor é de 3 em 13 (23%). Quando é analisada a distribuição dessa coincidência do nível maior para o menor (0 – 33 – 33 – 35, na bacia do rio das Velhas; 100 – 50 – 33 – 23, na bacia do Alto rio Grande), esses comportamentos poderiam sugerir uma melhor aplicação do método às bacias como a do rio das Velhas. No entanto, há de se avaliar que a área de drenagem e o número de estações selecionadas para a bacia do rio das Velhas são cerca de 20% menores que a do Alto rio Grande o que aumenta a possibilidade dessas correspondências. Considerou-se na Tabela 8.14 que há coincidência entre a locação proposta e a estação existente quando a diferença das áreas de drenagem é inferior a 100 km².

Tabela 8.14 – Características da locação das estações segundo resultados do método Sharp utilizando a variável área de drenagem

Bacia hidrográfica	Nível hierárquico	Número de centróides	Estação locada por nível	Coincidência com estação existente	% Acumulado de coincidência
Rio das Velhas	1	1	1	0	0
	2	2	2	1	33
	3	4	3	1	33
	4	8	8	3	35
	Totais	15	14	5	35
Alto rio Grande	1	1	1	1	100
	2	2	1	0	50
	3	4	4	1	33
	4	8	7	1	23
	Totais	15	13	3	23
Rio Paramirim	1	1	1	0	0
	2	2	2	1	100
	3	4	4	0	14
	4	8	9	0	6
	Totais	15	16	1	6
Rio Santo Onofre	1	1	0	0	0
	2	2	3	0	0
	3	4	4	0	0
	Totais	7	7	0	0
Rio Carnaíba de Dentro	1	1	1	0	0
	2	2	2	0	0
	Totais	3	3	0	0

Avaliando-se os resultados relativos à utilização da variável vazão, conforme Tabela 8.15, restritos às bacias do rio das Velhas e do Alto rio Grande, vêem-se algumas diferenças na comparação com a avaliação anterior na qual foi utilizada a variável área de drenagem para a simulação do método.

Tabela 8.15 – Características da locação das estações segundo resultados do método Sharp utilizando a variável vazão

Bacia hidrográfica	Nível hierárquico	Número de centróides	Estação locada por nível	Coincidência com estação existente	% Acumulado de coincidência
Rio das Velhas	1	1	0	0	0
	2	2	3	2	66
	3	4	5	2	50
	4	8	10	3	38
	Totais	15	18	7	38
Alto rio Grande	1	1	0	0	0
	2	2	0	0	0
	3	4	4	2	50
	4	8	13	3	29
	Totais	15	17	5	29

A primeira observação é quanto ao número total de estações locadas: houve um aumento de 30% para ambas as bacias. A segunda observação é quanto à distribuição dessas estações nos níveis hierárquicos: enquanto na bacia do rio das Velhas as estações locadas acompanham o comportamento marginal daquelas previstas para o respectivo nível (e também para o que foi observado na variável área de drenagem), na bacia do Alto rio Grande as estações concentram-se no nível hierárquico 4.

A primeira observação sugere que há uma gama de vazões em número maior que a relativa à área de drenagem o que permite uma locação maior de estações. Coincidentemente, isto se verifica em ambas as bacias. Essa característica é importante para a avaliação das diversas opções a serem implementadas nas bacias onde já se tem uma rede implantada e necessita-se de orientação para sua expansão ou adensamento.

A diferença apresentada na segunda observação sugere que sejam tomadas devidas precauções quando se avalia uma rede em bacia com alto índice de compacidade. Nessas bacias, os resultados apresentados podem sugerir uma concentração em medição de vazões nos afluentes ignorando as regiões de maior vazão, muitas vezes mais importantes e que concentram os maiores usos dos recursos hídricos.

Uma observação adicional frente aos valores apresentados na Tabela 8.15 é a maior coincidência das estações locadas com a variável vazão: o valor total chega a 38% na bacia do Velhas e a 29% na bacia do Alto Grande. O comportamento dessas coincidências (0 – 66 – 50 – 38, na bacia do Velhas; 0 – 0 – 50 – 29, na bacia do Alto Grande) confirmam uma maior adequação deste método à bacia do Velhas.

Por sua vez, a análise comparativa das propostas geradas pela aplicação do método Sharp para a bacia do rio das Velhas, baseada na variável vazão, mostra, exatamente, a mesma relação entre as estações da rede atual e as locações propostas pelo método Sharp utilizando a variável área de drenagem.

Esse fato sugere que em bacias com essas características, com forte correlação entre a área de drenagem e as vazões, poderia ser utilizada qualquer uma das variáveis para o lançamento de uma rede inicial.

Essas avaliações, no entanto, são muito preliminares o que leva a sugerir muita precaução na utilização das propostas de locação apresentadas. É certo que, para bacias onde não há nenhuma rede ou informação disponível, de acordo com a configuração de sua rede de drenagem e com a forma da bacia, pode-se espelhar nesses exemplos para se fazer o lançamento inicial das estações: nesse caso a variável a ser utilizada seria a área de drenagem.

Para aquelas bacias onde já há alguma informação sobre as vazões, essa informação aprimora a locação apresentada pela utilização da proposta da área de drenagem, no entanto, deve-se atentar também para a forma da bacia: bacias com maior índice de compacidade podem ter estudos prejudicados com a utilização da variável vazão.

Os exemplos das variáveis utilizadas neste estudo abrem caminho para a investigação de outras variáveis ou composição de variáveis que possam ser utilizadas para a aplicação do método Sharp. Na mesma linha da definição de áreas com vazões regionalizadas poderiam ser analisadas variáveis que se correlacionem mais intensamente com a vazão e, assim, melhorar a precisão apresentada considerando somente a variável área de drenagem.

8.3.2 Método de Dixon

A utilização do método de Dixon proporcionou a avaliação seguinte: independentemente da bacia ou da variável utilizada, o nível hierárquico de menor custo é o de número 2; em níveis inferiores (3, 4, ...) os valores estimados como custo por nível são muito próximos a este, porém, ligeiramente superiores; os valores dos custos do nível 1 são sempre superiores a todos os demais. As Tabelas 8.1 a 8.7 ilustram essa afirmação.

Esses resultados sinalizam uma baixa sensibilidade do método de Dixon quanto às características próprias de cada bacia, mesmo utilizando-se de magnitudes relativas. Isto se deve ao comportamento logarítmico da magnitude e aos valores nominais elevados considerados para a mesma.

Pode-se considerar que o método de Dixon se mostrou pouco impositivo na proposta de distribuição inicial das estações. No máximo, pode ser considerado adequado para o estabelecimento de um conjunto de alternativas, dentre as quais possa se propor o melhor arranjo da rede.

Abre-se, então, a necessidade de se avaliarem outros métodos de otimização para a aplicação do método Sharp considerando tanto as especificidades das vazões fluviais, suas magnitudes e o padrão de incerteza a ser considerado.

8.3.3 Entropia própria

Antes de analisar os resultados apresentados para as bacias objeto dos estudos é necessário se avaliar o comportamento da equação 6.36 frente às duas variáveis independentes: variância e intervalo amostral relativo.

Há duas situações a serem consideradas: o cálculo da entropia com o valor amostral relativo (ΔX) ou igualando este valor a 1. No primeiro caso, considerando a independência do valor amostral com relação à variância, e que os valores da variância encontram-se entre 161 e 13 e que ΔX varia entre 1 e 8,29, nesses estudos de caso, o que corresponde, respectivamente, a uma faixa de valores para as parcelas da equação 6.36 entre 2,54 e 1,28 e outra entre 0 e 2,11, ter-se-ia para a entropia própria o valor máximo de 3,95 e o valor mínimo de 0,58. No segundo caso, considerando ΔX igual a 1, ter-se-ia para a entropia própria o valor máximo de 3,96 e o valor mínimo de 2,69.

Observa-se nos valores acima que uma avaliação da entropia própria, considerando somente os valores das variâncias das séries, poderá ser adequada quando não se pretende avaliar a série amostral sob o aspecto do número de eventos da série. Isso seria aplicável a

regiões onde todas as séries das estações têm basicamente a mesma quantidade de eventos medidos.

Por outro lado, se for levada em consideração a “idade” das séries em regiões onde o número de eventos medidos por cada estação seja relevante, não se poderia abrir mão da última parcela da equação.

Ao se avaliarem os resultados apresentados para as duas regiões em que foi aplicado o conceito da entropia própria das séries isso fica mais evidente. Vê-se nas Tabelas 8.9 e 8.10 que, para a bacia do rio das Velhas, na qual as séries apresentam variação máxima de 34% no intervalo amostral relativo (ou valor máximo de 0,29 no valor da última parcela da equação 6.36), o processo de hierarquização visando ao descarte das estações com menor valor de entropia não foi impactado de forma significativa pela utilização do valor do intervalo amostral diferente de 1. Para ambas as simulações, as estações que exigiriam menor esforço para a melhoria da qualidade das informações a serem coletadas seriam as mesmas.

Nas Tabelas 8.11 e 8.12, que apresentam os valores calculados para a bacia do Alto rio Grande, os valores são bastante diferentes entre si. Na Tabela 8.11, considerando o valor amostral relativo, as duas estações que possuem menor série de dados foram remetidas às estações mais prioritárias (com maior entropia), enquanto na Tabela 8.12 estas estações estão localizadas na parte inferior da lista de prioridades para medição.

Parece importante, então, com o objetivo de “qualificar” as séries históricas pela medida da entropia, que o valor do intervalo amostral relativo seja considerado para o cálculo da entropia própria. Esse procedimento permitiria que fosse buscado no tempo, para a rede, o nivelamento da coleta das informações, garantindo a continuidade do monitoramento para aquelas estações que ainda não alcançaram as demais quanto ao tempo de amostragem.

A avaliação da entropia própria para a continuidade das etapas relativas à otimização da rede fluviométrica deve ser feita considerando a característica própria da série sob análise, ou seja, ao se considerar o valor amostral relativo pode ser preferível uma estação cuja variância encontra-se elevada o suficiente para não ser descartada. Mais uma vez, a análise das Tabelas 8.11 e 8.12 apresenta o exemplo: a estação 46543000, utilizando o intervalo amostral relativo, seria descartada pela Tabela 8.11, porém, com a consideração da variância para qualificação da série, esta estação seria mantida no processo de otimização pela Tabela 8.12.

Sugere-se, nesses casos, manter todas as estações ou descartar somente aquela cujos valores de entropia própria estejam indicados como pouco prioritários em ambas as simulações, como foi o caso da estação 46570000 no estudo de caso sob análise.

8.3.4 Hierarquização pela entropia condicional

Após a escolha das estações hierarquizadas pelo valor da entropia própria, o procedimento proposto sugere que a rede seja otimizada utilizando-se o critério da entropia condicional associada. As estações selecionadas para continuidade da otimização foram escolhidas considerando valores diferentes para o intervalo amostral relativo. Ou seja, apesar de descartadas as mesmas estações em ambos os casos, considerou-se para cada simulação a ordem hierárquica relativa ao intervalo amostral considerado.

Inicialmente, é importante lembrar que a hierarquização proposta nessa etapa do procedimento trabalha exclusivamente com as informações geradas pelas séries das estações, independentemente da sua localização na bacia, considerando que o que se pretende é qualificar as estações que possibilitem uma maior quantidade de informações no seu conjunto.

Começando por analisar os resultados da bacia do rio das Velhas, apesar da desconsideração do aspecto geográfico, o que se vê nos resultados apresentados nas Figuras 8.10 e 8.11 é o atendimento de uma lógica locacional: na Figura 8.10 a estação que troca a menor quantidade de informações com a 41940000 (número 1) é a estação 41260000 (número 2); geograficamente, essas estações se localizam, a número 1, de maior entropia, junto à parte inferior da bacia e, a número 2, junto às cabeceiras do rio das Velhas. Essa lógica persiste: a estação que troca menor quantidade de informações com a número 2 é a estação 41890000 (número 3); essa também se localiza na parte inferior da bacia, onde as condições hidrológicas, de relevo e de precipitação são diversas das cabeceiras onde está a 41260000. E assim por diante: o método segue revezando estações que estão submetidas a situações antagônicas quanto à produção de vazão.

A lógica do fluxo do transporte de informações na Figura 8.11 é a mesma: apesar das estações que estão localizadas no início da fila da hierarquização, feita a partir da entropia própria, variarem em suas posições isso não altera o revezamento entre estações localizadas em posições hidrologicamente diversas na bacia.

As últimas estações hierarquizadas, em ambas as simulações, são as mesmas: 41990000, 41340000, 41818000, 41600000 e 41650002. Esse fato mostra quão desprezível é a utilização do intervalo amostral relativo no cálculo da entropia própria das estações em bacias com as características da do rio das Velhas.

Ao se analisarem os resultados da bacia do Alto rio Grande, nas Figuras 8.18 e 8.19, com as simulações considerando diferentes valores para o intervalo amostral relativo, que as últimas quatro estações hierarquizadas também são as mesmas: 46520000, 46543000, 46590000 e 46455000. A lógica geográfica mais uma vez se faz presente: na Figura 8.18, a estação número 1 (46530000), localizada em uma das cabeceiras da bacia, troca a menor quantidade informações com a estação 46550000 (número 2) localizada próxima ao exutório da área de drenagem; esta estação, por sua vez, troca menor quantidade de informações com a estação 46490000 (número 3), localizada no exutório da região “seca” da bacia; e assim por diante, segue-se revezando entre regiões com diferenças hidrológicas relevantes.

Ainda nessa etapa do procedimento não se faz notar com muita nitidez a diferença entre considerar ou não o intervalo amostral relativo na hierarquização proposta. Tanto os grupos de estações a serem preferidas (ou não) quanto os valores apresentados para o que se convencionou chamar de “transporte de informações” não são diferentemente impactados em ambas as simulações. Até essa fase não há razão para que se façam as duas simulações, devendo-se, por conta de simplificação operacional, optar pela aplicação do valor amostral relativo igual a 1 para hierarquização das estações.

Uma outra observação a ser feita, a partir dos resultados apresentados para ambas as bacias, é a maior redundância das informações na bacia do rio das Velhas, comparativamente à bacia do Alto rio Grande. Isto era de se esperar e está refletido nos valores relativos ao transporte das informações: os números da bacia do rio das Velhas são, quase sempre, superiores àqueles da do Alto rio Grande. Deve-se creditar esse fato às maiores diferenças entre as regiões hidrográficas da bacia baiana, sua maior diferença interna de relevo e de clima.

8.3.5 Otimização pelo transporte de informações

O procedimento proposto define o processo de otimização da rede de monitoramento por intermédio da avaliação da quantidade de informação que é agregada ao sistema com a incorporação de novas estações. Dessa forma, foi definido que, na rede hierarquizada na etapa anterior, deve-se avaliar a importância da estação de nível hierárquico inferior medindo o percentual de transferência das informações.

Os resultados são apresentados nas Figuras 8.12 e 8.13 para a bacia do rio das Velhas. Vê-se que os valores são muito próximos entre os diagramas apresentados, com um constante valor maior para a simulação que considerou o valor do intervalo amostral relativo diferente de 1. Observa-se que, enquanto na etapa de hierarquização, as informações da

estação anteriormente observadas não eram consideradas no processo posterior de avaliação do transporte de informações, nesse caso, a associação das informações do sistema (e não somente da estação) são a fonte da avaliação do transporte de informações.

Esse procedimento refina a rede proposta e possibilita o descarte de estações intermediárias na rede hierarquizada. Pode-se observar, como exemplo, a relação de “dependência” entre as quatro primeiras estações hierarquizadas, em ambas as simulações, apresentando valores de transporte próximos a 10%.

Quando se avaliam os resultados apresentados nas Figuras 8.20 e 8.21, para a bacia do Alto rio Grande, observam-se valores nominais muito mais diversos que aqueles apresentados para a bacia do rio das Velhas. Vê-se aqui que a consideração do valor do intervalo amostral relativo, bastante diferente para as diversas estações, impacta significativamente na simulação mostrada na Figura 8.21. Essa distorção leva a se sugerir, novamente, que o valor do intervalo seja considerado igual a 1 uma vez que a consideração do seu valor próprio torna-se um componente dificultador da avaliação comparativa entre bacias diferentes, além de não agregar informações quanto à análise da própria rede.

Considerado $\Delta X = 1$ e os resultados expressos nas Figuras 8.13 e 8.21 como aqueles a serem analisados, vê-se que os valores dos fluxos de transporte das estações associadas poderão apresentar uma faixa de valores bastante próximos (entre 0 e 12% no caso em análise) e, com o acúmulo de simulações em outras bacias, essa faixa de valores deverá ser verificada para que seja elaborada regra consistente para o descarte de estações.

8.3.6 Otimização pela razão da entropia do sistema

O procedimento proposto para otimização da rede apresenta, alternativamente, a possibilidade de avaliação da entropia geral do sistema com a incorporação de estações à rede, a partir da estação de maior entropia própria.

Inicialmente verifica-se nas Figuras 8.14, 8.15 e 8.23 que o valor da entropia associada do sistema é sempre crescente, mesmo considerando o valor do intervalo amostral relativo diferente de 1 para a bacia do rio das Velhas (a última parcela da equação 6.35, sempre negativa, seria a única possibilidade de que o valor geral da entropia associada viesse a reduzir com o incremento de estações).

Na Figura 8.22, no entanto, referente à simulação para otimização da rede do Alto rio Grande, utilizando-se do valor amostral relativo próprio (diferente de 1), o valor da entropia chega a reduzir-se. Essa diminuição acontece em razão dos valores elevados de ΔX que fazem com que a última parcela da equação torne-se bastante significativa no cálculo da

entropia associada. Esse resultado, ligado diretamente à última parcela da equação 6.35, mostra que se deve, efetivamente, eliminar esse tipo de simulação para o processo de otimização.

Considerando somente os valores dos diagramas onde ΔX é igual a 1 (Figuras 8.14 e 8.15), observa-se que a otimização utilizando-se o critério da razão da entropia aplica-se somente às estações de menor nível hierárquico, confundindo-se com o próprio processo de hierarquização.

Trata-se, então, diferentemente da análise do fluxo do transporte de informações, não de um processo de otimização mas de uma etapa complementar à etapa de hierarquização para auxiliar na análise do descarte de estações.

8.3.7 Avaliação geográfica do transporte de informações

A construção de diagrama unifilar da rede de monitoramento, apresentando a locação real na bacia das estações sob análise e avaliando a transferência de informações entre elas, foi mostrada nas Figuras 8.16 e 8.24 para ambas as bacias sob simulação.

Esse procedimento, que apresenta resultados idênticos e independentes do intervalo amostral relativo, é importante auxiliar no julgamento da dependência das estações e na análise da consistência dos resultados do processo de hierarquização e otimização da rede.

Observa-se claramente no diagrama para a bacia do rio das Velhas que a dependência (ou redundância de informações) entre as estações é muito maior nesta bacia do que na bacia do Alto rio Grande. Vê-se, também, a dependência das informações geradas pelas estações hierarquicamente inferiores na rede (segundo a 6ª etapa) e os valores nominais que podem sinalizar degraus nas condições hidrológicas da bacia. Um exemplo dessa última afirmação pode ser visto no transporte de informações entre as estações 41260000 e 41340000 na bacia do rio das Velhas ou entre as estações 46490000 e 46550000, na bacia do Alto rio Grande, com valores indicativos da existência de regiões hidrológicamente diferentes. Em ambos os casos há uma forte diferenciação dos valores nominais do transporte das informações, comparativamente aos valores entre as outras estações.

Esses diagramas unifilares são importantes, ainda, para a avaliação do descarte de estações uma vez que as relações apresentadas pelo procedimento proposto para hierarquização e otimização precisam ser avaliadas, freqüentemente, para sua validação. Sugere-se, então, que essa etapa seja incorporada ao fluxograma de atividades do procedimento proposto.

8.3.8 Critérios de gestão na avaliação da rede

A locação das estações deverá possibilitar que as diretrizes de gestão dos recursos hídricos, para todas as regiões hidrográficas, atendam, por exemplo, às necessidades de monitoramento de áreas críticas relativas ao uso quantitativo e à qualidade das águas, à verificação de seções sujeitas à restrição de uso ou à alocação negociada das águas ou ao conhecimento das tendências correlacionadas ao uso do solo.

Este trabalho não se estenderá nessa análise ou proposição já que uma avaliação criteriosa da locação de estações para esses atendimentos demandaria verificar o plano de recursos hídricos da respectiva região e as deliberações dos comitês de bacia, assim como diretrizes estaduais e federais que norteiam os usos das águas, o que não se propõe aqui.

Restringir-se-á à proposição de uma estação de monitoramento fluviométrico junto ao exutório de cada região, fato que parece ser imprescindível para a gestão descentralizada dos recursos hídricos nessa região hidrográfica frente ao necessário atendimento das diretrizes de uso da bacia do rio São Francisco.

8.4 REVISÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

Em função da análise dos resultados apresentados pela aplicação dos métodos pode-se rever o procedimento proposto contemplando a separação dos métodos propostos (Sharp e Entropia), conforme proposto nas seções 8.4.1 e 8.4.2.

A proposição da separação levou em consideração, basicamente, que a aplicação dos métodos atende a interesses distintos: o método Sharp para a elaboração de proposta de locação inicial ou para adensamento de redes de monitoramento; o método utilizando o conceito de entropia para avaliação dos dados coletados em cada estação e, também, da redundância de informações oriundas da rede existente. Importante destacar que para a aplicação de ambos os métodos devem estar claros os objetivos a que se destinam os resultados a serem alcançados, conforme Tabela a seguir, extraída da Tabela 6.5.

Tabela 8.16 – Objetivos e interesse para aplicação do método Sharp e do método utilizando o conceito de entropia (onde **A** = atende ao quesito)

Métodos e Procedimentos	Objetivos e interesses		Escala temporal			Escala espacial		
	Hidrológicos	Gestão	Alterações climáticas	Usos de recursos hídricos	Alerta	Macro localização	Micro localização	Locais representativos
Método Sharp	A		A	A		A		
Método utilizando entropia	A	A	A	A		A		A

8.4.1 Novo fluxograma para o Método Sharp

Dos resultados apresentados, propõe-se que o método Sharp seja utilizado visando à locação de estações fluviométricas e considerando as variáveis área de drenagem e vazões fluviais. Para bacias nas quais não haja informações fluviométricas deverá ser utilizada a variável área de drenagem; para bacias em que haja conhecimento de vazões fluviais, deve-se utilizar a vazão fluvial como a variável do método.

O resultado a ser alcançado com esse método poderá ser destinado tanto ao lançamento inicial de estações, por nível hierárquico de prioridade, quanto para subsidiar o adensamento de redes de monitoramento que se mostrem insuficiente para a geração das informações hidrológicas.

O fluxograma apresentado na Figura 8.25 estabelece as etapas a serem obedecidas para a aplicação do método. Nesse fluxograma, inicia-se avaliando qual será a variável a ser utilizada no método. Escolhida, entre a vazão fluvial e a área de drenagem, calcula-se a magnitude, ou ordem, da bacia hidrográfica e aplica-se o método de Sharp buscando definir os diversos níveis hierárquicos. Esses níveis terão área ou vazão sempre superior àqueles valores definidos como mínimos.

Definidos os níveis hierárquicos, é feita a locação das diversas estações considerando um coeficiente de tolerância K que estabelece a área ou vazão agregada ao valor do centróide próxima à qual pode este ser locado.

O resultado da aplicação do método pode ser apresentado em mapa com a rede de drenagem e os diversos níveis hierárquicos de centróides, definidos em função da variável utilizada.

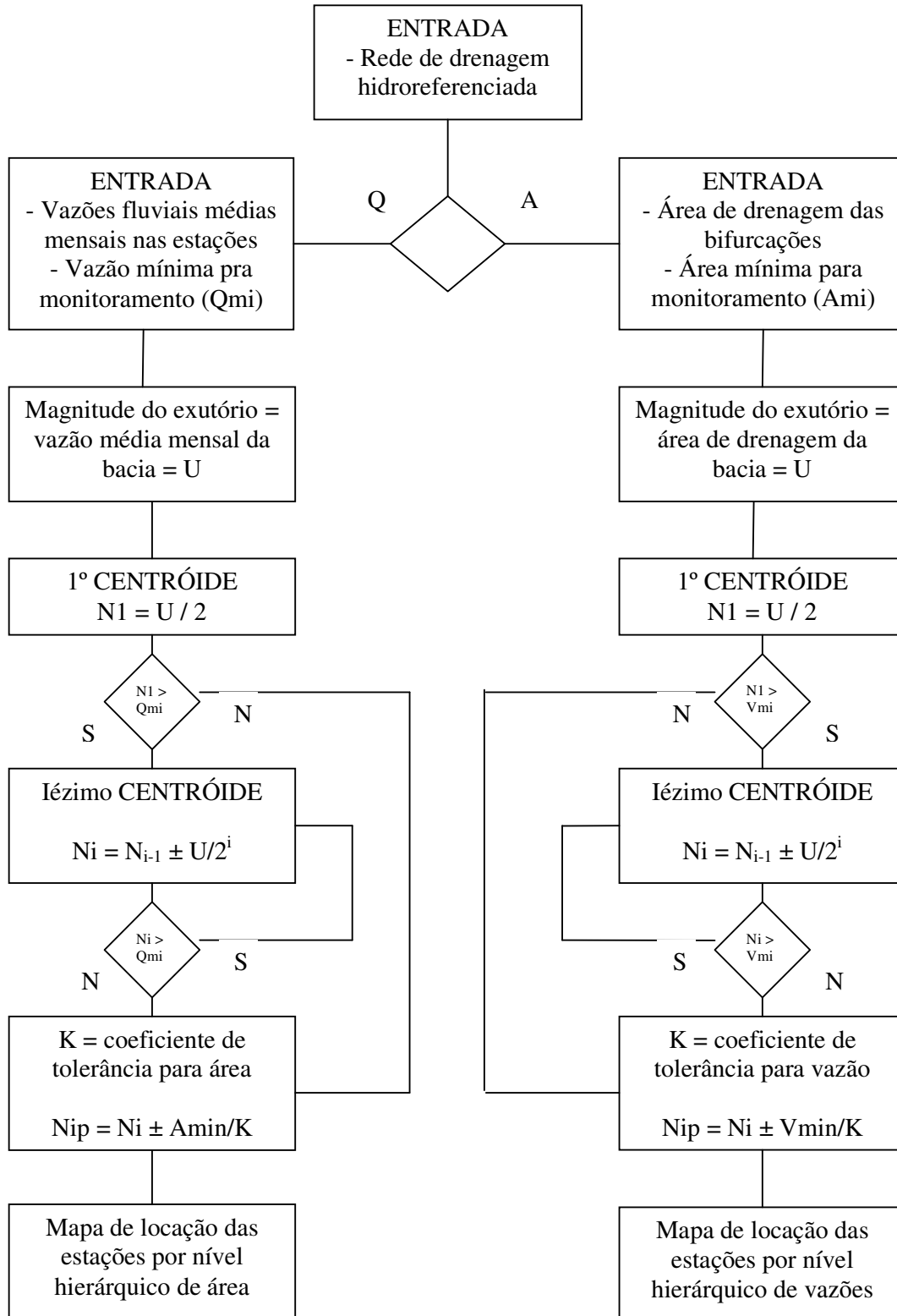


Figura 8.25 – Fluxograma para a aplicação do método Sharp visando à locação de estações para rede de monitoramento fluviométrico de vazões

8.4.2 Novo fluxograma para o Método utilizando o conceito de entropia

Da análise dos resultados apresentados com a aplicação do procedimento proposto, o método utilizando o conceito de entropia pode ser utilizado visando à avaliação da qualidade dos dados coletados em cada uma das estações de monitoramento assim como para a verificação da redundância existente nas diversas séries de dados visando à otimização das estações ou o redimensionamento da rede sob análise.

Esse método é aplicável às séries ergódicas ou a séries de vazões naturais reconstituídas.

O fluxograma apresentado na Figura 8.26 estabelece as etapas a serem obedecidas para a aplicação do método. Nesse fluxograma, inicia-se avaliando a rede de drenagem e as condições de ergodicidade das séries de vazões. Definidas, também, as condições mínimas de aceitabilidade dessas séries (tempo de leitura e área mínima de drenagem), podem ser construídas as funções distribuição de freqüência de cada uma das séries.

A análise das diversas funções-distribuição de uma bacia permite que se escolha a função distribuição padrão. Nesta dissertação, apenas aquelas bacias cujo comportamento estatístico hidrológico das distribuições de freqüência das séries de vazões assemelha-se à função Log-Normal, possuem equações já desenvolvidas para a utilização do método.

Calcula-se, então, os valores da entropia própria, com o valor amostral relativo ou igualando este valor a 1 (um). Da análise dos valores destas entropias, pode-se estabelecer uma primeira hierarquia para as estações.

Essa hierarquia inicial é submetida ao cálculo da entropia condicional, tanto considerando a cadeia hierarquizada quanto a situação hidrográfica das estações. Pode-se, nessa etapa, descartar aquelas estações cujos valores de entropia indiquem redundância ou sejam menores que valores considerados importantes para a continuidade do monitoramento.

Processa-se, na etapa seguinte, ao cálculo da entropia associada da rede hierarquizada. Podem-se eliminar estações que apresentem uma redundância superior ao valor máximo de transporte de informações permitido. Retirando-se estas estações, pode-se proceder a novo cálculo dos valores dos transportes de informações na entropia associada e, assim por diante, eliminarem-se as estações indicadas pelo método.

O resultado final é a apresentação de cadeia hierarquizada de estações, devidamente otimizada pelo critério da entropia associada e pelo máximo transporte de informações permitido.

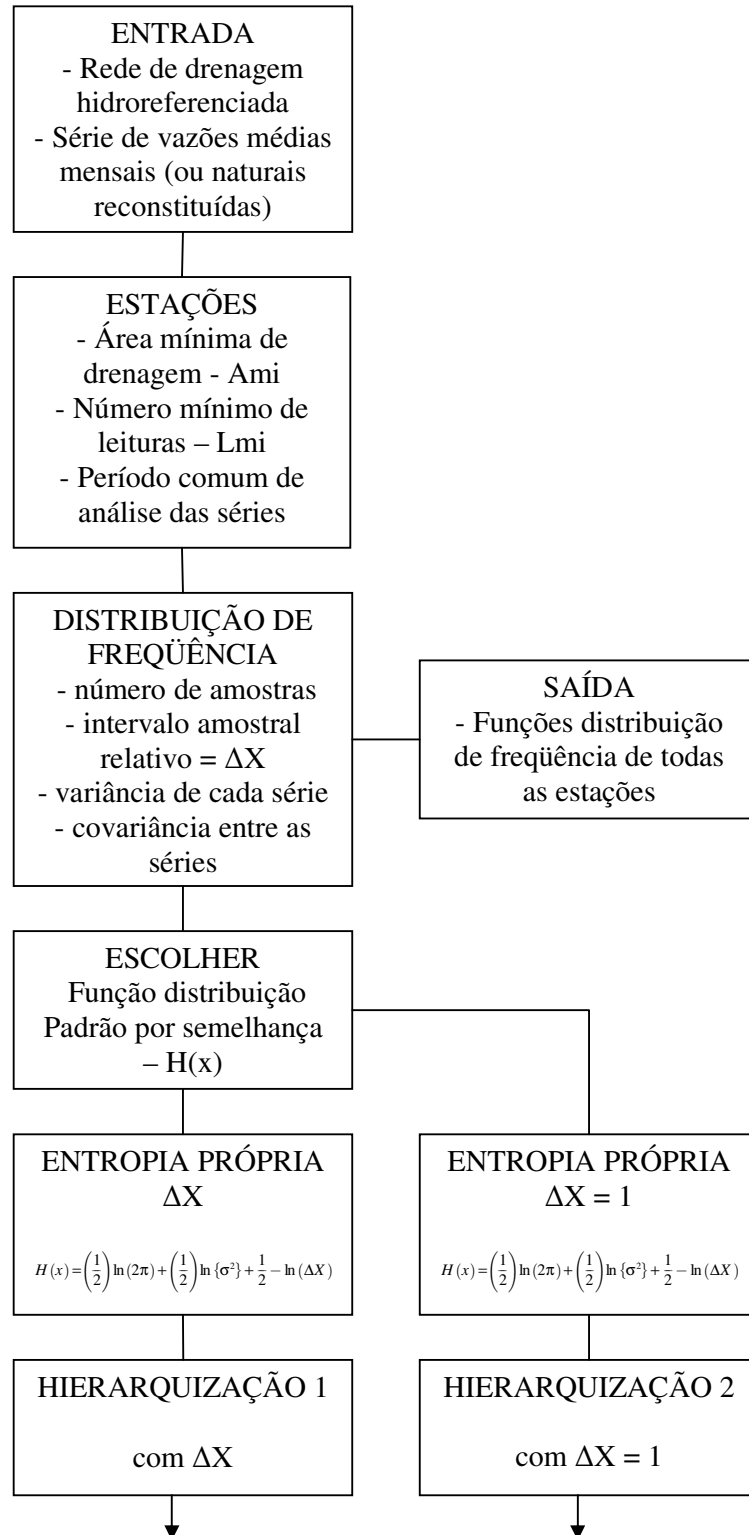


Figura 8.26 (1/2) – Fluxograma para a aplicação do método utilizando o conceito de entropia visando à avaliação e redimensionamento de rede de monitoramento fluviométrico de vazões

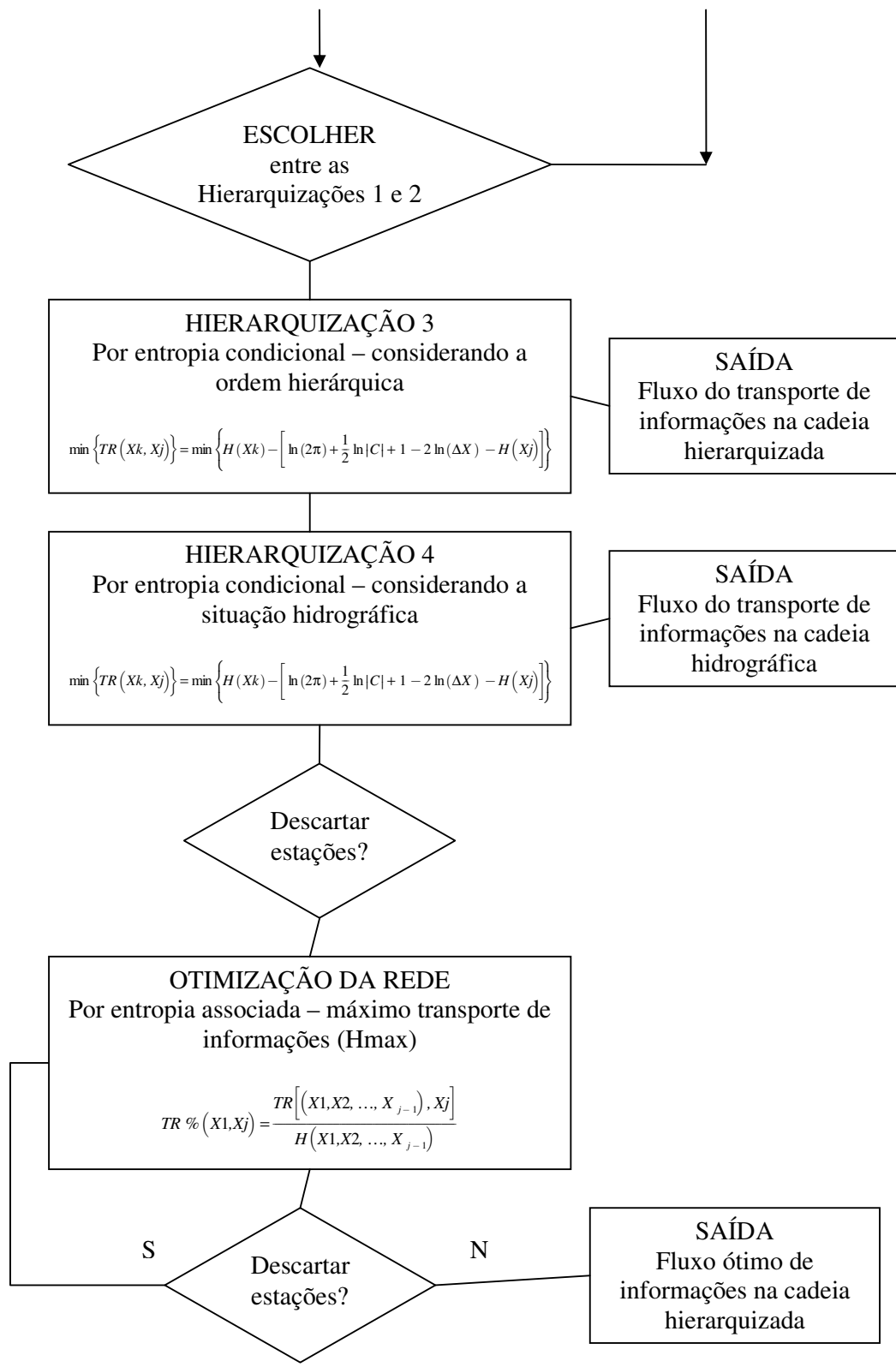


Figura 8.26 (2/2) – Fluxograma para a aplicação do método utilizando o conceito de entropia visando à avaliação e redimensionamento de rede de monitoramento fluviométrico de vazões

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral desta dissertação foi propor um procedimento técnico-científico para avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico de vazões.

Foram discutidos os objetivos específicos a que deveriam atender as redes de monitoramento, os conceitos que definem as redes básicas e, também, as redes especialistas e, principalmente, a política de recursos hídricos no Brasil, sua evolução e a mudança de paradigmas quanto a seus objetivos.

Destacou-se o histórico da implantação da rede no país, os princípios que nortearam a instalação das estações e como se propõe, na atual política de recursos hídricos, que a rede de monitoramento possa sustentar as demandas da gestão e dos instrumentos legais estabelecidos para sua efetivação.

Importante destacar que, em função dos fundamentos da legislação brasileira, principalmente aqueles que se referem à descentralização da gestão e à definição da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, com a instituição do Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2006) devem ser definidas as diretrizes para a rede de interesse nacional e para as redes de interesses locais. A estas últimas devem ser reservadas as atribuições de acompanhamento das necessidades expressas nos planos de recursos hídricos das respectivas unidades de planejamento e que visam atender às demandas nas escalas mais adequadas para sua gestão. Ambas as redes podem ser classificadas como básicas, porém, aquela rede que busque monitorar tendências e metas estabelecidas no Plano Nacional será neste trabalho considerada como rede básica nacional e a outra, para a gestão em bacias, será considerada rede básica de bacia.

A reunião das técnicas e procedimentos utilizados para a elaboração do planejamento e dos projetos de rede mostrou que não se deve à inexistência de métodos a falta de procedimentos sistemáticos para sua avaliação. Esse trabalho, em função da reunião das informações pesquisadas, poderá contribuir e facilitar posteriores pesquisas quanto ao aprimoramento dos métodos propostos e daqueles apresentados e classificados aqui.

Dentre os métodos pesquisados, elegeram-se dois sobre os quais se propôs desenvolver maiores considerações e estudos buscando verificar sua adequação ao escopo do trabalho: o método Sharp e o método utilizando o conceito de entropia.

O método Sharp depende, basicamente, da boa definição de qual variável deve ser considerada para a determinação da magnitude dos ramos de uma rede de drenagem. Foram escolhidas a área de drenagem e a vazão fluvial como as variáveis a serem simuladas. A

apresentação da discussão teórica e a aplicação do método mostraram que se trata de técnica bastante expedita para a proposição da locação de estações. Naquelas que apresentam baixa densidade de monitoramento mostrou-se que, de forma iterativa com as vazões medidas, pode-se rever e propor nova locação das estações para a coleta de dados. Esse método poderá permitir, ainda, a automatização do lançamento de estações uma vez integrado a sistemas de informações geográficas que georeferenciem os dados da variável utilizada para definição da magnitude.

Os exemplos apresentados para três regiões hidrográficas da bacia do rio São Francisco foram importantes para que se visualizassem as diferentes situações que poderão ser abrangidas com o apoio desse método: na bacia do rio das Velhas, em função da uniformidade apresentadas pelas séries de dados coletados, tanto quanto ao tempo de sua aquisição quanto à forte correlação da variabilidade das vazões com relação à área de drenagem, observa-se uma boa aproximação entre os pontos propostos utilizando as duas variáveis; na bacia do Alto rio Grande, no entanto, esse fato não foi observado, provavelmente, em função das diferentes características hidrográficas dentre suas áreas de drenagem, o que indica uma reflexão a ser feita quanto ao impacto dessas características antes da escolha da melhor variável para a magnitude dos ramos; e, na região hidrográfica Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro, vê-se que a utilização da área de drenagem pode ser bastante útil para uma distribuição inicial das estações.

A utilização da área de drenagem como fator de ponderação pode ser muito adequada em regiões que não possuam informação confiável sobre as vazões dos seus cursos d'água e que apresentem uniformidade de relevo, de precipitação e de outras características que sejam relevantes para a produção hídrica da bacia. Nas regiões onde essas características não se apresentam, há necessidade de se avaliar a utilização de outras variáveis de forma composta com a área de drenagem, de forma similar aos procedimentos utilizados nos estudos de regionalização de vazões.

Os estudos apresentados por Galvão (2004) poderão ser úteis para um aprimoramento das propostas aqui apresentadas, principalmente nos aspectos relativos à definição e mapeamento de variáveis relevantes para a locação de estações, incluídas aí aquelas relativas às necessidades da gestão dos recursos hídricos na bacia.

O outro método escolhido, com a utilização do conceito da entropia, parece bastante adequado aos casos estudados. O método foi aplicado a duas regiões. A região hidrográfica do rio das Velhas possui estações mais antigas, séries mais consolidadas e muito

homogêneas sob os aspectos relativos ao tempo de coleta. No entanto, as variâncias das séries de dados são muito altas o que proporcionou valores maiores de entropia própria (acima de 3) para todas as estações. Por sua vez, as entropias próprias apresentaram valores muito próximos entre as estações o que poderá representar uma especificidade das vazões dessa bacia. Pela análise da transferência de informações entre as séries pode-se supor que há uma maior redundância nas informações coletadas já que seus valores são sensivelmente maiores que aqueles apresentados na bacia do Alto rio Grande, o que pode indicar a necessidade de otimização das estações ali instaladas.

Na bacia do Alto rio Grande, a diferença entre o intervalo amostral relativo de duas das estações selecionadas é muito significativo na definição do valor da entropia própria. Esse fato indica que essas estações deverão ter intensificadas as medições, reduzindo tal intervalo. A transferência de informações entre as estações, no entanto, indica que há uma independência grande entre as informações coletadas nos diferentes locais. Isto pode ser explicado pelas diferentes características hidrológicas da região: a área de drenagem da estação 46490000, que influencia diretamente a série da estação 46550000, é composta por cabeceiras em região semi-árida, com baixa produção hídrica, diferentemente das demais cabeceiras dos cursos monitorados pelas demais estações. A transferência de informações pode indicar, também, que existe um número de estações menor do que seria necessário para essa região.

A análise dos resultados do procedimento sugere que sua aplicação é muito útil para a avaliação da “qualidade” das séries de dados, ou seja, as séries que têm valores relativos de entropia própria muito superiores àqueles observados nas demais devem ter suas medições priorizadas. Sugere, ainda, que os valores de transporte de informações devem ser observados com bastante critério antes do descarte das estações. Cuidados adicionais devem ser tomados nessas situações visando verificar a correlação espacial entre as estações. Quando, além do procedimento proposto, elaborou-se o fluxo de informações entre as séries, de montante para jusante na bacia, os resultados indicaram com maior precisão a origem das redundâncias e aquelas que efetivamente podiam ser consideradas descartáveis. Ou seja, a proposta não poderá prescindir de uma etapa adicional, após a 7ª etapa – que propõe a otimização da rede pela análise do transporte de informações. O resultado da 7ª etapa pode não guardar correspondência direta com a situação física real o que poderá indicar avaliações incorretas dos resultados apresentados.

Estudos adicionais deverão contribuir para melhor avaliação do procedimento proposto neste trabalho. Para o método Sharp, sugere-se que sejam elaborados:

a) avaliação de outras variáveis ou composição de variáveis para a definição da magnitude de ramos de rede de drenagem;

b) proposição de técnica de otimização das propostas resultantes do método, considerando as especificidades das vazões fluviais quanto ao padrão de incerteza e ao valor nominal da magnitude;

c) automação dos procedimentos do método permitindo a geração mais eficiente de resultados e, conseqüentemente, uma maior gama de alternativas ao projetista de redes.

O método utilizando o conceito da entropia, por sua vez, merece estudo com maior profundidade, principalmente no que se refere aos seguintes aspectos:

a) correlação entre os valores da entropia própria e as características intrínsecas das vazões fluviais nas bacias hidrográficas;

b) correlação entre a entropia própria e o valor do intervalo amostral relativo;

c) faixas de valores a serem observadas na razão da transferência de informações e sua correlação com as características hidrológicas da bacia;

d) comportamento dos valores a serem observados na razão do avanço da entropia condicional na rede;

e) avaliação da influência da adoção da distribuição Log-Normal em relação a outras distribuições que podem se ajustar melhor ao comportamento fluvial e conseqüente definição da equação da entropia associada;

f) automação dos procedimentos do método.

Quanto ao procedimento proposto deve-se considerar o valor do intervalo amostral relativo igual a 1 nas etapas de hierarquização e otimização da rede (etapas 6ª e 7ª) e incluir na avaliação a etapa que promove a avaliação do transporte de informações entre as estações, de montante para jusante, logo após a 7ª etapa.

A aplicação do procedimento proposto leva-nos a uma constatação imediata: a aplicação simples da Tabela 6.1 - densidade mínima para redes fluviométricas (WMO, 1994; LLAMAS, 1996) – não é suficiente para que possamos classificar as unidades de planejamento e gestão do país quanto à suficiência das redes instaladas. Os resultados apresentados para a bacia do rio das Velhas mostra que esta não pode ser classificada como superdensa e sim como média; enquanto os resultados apresentados para a bacia do Alto rio

Grande apresentam uma rede com classificação quase subdensa, diferentemente do valor médio apresentado na Figura 7.3.

Certamente, a aplicação desse procedimento em um número maior de bacias hidrográficas deverá proporcionar uma visão mais crítica das suas vantagens e desvantagens, visando seu aprimoramento ou rejeição.

Este trabalho indica um possível caminho a ser seguido para que haja, de forma sistemática, a avaliação e o redimensionamento de redes de monitoramento das vazões fluviais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALQUÉRES, J. L. Planejamento da expansão do setor elétrico: histórico e perspectivas. In: Curso de especialização sobre o novo ambiente regulatório, institucional e organizacional do setor elétrico. São Paulo: USP/IEE, 1997.
- ANA. *Diagnóstico da situação atual da rede hidrometeorológica da bacia hidrográfica do rio Paraguai - Relatório Final*. Brasília: 2001.
- ANA. Estudos sobre a determinação das bacias hidrográficas brasileiras segundo o método Otto Pfafstetter. Brasília: 2002.
- ANA. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco*. Brasília: 2004.
- ANA. Rede hidrometeorológica administrada pela ANA. Apresentação de slides realizada em junho de 2007 pela Superintendência de Informações Hidrológicas da ANA. 89p.
- ANA. *Mapa de declividades do terreno no Brasil*. Brasília: 2006.
- ANDRADE, E. M., PORTO, M. M., COSTA, R. N. T, MEIRELES, M e NETO, J. A. C. Regionalização de modelo de vazões médias de longo período para o Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, Ceará, v. **35**, número especial, p.139-148. 2004.
- ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. 2ª ed. Brasília: 2003.
- BELZ, J. e ENGEL, H. Optimization of surface water observation networks. In: International workshop on hydrological networks for integrated and sustainable water resources management, 2003, Koblenz, Alemanha. *Anais* p. 115-122.
- BENETI, A. e BIDONE, F. *O meio ambiente e os recursos hídricos*. TUCCI, C. E. M. org. In: Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/EDUSP, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. **4**, p. 849-75. 1993.
- BORSATO, F. H e MARTONI, A. M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no município de Maringá no Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Human and Social Sciences*, Maringá, Paraná, v. **26**, nº 2, p. 273-285. 2004.
- BRAGA, B.; REBOUÇAS, A. da C. *Águas Doces no Brasil. Capital ecológico, uso e conservação*. São Paulo: escrituras, 2002, 703p.
- BRASIL. Constituição (1891). Constituição da República dos Estados Unidos do Brasil. Rio de Janeiro: Congresso Nacional Constituinte, 1891.

- BRASIL. Lei nº 3.071, de 1º de janeiro de 1916. Código Civil. Rio de Janeiro: 1916.
- BRASIL. Constituição (1934). Constituição da República dos Estados Unidos do Brasil. Rio de Janeiro: Assembléia Nacional Constituinte, 1934.
- BRASIL. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código das Águas. Rio de Janeiro: Governo Provisório da República dos Estados Unidos do Brasil, 1934.
- BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília: Congresso Nacional Constituinte, 1988.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da lei nº 8.001, de 13 de março de 1.990, que modificou a lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília: Congresso Nacional, 1997.
- BRASIL. Resolução nº 396 da Agência Nacional de Energia Elétrica, de 4 de dezembro de 1998. Estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de estações fluviométricas e pluviométricas associadas a empreendimentos hidrelétricos. Brasília: ANEE, 1998.
- BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Brasília: Congresso Nacional, 2000.
- BRASIL. Resolução nº 30 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 11 de dezembro de 2002. Institui a metodologia para codificação de bacias hidrográficas. Brasília: CNRH, 2002.
- BRASIL. Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 15 de outubro de 2003. Institui a divisão hidrográfica nacional. Brasília: CNRH, 2003.
- BRASIL. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: 2006.
- CHAPMAN, D. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. London: Chapman & Hall, 1992.
- COELHO, A. C. P.; GONTIJO, W. C. Júnior; NETO, A. C. e FORMIGA, K. T. M. *Base Territorial para a Gestão de Recursos Hídricos – uma proposta metodológica*. In: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 7º, 2005, Évora, Portugal. Resumo expandido. Évora: APRH, 2005.

- DIXON, W.; SMYTH, G. K. E CHISWELL, B. *Optimized Selection of River Sampling Sites. Water Resources*, v. **33**, n° 4, p. 971-978, 1999.
- DNAEE/MME. *Planejamento de redes*. Brasília: 1983. 44p.
- DNAEE. *Rede hidrológica nacional – aspectos relevantes*. Brasília: 1995. 6p.
- EPSTEIN, I. *Teoria da Informação*. 2ª. ed. São Paulo: Editora Ática, 1988. 77p.
- MDPI – Molecular Diversity Preservation International - *Entropy, an International and Interdisciplinary Journal of Entropy and Information Studies*. Disponível em: <http://www.mdpi.org/entropy/>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2007.
- FREITAS, M. A. V. de (org) et al. *O estado das águas no Brasil – 1999*. 2ª ed. Brasília: ANEEL, SIH; MMA, SRH; MME, 1999. 334P.
- GALVÃO, W. S. *Uso de sistema de informação geográfica (SIG) na geração de modelos de favorabilidade à locação de estações fluviométricas e de unidades geoambientais homogêneas na bacia do rio São Francisco*. 2004. Tese de doutoramento – Universidade de Brasília, Brasília.
- GALVÃO, W. S. e MENESES, P. R. *Avaliação do sistema de classificação e de codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005, Goiânia, Brasil. *Anais ...* Goiânia: 2005, INPE, p.2511-2518.
- GALVÃO, W. S. e MENESES, P. R. *Geração do mapa de potencial à locação de estações na bacia do rio São Francisco como um produto estratégico de apoio às ações de planejamento de redes fluviométricas, através do uso de SIG e do classificador neural supervisionado*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005, Goiânia, Brasil. *Anais ...* Goiânia: 2005, INPE, p.2519-2526.
- GARCEZ, L. N. *Hidrologia*. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1967. 249 p.
- HARMANCIOGLU, S. D.; OZKUL, S. D.; ALPASLAN, M. N. *Water quality monitoring and network design*. In: Environmental data management. Dordrech: Kluwer, chapt. 4, p. 61-105, 1998.
- HORTON, E. R. *Erosional development of streams. Geological Society American Bulletin*, v. **56**, p. 275-370, 1945.
- IBIAPINA, A. V. et al. *Evolução da Hidrometria no Brasil*. In: FREITAS, M. A. V. de (org) et al. *O estado das águas no Brasil – 1999*. 2ª ed. Brasília: ANEEL, SIH; MMA, SRH; MME, 1999. 334P.

- KARASIEV, I. F. *Métodos estocásticos em hidráulica e hidrometria*. Gidrometeoizadt. Leningrado, 1992.
- KRIGE, D. G. *A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand*. J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afri., Johannesburg, v. **52**, p. 151-163, 1951.
- LANNA, A. E. *Elementos de estatística e probabilidades*. In: TUCCI, C. E. M. et al. *Hidrologia – ciência e aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001. p. 79 - 176.
- LIMA, J. B. M. *Estudo de redes de monitoramento de qualidade das águas superficiais – o caso da bacia do rio Descoberto*. 2004. 113p. Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília.
- LLAMAS, J. *Curso intensivo de planejamento e projeto de redes meteorológicas e hidrométricas*. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1996. 66p.
- MAGALHÃES, A. P. Júnior. A situação do monitoramento das águas no Brasil – instituições e iniciativas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH*, Porto Alegre, v. **5**, nº 3, p. 113-135, 2000.
- MARTINS, J. A. *Escoamento superficial*. In: PINTO, N. L. de S., HOLTZ, A. C. T. e MARTINS, J. A. *Hidrologia de Superfície*. Curitiba: Organização Pan-Americana de Saúde (OPS/OMS) e Universidade Federal do Paraná, 1967. p. 43-52.
- MOLLINEDO, M. A. O. *Optimizacion de la red hidrológica básica bajo los escenarios del cambio climático en la Republica de Bolívia*. 2000. Resumo de Tese de doutoramento - Universidad Estatal Hidrometeorologica de Rusia, San Petersburgo, Rússia.
- POLITANO, W. e PISSARA, T. *Relações entre as características morfométricas quantitativas e estimativa da vazão em função da área em microbacias hidrográficas de 2ª ordem de magnitude*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*. Jaboticabal, v. **26**, nº 1, p. 179-183. 2003.
- RECKHOW, K. H.; CHAPRA, S. C. *Engineering approaches for lake management*. Woburn: Butterworth, 1983.
- SANDERS, T. G. et al. *Design of network for monitoring water quality*. 4ª ed. Michigan: Water Resources Publications, 1983. 328p.

- SANTOS, I. dos *et al.*. *Hidrometria aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372p.
- SCHEIDEGGER, A. E. *Theoretical Geomorphology*. 2ª ed. New York: Springer-Verlag, 1970. 435p.
- SHREVE, R. L. *Statistical law of stream numbers*. J. Geology, 74. p. 17-37, 1966.
- SHREVE, R. L. *Infinite topologically random channel networks*. J. Geology, 75. p. 178-186, 1967.
- SHANNON, C. E. e WEAVER, W. *The Mathematical Theory of Communication*. 9ª ed. Illinois: The University of Illinois Press: Urbana, 1962. 117p.
- SHARP, W. E. Stream order as a measure of sample source uncertainty. *Water Resources Research*, v. 6, n. 3, p. 919-926, 1970.
- SHARP, W. E. A topologically optimum water-sampling plan for rivers and streams. *Water Resources Research*, v. 7, n. 6, p. 1641-1646, 1971.
- SILVA JR, O. B.; BUENO, E. O.; TUCCI, C. E. M. e CASTRO, N. M. R. *Extrapolação espacial na regionalização da vazão*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre. v. 8, nº 1, p. 21-37, 2001.
- SOARES, P. F. *Projeto e avaliação de desempenho de redes de monitoramento de qualidade de água utilizando o conceito de entropia*. 2001. 211p. Tese de doutoramento – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, USP, São Paulo.
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*. 2ª. Ed. São Paulo: Shaum MacGraw-Hill, 1985.
- STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow, Ven Te (Ed.) *Handbook of applied Hydrology*, New York. McGraw-Hill, p. 4.39 a 4.76, 1964.
- TRARBACH, J. *Aplicação do método geoestatístico no dimensionamento de redes pluviométricas e na avaliação da precisão da estimativa de precipitações médias totais anuais e sazonais sobre uma área*. 2004. 113p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- TUCCI, C. E. M. *Regionalização de vazões*. Agência Nacional de Energia Elétrica. IPH/UFRGS. Porto Alegre, 2000.
- TUCCI, C. E. M. *et al.* *Hidrologia – ciência e aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001. 943p.

- TUCCI, C. E. M. *Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos*. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2002. 150p.
- UN/ECE Task Force on Monitoring & Assessment. *Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Rivers*. 1ª ed. Lelystad, Netherlands: Riza, 2000.
- VILLELA, S. M. e MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: MacGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.
- VOGT, K. e PETERSEN, V. Surface water quality monitoring – requirements of the EU Water Framework Directive. In: International workshop on hydrological networks for integrated and sustainable water resources management, 2003, Koblenz, Alemanha. *Anais ...* p. 103-113.
- WMO. *Guide to hydrological practices – data acquisition and processing, analysis, forecasting e others applications*. 15º ed. 1994. World Meteorological Organization nº 168. p. 259-287.

APÊNDICE A

DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE ΔX NA FÓRMULA DA ENTROPIA ASSOCIADA

Na Tese de doutoramento de Soares (2001), intitulada *Projeto e avaliação de desempenho de redes de monitoramento de qualidade de água utilizando o conceito de entropia*, este autor propõe para o cálculo da entropia condicional a aplicação da equação 6.34.

$$H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1} | X_j) = H(X_1, X_2, \dots, X_{j-1}, X_j) - H(X_j) \quad 6.34$$

Na qual:

$$H(X_1, \dots, X_j) = \left(\frac{j}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln|C| + \frac{j}{2} - j \ln(\Delta X) \quad 6.35$$

Nas quais:

$H(X/Y)$ = entropia condicional de X, dado Y

j = número de amostras (ou estações)

$|C|$ = determinante da matriz de covariâncias C (que mede a dependência entre as séries amostrais associadas)

ΔX = intervalo de amostragem dos dados, assumido o mesmo para todas as estações M

Soares propõe, também, considerar um mesmo intervalo de valores para os dados das amostras (ΔX), para todas as estações. Importante destacar que essa proposta insere-se no âmbito do tratamento de dados de coleta de parâmetros de qualidade das águas.

Essa formulação, no entanto, não atende às características dos dados fluviais já que a coleta para a determinação de vazões, tendo em vista seu caráter mais expedito, é realizada em períodos mais curtos e, em várias séries de dados em uma mesma rede, pode-se ter número muito variável de intervalos de coleta. Como trata-se de um desenvolvimento geral para a entropia condicional, a equação 6.35, deverá, então, atender a esta necessidade específica e substituir-se-á na fórmula ΔX por ΔX_i .

No mesmo trabalho, em conformidade com a teoria desenvolvida por Shannon (1962), Soares propõe que a transferência de informações entre as duas séries seja calculada pela equação 6.43, abaixo:

$$\min \{TR(Xk, Xj)\} = \min \left\{ H(Xk) - \left[\ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln|C| + 1 - 2 \ln(\Delta Xi) - H(Xj) \right] \right\} \quad 6.43$$

Se duas séries são independentes quando a transferência de informações entre elas é nula e que isto ocorre quando a covariância entre estas séries é, igualmente, nula, tem-se:

$$0 = H(Xk) - \left\{ \ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln|C| + 1 - 2 \ln(\Delta Xi) \right\} + H(Xj) \quad A.1$$

e

$$|C| = \sigma k^2 \sigma j^2 \quad A.2$$

Se a entropia própria é calculada por (A.3):

$$H(Xi) = \left(\frac{1}{2} \right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2} \right) \ln(\sigma i^2) + \frac{1}{2} - \ln(\Delta Xi) \quad A.3$$

Substituindo A.2 e A.3 em A.1, tem-se:

$$0 = \left\{ \left(\ln(2\pi) \right) + \frac{\ln(\sigma k^2)}{2} + \frac{\ln(\sigma j^2)}{2} + 1 - \ln(\Delta Xk) - \ln(\Delta Xj) \right\} - \dots$$

$$\dots \left\{ \ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln(\sigma k^2 \sigma j^2) + 1 - 2 \ln(\Delta Xi) \right\} \quad A.4$$

Assim:

$$\ln(\Delta Xk) + \ln(\Delta Xj) = 2 \times \ln(\Delta Xi) \quad \text{ou} \quad \Delta Xi = \sqrt{\Delta Xj \times \Delta Xk} \quad A.5$$

e, generalizando:

$$\ln(\Delta X_1) + \dots + \ln(\Delta X_n) = n \times \ln(\Delta X_n) \quad \text{ou} \quad \Delta X_n = \sqrt[n]{\Delta X_1 \times \dots \times \Delta X_n} \quad \text{A.6}$$

APÊNDICE B

FUNÇÕES DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – 1978 A 2006

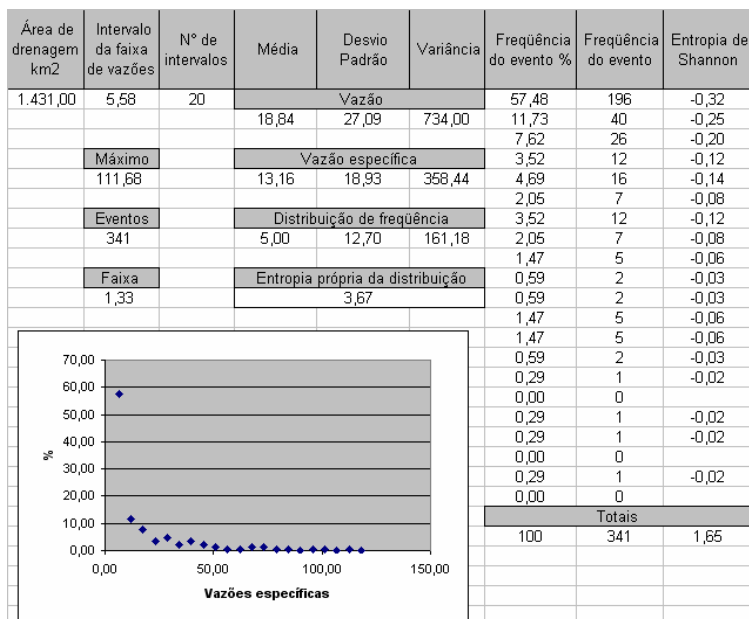


Figura B.1 – Função distribuição de frequência da estação 41890000

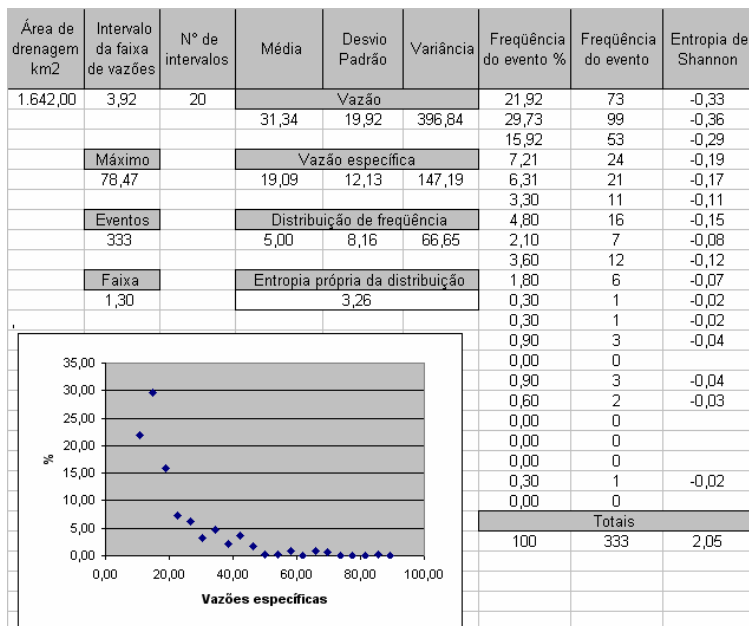


Figura B.2 – Função distribuição de frequência da estação 41199998

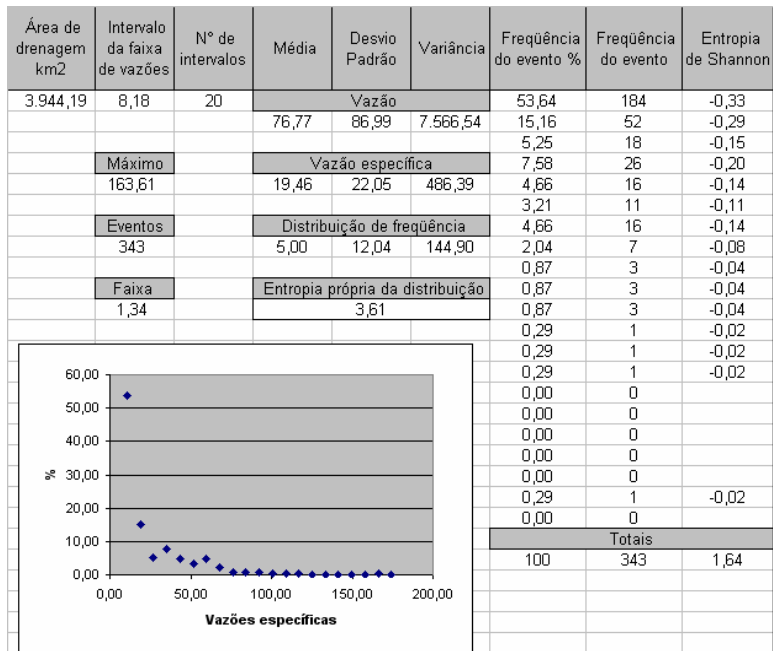


Figura B.5 – Função distribuição de frequência da estação 41780002

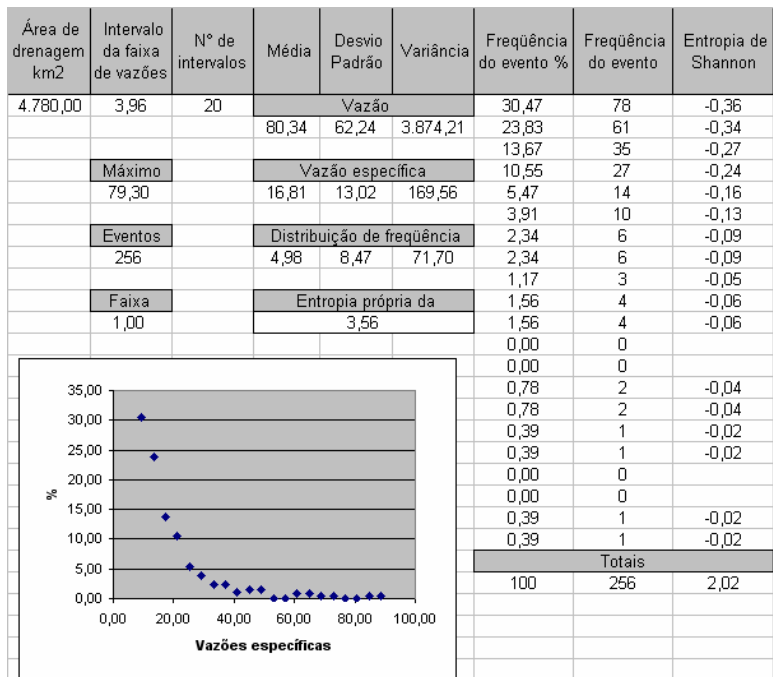


Figura B.6 – Função distribuição de frequência da estação 41340000

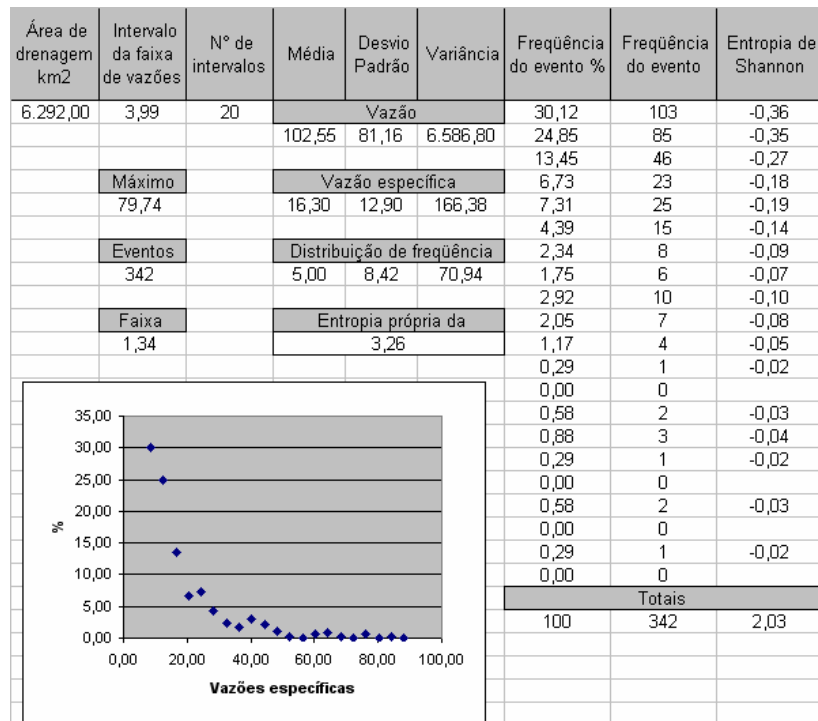


Figura B.7 – Função distribuição de frequência da estação 41410000

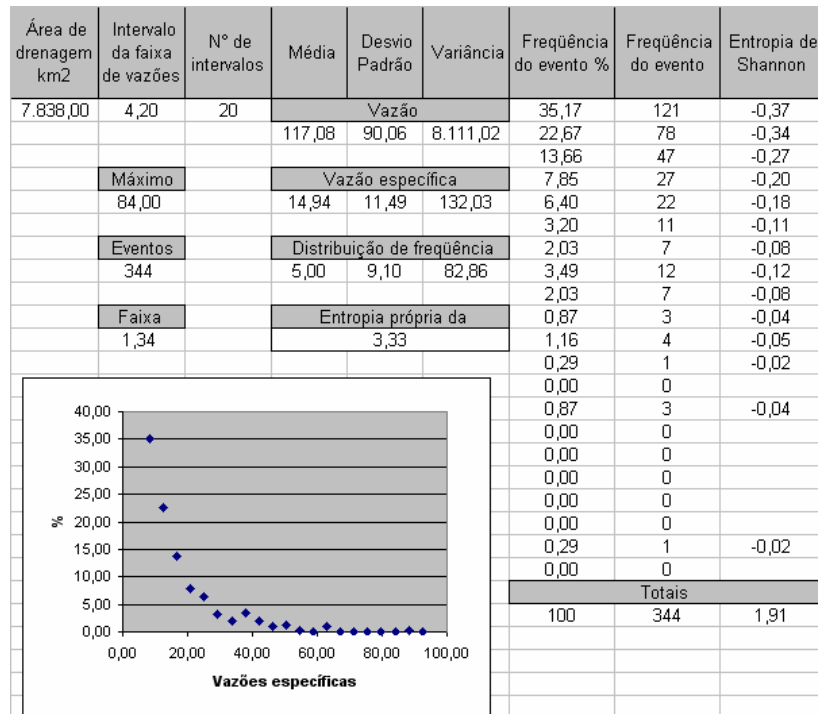


Figura B.8 – Função distribuição de frequência da estação 41600000

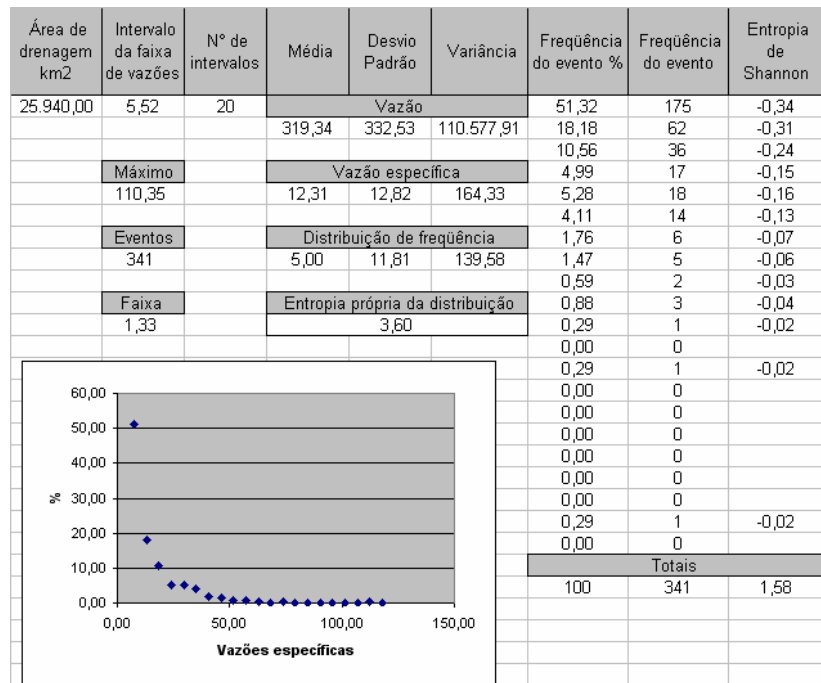


Figura B.11 – Função distribuição de frequência da estação 41990000

APÊNDICE C

FUNÇÕES DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO GRANDE – 1978 A 2006

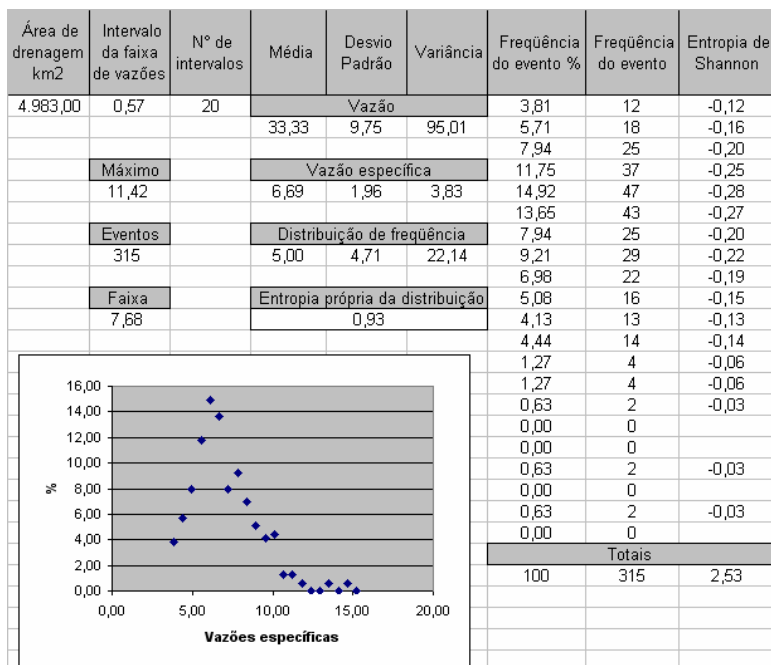


Figura C.1 – Função distribuição de frequência da estação 46415000

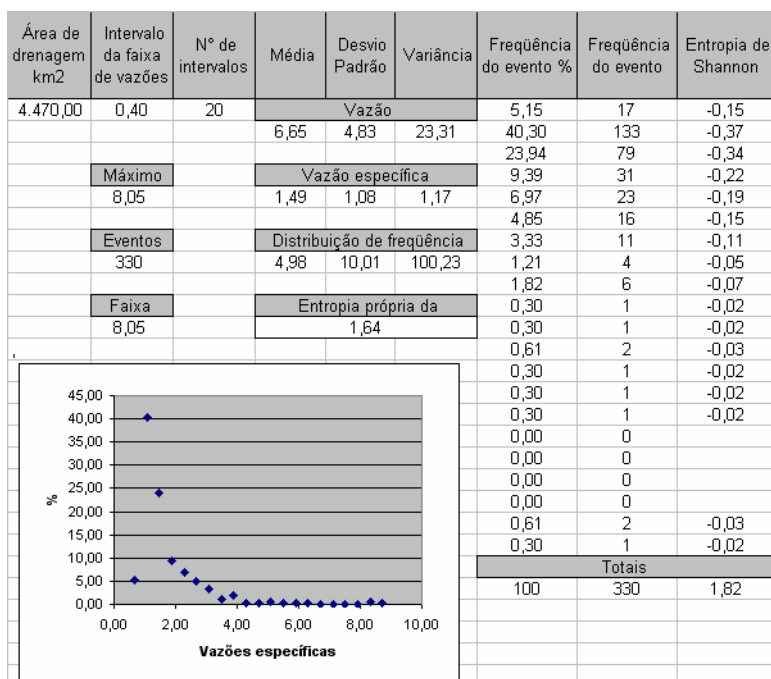


Figura C.2 – Função distribuição de frequência da estação 46490000

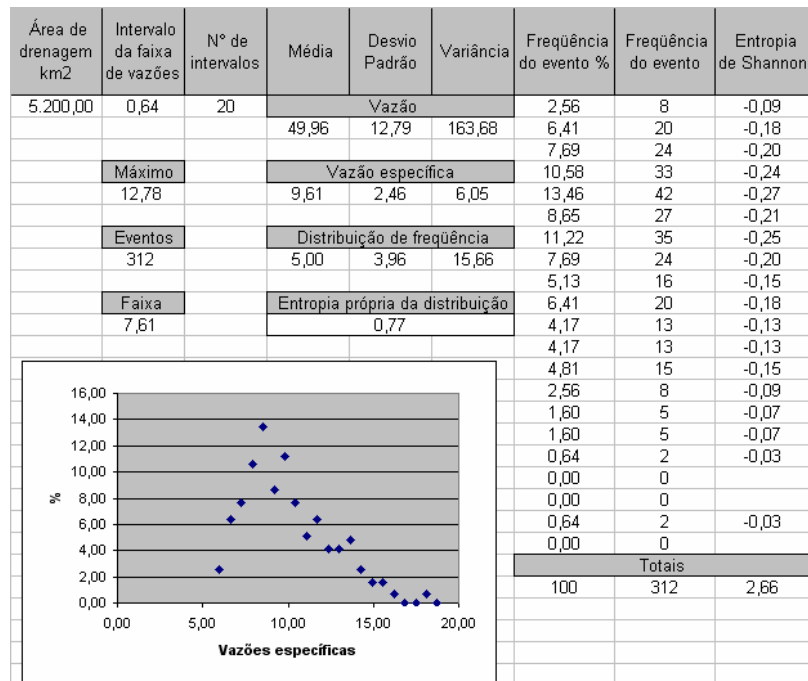


Figura C.3 – Função distribuição de frequência da estação 46543000

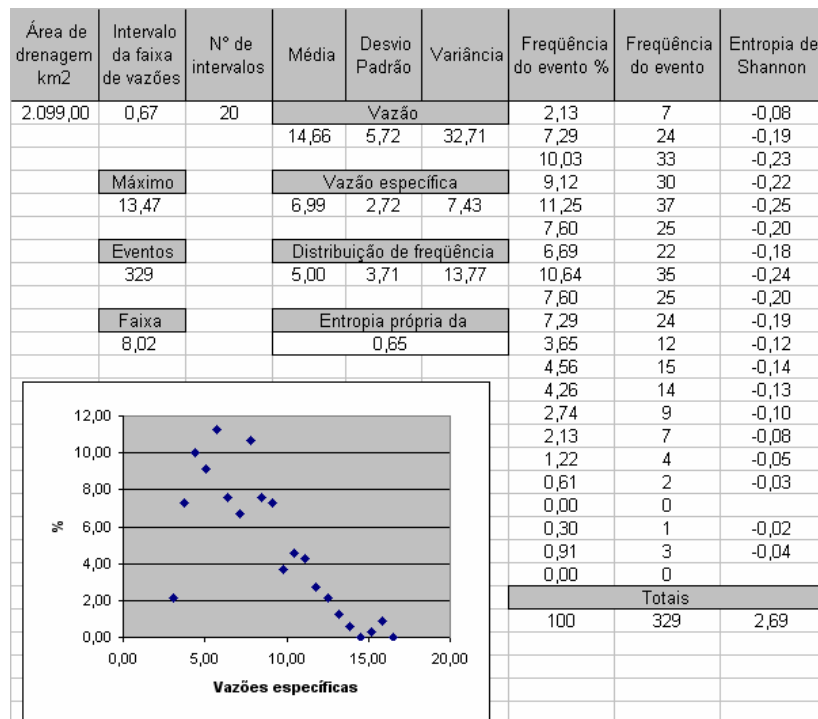


Figura C.4 – Função distribuição de frequência da estação 46570000

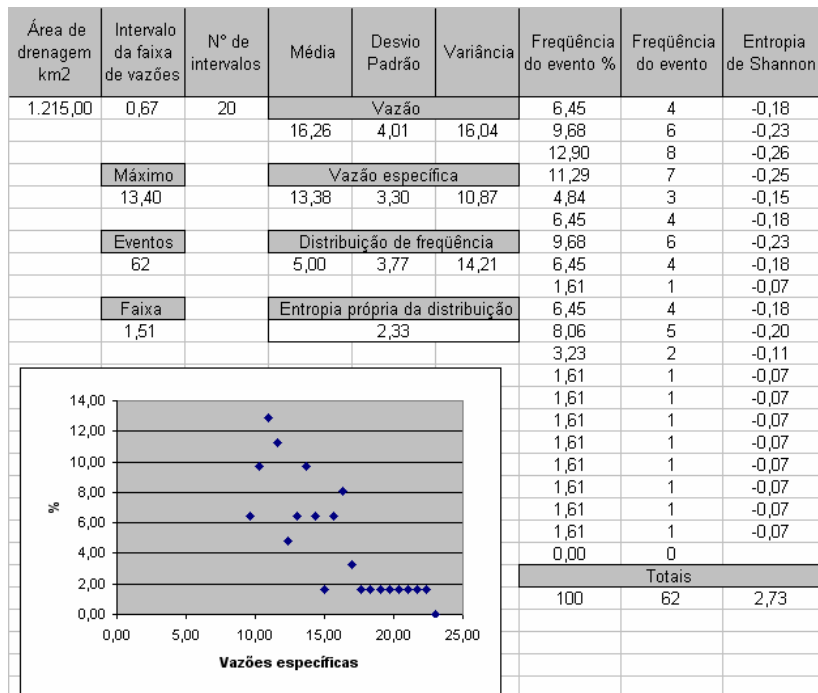


Figura C.5 – Função distribuição de frequência da estação 46520000

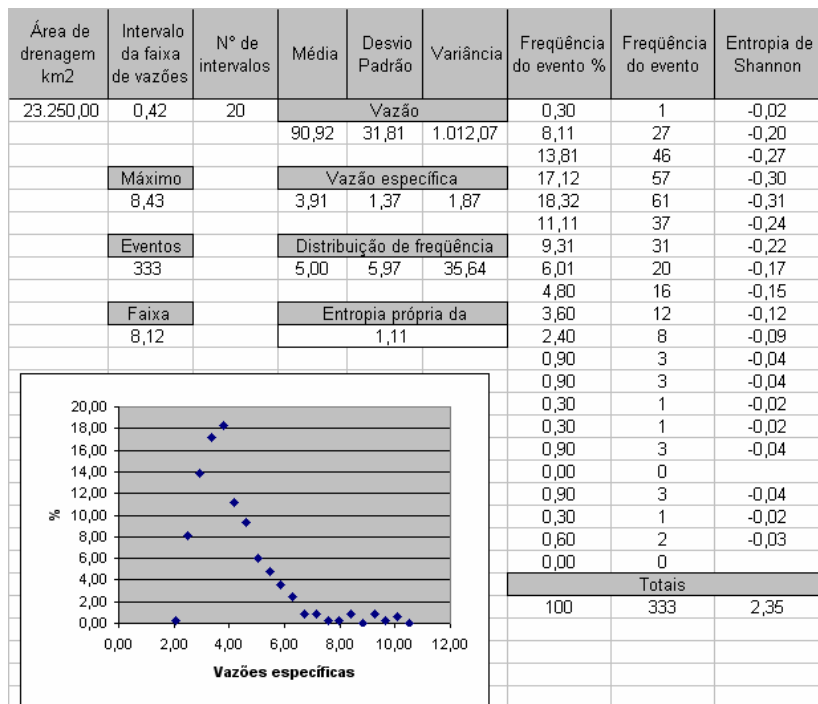


Figura C.6 – Função distribuição de frequência da estação 46550000

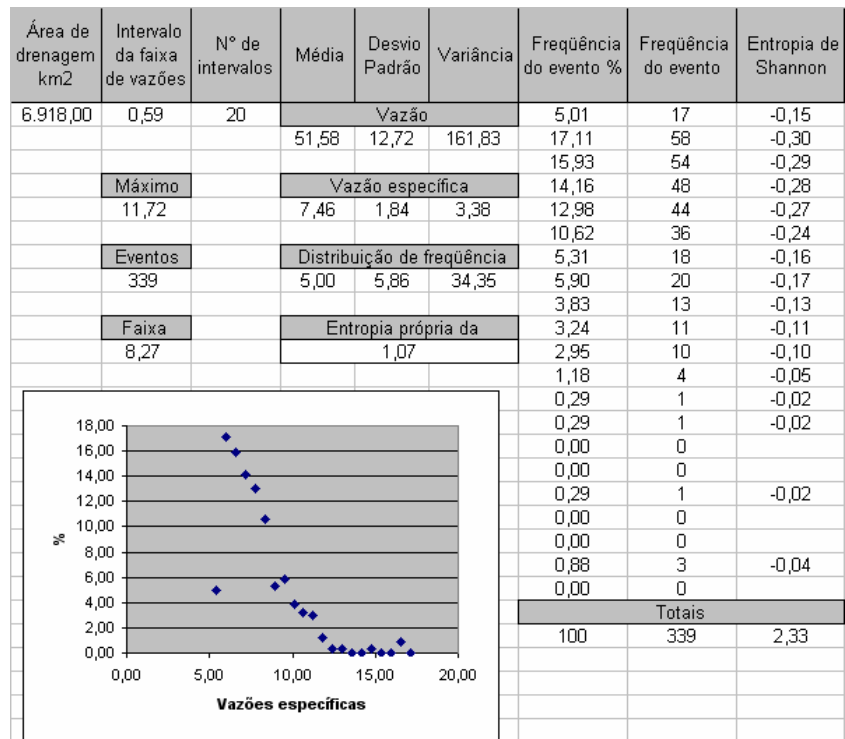


Figura C.7 – Função distribuição de frequência da estação 46590000

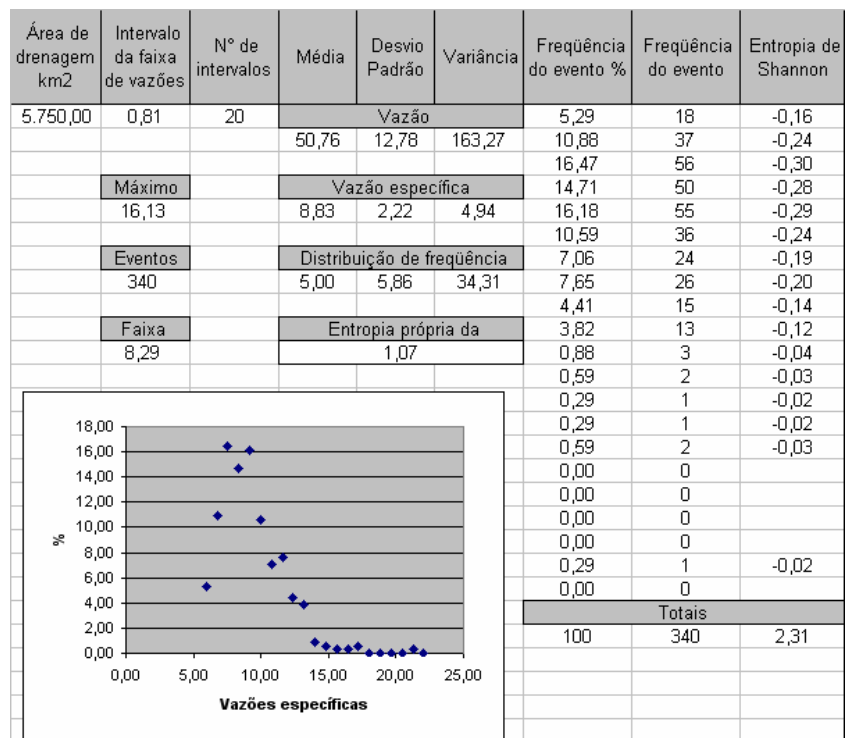


Figura C.8 – Função distribuição de frequência da estação 46455000

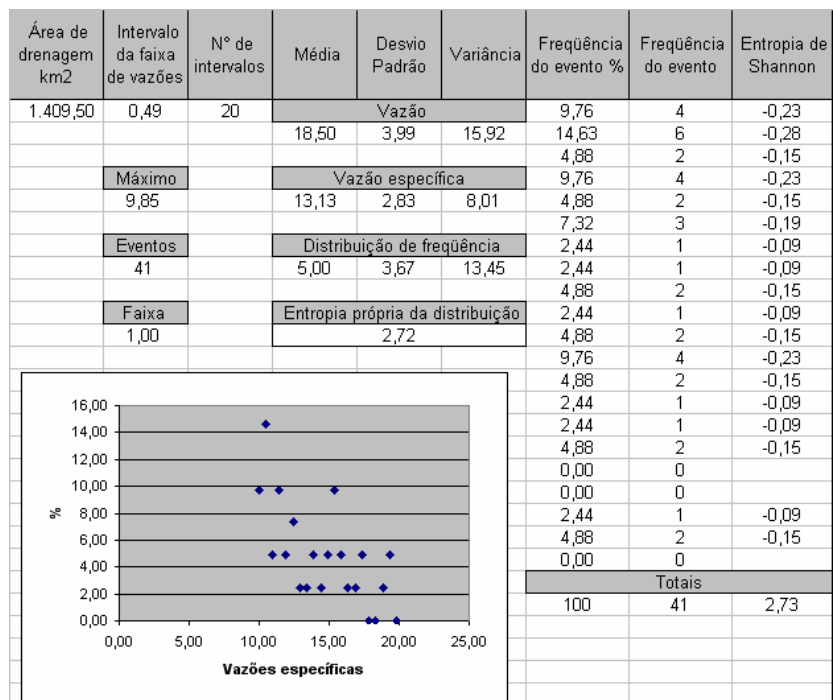


Figura C.9 – Função distribuição de frequência da estação 46530000