

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**AVALIAÇÃO DA REDE DE  
MONITORAMENTO DE QUALIDADE DAS  
ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA DO RIO  
DAS VELHAS UTILIZANDO O MÉTODO DA  
ENTROPIA**

**Katiane Cristina de Brito Almeida**

**Belo Horizonte**

**2013**

**AVALIAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO DE  
QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA  
DO RIO DAS VELHAS UTILIZANDO O MÉTODO DA  
ENTROPIA**

**Katiane Cristina de Brito Almeida**

**Katiane Cristina de Brito Almeida**

**AVALIAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO DE  
QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA  
DO RIO DAS VELHAS UTILIZANDO O MÉTODO DA  
ENTROPIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Avaliação e gerenciamento de impactos e riscos ambientais

Orientador: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

A447a Almeida, Katiane Cristina de Brito

Avaliação da rede de monitoramento de qualidade das águas superficiais da Bacia do Rio das Velhas utilizando o método da entropia [manuscrito] / Katiane Cristina de Brito Almeida. — 2013.

viii, 98 f., enc.: il.

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 77-98.

Bibliografia: f. 72-76.

1. Meio ambiente – Teses. 2. Avaliação de riscos ambientais – Teses. 3. Entropia – Teses. 4. Velhas, Rio das (MG) – Teses. I. Oliveira, Sílvia Maria Alves Corrêa. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628.19 (043)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre ao meu lado me mostrando o caminho a seguir

Aos meus irmãos, meus pais e a toda minha família que sempre confiaram no meu trabalho e se orgulharam de mim

Ao Ramon por todo amor, companheirismo, carinho e paciência que foram fundamentais na construção desse trabalho

Aos meus amigos do mestrado e do IGAM, especialmente à Ludmila Lage, Nádia Santos, Alessandro Campos e Ana Laura Cerqueira, pelos momentos e conhecimentos divididos

A todos os meus amigos e pessoas que de alguma forma me motivaram, me inspiraram e que tornaram mais leve o meu trabalho

A UFMG e a todos os professores e colegas do DESA, por estimular o meu interesse pelo conhecimento e pela vida acadêmica, em especial,

A minha orientadora Sílvia Corrêa Oliveira por todo conhecimento compartilhado, disponibilidade, acompanhamento atento e amizade que contribuíram significativamente para a concretização desta dissertação.

## RESUMO

O presente estudo propôs a avaliação da distribuição espacial da rede de monitoramento de qualidade das águas superficiais do rio das Velhas (MG) operada pelo IGAM, utilizando o método da entropia. Para isto, foi utilizado um programa computacional desenvolvido por Soares (2001), que permite verificar a eficiência dos dados coletados quanto à informação fornecida por cada um deles e, assim, estabelecer níveis de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento. Foram selecionados cinco parâmetros para estudo, considerando os maiores percentuais de violação à DN COPAM/CERH N°01/08 - Coliformes Termotolerantes, Arsênio Total, Fósforo Total, Turbidez e Oxigênio Dissolvido – e 19 estações de monitoramento localizadas na calha do rio das Velhas. Em função das características do programa computacional utilizado, que analisa apenas cinco estações por vez, com uma série de no máximo 21 dados, foi necessário agrupar as estações em quatro trechos. Estes agrupamentos foram definidos por meio da Análise de Cluster e validados com a utilização dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, seguidos pelo teste de comparações múltiplas, ao nível de significância de 5%. A avaliação da distribuição espacial da rede de monitoramento foi efetuada em duas etapas, considerando o nível de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento: em função de cada parâmetro individualmente e de todos eles conjuntamente. A partir da análise dos resultados, considerando a incerteza envolvida na produção da informação sobre os parâmetros monitorados, foi possível indicar que as estações mais importantes na manutenção da rede foram a BV067, BV141, BV142 e BV149. As que obtiveram a pior classificação e que, teoricamente, poderiam ser desativadas foram as estações BV013, BV139, BV150 e BV148. Assim, conclui-se que o método da entropia pode ser uma importante ferramenta de decisão para o redimensionamento de redes de monitoramento, já que permitiu identificar estações que poderiam ser priorizadas ou não na rede de monitoramento do rio das Velhas, considerando a redundância das informações contidas nas diversas séries de dados.

## ABSTRACT

The present study has aimed to evaluate the spatial distribution of the water quality monitoring network of Velhas river (MG), operated by IGAM, using the method of entropy. For that matter, it was used a software developed by Soares (2001), which allows you to check the efficiency of the data collected considering the information provided and thus establish the priority levels of stations in the monitoring network. There were selected five parameters to study, considering the highest percentages of violation of DN COPAM/CERH N. 01/08 - fecal coliforms, Total Arsenic, Total Phosphorus, Turbidity and Dissolved Oxygen - and 19 monitoring stations located in the Velhas river. Due to the characteristics of the software used, which analyzes only five stations at time, with a maximum number of 21 data, it was necessary to group the stations into four sections. These clusters were defined by Cluster Analysis and validated using the nonparametric Kruskal-Wallis test followed by multiple comparisons, by significance level of 5%. The evaluation of the spatial distribution of network monitoring was performed in two stages considering the priority level of maintenance of the stations in the network monitoring: as a function of each parameter individually and all together. According to the analysis of the results, considering the uncertainty involved in the production of information about the monitored parameters, it was possible to indicate that the most important stations in the maintenance of the network were the BV067, BV141, BV142 and BV149. The stations showed that the worst results and that, theoretically, could be deactivated, were BV013, BV139, BV150 and BV148. Thus, it was concluded that the method of entropy can be an important decision tool for redesigning of monitoring networks, as it could identify stations that could or not to be prioritized in the network monitoring of Velhas river, considering the redundancy of the information contained in the various data sets.



# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....	VIII
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
3.1 IMPORTÂNCIA DAS REDES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS .....	4
3.1.1 <i>Monitoramento na Gestão de Recursos Hídricos</i> .....	4
3.1.2 <i>Monitoramento na Legislação de Recursos Hídricos</i> .....	5
3.1.3 <i>Redes de monitoramento como instrumento de gestão</i> .....	7
3.2 REDES DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA NO BRASIL .....	9
3.3 REDES DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA EM MINAS GERAIS .....	12
3.4 NOVAS CONCEPÇÕES DE PROJETOS DE REDES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA .....	15
3.4.1 <i>Redimensionamento de redes de monitoramento utilizando análises estatísticas</i> .....	16
3.4.2 <i>Redimensionamento de redes de monitoramento utilizando análises geoestatísticas e SIG</i> .....	18
3.4.3 <i>Redimensionamento de redes de monitoramento utilizando entropia</i> .....	19
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	23
4.2 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS UTILIZADOS COMO DADOS DE ENTRADA ...	26
4.3 SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO.....	27
4.3.1 <i>Definição dos agrupamentos das estações de monitoramento</i> .....	29
4.3.2 <i>Validação dos agrupamentos das estações de monitoramento</i> .....	31
4.4 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA REDE DE MONITORAMENTO PELA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA ENTROPIA.....	31
4.4.1 <i>Análise individual do nível de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento, em função de cada parâmetro</i> .....	31
4.4.2 <i>Análise conjunta do nível de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento</i> .....	33
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
5.1 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS UTILIZADOS COMO DADOS DE ENTRADA ...	34
5.2 SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO.....	35
5.2.1 <i>Definição dos agrupamentos das estações de monitoramento</i> .....	35
5.2.2 <i>Validação dos agrupamentos das estações de monitoramento</i> .....	37
5.3 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA REDE DE MONITORAMENTO PELA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA ENTROPIA.....	43
5.3.1 <i>Análise individual do nível de prioridade das estações na rede de monitoramento, em função de cada parâmetro</i> .....	43
5.3.2 <i>Análise conjunta do nível de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento</i> .....	64
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>93</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Regiões da Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade de Água (RNMQA) segundo as metas de densidade do monitoramento nas regiões hidrográficas. ....	11
FIGURA 3.2: Frequência atual de amostragem adotada pelos estados brasileiros e a meta proposta pela Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade de Água (RNMQA). ....	11
FIGURA 3.3: Pontos de Monitoramento de Qualidade da Água Superficial da Rede Básica em operação até 2012. ....	13
FIGURA 3.4: Pontos de Monitoramento de Qualidade da Água Superficial da Rede Dirigida em operação até 2012. ....	14
FIGURA 3.5: Relação entre entropia e informação mútua. ....	20
FIGURA 4.1: Localização da bacia hidrográfica do rio das Velhas em Minas Gerais. ....	24
FIGURA 4.2: Localização das estações de monitoramento de qualidade das águas superficiais no rio das Velhas. ....	28
FIGURA 4.3: Procedimentos metodológicos empregados na definição dos agrupamentos das estações. ....	30
FIGURA 4.4: Procedimentos metodológicos empregados na hierarquização conjunta. ....	33
FIGURA 5.1: Percentuais de desconformidade das variáveis de qualidade de água em relação à Deliberação Normativa COPAM/CERH N°01/08 no rio das Velhas no período de 2008 a 2011. ....	34
FIGURA 5.2: Dendograma da Análise de Cluster para 19 estações de monitoramento do rio das Velhas das variáveis Coli. Term., AsT, PT, Turb. e OD. ....	36
FIGURA 5.3: <i>Box-plot</i> das concentrações de Arsênio dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas. ....	37
FIGURA 5.4: <i>Box-plot</i> das concentrações de Fósforo Total dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas. ....	38
FIGURA 5.5: <i>Box-plot</i> das concentrações de Coliformes Termotolerantes dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas. ....	38
FIGURA 5.6: <i>Box-plot</i> das concentrações de OD dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas. ....	39
FIGURA 5.7: <i>Box-plot</i> das concentrações de Arsênio Total das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011. ....	40
FIGURA 5.8: <i>Box-plot</i> das concentrações de Fósforo Total das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011. ....	40
FIGURA 5.9: <i>Box-plot</i> das concentrações de Coliformes Termotolerantes das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011. ....	41
FIGURA 5.10: <i>Box-plot</i> das concentrações de Oxigênio Dissolvido das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011. ....	41
FIGURA 5.11: Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de arsênio total, para cada trecho do rio das Velhas. ....	46
FIGURA 5.12 - Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável arsênio total. ....	47

FIGURA 5.13: Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de coliformes termotolerantes, para cada trecho do rio das Velhas. ....	50
FIGURA 5.14 - Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável coliformes termotolerantes .....	51
FIGURA 5.15 - Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de turbidez, para cada trecho do rio das Velhas. ....	54
FIGURA 5.16 - Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável turbidez .....	55
FIGURA 5.17: Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de fósforo total, para cada trecho do rio das Velhas.....	58
FIGURA 5.18 Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável fósforo total .....	59
FIGURA 5.19: Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de oxigênio dissolvido, para cada trecho do rio das Velhas. ....	62
FIGURA 5.20 Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável oxigênio dissolvido .....	63
FIGURA 5.21: Ordem de prioridade obtida pelas estações de monitoramento, considerando os períodos A, B e Global, em cada trecho. ....	67
FIGURA 5.22: Resultado final da classificação das 19 estações de monitoramento calculada pelo método da entropia, considerando todas as estações analisadas. ....	68
FIGURA 5.23: Mapa com a avaliação da distribuição espacial da rede de monitoramento do rio das Velhas pelo método da entropia. ....	69

## LISTA DE TABELAS

QUADRO 3.1 - Relação entre os instrumentos de gestão e o monitoramento de recursos hídricos. ....	8
QUADRO 3.2 – Número de estações da rede de monitoramento das águas operadas no Estado de Minas Gerais pelo IGAM. ....	14
QUADRO 4.1 - Variáveis analisadas nas águas do rio das Velhas e sua unidade de medida. ....	26
QUADRO 4.2 - Variáveis monitoradas mensalmente no rio das Velhas e que possuem VMP segundo a Deliberação Normativa COPAM/CERH N°01/08.....	27
QUADRO 4.3 - Descrição das estações de monitoramento de qualidade de água do rio das Velhas .....	29
TABELA 5.1 - Número de coletas das variáveis com percentual de violação superior a 20%. ....	35
TABELA 5.2 - Distribuição das estações do rio das Velhas nos trechos. ....	36
TABELA 5.3: Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de arsênio total no período A, para cada trecho do rio das Velhas. ....	44
TABELA 5.4 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de arsênio total no período B, para cada trecho do rio das Velhas. ....	45
TABELA 5.5 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de coliformes termotolerantes no período A, para cada trecho do rio das Velhas.....	48
TABELA 5.6 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de coliformes termotolerantes no período B, para cada trecho do rio das Velhas.....	49
TABELA 5.7 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de turbidez no período A, para cada trecho do rio das Velhas. ....	53
TABELA 5.8 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de turbidez no período B, para cada trecho do rio das Velhas. ....	53
TABELA 5.9 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de fósforo total no período A, para cada trecho do rio das Velhas. ....	56
TABELA 5.10 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de fósforo total no período B, para cada trecho do rio das Velhas. ....	57
TABELA 5.11 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de oxigênio dissolvido no período A, para cada trecho do rio das Velhas. ....	60
TABELA 5.12 - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de oxigênio dissolvido no período B, para cada trecho do rio das Velhas. ....	61
TABELA 5.13 - Resultados da priorização das estações pela aplicação do método da entropia nos trechos do rio das Velhas considerando as cinco variáveis analisadas nos períodos A e B. ....	64
TABELA 5.14 - Pontuação obtida em cada estação de monitoramento considerando os níveis de prioridade obtidos nas simulações realizadas para cada variável nos períodos A e B. ....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AC	Análise de Cluster
ACP	Análise de Componentes Principais
ANA	Agência Nacional de Águas
As <sub>T</sub>	Arsênio total
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
HCA	Hierarchical Cluster Analysis
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelagem Numérica de Terreno
OD	Oxigênio Dissolvido
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PDRH	Plano Diretor de Recursos Hídricos
PNQA	Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas
P <sub>T</sub>	Fósforo total
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RNMQA	Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade de Água
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UF	Unidades da Federação
VPM	Valor Máximo Permitido

# 1 INTRODUÇÃO

Para um gerenciamento efetivo e de forma sustentável da qualidade da água, as tendências recentes estão se movendo em direção a uma gestão integrada da água tendo o monitoramento como uma importante ferramenta (DO, *et al.* 2012). O monitoramento é o primeiro passo importante para a elaboração de uma base de dados confiável e adequada para que possa ser útil ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (TUNDISI, 2011). Por esta razão, o desenvolvimento de projetos de redes de monitoramento em rios e bacias hidrográficas tem ganhado cada vez mais importância.

A ausência de um planejamento de redes de monitoramento com base na análise científica do problema acarreta o desperdício dos recursos humanos, financeiros e logísticos associados ao planejamento e gerenciamento de redes hidrometeorológicas, produzindo um número elevado de implementações de estações nas sub-bacias hidrográficas, e a posterior desativação das mesmas por motivos de localização geográfica inadequada, além da geração de dados redundantes e perda da oportunidade de se aumentar o conhecimento da evolução da qualidade da água na bacia (GALVÃO & MENEZES, 2005).

Dessa forma, faz-se necessária a utilização de ferramentas estatísticas que permitam avaliar qualitativamente as redes existentes e orientar o processo de escolha das estações e pontos mais adequados para o atendimento às diversas finalidades das redes, como a análise de tendência de evolução da qualidade da água, a identificação de áreas críticas de poluição, verificação da efetividade da gestão sobre as ações de recuperação da qualidade da água ou o monitoramento de metas qualitativas do enquadramento dos corpos de água visando garantir os usos múltiplos nas bacias hidrográficas.

Existem diversos métodos para a proposição da localização das estações de monitoramento que permitem avaliar a qualidade da rede e dos seus dados e diversos autores, em todo o mundo, têm efetuado estudos nesta área. Em geral, a aplicação desses procedimentos requer conhecimento aprofundado do relevo e da hidrografia local ou das características geográficas e hidrológicas da bacia.

No Brasil, os trabalhos ainda são relativamente escassos, mas têm ganhado cada vez mais interesse dos profissionais e pesquisadores. Algumas metodologias para o redimensionamento

de redes de monitoramento têm sido exploradas, considerando abordagens diferentes, tais como técnicas multivariadas (NEJADKOORKI *et al.*, 2011; NABI *et al.*, 2011; ACOSTA, FAZ *et al.*, 2011; NADDEO *et al.*, 2012), análises geoestatísticas e sistemas de informações geográficas (YANG & JIN, 2010; YENILMEZ *et al.*, 2010; ACOSTA *et al.*, 2011) e aplicação do conceito da entropia (SOARES; 2001; MOULIN, 2005; MISHRA & COULIBALY, 2010).

Esse método, introduzido pela teoria matemática da informação, foi desenvolvido por Shannon (1948) para analisar qualitativamente os dados coletados. Segundo Gontijo Jr. & Koide (2012), o método utilizando o conceito de entropia visa alcançar o mesmo objetivo que os métodos utilizados anteriormente com uma menor quantidade de informações sobre a bacia hidrográfica. Para o presente estudo foi utilizado um programa computacional desenvolvido por Soares (2001), que permite verificar a eficiência dos dados coletados quanto à informação fornecida por cada um deles e, assim, estabelecer níveis de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento.

O rio das Velhas foi selecionado devido à grande densidade de estações de monitoramento atualmente existente em sua calha, podendo ser considerado o curso d'água com maior número de estações de monitoramento na rede básica (macro-rede) do IGAM. Nesse contexto a presente pesquisa justifica-se por propor uma análise da distribuição espacial dessa rede pela aplicação do método da entropia. Esse método se mostrou uma importante ferramenta de decisão para redimensionamento de redes de monitoramento, já que permitiu identificar estações que poderiam ser priorizadas ou não na rede, considerando a redundância das informações contidas nas diversas séries de dados.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a distribuição espacial da rede de monitoramento de qualidade das águas superficiais do rio das Velhas, operada pelo IGAM, utilizando o método da entropia.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar e selecionar os principais parâmetros responsáveis pela degradação da bacia do rio das Velhas para serem considerados no cálculo da entropia;
- Selecionar e agrupar as estações de monitoramento com características similares no rio das Velhas, por meio de técnicas multivariadas;
- Validar os agrupamentos das estações de monitoramento, por meio de ferramentas estatísticas não paramétricas;
- Estabelecer a ordem de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento, em função de cada parâmetro individualmente e de todos eles conjuntamente;
- Indicar as estações de monitoramento prioritárias na rede de monitoramento do rio das Velhas, operada pelo IGAM.



## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 *Importância das redes de monitoramento da qualidade das águas*

O efetivo gerenciamento de recursos hídricos implica na constante avaliação da quantidade e qualidade da água simultaneamente, a fim de que se conheça adequadamente o estado dos recursos hídricos, seu potencial e os possíveis problemas agregados de contaminação e poluição. O monitoramento de recursos hídricos é um conjunto de ações e esforços que visa permitir o conhecimento da situação da qualidade das águas e seu padrão de comportamento ao longo do espaço e do tempo. Nesse contexto, as redes de monitoramento de qualidade das águas são implantadas para atingir diversos objetivos, tais como: auxiliar na gestão dos recursos hídricos, fornecer subsídios para elaboração de uma adequada legislação de recursos hídricos, disponibilizar informações para um efetivo gerenciamento de recursos hídricos, etc.

Finotti *et al.* (2009) pontuam que a necessidade de monitoramento, de forma geral, está prevista na Política Nacional de Meio Ambiente (BRASIL, 1981) e pode servir a vários propósitos. Dessa forma, antes da definição da rede de monitoramento, é preciso ter clareza dos objetivos do monitoramento, para que se faça o melhor projeto de rede com os custos mais baixos dentro do objetivo proposto.

#### 3.1.1 **Monitoramento na Gestão de Recursos Hídricos**

A partir dos anos 1960 e 1970 o monitoramento da qualidade da água tem sido desenvolvido para descrever o estado geral da qualidade da água (STROBL & ROBILLARD, 2008). Normalmente, esses primeiros esforços de monitoramento envolviam abordagens arbitrárias sem um projeto consistente ou estratégia lógica. Os locais de amostragem e as frequências eram muitas vezes determinadas por conveniência ou por outros critérios subjetivos, e uma vez que a rede era estabelecida, geralmente não havia uma reavaliação da eficácia do *design* da rede de monitoramento.

A fim de compreender o processo dinâmico de uma bacia hidrográfica, uma rede de monitoramento de qualidade da água bem projetada permite identificar problemas de qualidade da água e também estabelecer valores de referência para as análises de tendência de curto e longo prazo. Magalhães (2000), afirma que o adequado monitoramento pode ser considerado como um dos pré-requisitos para o sucesso de qualquer sistema de gestão das

águas, já que permite a obtenção do arcabouço de informações necessárias, o acompanhamento das medidas efetivadas, a atualização da base de dados e o direcionamento das decisões.

De acordo com Sanders *et al.* (2003), a localização de pontos de amostragem é sem dúvida o fator mais crítico no projeto de rede de monitoramento, uma vez que se as amostras coletadas não forem representativas da massa de água, a frequência de amostragem, o modo de interpretação dos dados e a apresentação tornam-se irrelevantes.

A estação de monitoramento deve estar localizada de tal forma que possa representar adequadamente o fenômeno que se está estudando e a região em que está instalada. Em geral, a representatividade da informação obtida com a rede de monitoramento está relacionada com os aspectos espaço temporais do fenômeno observado. Não existem meios de se medir eficazmente a representatividade da informação obtida, mas por outro lado o projetista pode tomar certas precauções para que o dado obtido não seja simplesmente números a mais e sim a descrição fidedigna do comportamento do fenômeno observado (Soares, 2001).

Conforme Stair e Reynolds (2002) *apud* Soares (2006), para ser relevante, a informação deve conter as seguintes características: ser precisa, completa, econômica, confiável, relevante, simples, pontual, verificável, acessível e segura. Se a informação não for precisa ou completa, decisões ruins podem ser tomadas, e, conseqüentemente, custar muito caro para quem dependa dela. E, ainda, se a informação não for pertinente à situação, se chegar aos tomadores de decisão no momento inadequado ou com muita complexidade para seu entendimento, ela poderá ser de pouco valor para o sistema.

### **3.1.2 Monitoramento na Legislação de Recursos Hídricos**

Para equilibrar o uso da água, amenizar e evitar conflitos, é necessário que ocorra a adequada gestão dos recursos hídricos, que consiste no gerenciamento deste bem segundo princípios e diretrizes que visam orientar no uso mais adequado e na proteção desse recurso. A gestão eficiente dos recursos hídricos deve levar em consideração a existência de uma diversidade de objetivos (econômicos, ambientais, sociais etc.), usos (irrigação, geração de energia, abastecimento, etc) e alternativas no momento da implantação das normas e diretrizes de utilização (LANNA, 2001).

O Código de Águas, decretado em 10 de julho de 1934 (BRASIL, 1934), constituiu o cerne da atual legislação brasileira, e versa sobre conceitos que atualmente compõem o Gerenciamento de Bacias Hidrográficas, como o controle da poluição, a internalização dos custos externos/cobrança pela poluição, a hierarquia de usos e a solidariedade de bacias. A partir deste momento, diversas leis e normas foram formuladas com a finalidade de promover um uso racional dos recursos hídricos (MACIEL JR., 2000).

Em 1997, a Lei das Águas foi instituída, por meio da Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), dotando o Brasil de um instrumento legal para a gestão dos recursos hídricos. 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 a bacia hidrográfica como base territorial para o planejamento. 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.

Tundisi *et al.* (2011) destacam que entre as principais inovações introduzidas pela Lei nº 9433/97 está o estabelecimento claro dos instrumentos que devem ser utilizados para viabilizar a implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos:

- I – os Planos de Recursos Hídricos;
- II – o enquadramento dos corpos de água em classes de usos preponderantes;
- III – a outorga de direitos de uso dos recursos hídricos;
- IV – a cobrança pelo uso dos recursos hídricos;
- V – a compensação dos municípios;
- VI – o sistema de informação dos recursos hídricos.

O monitoramento é uma das ferramentas que compõe o sistema de informações que 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. Este sistema de informações é fundamental para a aplicação de todos os instrumentos da política e para a disseminação de informações confiáveis, sendo de extrema importância para a tomada de decisões seguras em um sistema compartilhado de decisão.

No entanto, o sistema de informações será frágil se não contar com uma rede de monitoramento hidrometeorológico capaz de garantir a prestação, precisão e permanente informação sobre a situação dos recursos hídricos (MAGALHÃES, 2000).

No ano 2000, por meio da Lei Federal nº. 9.984 (BRASIL, 2000), o Governo Federal criou a Agência Nacional de Águas - ANA com a missão de regular o uso das águas dos rios e lagos de domínio da União e implementar o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Com o status adquirido pela questão hídrica refletida na promulgação da Lei nº. 9.433/97 (BRASIL, 2000), e a conseqüente criação de órgãos federais e estaduais dirigidos ao gerenciamento racional das águas, no final de 1999, o Governo do estado de Minas Gerais, por intermédio do Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH, também destinou recursos para o programa de monitoramento da qualidade das águas (Projeto Águas de Minas), passando o IGAM a integrar a coordenação do mesmo. Esse projeto vem atender a uma das ações previstas na Lei 12.584, de criação do IGAM, em seu Artigo 5º inciso X – proceder à avaliação da rede de monitoramento da qualidade das águas no Estado - e também contribui para a implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos, que foi instituída pela Lei nº 13.199/99 (MINAS GERAIS, 1999) fundamentada na Lei Federal nº 9.433/97 (BRASIL, 1997).

### **3.1.3 Redes de monitoramento como instrumento de gestão**

A gestão dos recursos hídricos, atualmente, passa por um processo de transição no qual a descentralização, a gestão por bacias hidrográficas, o monitoramento permanente e a disponibilização de informações para a sociedade são pontos fundamentais (TUNDISI, 2011).

Em relação ao desenvolvimento do conhecimento no gerenciamento de recursos hídricos, Tundisi (2011) afirma que:

Os novos paradigmas para o gerenciamento de recursos hídricos incluem, necessariamente, uma base de dados sustentada pela pesquisa científica, a fim de gerar as informações necessárias à tomada de decisões pelos gestores, e interação contínua e permanente entre gerentes e pesquisadores da área básica, vital para a implantação de políticas públicas em nível municipal, regional, estadual e federal. O desenvolvimento de mecanismos institucionais que permitam essa integração é, portanto, uma das tarefas fundamentais de gestores e dirigentes de instituições científicas.

Só a ampliação do conhecimento dos principais processos e mecanismos poderá dar a fundamentação necessária para a recuperação dos ecossistemas e a proteção daqueles ainda não ameaçados pela deterioração da quantidade e da qualidade dos recursos hídricos. Nesse sentido, as redes de monitoramento se inter-relacionam com os instrumentos de gestão de recursos hídricos, como relatado pelos autores Gontijo Júnior (2007) e Tundisi (2011) e sintetizado no Quadro 3.1.

**QUADRO 3.1 - Relação entre os instrumentos de gestão e o monitoramento de recursos hídricos.**

Objetivos	Importância do Monitoramento
<b>(1) Plano Diretor de Recursos Hídricos (PDRH)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estabelecer metas de gestão e ações para médio e longo prazos na bacia hidrográfica</li> <li>✓ Estabelecer diretrizes para a implementação dos instrumentos de regulação (outorga, enquadramento e cobrança pelo uso da água)</li> <li>✓ Propor indicadores de desempenho do planejamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Fornecer informações e dados relativos aos recursos hídricos que permitirão diagnosticar, prever ou verificar a evolução da gestão dos recursos hídricos</li> <li>✓ Verificar a eficácia do planejamento e da gestão na respectiva bacia</li> </ul>
<b>(2) Outorga de Direito de Uso</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Garantir ao usuário o direito de uso da água, condicionado à disponibilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Fornecer informações e dados relativos a qualidade e quantidade de recursos hídricos que permitirão estabelecer critérios para a concessão das autorizações de uso</li> <li>✓ Fornecer informações que permitirão aos poderes públicos outorgantes fiscalizar e monitorar o cumprimento das condições previstas nos instrumentos de outorga</li> </ul>
<b>(3) Cobrança pelo uso da água</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estimular o reconhecimento da água como um bem ecológico, social e econômico, dando ao usuário uma indicação de seu real valor;</li> <li>✓ Arrecadar recursos financeiros para o financiamento de programas e intervenções previstos no PDRH, voltados para a melhoria da quantidade e da qualidade da água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Fornecer informações e dados necessários à implementação de critérios e mecanismo adequados ao alcance dos objetivos da cobrança</li> </ul>
<b>(4) Enquadramento dos corpos da água</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estabelecer metas de qualidade para os corpos de água, a fim de assegurar os usos preponderantes estabelecidos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Fornecer informações e dados necessários à identificação das condições atuais da qualidade da água</li> <li>✓ Fornecer informações que permitirão avaliar se a qualidade atual atende os usos estabelecidos no enquadramento dos corpos de água</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Gontijo Júnior (2007) e Tundisi (2011)

### **3.2 Redes de monitoramento de qualidade de água no Brasil**

As redes de monitoramento da qualidade das águas superficiais brasileiras tiveram início nos anos 1970, quando foram implantadas as primeiras redes estaduais (ANA, 2012). Essas redes tinham características próprias adquiridas no processo histórico de sua construção e refletiam as necessidades setoriais pelas informações hidrológicas que subsidiaram o desenvolvimento e implantação de projetos específicos, sem que o múltiplo uso das águas fosse a preocupação central para a locação das estações (GONTIJO JÚNIOR, 2007).

Desde então, as Unidades da Federação (UF) têm adotado diferentes estratégias no estabelecimento de seus programas de monitoramento da qualidade das águas. Atualmente 17 das 27 UF realizam o monitoramento de suas águas superficiais, totalizando 2.167 pontos de monitoramento ativos (ANA, 2012). Considerando todo território nacional, isto representa uma densidade média de 0,25 ponto para cada 1.000 km<sup>2</sup>. Outros países apresentam densidades maiores, como o Canadá, que apresenta densidade de 0,8/1.000 km<sup>2</sup>, Espanha com 2,55 pontos/1.000 km<sup>2</sup> e França com 1,96 ponto/1.000 km<sup>2</sup>. De acordo com IGAM (2010), países membros da União Européia adotam como meta a razão de uma estação de monitoramento por 1.000km<sup>2</sup>, que é a densidade média adotada nos mencionados países e no estado de Minas Gerais pelo órgão gestor de recursos hídricos.

No Brasil a distribuição desses pontos de monitoramento é bastante desigual e concentrada em algumas regiões hidrográficas. Além disso, sendo o Brasil uma federação, cada UF adota em seu monitoramento critérios próprios de localização dos pontos, frequência de amostragem e parâmetros analisados. Em muitos estados as redes de monitoramento não possuem uma interligação, assim, muitas vezes em um mesmo rio, tem-se estações muito próximas, quando não estão no mesmo ponto, sendo administradas por diferentes órgãos ou empresas. Desse modo, existem lacunas a serem preenchidas em relação à distribuição dos pontos e à padronização do monitoramento da qualidade da água no Brasil.

Diante da necessidade de ampliar e integrar o monitoramento de qualidade de água do Brasil, a ANA lançou em 2010 o Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas (PNQA), que tem como objetivo ampliar o conhecimento sobre a qualidade das águas superficiais do Brasil, de forma a orientar a elaboração de políticas públicas para a recuperação da qualidade ambiental em corpos d'água interiores, contribuindo com a gestão sustentável dos recursos hídricos. O PNQA tem os seguintes objetivos específicos:

- eliminar lacunas geográficas e temporais no monitoramento de qualidade de água no Brasil;
- aumentar a confiabilidade das informações sobre qualidade de água (incentivos à acreditação e intercalibração laboratorial);
- padronizar e tornar os dados e as informações de qualidade de água comparáveis entre estados e regiões hidrográficas brasileiras;
- avaliar, divulgar e disponibilizar à sociedade as informações de qualidade de água.

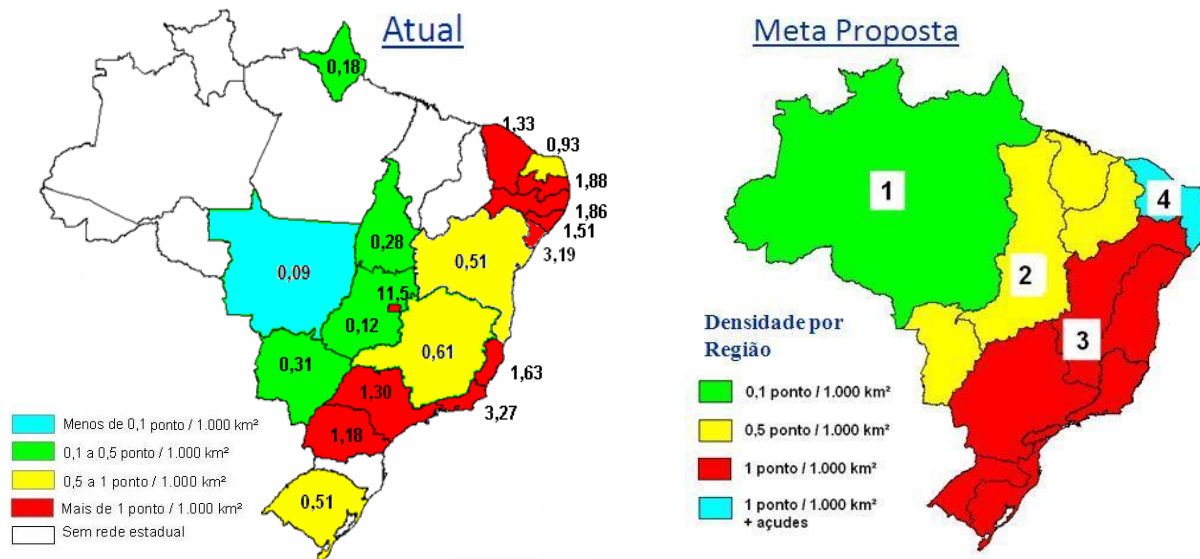
O PNQA está estruturado em quatro componentes, sendo que um deles diz respeito à Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade de Água (RNMQA). Essa rede tem como objetivo desenvolver ações que possibilitem o aprimoramento e a ampliação do monitoramento da qualidade das águas superficiais, permitindo que suas informações estejam disponíveis para toda a população.

Para elaboração do projeto da RNMQA foram estabelecidas metas regionalizadas que se referem à densidade mínima de pontos por km<sup>2</sup>, à frequência mínima de amostragem dos parâmetros por ponto de monitoramento e aos parâmetros mínimos analisados por ponto de monitoramento, em função das características hídricas e de qualidade da água das diferentes regiões do País.

A Figura 3.1 mostra a atual densidade de pontos por km<sup>2</sup> adotada pelos estados brasileiros (esquerda) e a meta proposta pela RNMQA (direita), segundo os critérios mínimos de densidade de pontos por km<sup>2</sup>. Em função das diferenças regionais, o território nacional foi dividido em quatro regiões, segundo os critérios mínimos de densidade de pontos por km<sup>2</sup>.

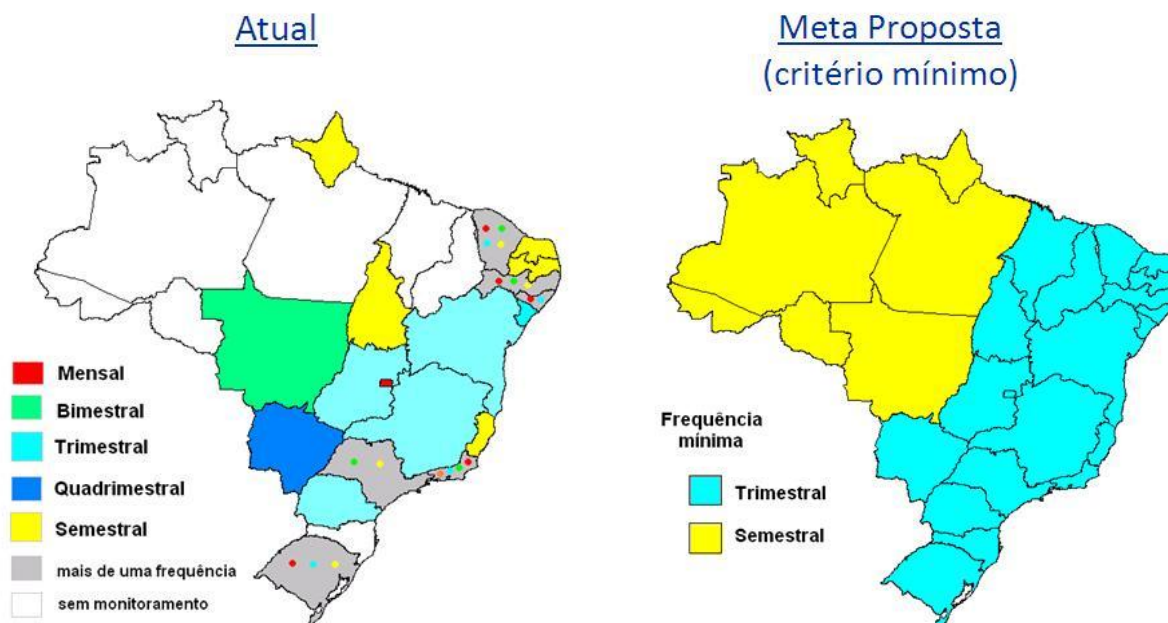
Com relação à frequência de monitoramento, a meta da RNMQA estabelece que, no mínimo, sejam realizadas coletas semestrais na região 1 e trimestrais no restante do País. A Figura 3.2 mostra a atual frequência de amostragem adotada pelos estados brasileiros e a meta proposta pela RNMQA.

**FIGURA 3.1:** Regiões da Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade de Água (RNMQA) segundo as metas de densidade do monitoramento nas regiões hidrográficas.



Fonte: ANA, 2013.

**FIGURA 3.2:** Frequência atual de amostragem adotada pelos estados brasileiros e a meta proposta pela Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade de Água (RNMQA).



Fonte: ANA, 2013.



### **3.3 Redes de monitoramento de qualidade de água em Minas Gerais**

O monitoramento qualitativo dos corpos de água do Estado de Minas Gerais foi iniciado na década de 70 pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, contemplando pontos de amostragem distribuídos nas principais bacias hidrográficas do Estado. A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) iniciou nesta mesma década um monitoramento detalhado nas sub-bacias dos rios das Velhas e Paraopeba, afluentes do rio São Francisco, e na parte mineira da bacia do rio Paraíba do Sul, que se desenvolveu até o final da década de 80.

Em vista da necessidade de avaliar a efetividade de ações de controle ambiental do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e as tendências de comportamento das águas superficiais, a FEAM reativou, em 1993, o programa de monitoramento das sub-bacias dos rios das Velhas e Paraopeba, consideradas críticas pelo elevado grau de desenvolvimento socioeconômico, onde se insere a Região Metropolitana de Belo Horizonte. O trabalho de monitoramento foi reforçado pela FEAM, em 1997, desta vez com um monitoramento mais amplo e completo, estendido às oito principais bacias hidrográficas mineiras por meio de convênio com o Ministério do Meio Ambiente – MMA.

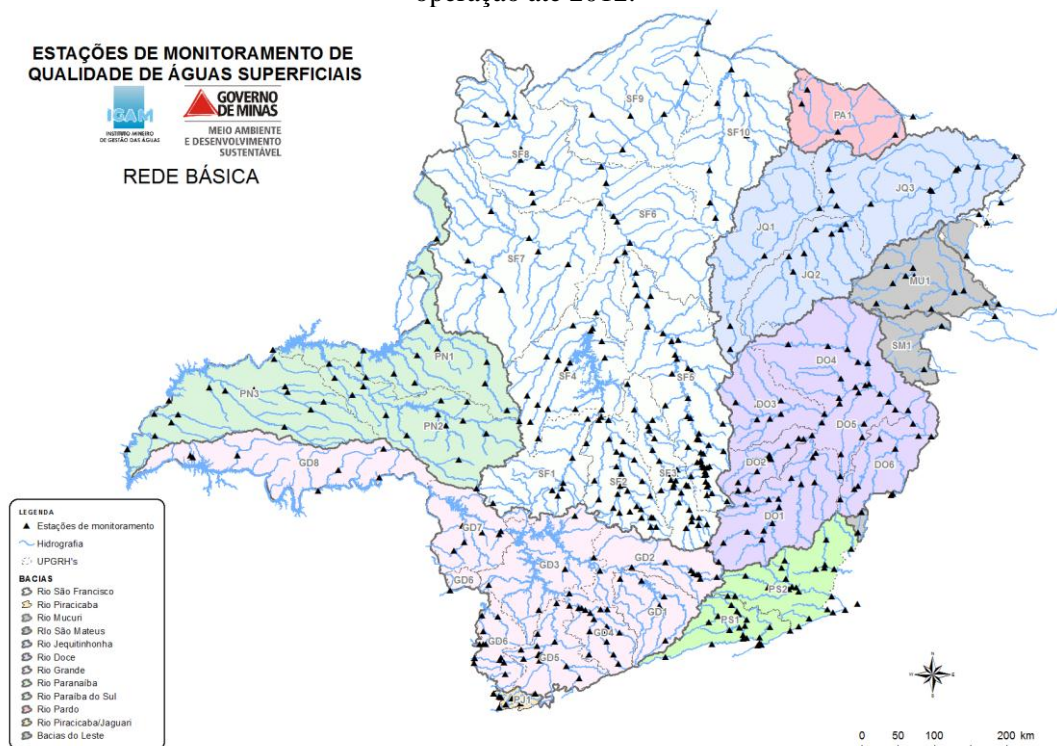
A implantação do “Projeto Águas de Minas” em 1997, representou um marco no sentido de dotar a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) de informações sobre o estado de preservação e das necessidades de melhorias das condições ambientais dos rios do Estado de Minas Gerais. Em 2001, por estar melhor inserido nas competências da Agenda Azul do que nas da Agenda Marrom, a coordenação geral deste Projeto passou para o IGAM.

A operação da rede de monitoramento da qualidade das águas vem demonstrando a sua importância no fornecimento de informações básicas necessárias para a definição de estratégias e da própria avaliação da efetividade do Sistema de Controle Ambiental, sob responsabilidade da SEMAD/COPAM, e para o Planejamento e Gestão Integrada dos Recursos Hídricos a cargo do IGAM/CERH. As redes de monitoramento estão em constante ampliação visando à cobertura da maior área possível no Estado, de modo a identificar as regiões onde são dominantes as pressões ambientais decorrentes de atividades antrópicas, exigindo, portanto, uma caracterização mais particularizada da qualidade das águas.

O monitoramento básico é realizado em locais estratégicos para acompanhamento da evolução da qualidade das águas, identificação de tendências e apoio a elaboração de diagnósticos (ANA, 2013). Além disso, os resultados obtidos no monitoramento permitem a identificação de locais onde é necessário um maior detalhamento. Nas regiões em que são dominantes as pressões ambientais decorrentes de atividades industriais, minerárias e de infraestrutura, são operadas redes de monitoramento específicas para cada tipo de pressão antrópica, as quais são denominadas redes dirigidas.

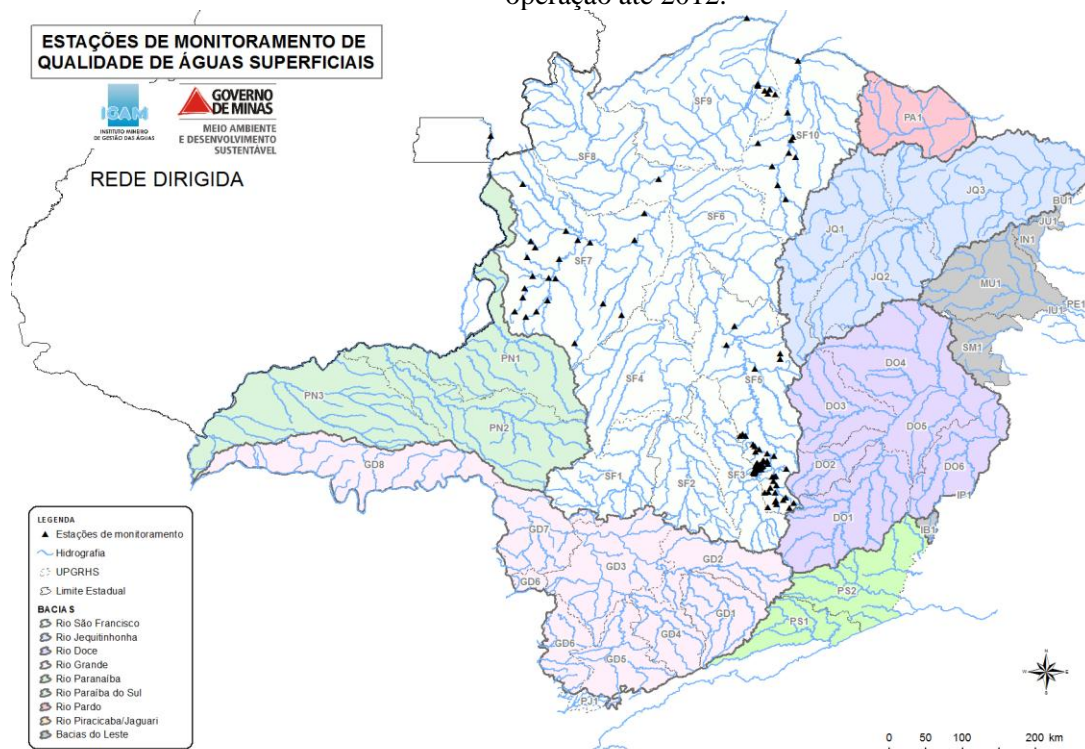
A operação da rede de monitoramento atualmente conta com 570 estações de amostragem de água superficial e 78 poços de águas subterrâneas. A área de abrangência desse programa inclui as principais bacias dos rios mineiros. Os pontos de monitoramento das redes básica e dirigida são apresentados, respectivamente, nas Figuras 3.3 e 3.4 a seguir.

**FIGURA 3.3:** Pontos de Monitoramento de Qualidade da Água Superficial da Rede Básica em operação até 2012.



Fonte: IGAM, 2012.

**FIGURA 3.4:** Pontos de Monitoramento de Qualidade da Água Superficial da Rede Dirigida em operação até 2012.



Fonte: IGAM, 2012.

O número de estações que fazem parte da Rede de Monitoramento, atualmente, do Estado de Minas Gerais, é apresentado no Quadro 3.2 a seguir:

**QUADRO 3.2** – Número de estações da rede de monitoramento das águas operadas no Estado de Minas Gerais pelo IGAM.

<b>Tipo de Estação</b>	<b>Rede Básica</b>	<b>Rede Dirigida</b>
Qualidade de Água Superficial	448	122
Qualidade de Água Subterrânea	78	
Pluviométricas	66	
Fluviométricas	264	

Fonte: IGAM, 2012

No que se refere à rede de Monitoramento Meteorológico, o IGAM opera 21 estações do tipo Plataformas de Coletas de Dados (PCDs) meteorológicas automáticas e telemétricas (em parceria com o CPTEC/INPE). Este tipo de estação obtém os dados automaticamente e os enviam telemetricamente via satélite ou via telefonia celular, com divulgação em página da web. Além da rede pertencente ao IGAM, existem no estado outras redes automáticas telemétricas, pertencentes à CEMIG, ANA e INMET.

### **3.4 Novas concepções de projetos de redes de monitoramento da qualidade da água**

Em muitos países em desenvolvimento, a maioria das redes de monitoramento apresentam deficiências em termos de fornecimento de informações necessárias para o gerenciamento integrado das bacias hidrográficas (PARK, 2006).

No Brasil, as dificuldades de se estabelecerem programas eficientes de monitoramento perpassam pela escassez de recursos financeiros e pela grande extensão territorial, que dificultam a implantação e o gerenciamento de redes de monitoramento capazes de fornecer informações que possibilitem verificar tendências, avaliar impactos, prevenir eventos críticos e orientar quanto à futuras ações. Soma-se também o fato de que, apesar de várias décadas de operações e da crescente importância de redes de monitoramento da qualidade da água, as autoridades ainda dependem de conhecimentos vivenciais e julgamentos subjetivos para determinar a localização das estações de monitoramento de qualidade de água (STROBL e ROBILLARD, 2008; PARK, 2006).

Nas últimas décadas, muitos pesquisadores têm realizados estudos para projetos de redes de monitoramento da qualidade da água. Algumas redes de monitoramento foram concebidas com base no procedimento Sharp, modificado por Sanders, para a localização dos pontos de amostragem (PARK *et al.*, 2006; CHILUNDO *et al.*, 2008; STROBL e ROBILLARD, 2008; DO *et al.*, 2012). Muitos outros pesquisadores têm utilizado métodos estatísticos (NONATO *et al.*, 2007; FRANÇA *et al.*, 2009; NADDEO *et al.*, 2012), Algoritmos Genéticos (PARK *et al.*, 2006, KONDAGESKI *et al.*, 2009), otimização Fuzzy (NING & CHANG, 2004), métodos geoestatísticos (YANG & GIN, 2010, NABI *et al.*, 2011, ACOSTA *et al.*, 2011, BEVERIDGE *et al.*, 2012) e o método de entropia (HARMANCIOGLU *et al.*, 1985; SOARES, 2001; MOULIN, 2005; MISHRA & COULIBALY, 2010; MONDAL & SINGH, 2012). Tais abordagens serão detalhadas nas próximas seções.

Nos últimos anos, projetos de redes de monitoramento de qualidade da água evoluíram para temas mais focados, como salinização, eutrofização, acidificação, contaminação por metais pesados, dentre outros (STROBL E ROBILLARD, 2008). Consequentemente, há novos desafios em *design* de redes de monitoramento. A metodologia de um projeto de rede de monitoramento deverá ser desenvolvida para permitir a obtenção de dados mais representativos de forma que a informação extraída seja mais útil e eficiente. Tal abordagem

permitirá não só melhorar as recomendações de controle da poluição de água e da gestão de recursos financeiros, mas também um melhor entendimento do ecossistema em estudo.

A seguir serão abordados alguns métodos que podem ser empregados para otimização ou redimensionamento de redes de monitoramento.

### **3.4.1 Redimensionamento de redes de monitoramento utilizando análises estatísticas**

O monitoramento da qualidade da água refere-se à aquisição de informações quantitativas e representativas sobre as características físicas, químicas e biológicas de um corpo d'água por meio de amostragens estatísticas (SANDERS *et al.*, 2003).

Nesse contexto, pesquisas de longo prazo e programas de monitoramento de qualidade de água são primordiais para um melhor entendimento sobre o comportamento do corpo hídrico. Geralmente, o resultado destes programas de monitoramento mais longos é um grande e complexo conjunto de dados, composto por diversas variáveis de qualidade de água medidas em diferentes escalas. Assim, uma ferramenta comum para avaliação de conjuntos complexos é a análise estatística multivariada, visto que uma de suas principais atribuições é analisar grandes conjuntos de dados referentes a diversas variáveis simultaneamente. Além disso, através das técnicas de análise multivariada é possível simplificar a estrutura de variabilidade dos dados, facilitando a interpretação dos mesmos (MINGOTI, 2005).

Por auxiliarem na interpretação de uma matriz complexa de dados, as técnicas multivariadas permitem um melhor entendimento da qualidade e da situação ecológica do sistema estudado, possibilitando a identificação de possíveis fontes e fatores que influenciam o sistema aquático, bem como o agrupamento de estações de monitoramento de acordo com suas similaridades. São também utilizadas para otimizar o número e a locação de estações de monitoramento, reduzindo o número de dados e custos (NONATO *et al.*, 2007; SABINO *et al.*, 2008; FRANÇA *et al.*, 2009; NEJADKOORKI *et al.*, 2011; NABI *et al.*, 2011; ACOSTA, FAZ *et al.*, 2011; NADDEO *et al.*, 2012). Entre os métodos mais utilizados destacam-se: análise de fatores, análise de componentes principais, análise de agrupamento hierárquica, análises discriminantes e redes neurais. Cada uma dessas técnicas apresenta características típicas e, conseqüentemente, usos específicos para análise de dados de qualidade da água.

As análises de agrupamento hierárquico e de componentes principais foram empregadas para agrupar as estações de monitoramento na bacia do rio das Velhas por Nonato *et al.* (2007), de acordo com similaridades e índices de qualidade de água, identificando os principais poluentes e as fontes de contaminação associadas. A análise de agrupamento compreende um grupo de técnicas estatísticas multivariadas cujo objetivo principal é o agrupamento de dados com características semelhantes, permitindo, assim, identificar comportamentos similares entre diferentes pontos de monitoramento de água em uma região, ou entre variáveis mensuradas em um conjunto de dados de programa de monitoramento. A distância Euclidiana é a medida de dissimilaridade mais comumente usada em agrupamentos, embora outras medidas de distância existam. A análise de agrupamento hierárquica (HCA – Hierarchical Cluster Analysis) permite a formação de grupos (ou classes) de amostras que apresentam características físicas e químicas similares, que são visualmente representadas por um dendograma.

Sabino *et al* (2008) realizaram a análise de alguns aspectos da qualidade da água da Bacia do Rio Paraopeba utilizando estatística multivariada. Por meio do teste de Kruskal-Wallis aplicado aos escores foi possível determinar as sub-regiões da bacia nas quais as diferentes componentes apresentavam valores dissimilares. O teste de Kruskal-Wallis (ou Análise de Variância por Postos), diferentemente do que ocorre com a Análise de Variância de Um Critério (ou ANOVA de Fisher, teste paramétrico), não exige as suposições de normalidade da variável, nem homogeneidade de variâncias entre os tratamentos. É caracterizado como teste livre de distribuição, ou seja, a distribuição teórica populacional dos dados não precisa ser estimada pelas médias ou variâncias amostrais para sua correta aplicação.

Quando se detecta diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Kruskal-Wallis, usualmente são efetuadas comparações múltiplas envolvendo todos os pares de tratamentos. Amaral (2012) utilizou os testes de comparações múltiplas para realizar uma comparação simultânea entre todos os resultados obtidos nos perímetros irrigados implantados no Norte de Minas Gerais na porção mineira do Médio São Francisco, verificando assim quais parâmetros apresentaram comportamentos diferenciados entre estações de monitoramento.

### 3.4.2 Redimensionamento de redes de monitoramento utilizando análises geoestatísticas e SIG

Diversas questões devem ser consideradas a fim de permitir uma caracterização efetiva de bacias hidrográficas, incluindo a hidrografia, declividade, cobertura vegetal, etc. No entanto, o primeiro passo para essa caracterização consiste na delimitação de seus limites físicos que, por sua vez, estão associados ao relevo da bacia. Neste sentido, o estudo dessas informações pode ser mediado pelos Sistemas de Informação Geográfica – SIG (Geographic Information System), que constituem o ambiente de inteligência em softwares que, por sua vez, oferecem suporte de forma lógica e estruturante à gestão, permitindo a construção de indicadores baseados em análises geográficas, além de coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados (CAMPOS, 2011).

A caracterização de bacias hidrográficas tem sido facilitada pela utilização da Modelagem Numérica do Terreno (MNT). Esses modelos correspondem à representação matemática da distribuição de um fenômeno espacial dentro de uma região da superfície terrestre. Assim, para a definição dos limites de uma bacia, o relevo pode ser representado como uma matriz de *pixels* (menor elemento de uma imagem) que contém valores de altimetria associados. Esta matriz corresponde a um modelo numérico de terreno (MNT), ou mais especificamente ao Modelo Digital de Elevação (MDE), podendo ser obtida através da vetorização e interpolação de curvas de nível de uma folha topográfica e também a partir de imagens de satélite e de radar.

A utilização de MDE na caracterização topográfica das bacias hidrográficas pode trazer benefícios significativos para a gestão dos recursos hídricos, sendo descrita na literatura recente a aplicação do MDE em estudo de fontes de poluição difusa em bacia hidrográfica (YANG e JIN 2010) e na caracterização de escoamentos superficiais em áreas degradadas de mineração (YENILMEZ *et al.* 2010; ACOSTA *et al.* 2011). Rossato *et al.* (2011) ainda pontuam que as informações encontradas a partir de MDE, tais como a declividade, podem ser usados direta ou indiretamente em muitos modelos de estimativa de escoamento.

Além da delimitação da bacia hidrográfica como um todo, o MDE gerado a partir do relevo permite a delimitação das áreas de influência associadas a cada uma das estações de amostragem localizadas na bacia (YENILMEZ *et al.* 2010; ACOSTA *et al.* 2011),

contribuindo para um melhor delineamento da rede amostral bem como para uma interpretação mais eficiente dos dados.

### **3.4.3 Redimensionamento de redes de monitoramento utilizando entropia**

Existem diversos métodos para a proposição da localização das estações de monitoramento que permitem avaliar a qualidade da rede e dos seus dados. Em geral, a aplicação desses procedimentos requer conhecimento aprofundado do relevo e da hidrografia local ou das características geográficas e hidrológicas da bacia. Segundo Gontijo Jr. & Koide (2012), o método utilizando o conceito de entropia visa alcançar o mesmo objetivo com uma menor quantidade de informações sobre a bacia. Para sua aplicação são necessários apenas os dados brutos das estações e a definição de sua rede de drenagem.

O conceito de entropia foi introduzido na ciência há mais de 150 anos, mas somente a partir de meados do Século XX é que suas aplicações foram difundidas por diversas áreas do conhecimento. Originária de estudos de termodinâmica, onde foi introduzida para caracterizar o grau de desordem de um sistema, a noção de entropia já foi objeto de muitas controvérsias e distintas formulações (MATTOS & VEIGA, 2002). Na raiz deste movimento, estiveram os trabalhos de Shannon (1948), que introduziu um conceito de entropia em teoria da informação e uma medida para quantificá-la. Atualmente, diferentes áreas, como medicina (ARAÚJO, 2008), hidrologia (HARMANCIOGLU *et al.*, 1985; MONDAL, N.C. & SINGH, 2012), pesquisa operacional (MATTOS & VEIGA, 2002), climatologia (SILVA *et al.*, 2003), planejamento urbano e de transportes (SOARES, 2006), além das áreas da termodinâmica, probabilidade, estatística, economia, finanças e marketing, vêm usando e desenvolvendo princípios de otimização da entropia.

Para entender melhor o aspecto informacional da entropia, deve-se considerar um conjunto de  $n$  elementos, sendo a incerteza da ocorrência de um deles considerada como a situação na qual não se conhece qual deles ocorrerá (SINGH, 1997). Com base no conhecimento de um único evento, a incerteza poderá ser maior ou menor; por exemplo, o número total de eventos  $n$  é uma parte da informação e o número desses eventos com probabilidade diferente de zero é outra parte da informação. Esta distribuição de probabilidade, se conhecida, oferece um número de informações que pode reduzir as incertezas associadas ao sistema. Desta forma, a incerteza pode ser quantificada pela entropia, levando-se em conta todos os tipos de informações disponíveis, e representada pela distribuição de probabilidade da variável

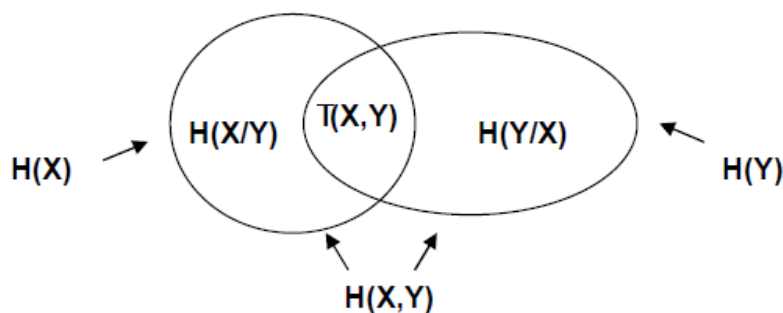


considerada (SILVA *et al.*, 2003). Em resumo, Mondal & Singh (2012) definem a entropia como uma medida do grau de incerteza de uma distribuição de probabilidades e por sua vez da variável aleatória.

Gontijo Junior (2007) afirma que o método da entropia é bastante aplicável a processos para a macrolocalização de estações e para locação representativa quanto à gestão. Aponta que a grande vantagem desse método seria a mínima necessidade de informações para a sua aplicabilidade.

As medidas de informação são entropia marginal, entropia condicional, entropia conjunta e *transinformation*. A entropia marginal  $H(X)$  pode ser definida como a informação média contida em uma variável aleatória  $X$  com a distribuição de probabilidade  $p(x)$  e é utilizada como uma medida de incerteza. Para duas variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$  a entropia condicional  $H(X|Y)$  é uma medida do conteúdo de informação de  $X$ , que não está contido em  $Y$ . A junção de entropia  $H(X, Y)$  é o conteúdo total de informação em ambos  $X$  e  $Y$ . A informação mútua,  $T(X, Y)$ , também chamada *transinformation*, é a informação comum entre  $X$  e  $Y$ . Pode ser definido como o conteúdo de informação de  $X$ , que está contido em  $Y$  e pode ser interpretado como a redução da incerteza em  $X$  devido ao conhecimento da variável aleatória  $Y$ . Essas relações são ilustradas a seguir (Figura 3.5).

**FIGURA 3.5:** Relação entre entropia e informação mútua.



Fonte: Araújo, 2008.

A associação das estações de monitoramento para fins de redimensionamento baseia-se no critério de que esta associação produzirá o menor transporte de informações, ou seja, quanto mais estas estações produzirem informações independentes umas das outras, menor será a informação comum entre elas e isto caracterizará a importância da informação da estação de monitoramento considerada (SOARES, 2006).

O transporte de informação representa a quantidade de informação redundante no conjunto ou na associação das informações obtidas com as estações considerados na rede em questão. Quando os processos são independentes em cada estação, ou seja, a informação produzida só depende de cada estação em questão, o transporte de informação entre as estações consideradas, será zero. Desta forma, a análise do redimensionamento sob o conceito de entropia sempre deverá levar em conta a incerteza da informação produzida em cada estação e a dependência entre as informações produzidas nestas estações.

O Método da Entropia desenvolvido por Shannon foi utilizado para as avaliações de redes hidrométricas no Canadá por Mishra & Coulibaly (2010), que consideraram esse método uma ferramenta útil para identificar a importância relativa das estações hidrométricas, bem como áreas críticas dentro da bacia, onde estações adicionais poderiam ser implantadas. Markus *et al.* (2003) avaliaram o valor regional de cada estação através de uma avaliação da transferência de informação entre os registros de medição de vazão no Estado de Illinois (EUA) usando o conceito da entropia, que se mostrou adequado para a identificação de estações redundantes e mal aferidas nas áreas de uma bacia hidrográfica.

No Brasil, o método da entropia desenvolvido por Shannon foi utilizado por Soares (2001) para analisar dados de redes de monitoramento de qualidade de água visando propor o redimensionamento da rede, por Moulin (2005) para selecionar um número otimizado de estações pluviométricas de uma rede existente e, mais recentemente, por Gontijo Junior & Koide (2012). Os últimos mostraram a praticidade da aplicação do conceito da entropia em dados fluviométricos, tendo em vista necessitar unicamente da locação das estações e dos dados brutos coletados, mostrando-se efetivo.

#### **3.4.3.1 Método proposto por Soares (2001) para redimensionamento de redes de monitoramento**

O método da entropia utilizado neste trabalho foi adaptado de Soares (2001), que reporta que o desempenho das redes de monitoramento ambiental deve ser medido de acordo com sua eficiência em produzir a maior quantidade de informação ao menor custo possível.

Segundo o autor, uma das principais propriedades da entropia é que o seu valor máximo, ou a máxima quantidade média de informação por mensagem, ocorre quando todos os eventos são igualmente prováveis e independentes. Neste caso, as probabilidades individuais  $P(i)$  são

todas iguais e cada mensagem contribui com a mesma quantidade de informação. Assim, a máxima informação deve ser transmitida quando os eventos são aleatórios ou igualmente prováveis. Quando isto não ocorre, a informação média diminuirá em relação à máxima.

A média, contida em um conjunto de dados normalmente distribuído, é inversamente proporcional à variância, ou seja, ao se aumentar o valor da variância a informação sobre a média tenderá a diminuir e a incerteza ou entropia será aumentada também. Desta forma, a informação sobre a média terá valor máximo quando a entropia for mínima, pois a entropia marginal, ou seja, a entropia de cada estação de monitoramento é função da variância do vetor de valores da variável considerada na estação. Por outro lado, a entropia será alta e a informação sobre a média baixa, quando o número de resultados, eventos ou valores possuírem grande variabilidade. Então, quando há muitos resultados possíveis, o resultado é completamente incerto e o conteúdo de informação sobre a média é baixo, porém a informação sobre o sistema é alta.

Utilizando-se dos estudos de Shannon, Soares (2001) desenvolveu matematicamente as equações a serem utilizadas para aferir as entropias de séries de dados de monitoramento cujos comportamentos esperados sejam funções-distribuição multivariadas Normal ou Log-Normal (Anexo I). Esses são comportamentos frequentes para situações de redes de monitoramento consideradas básicas.

Uma das contribuições do estudo desenvolvido por Soares (2001) foi o desenvolvimento de um programa para análise do desempenho de redes de monitoramento de qualidade da água baseado no conceito da entropia. Segundo esse autor, através da análise de desempenho da rede, pode-se verificar a eficiência dos dados coletados quanto à informação fornecida por cada um deles e, também, quanto à necessidade de se priorizar, manter ou alterar a frequência temporal ou espacial de coleta de um determinado dado.

O programa desenvolvido permite que se faça a análise de 5 (cinco) postos (ou estações) em uma mesma rede, com até 21 dados por posto, sendo analisada uma variável de cada vez. Segundo Soares (2001), esse limite de dados por postos foi escolhido em função do número de dados utilizáveis no primeiro conjunto de dados analisado para construção do programa. A respeito da funcionalidade do programa, o autor pontua que o programa classifica as estações por ordem de prioridade e, através deste resultado, pode-se concluir se alguma estação pode ser desativada, qual a ordem de desativação ou que dados podem ser deixados de ser medidos

em determinados postos, pois a informação obtida não está contribuindo significativamente para os resultados obtidos.

Se a série de dados disponíveis for maior que 21, pode-se aplicar o programa várias vezes, para diferentes períodos de tempo e uma mesma variável, dentro da série disponível e observar se a importância da informação fornecida por um dado posto vem se mantendo ao longo do tempo.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

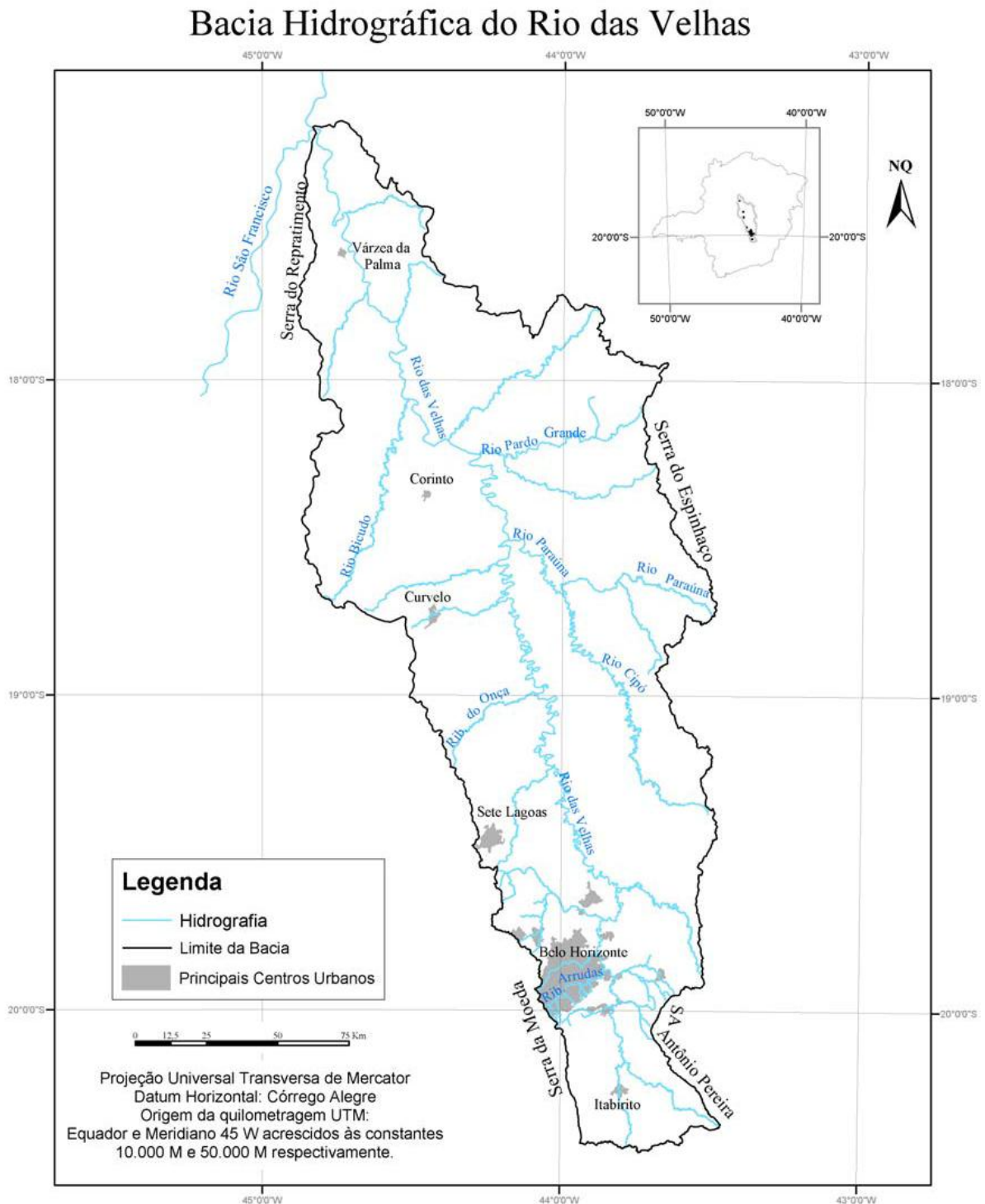
### **4.1 Área de Estudo**

Localizada na região central do Estado de Minas Gerais, a bacia do rio das Velhas compreende uma área de 27.867,2 km<sup>2</sup> (Figura 4.1). A bacia apresenta uma largura média de 38,3 km e o curso principal possui 688 km de extensão, percorrendo aproximadamente 806,2 km. Seu território abrange 51 municípios, sendo que 14 estão parcialmente contidos na bacia e 15 estão localizados na Região Metropolitana de Belo Horizonte. O rio das Velhas é um dos principais afluentes do rio São Francisco e tem sua nascente dentro do Parque Municipal das Andorinhas a uma altitude de aproximadamente 1.500 m, no município de Ouro Preto, e deságua no rio São Francisco, na Barra do Guaicuí, município de Várzea da Palma, a uma altitude de 500m (IGAM, 2010).

Na bacia do rio das Velhas o monitoramento da qualidade das águas superficiais foi iniciado em 1983 pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, com a instalação de 42 estações de coleta e elaboração do primeiro diagnóstico sobre a qualidade da água. Atualmente, a rede de monitoramento de qualidade de águas superficiais na bacia do rio das Velhas vem sendo operada pelo IGAM e é atualmente constituída por 118 estações. Essa rede foi adequada ao longo da execução dos trabalhos do IGAM, adotando-se como referência a experiência desenvolvida pelos países membros da União Europeia. Assim sendo, estabeleceu-se como meta a razão de uma estação de monitoramento por 1.000 km<sup>2</sup>, que é a densidade média adotada nos mencionados países (IGAM, 2010). Considerando o quantitativo de pontos monitorados na bacia pelos padrões da União Europeia, essa bacia é considerada superdensa, apresentando uma densidade de estações igual a 4,3/1000km<sup>2</sup>.

O rio das Velhas foi selecionado devido ao grande número de estações de monitoramento atualmente existente em sua calha (total de 25 considerando as estações em operação da rede básica e dirigida), podendo ser considerado atualmente o curso d'água com maior número de estações de monitoramento na rede básica do IGAM.

**FIGURA 4.1:** Localização da bacia hidrográfica do rio das Velhas em Minas Gerais.



Fonte: SANTOS, 2005.

O rio das Velhas é dividido em trechos, segundo os cursos alto, médio e baixo (GUIMARÃES, 1953 *apud* IGAM, 2010). O alto rio das Velhas compreende toda a região denominada Quadrilátero Ferrífero e apresenta o maior contingente populacional, com uma expressiva atividade econômica, concentrada, principalmente, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), onde estão presentes os maiores focos de poluição de toda a bacia. Os principais agentes poluidores são os esgotos industriais e domésticos e os efluentes gerados pelas atividades minerárias.

Os trechos Médio e Baixo do rio das Velhas possuem características diferenciadas em relação ao uso e ocupação do solo do alto trecho, apresentando uma menor concentração populacional, com o predomínio das atividades agrícolas e pecuárias. Essas atividades contribuem para processos de erosão na região, pois há um grande percentual de área mecanizada (IGAM, 2010).

Atualmente o IGAM analisa 54 variáveis trimestralmente para avaliar o grau de contaminação das águas do rio das Velhas sendo 18 delas com frequência mensal (Quadro 4.1). As coletas e respectivas análises físico-químicas e bacteriológicas das amostras de água são realizadas pelo CETEC.

**QUADRO 4.1 - Variáveis analisadas nas águas do rio das Velhas e sua unidade de medida.**

Alcalinidade de bicarbonato (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Demanda Bioquímica Oxigênio (mg.L-1)*</b>	Óleos e graxas (mg.L <sup>-1</sup> )
Alcalinidade total (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Demanda Química de Oxigênio (mg.L<sup>-1</sup>)*</b>	<b>Oxigênio dissolvido (mg.L<sup>-1</sup>)*</b>
Alumínio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Densidade de cianobactérias (cel.ml<sup>-1</sup>)*</b>	<b>pH*</b>
Amônia não ionizável (mg.L <sup>-1</sup> NH <sub>3</sub> )	Dureza de cálcio (mg.L <sup>-1</sup> )	Potássio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )
<b>Arsênio total (mg.L<sup>-1</sup>)*</b>	Dureza de magnésio (mg.L <sup>-1</sup> )	Selênio total (mg.L <sup>-1</sup> )
Bário total (mg.L <sup>-1</sup> )	Dureza total (mg.L <sup>-1</sup> )	Sódio dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )
Boro total (mg.L <sup>-1</sup> )	Estreptococos fecais (NMP.100ml <sup>-1</sup> )	Sólidos dissolvidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )
Cádmio total (mg.L <sup>-1</sup> )	Fenóis totais (mg.L <sup>-1</sup> )	Sólidos em suspensão totais (mg.L <sup>-1</sup> )
Cálcio total (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Feoftina (µg.L<sup>-1</sup>)*</b>	<b>Sólidos totais (mg.L<sup>-1</sup>)*</b>
Chumbo total (mg.L <sup>-1</sup> )	Ferro dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	Substâncias tensoativas (mg.L <sup>-1</sup> )
Cianeto (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Fósforo total (mg.L<sup>-1</sup>)*</b>	Sulfato total (mg.L <sup>-1</sup> )
<b>Cloreto total (mg.L<sup>-1</sup>)*</b>	Magnésio total (mg.L <sup>-1</sup> )	Sulfeto (mg.L <sup>-1</sup> )
<b>Clorofila a (µg.L<sup>-1</sup>)*</b>	Manganês total (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Temperatura da água (°C)*</b>
Cobre dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	Mercurio total (µg.L <sup>-1</sup> )	<b>Temperatura do ar (°C)*</b>
<b>Coliformes termotolerantes (NMP.100ml<sup>-1</sup>)*</b>	Níquel total (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Turbidez (UNT)*</b>
Coliformes totais (NMP.100ml <sup>-1</sup> )	<b>Nitrato (mg.L<sup>-1</sup> N)*</b>	Zinco total (mg.L <sup>-1</sup> )
<b>Condutividade elétrica (µmho.cm<sup>-1</sup>)*</b>	Nitrito (mg.L <sup>-1</sup> N)	
Cor verdadeira (mg Pt.L <sup>-1</sup> )	Nitrogênio amoniacal total (mg.L <sup>-1</sup> N)	
Cromo total (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>Nitrogênio orgânico (mg.L<sup>-1</sup> N)*</b>	

\*Variáveis com frequência de monitoramento mensal

## **4.2 Seleção dos parâmetros físico-químicos e biológicos utilizados como dados de entrada**

Os dados utilizados neste trabalho são compostos pela base dos pontos de monitoramento da qualidade das águas superficiais do rio das Velhas, no formato *shape* e dados dos parâmetros de qualidade de água (variáveis), nos formatos CSV e XLS (Excel®), das estações operadas pelo Instituto Mineiro Gestão das Águas, no âmbito do Projeto Águas de Minas.

As variáveis físico-químicas e biológicas das estações monitoradas no rio das Velhas foram obtidos no período de julho de 2008 (início do monitoramento mensal) a dezembro de 2011, totalizando 42 resultados para cada variável analisada. A definição desse período deve-se ao número de estações com medição mensal, o que possibilitou um número relevante de dados.

Optou-se por utilizar as variáveis que apresentaram os maiores percentuais de violação à Deliberação Normativa COPAM/CERH N°01/08 e que dessa forma representariam os constituintes mais críticos da bacia. Assim, foram pré-selecionadas as variáveis que apresentaram mais de 20% de resultados em desconformidade a essa legislação, considerando o enquadramento do corpo de água no local de cada estação no rio das Velhas. Tendo em

vista esse critério foram selecionadas, dentre as variáveis monitoradas mensalmente, aquelas que possuíam VPM (valor máximo permitido) segundo a DN COPAM/CERH N°01/08 (Quadro 4.2), totalizando 11 variáveis. Optou-se também por selecionar as variáveis que possuíam o mesmo número de dados da variável (mesmo N) em todas as estações selecionadas.

**QUADRO 4.2** - Variáveis monitoradas mensalmente no rio das Velhas e que possuem VMP segundo a Deliberação Normativa COPAM/CERH N°01/08

Variável	Limite DN COPAM / CERH nº 01/2008		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Arsênio total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,01	0,033
Cloreto total (mg.L <sup>-1</sup> )	250	250	250
Coliformes termotolerantes (NMP.100ml <sup>-1</sup> )	200	1000	4000
Clorofila-a (µg.L <sup>-1</sup> )	10	30	60
Demanda Bioquímica Oxigênio (mg.L <sup>-1</sup> )	3	5	10
Densidade de cianobactérias (cel.ml <sup>-1</sup> )	20000	50000	100000
Fósforo total (mg.L <sup>-1</sup> )*	0,1	0,1	0,15
Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> N)	10	10	10
Oxigênio Dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	Não inferior a 6	Não inferior a 5	Não inferior a 4
Ph	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Turbidez (UNT)	40	100	100

\*Obs.: limites para ambientes lóticos

Os resultados que apresentam valores censurados, ou seja, abaixo ou acima do limite mínimo de detecção do método analítico foram substituídos pelo próprio resultado, ou seja, os valores dos limites mínimos e máximos de detecção foram mantidos.

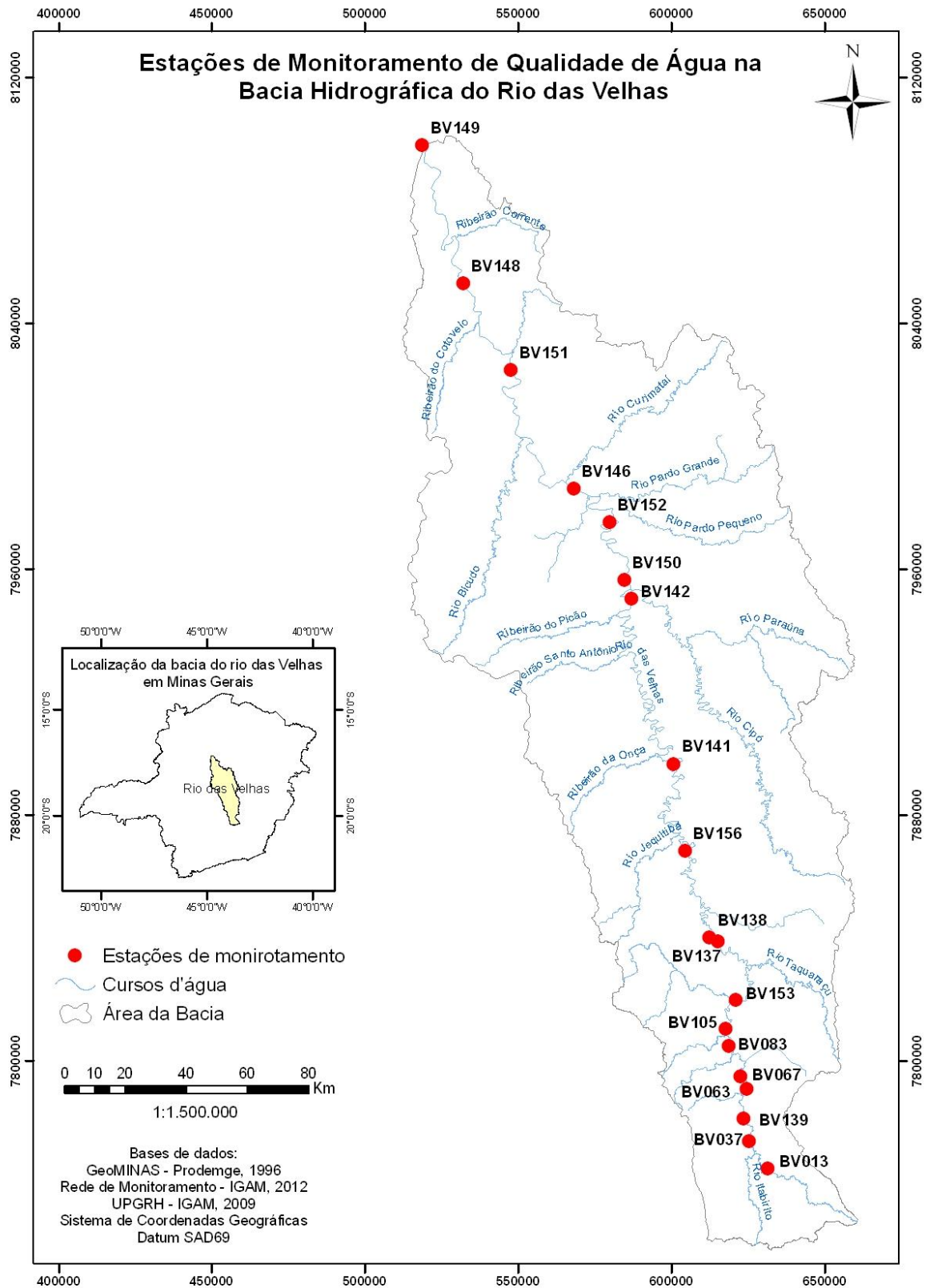
O objetivo dessa etapa foi identificar as principais variáveis responsáveis pela degradação do rio das Velhas e, posteriormente, selecionar os mais representativos das principais tipologias de impacto existentes na bacia e que seriam convenientemente considerados no cálculo da entropia.

### **4.3 Seleção das estações de monitoramento**

Foram analisadas todas as estações de monitoramento em operação na rede básica do IGAM que possuem monitoramento mensal, implantadas até o ano de 2008. Dessa forma, a rede de monitoramento selecionada foi composta por 19 estações de monitoramento distribuídas na calha do rio das Velhas (Figura 4.2). A descrição da localização das estações de monitoramento é apresentada no Quadro 4.3.



**FIGURA 4.2:** Localização das estações de monitoramento de qualidade das águas superficiais no rio das Velhas.



**QUADRO 4.3 - Descrição das estações de monitoramento de qualidade de água do rio das Velhas**

Estação	Descrição	Classe de Enquadramento	Município	Coordenadas Geográficas	
				Latitude	Longitude
BV013	Rio das Velhas a montante da foz do Rio Itabirito	Classe 2	Itabirito	-20° 12'36,4"	-43° 44'30,2"
BV037	Rio das Velhas a jusante da foz do Rio Itabirito	Classe 2	Rio Acima	-20° 7'47,7"	-43° 48'0,09"
BV063	Rio das Velhas a jusante do Ribeirão Água Suja	Classe 2	Nova Lima/ Raposos	-19° 58'31,4"	-43° 48'26,9"
BV067	Rio das Velhas a montante do ribeirão Sabará	Classe 2	Sabará	-19° 56'18,2"	-43° 49'37,7"
BV083	Rio das Velhas logo a jusante do Ribeirão Arrudas	Classe 3	Sabará	-19° 50'57,7"	-43° 51'54,7"
BV105	Rio das Velhas logo a jusante do Ribeirão do Onça	Classe 3	Santa Luzia	-19° 47'56,0"	-43° 52'33,4"
BV137	Rio das Velhas na Ponte Raul Soares, em Lagoa Santa	Classe 3	Lagoa Santa	-19° 32'35,8"	-43° 54'8,8"
BV138	Rio das Velhas no Parque do Sumidouro em Lagoa Santa	Classe 3	Lagoa Santa	-19° 31'53,6"	-43° 55'39,5"
BV139	Rio das Velhas a montante da ETA/COPASA, em Bela Fama	Classe 2	Rio Acima	-20° 3'48,3"	-43° 49'0,9"
BV141	Rio das Velhas na cidade de Santana do Pirapama	Classe 2	Santana de Pirapama	-19° 1'15,9"	-44° 2'28,9"
BV142	Rio das Velhas a jusante do ribeirão Santo Antônio	Classe 2	Inimutaba/Presidente Juscelino	-18° 32'13,4"	-44° 10'30,1"
BV146	Rio das Velhas a jusante do rio Pardo Grande	Classe 2	Augusto de Lima/Corinto	-18° 12'47,8"	-44° 21'14,4"
BV148	Rio das Velhas na cidade de Várzea da Palma	Classe 2	Várzea da Palma	-17° 36'39,0"	-44° 41'46,8"
BV149	Rio das Velhas a montante da sua foz no rio São Francisco, em Guaicuí	Classe 2	Várzea da Palma	-17° 12'14,8"	-44° 49'22,8"
BV150	Rio das Velhas a jusante do rio Paraúna, na localidade de Senhora da Glória	Classe 2	Santo Hipólito	-18° 28'53,6"	-44° 11'53,6"
BV151	Rio das Velhas a jusante do córrego do Vinho, em Lassance	Classe 2	Lassance	-17° 51'54,7"	-44° 32'56,5"
BV152	Rio das Velhas entre os Rios Paraúna e Pardo Grande	Classe 2	Santo Hipólito	-18° 18'43,0"	-44° 14'36,9"
BV153	Rio das Velhas a jusante do Ribeirão da Mata	Classe 3	Santa Luzia	-19° 42'49,4"	-43° 50'41,6"
BV156	Rio das Velhas logo a jusante do Rio Jabuticatubas	Classe 2	Baldim	-19° 16'39,9"	-44° 0'20,3"

Fonte: IGAM, 2010

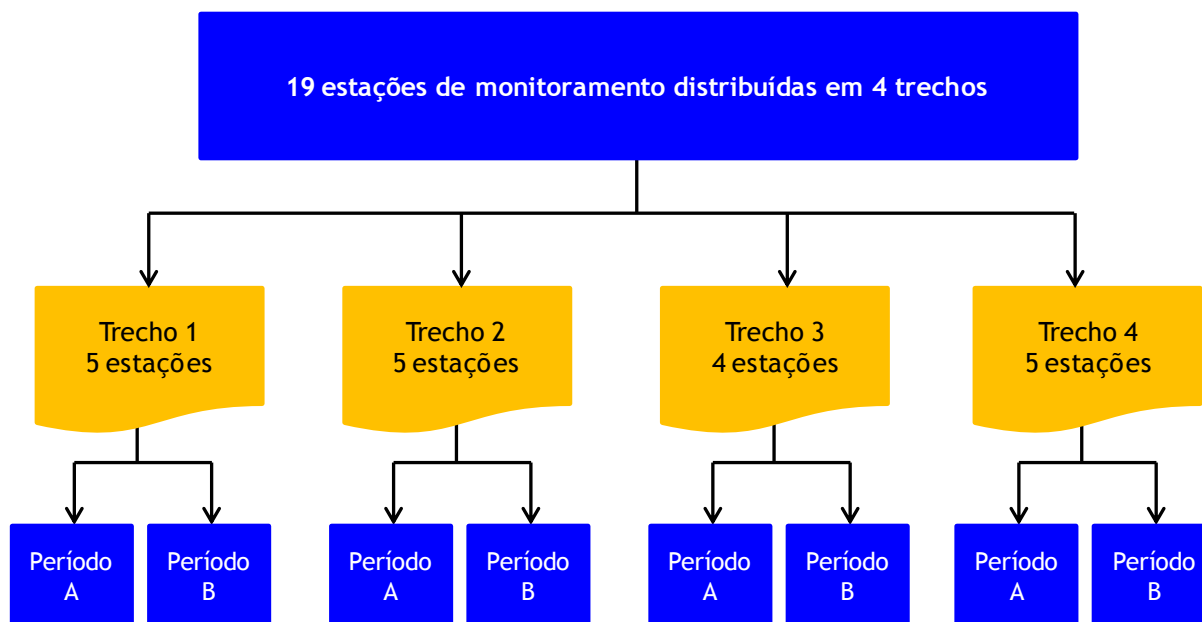
#### 4.3.1 Definição dos agrupamentos das estações de monitoramento

Para a utilização do programa baseado no método da entropia (Soares, 2001) houve necessidade de preparação prévia dos dados de entrada.

Como já mencionado, o programa utilizado possui a limitação de analisar apenas cinco estações por vez com uma série de no máximo 21 dados, sendo analisada uma variável por vez. Dessa maneira foi necessário agrupar as 19 estações em quatro grupos menores,

chamados de trechos, e em dois períodos distintos de monitoramento, denominados A e B, uma vez que cada estação possuía uma série de 42 resultados para cada variável analisada. Assim, foram organizadas duas séries da mesma variável de forma que a primeira contivesse os primeiros 21 dados e a segunda os 21 restantes. O período A refere-se aos resultados obtidos entre julho de 2008 e março de 2010 e o período B entre abril de 2010 e dezembro de 2011. O fluxograma da Figura 4.3 sintetiza este procedimento.

**FIGURA 4.3:** Procedimentos metodológicos empregados na definição dos agrupamentos das estações.



Para definir os agrupamentos das estações que formariam os trechos, foi realizada a análise de cluster. A Análise de Cluster (AC) é uma análise estatística multivariada que divide uma grande quantidade de dados em subconjuntos ou clusters, baseado em características comuns desses dados. Foi realizada a padronização prévia dos dados transformando todos em escala-Z, com média igual a 0 e desvio padrão igual a 1, para permitir a avaliação conjunta de variáveis com unidades e ordens de grandeza diferentes. A distância Euclidiana foi utilizada para medir a ligação dos agrupamentos e assim verificar quais estações apresentaram maiores similaridades em relação às variáveis testadas. O objetivo dessa etapa foi formar agrupamentos menores de estações uma vez que o programa adotado analisa no máximo cinco estações por vez, como já mencionado.

### **4.3.2 Validação dos agrupamentos das estações de monitoramento**

Complementarmente, para validar os agrupamentos formados e identificar as variáveis responsáveis pelas diferenças e semelhanças encontradas na AC, foram analisados os resultados do teste Kruskal-Wallis por estação, considerando um nível de significância de 5%. O teste de comparações múltiplas foi aplicado sempre que o teste de Kruskal-Wallis apontava diferenças significativas, visando identificar as variáveis responsáveis pelos agrupamentos obtidos. Primeiramente foram comparados os agrupamentos encontrados na AC e depois as estações. Foram elaborados gráficos *box-plot* para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos nos testes estatísticos. As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica 8.0.

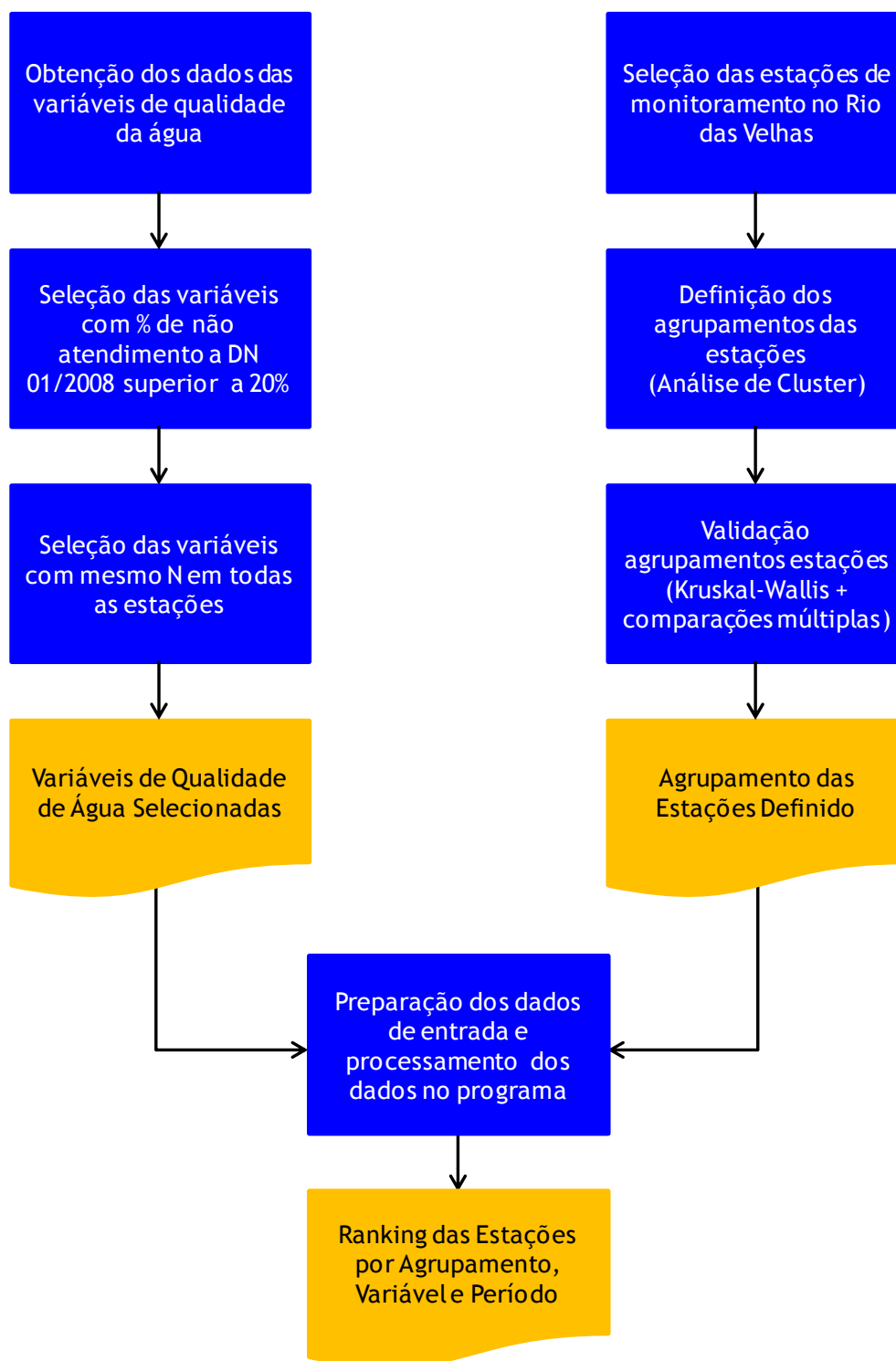
A partir do pré-processamento dos resultados dessa etapa, foi possível alimentar o programa e determinar a importância da manutenção de cada estação na rede de monitoramento a partir do valor de entropia obtido em cada estação de monitoramento por variável, agrupamento e por período, detalhados a seguir. A Figura 4.4 apresenta um resumo dos procedimentos metodológicos empregados nessa etapa.

## **4.4 Avaliação da distribuição espacial da rede de monitoramento pela aplicação do método da Entropia**

### **4.4.1 Análise individual do nível de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento, em função de cada parâmetro.**

Como mencionado anteriormente, o programa disponibiliza os resultados das simulações para cada variável analisada, nos diferentes agrupamentos e considerando os dois diferentes períodos de monitoramento (A e B). Desta forma, a princípio, foi efetuada uma avaliação da importância de cada parâmetro na produção da informação disponibilizada por cada uma das estações de monitoramento. Ou seja, considerando cada variável individualmente, qual seria a ordem de prioridade ou de importância de cada estação de monitoramento, em cada um dos trechos.

**FIGURA 4.4:** Procedimentos metodológicos empregados na aplicação do método da entropia.

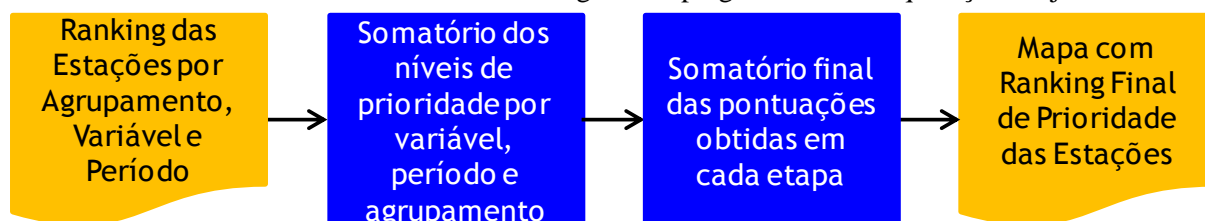


#### 4.4.2 Análise conjunta do nível de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento

Para análise do resultado global das 19 estações, procedeu-se a uma análise da hierarquização conjunta dos resultados obtidos em cada simulação. O objetivo desse procedimento foi o de realizar uma análise global dos resultados obtidos nas diferentes simulações realizadas, possibilitando assim classificar as 19 estações quanto à sua importância na manutenção da rede de monitoramento, em função de todas as variáveis analisadas.

Os níveis de prioridade obtidos para cada estação de monitoramento em cada simulação (variável, período e agrupamento) foram somados e aquela estação que obteve o menor valor foi considerada a de maior importância hierárquica, ou seja, a sua manutenção na rede de monitoramento seria importante. O segundo menor valor determinou a segunda estação em ordem de prioridade, e assim sucessivamente. Desta forma, as estações que obtiverem as menores classificações ou importância hierárquica, caso haja necessidade de interrupção da operação dessas estações, poderão ser removidas. O software ArcView 10.1 foi usado para a confecção dos mapas da rede de monitoramento. A Figura 4.5 apresenta um resumo dos procedimentos metodológicos empregados nessa etapa.

**FIGURA 4.4:** Procedimentos metodológicos empregados na hierarquização conjunta.



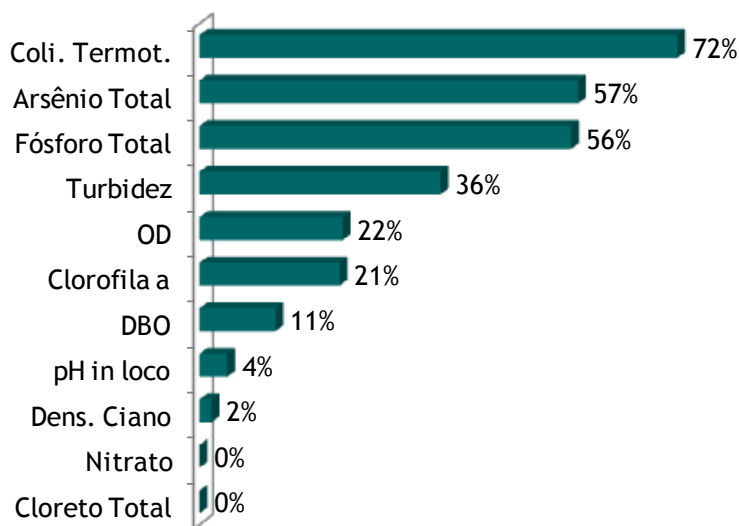
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Seleção dos parâmetros físico-químicos e biológicos utilizados como dados de entrada

Na Figura 5.1 são apresentados os percentuais de desconformidade das 11 variáveis de qualidade de água em relação à Deliberação Normativa COPAM/CERH N°01/08 no rio das Velhas, considerando os resultados obtidos no período de julho de 2008 a dezembro de 2011. Os parâmetros que apresentaram percentual de violação superior a 20% foram coliformes termotolerantes (72%), arsênio total (57%), fósforo total (56%), turbidez (36%), oxigênio dissolvido (22%) e clorofila a (21%).

De maneira geral, os principais fatores de degradação ambiental, que podem ser apontados como contribuintes dos resultados citados acima, segundo IGAM (2010), são os lançamentos de esgotos domésticos e industriais nos corpos de água da bacia hidrográfica do rio das Velhas, as atividades minerárias, além de outras formas de uso ou presença natural nos solos da bacia de drenagem que podem afetar a qualidade da água.

**FIGURA 5.1:** Percentuais de desconformidade das variáveis de qualidade de água em relação à Deliberação Normativa COPAM/CERH N°01/08 no rio das Velhas no período de 2008 a 2011.



Em seguida, foi feita a contagem do número de coletas das variáveis que apresentaram percentual de violação superior a 20% nas 19 estações de monitoramento e verificou-se que as variáveis coliformes termotolerantes e clorofila *a* (Tabela 5.1) apresentaram um número de amostragens inferior ao das demais variáveis. Entretanto, como a variável coliformes

termotolerantes foi a que apresentou o maior percentual de violação no rio das Velhas, optou-se por incluí-la na seleção das variáveis, considerando que essa tem uma importância expressiva para caracterização dos impactos na bacia do rio das Velhas.

**TABELA 5.1** - Número de coletas das variáveis com percentual de violação superior a 20%.

Variável	N coletas	% violação
Arsênio total	797	57
Fósforo total	797	56
Turbidez	797	36
Oxigênio dissolvido	797	22
Coliformes termotolerantes	789	72
Clorofila a	786	21

Ao final, foram selecionadas as cinco variáveis com os maiores percentuais de desconformidade em relação à legislação para avaliar os agrupamentos das estações do rio das Velhas: Coliformes Termotolerantes (Coli. Term.), Arsênio Total ( $As_T$ ), Fósforo Total ( $P_T$ ), Turbidez (Turb) e Oxigênio Dissolvido (OD).

## **5.2 Seleção das estações de monitoramento**

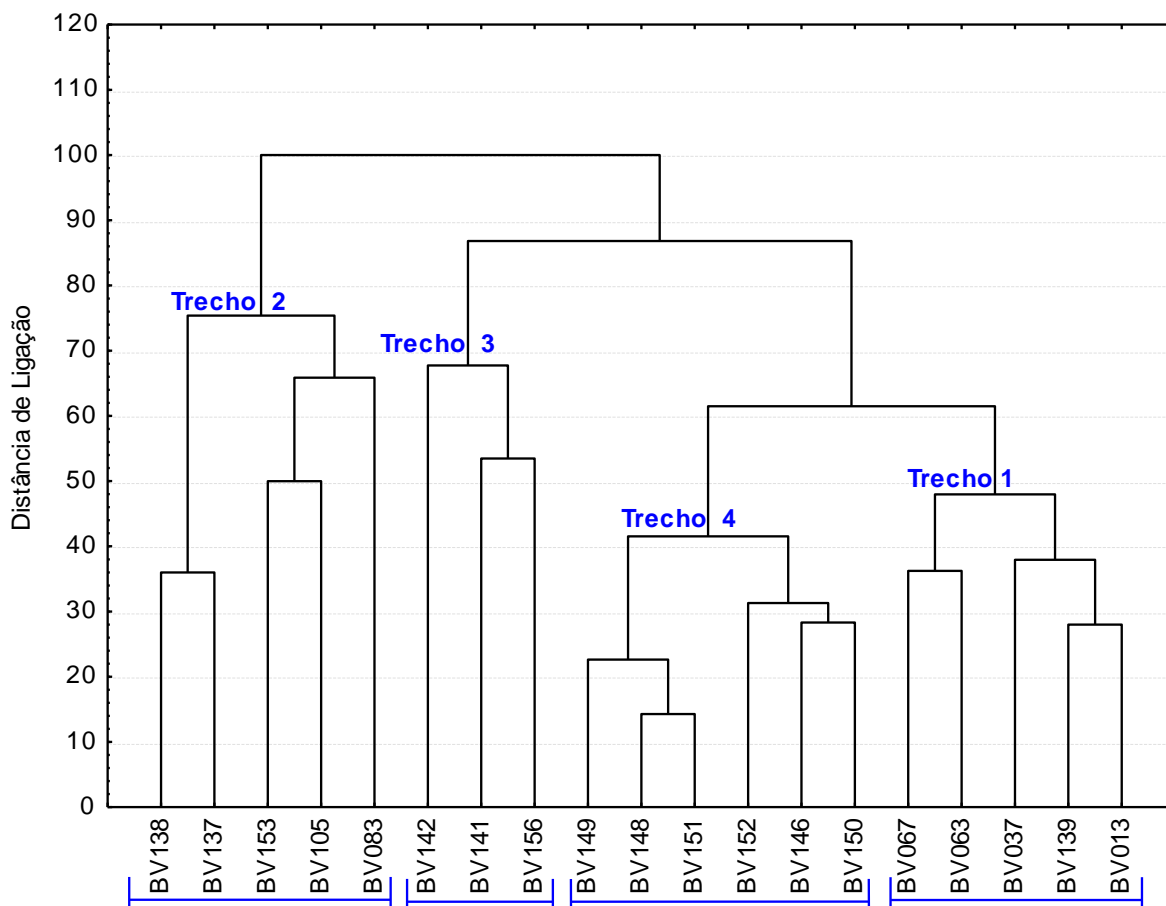
### **5.2.1 Definição dos agrupamentos das estações de monitoramento**

Como descrito anteriormente, a análise de *cluster* (AC) ou análise do agrupamento hierárquico foi utilizada para agrupar as estações de monitoramento em trechos com características similares, a partir dos dados padronizados das variáveis Coliformes Termotolerantes, Arsênio Total, Fósforo Total, Turbidez e Oxigênio Dissolvido.

O dendograma exibido na Figura 5.2 mostra a formação de quatro agrupamentos principais, que refletem as condições de qualidade das águas do rio das Velhas e também a localização geográfica das estações de monitoramento. Comportamentos semelhantes na formação dos agrupamentos das estações de monitoramento foram observados por Jardim (2011) e Christofaro (2009) na bacia do rio das Velhas. As estações localizadas no trecho inicial do rio das Velhas foram chamadas de Trecho 1, as localizadas na transição entre o alto/médio curso ficaram no Trecho 2, as do médio curso de Trecho 3, e por último as localizadas no baixo curso do rio de Trecho 4.



**FIGURA 5.2:** Dendograma da Análise de Cluster para 19 estações de monitoramento do rio das Velhas das variáveis Coli. Term., AsT, PT, Turb. e OD.



Como já mencionado, o programa desenvolvido por Soares (2001) possui a limitação de analisar apenas cinco estações por vez. Entretanto os quatro agrupamentos definidos na AC foram compostos por diferentes quantidades de estações de monitoramento. Desses, apenas o grupo 4 extrapola o número máximo de estações permitido pelo programa. Assim, optou-se por relocar a estação BV150 do Trecho 4 e incluí-la no Trecho 3, devido a sua proximidade geográfica com as estações desse trecho (Figura 4.2). Dessa maneira, a distribuição das estações do rio das Velhas em cada trecho, para o processamento dos dados pelo método da entropia, é apresentada na Tabela 5.2.

**TABELA 5.2 -** Distribuição das estações do rio das Velhas nos trechos.

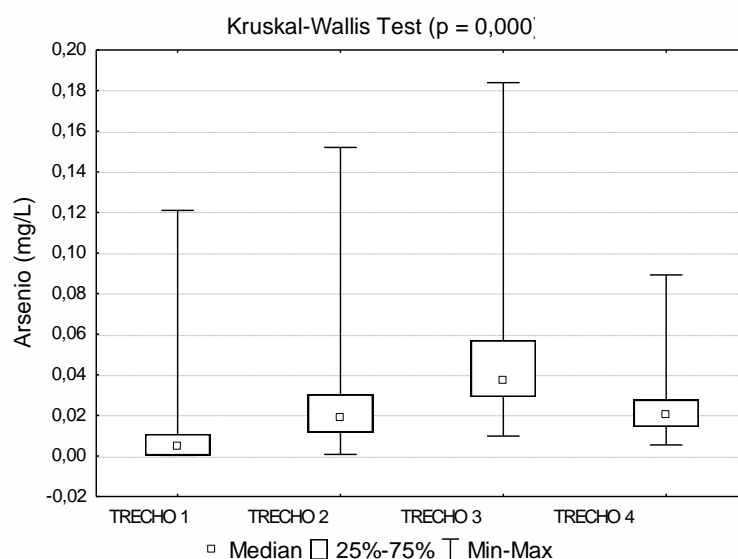
Agrupamento	Código da Estação
Trecho 1	BV013, BV037, BV139, BV063 e BV067
Trecho 2	BV083, BV105, BV153, BV137 e BV138
Trecho 3	BV156, BV141, BV142 e BV150
Trecho 4	BV152, BV146, BV151, BV148, BV149

## 5.2.2 Validação dos agrupamentos das estações de monitoramento

Foram efetuados os testes de Kruskal-Wallis, seguido de teste de comparações múltiplas, para validar os agrupamentos formados e identificar as variáveis responsáveis pelas diferenças e semelhanças encontradas na AC. A um nível de significância de 5%, as variáveis que foram significativas para distinção entre os agrupamentos formados na AC foram arsênio total ( $A_{ST}$ ), fósforo total ( $P_T$ ), coliformes termotolerantes (Coli. Term) e oxigênio dissolvido (OD). Somente os resultados da variável turbidez não apresentaram diferença entre as estações ( $p = 0,437$ ).

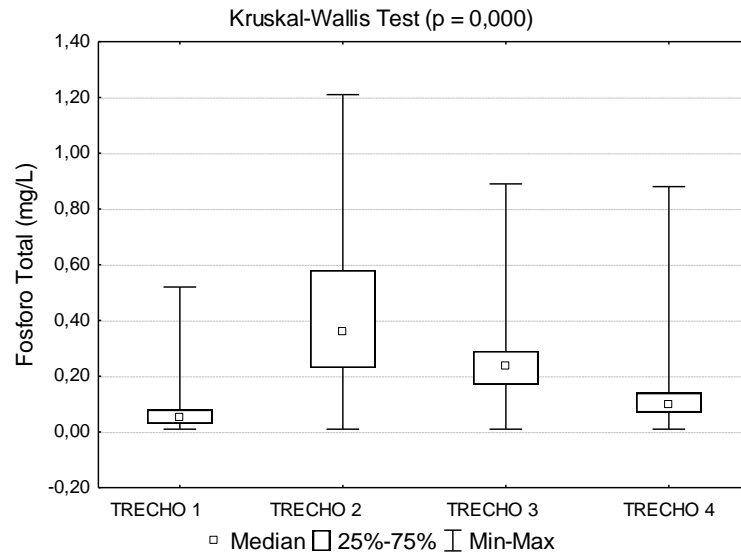
Analisando-se as variáveis separadamente por agrupamento (Figuras 5.3 a 5.6), constatou-se que, em quase todos os casos, os parâmetros monitorados nos trechos 1, 2 e 3 apresentaram comportamentos diferenciados entre si, em virtude das ou diferenças dos resultados obtidos, como detalhado nos próprios gráficos. Os valores medianos das variáveis significativas ( $p = 0,000$ ) para distinção entre os agrupamentos formados na AC do rio das Velhas são apresentados em gráficos *Box-plots* que compõem a Figura 5.3 a 5.6.

**FIGURA 5.3:** *Box-plot* das concentrações de Arsênio dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas.



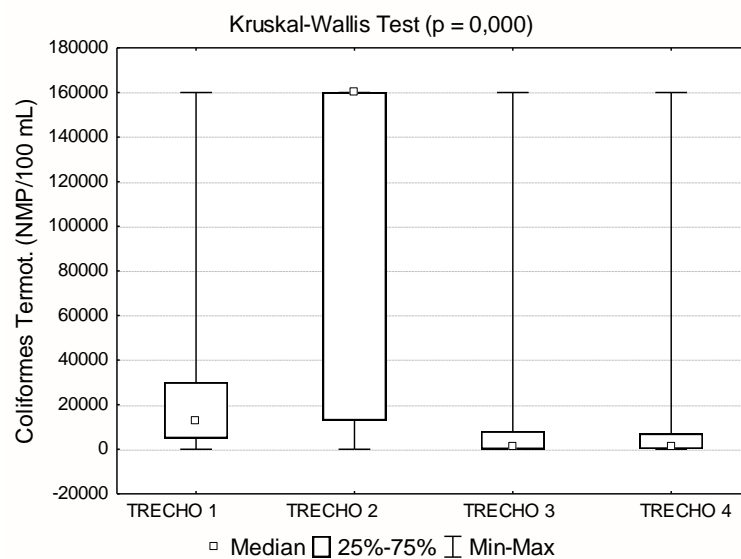
Obs.: Teste de comparações múltiplas ( $\alpha = 5\%$ ) para o parâmetro arsênio total apontou diferença significativa entre todos os trechos exceto entre os trechos 2 e 4.

**FIGURA 5.4:** *Box-plot* das concentrações de Fósforo Total dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas.



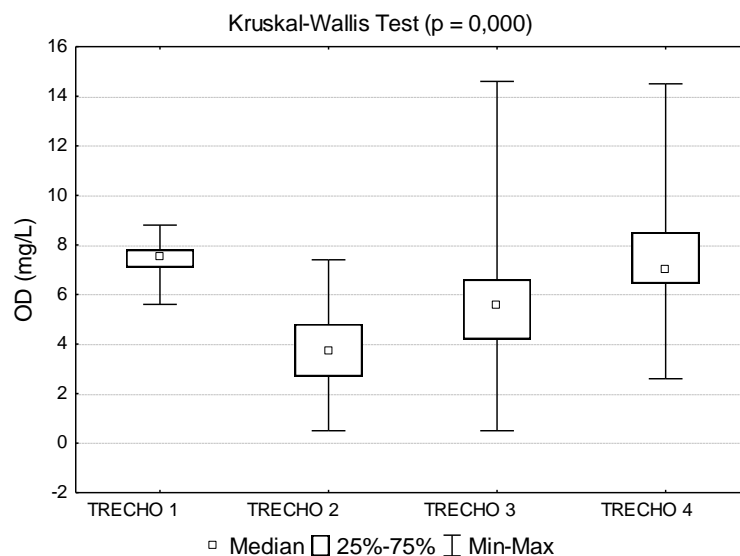
Obs.: Teste de comparações múltiplas ( $\alpha = 5\%$ ) do parâmetro fósforo total apontou diferença significativa entre todos os grupos.

**FIGURA 5.5:** *Box-plot* das concentrações de Coliformes Termotolerantes dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas.



Obs.: Teste de comparações múltiplas ( $\alpha = 5\%$ ) para os coliformes termotolerantes apontou que apenas os grupos 3 e 4 não foram significativamente diferentes.

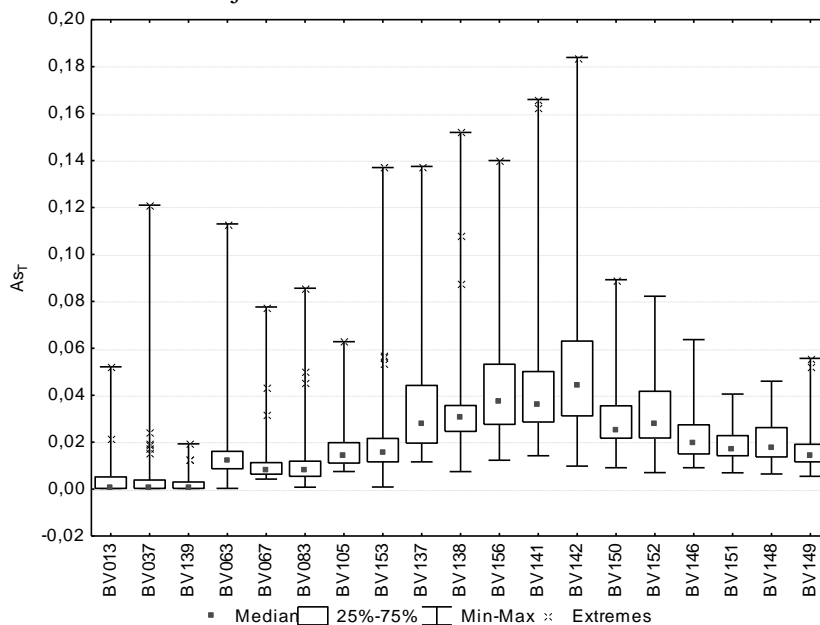
**FIGURA 5.6:** *Box-plot* das concentrações de OD dos agrupamentos formados na AC do rio das Velhas.



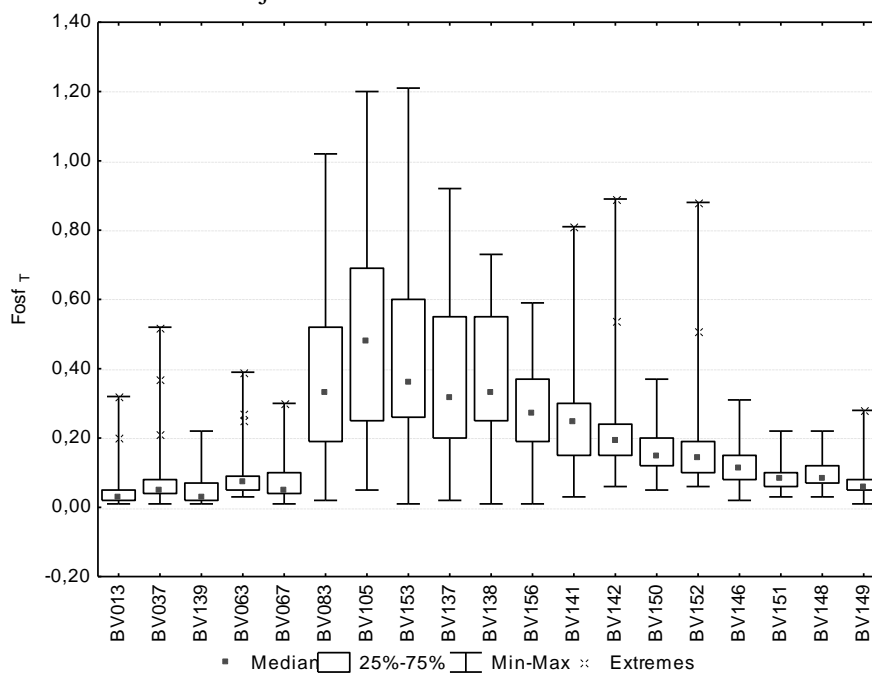
Obs.: Teste de comparações múltiplas ( $\alpha = 5\%$ ) para o parâmetro oxigênio dissolvido apontou diferença significativa para todos os grupos, exceto 1 e 4.

Para auxiliar na identificação das variáveis mais importantes nas estações do rio das Velhas em cada agrupamento, foram analisados os resultados do teste Kruskal-Wallis por estação para cada parâmetro em questão. As Figuras 5.7 a 5.10 mostram os gráficos box-plot das variáveis  $As_T$ ,  $P_T$ , Coli. Term e OD e permitem verificar a evolução espacial dessas variáveis ao longo das estações do rio das Velhas.

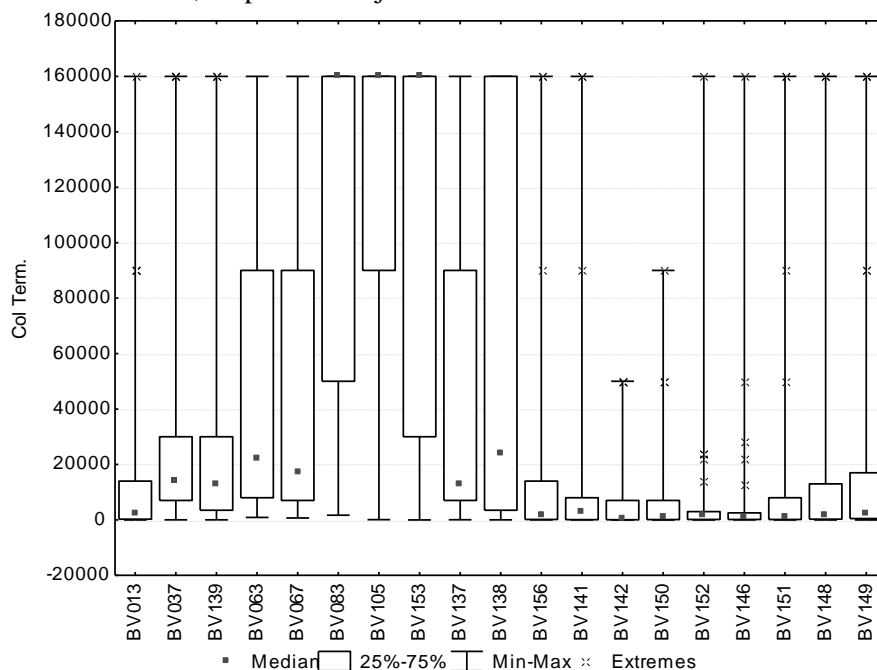
**FIGURA 5.7:** Box-plot das concentrações de Arsênio Total das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011.



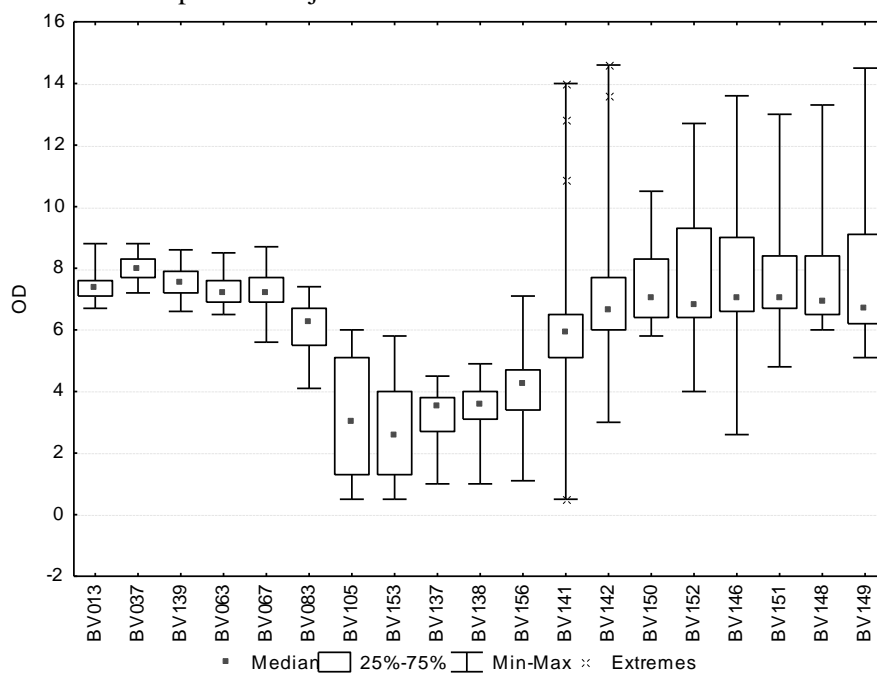
**FIGURA 5.8:** Box-plot das concentrações de Fósforo Total das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011.



**FIGURA 5.9:** Box-plot das concentrações de Coliformes Termotolerantes das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011.



**FIGURA 5.10:** Box-plot das concentrações de Oxigênio Dissolvido das estações do rio das Velhas, no período de julho de 2008 a dezembro de 2011.



Os resultados das variáveis  $P_T$  e OD influenciaram a formação do primeiro agrupamento das estações BV013, BV037, BV063, BV067 e BV139. Esse trecho se distingue dos demais por ser o menos impactado do rio das Velhas, apresentando bons níveis de oxigenação e baixa concentração de nutrientes. O segundo agrupamento, formado pelas estações BV083, BV105,

BV153, BV137 e BV138, é explicado pelos menores concentrações de OD e maiores valores de Coli. Term e  $P_T$ , resultantes dos lançamentos de esgotos da RMBH. De acordo com ANA (2012), as maiores concentrações de carga orgânica encontram-se na região do Alto São Francisco, particularmente na Região Metropolitana de Belo Horizonte (bacias do rio das Velhas e rio Paraopeba), que inclui as cidades de Belo Horizonte, Betim, Contagem, Ribeirão das Neves, Santa Luiza e Sete Lagoas. Essas cidades, mesmo sendo contempladas com algum tipo de tratamento de esgoto, ainda contribuem com cerca de 30% da carga de esgoto urbano remanescente na Região Hidrográfica do São Francisco.

No terceiro agrupamento, formado pelas estações BV156, BV141 e BV142 destacou-se principalmente a variável  $As_T$ , devido às suas altas concentrações (medianas em torno de 0,03 mg/L) . Dados do mapeamento geoquímico da bacia do rio das Velhas (CPRM, 2010) apontam que os solos da região próxima ao município de Baldim apresentam teores atípicos de arsênio, o que pode explicar os valores elevados das medianas de arsênio nessas estações.

No último agrupamento, formado pelas estações BV150, BV152, BV146, BV151, BV148 e BV149, foram determinantes os resultados de OD e Coli. Term. Nesse trecho, localizado no baixo curso da bacia, observam-se as maiores concentrações de OD em virtude da redução da carga orgânica no rio das Velhas. Outra causa importante se deve ao fato da região contribuir positivamente para a melhoria da qualidade da água do rio das Velhas, ao receber as águas dos rios Cipó, Paraúna e Pardo Grande que são afluentes que apresentam melhor qualidade das águas superficiais, de acordo com IGAM (2010). Já a presença de coliformes termotolerantes pode estar relacionada com lançamentos de esgotos sanitários de municípios como Lassance e Várzea da Palma e as fontes não pontuais, como a presença de áreas de pastagens nesse trecho do rio das Velhas.

Desta forma, a identificação das variáveis responsáveis pelas diferenças e semelhanças encontradas na AC validaram os agrupamentos formados, uma vez que foram coerentes com as condições de degradação ou preservação observadas nos trechos.

### **5.3 Avaliação da distribuição espacial da rede de monitoramento pela aplicação do método da Entropia**

#### **5.3.1 Análise individual do nível de prioridade das estações na rede de monitoramento, em função de cada parâmetro.**

Como já mencionado, o programa analisa apenas um parâmetro por vez, com uma série de no máximo 21 dados, sendo necessário realizar para cada variável analisada oito diferentes simulações de priorização para avaliar a rede de monitoramento. Os dados de entrada das variáveis selecionadas estão apresentados no Apêndice A

Para confirmação e apoio na identificação da ordem de prioridades, foi efetuada a estatística descritiva da série de dados mensais de cada parâmetro analisado, considerando o período de julho de 2008 a dezembro de 2011. O Apêndice B apresenta a estatística descritiva das variáveis selecionadas, considerando o número de dados, média e desvio padrão, mediana e variância. A ordem de apresentação das estações de monitoramento segue o sentido de montante para jusante de sua localização no rio das Velhas.

Por fim, foi efetuada uma análise global dos resultados obtidos nas diferentes simulações realizadas, para classificação das 19 estações quanto ao seu nível de prioridade, ou seja, quanto à sua importância na manutenção da rede de monitoramento.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para cada variável analisada, considerando os agrupamentos formados (ou trechos) nos períodos A e B.

##### **5.3.1.1 Arsênio Total**

Os resultados obtidos com a aplicação do método da entropia nos trechos do rio das Velhas obtidos na Análise de Cluster, considerando os períodos A e B são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Para a variável arsênio total, considerando os dados coletados no período de julho de 2008 a março de 2010 (período A), no que diz respeito à incerteza desta variável na produção da informação, a estação mais importante, por exemplo, no trecho 1, seria a estação BV013. Considerando o período B (dados coletados entre abril de 2010 e dezembro de 2011) a estação



que obteve prioridade 1 seria a estação BV037. Já a estação BV139 obteve prioridade 5 em ambas as séries, podendo-se concluir que caso necessário a desativação de alguma estação no trecho 1, esta deverá ocorrer na estação BV139, no que diz respeito a incerteza envolvida na produção da informação da variável arsênio total.

**TABELA 5.3:** Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de arsênio total no período A, para cada trecho do rio das Velhas.

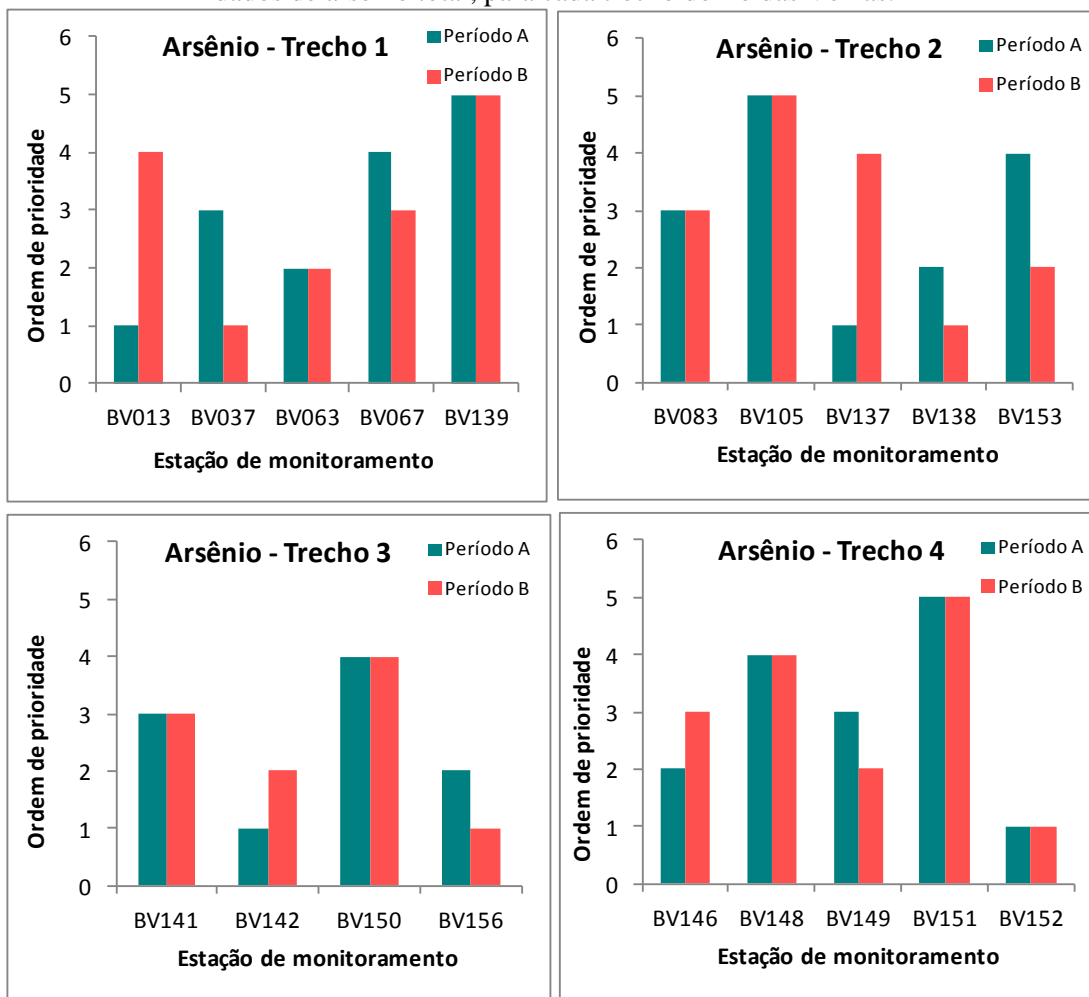
Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV013	1	-3,09	15,93	---	---
	BV063	2	-6,4	32,99	-2,75	-0,35
	BV037	3	-10,4	53,57	-6,66	0,26
	BV067	4	-14,74	75,9	-11,45	1,05
	BV139	5	-19,41	100	-15,49	0,76
2	BV137	1	-2,19	14,16	---	---
	BV138	2	-4,81	31,14	-2,31	0,12
	BV083	3	-7,92	51,31	-4,79	-0,02
	BV153	4	-11,25	72,87	-8,21	0,28
	BV105	5	-15,44	100	-11,99	0,74
3	BV142	1	-1,9	18,54	---	---
	BV156	2	-4,41	43,01	-1,77	-0,13
	BV141	3	-7,15	69,74	-5,05	0,64
	BV150	4	-10,25	100	-7,5	0,35
4	BV152	1	-2,49	15,72	---	---
	BV146	2	-5,04	31,78	-2,15	-0,34
	BV149	3	-8,02	50,53	-4,86	-0,18
	BV148	4	-11,48	72,33	-7,98	-0,04
	BV151	5	-15,87	100	-12,29	0,8

**TABELA 5.4** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de arsênio total no período B, para cada trecho do rio das Velhas.

Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV037	1	-2,24	13,49	---	---
	BV063	2	-4,31	26,01	-1,89	-0,34
	BV067	3	-0,83	47,24	-5,08	0,77
	BV013	4	-11,52	69,49	-7,92	0,09
	BV139	5	-16,58	100	-12,16	0,63
2	BV138	1	-2,1	15,33	---	---
	BV153	2	-4,15	30,26	-1,99	-0,12
	BV083	3	-6,64	48,4	-4,08	-0,07
	BV137	4	-9,56	69,64	-6,92	0,28
	BV105	5	-13,72	100	-10,72	1,16
3	BV156	1	-1,97	20,4	---	---
	BV142	2	-3,81	39,41	-1,65	-0,32
	BV141	3	-6,34	65,62	-4,27	0,47
	BV150	4	-9,66	100	-6,97	0,64
4	BV152	1	-2,72	15,4	---	---
	BV149	2	-5,8	32,91	-2,56	-0,15
	BV146	3	-9,36	53,09	-6,25	0,45
	BV148	4	-13,28	75,32	-10,04	0,68
	BV151	5	-17,63	100	-14,15	0,87

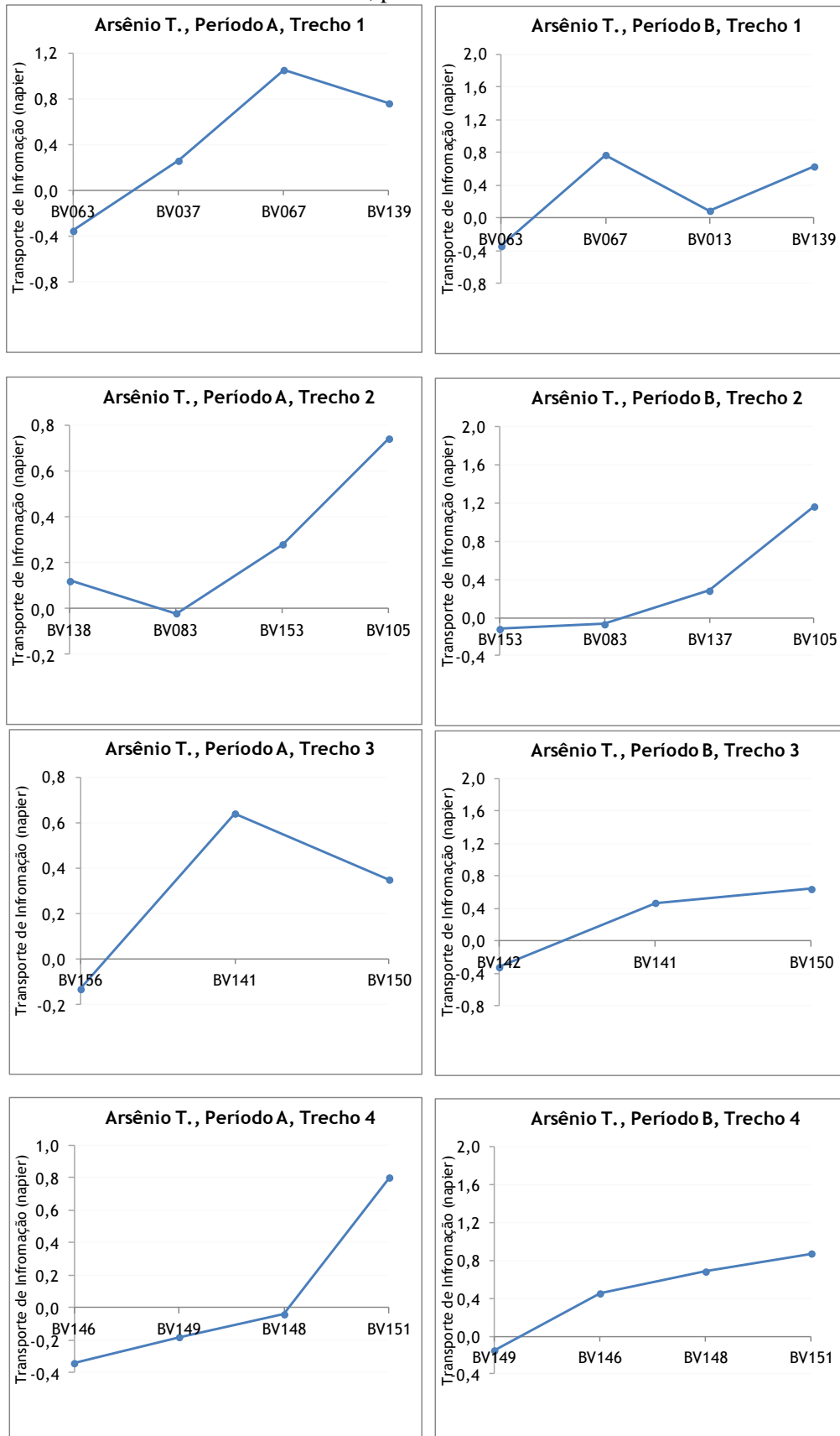
A Figura 5.11 ilustra os resultados da ordem de prioridade das estações em cada trecho do rio das Velhas, para os períodos A e B. Os resultados mostram uma coincidência de resultados para os distintos períodos no que diz respeito às estações de menor entropia, ou seja, menor importância hierárquica na manutenção da rede. Assim, se necessária a desativação de alguma estação, considerando a variável arsênio total, ela deverá ocorrer no trecho 1 na estação BV139, no trecho 2 na estação BV105, no trecho 3 na estação BV150 e, por fim, no trecho 4 na estação BV151.

**FIGURA 5.11:** Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de arsênio total, para cada trecho do rio das Velhas.



Considerando a dependência na produção da informação entre estas estações no período A, Trecho 1, a quarta estação (BV067) transporta uma quantidade maior de informação já disponibilizada pelas anteriores (ver Tabela 5.3 – Transporte da informação). Observa-se, também, que o transporte de informação no trecho 1 (período A) decresce com o acréscimo da quinta estação na rede, ou seja, a sua inserção na rede volta a agregar informações sobre o parâmetro analisado (Figura 5.12).

**FIGURA 5.12 - Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável arsênio total**



### 5.3.1.2 Coliformes termotolerantes

Os resultados obtidos com a aplicação do método da entropia para a variável coliformes termotolerantes nos trechos do rio das Velhas são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Em relação aos coliformes termotolerantes, considerando os dados coletados no período A, no que diz respeito à incerteza desta variável na produção da informação, a estação mais importante, por exemplo, no trecho 2, seria a estação BV153. Já para o período B a estação que obteve prioridade 1 seria a estação BV138. Contudo, a estação BV137 obteve os maiores valores de entropia associada no trecho 2, obtendo prioridade 5 em ambas as séries. Pode-se concluir que, caso necessário a desativação de alguma estação no trecho 2, esta deverá ocorrer na estação BV137, no que diz respeito a incerteza envolvida na produção da informação da variável coliformes termotolerantes.

**TABELA 5.5** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de coliformes termotolerantes no período A, para cada trecho do rio das Velhas.

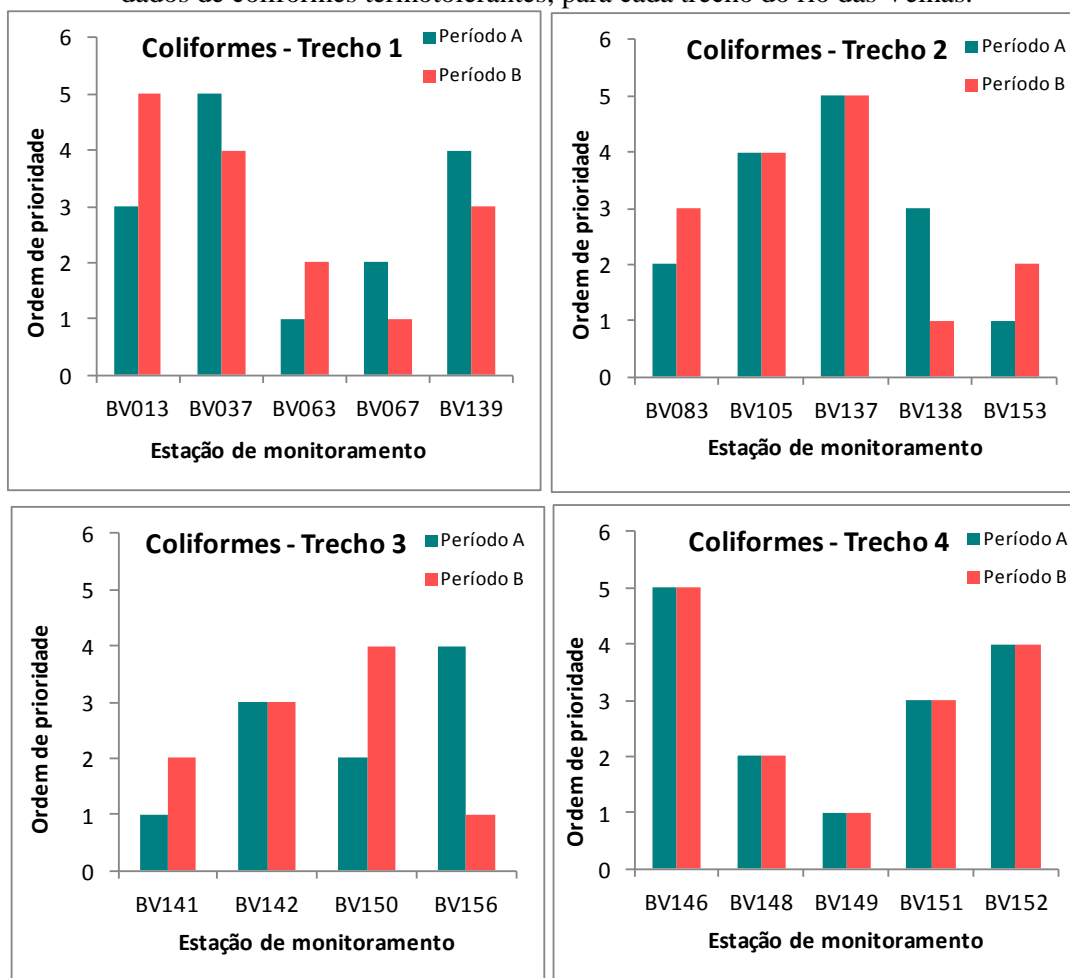
Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV063	1	12,52	21,2	---	---
	BV067	2	24,67	41,77	12,26	0,26
	BV013	3	36,47	61,76	24,52	0,15
	BV139	4	47,78	80,9	36,45	0,02
	BV037	5	59,06	100	47,24	0,54
2	BV153	1	12,58	20,81	---	---
	BV083	2	25,01	41,4	12,49	0,09
	BV138	3	37,32	61,75	24,89	0,13
	BV105	4	49,14	81,32	36,64	0,67
	BV137	5	60,43	100	48,5	0,64
3	BV141	1	11,85	27,3	---	---
	BV150	2	23,22	53,5	11,85	0,0
	BV142	3	34,21	78,83	23,22	0,0
	BV156	4	43,4	100	32,69	1,53
4	BV149	1	11,96	22,75	---	---
	BV148	2	23,07	43,88	11,22	0,74
	BV151	3	33,39	63,5	22,55	0,52
	BV152	4	43,24	82,23	33,34	0,05
	BV146	5	52,58	100	40,72	2,51

**TABELA 5.6** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de coliformes termotolerantes no período B, para cada trecho do rio das Velhas.

Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV067	1	12,32	20,5	---	---
	BV063	2	24,58	40,91	12,29	0,03
	BV139	3	36,73	61,14	24,41	0,17
	BV037	4	48,81	81,24	36,51	0,22
	BV013	5	60,08	100	48,47	0,34
2	BV138	1	12,61	20,69	---	---
	BV153	2	25,05	41,11	12,6	0,00
	BV083	3	37,41	61,39	24,98	0,07
	BV105	4	49,5	81,23	37,15	0,26
	BV137	5	60,94	100	48,33	1,17
3	BV156	1	12,21	26,79	---	---
	BV141	2	24,14	52,96	12,18	0,03
	BV142	3	35,14	77,1	24,08	0,05
	BV150	4	45,57	100	34,83	0,3
4	BV149	1	12,32	20,5	---	---
	BV148	2	24,57	40,9	12,27	0,05
	BV151	3	36,42	60,61	24,22	0,35
	BV152	4	48,26	80,32	36,41	0,01
	BV146	5	60,08	100	48,24	0,02

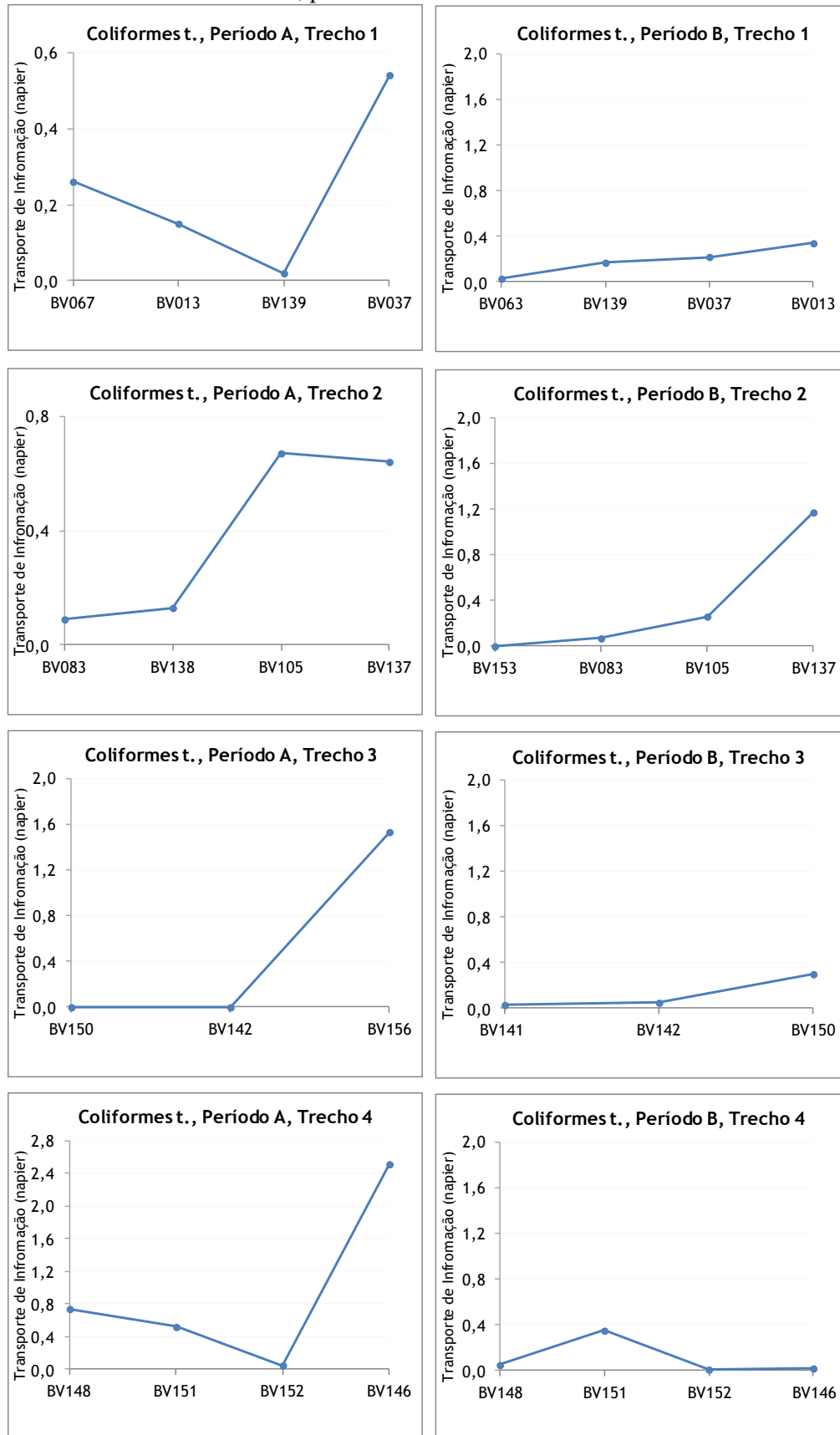
Comparando-se os resultados obtidos nos períodos A e B (Figura 5.13) observa-se uma coincidência de resultados para os distintos períodos em relação às ordens de prioridade apenas no trecho 4. Nas simulações realizadas nos demais trechos houve indicações distintas de priorizações em quase todas as estações, fazendo-se necessário aplicar o método a toda a rede para depois se avaliar globalmente as possibilidades de otimização.

**FIGURA 5.13:** Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de coliformes termotolerantes, para cada trecho do rio das Velhas.



Com relação à dependência na produção da informação entre as estações do trecho 1 no período A, observa-se que o transporte de informações diminui com a associação das três primeiras estações de monitoramento (ver Tabela 5.5 – Transporte da informação), sugerindo que tal associação é necessária para a produção de informação relevante na rede de monitoramento. A informação repetida, nesse caso, cresce com a inserção da estação BV037 (Figura 5.14).

**FIGURA 5.14 -** Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável coliformes termotolerantes





### 5.3.1.3 Turbidez

Os resultados obtidos com a aplicação do método da entropia para variável turbidez nos trechos do rio das Velhas são apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Considerando a incerteza envolvida na produção da informação sobre a variável turbidez e a dependência na produção desta informação pela rede de monitoramento analisada no trecho 3, como exemplo, o *ranking* de prioridade obedeceu a seguinte ordem: BV141, BV142, BV156 e BV150 para o período A e BV156, BV142, BV141 e BV150 para o período B. Nesse caso observa-se que a estação BV141, que possuía ordem de prioridade 1 no período A, teve sua importância reduzida com o passar do tempo, passando para ordem de prioridade 3. Situação inversa foi observada para a estação BV156. Esse resultado pode indicar que as características da qualidade das águas nas estações BV141 e BV156 sofreram alteração ao longo dos anos. Segundo Soares (2001), isso demonstra a importância de se ter uma série longa e o mais atual possível, para se redimensionar a rede.

**TABELA 5.7** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de turbidez no período A, para cada trecho do rio das Velhas.

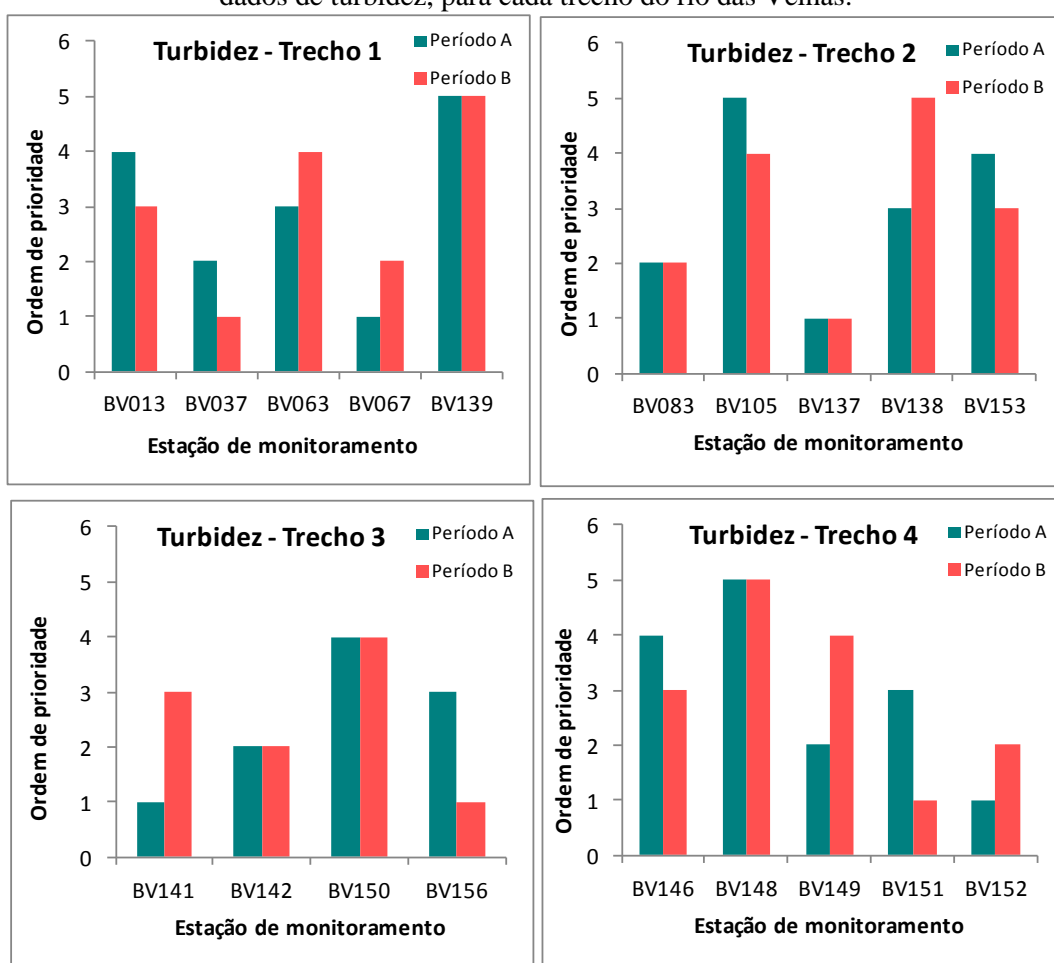
Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV067	1	8,11	24,8	0	0
	BV037	2	15,32	46,85	7,72	0,38
	BV063	3	22,04	67,42	14,77	0,55
	BV013	4	27,65	84,58	20,51	1,53
	BV139	5	32,7	100	25,92	1,74
2	BV137	1	8	22,17	0	0
	BV083	2	15,66	43,37	7,76	0,24
	BV138	3	22,78	63,09	15,14	0,52
	BV153	4	29,72	82,31	22,27	0,51
	BV105	5	36,11	100	28,87	0,85
3	BV141	1	8,03	29,29	0	0,00
	BV142	2	15,01	54,75	8	0,03
	BV156	3	21,58	78,74	14,14	0,87
	BV150	4	27,41	100	20,58	1,00
4	BV152	1	6,59	22,53	0	0
	BV149	2	12,76	43,63	6,48	0,11
	BV151	3	18,64	63,73	12,41	0,36
	BV146	4	24,18	82,66	17,93	0,72
	BV148	5	29,25	100	22,86	1,32

**TABELA 5.8** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de turbidez no período B, para cada trecho do rio das Velhas.

Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV037	1	7,63	23,51	---	---
	BV067	2	14,81	45,63	7,44	0,19
	BV013	3	21,39	65,91	14,44	0,23
	BV063	4	27,18	83,73	20,1	1,29
	BV139	5	32,45	100	25,97	1,2
2	BV137	1	7,6	23,09	---	---
	BV083	2	14,96	25,48	7,59	0,01
	BV153	3	21,66	65,85	14,18	0,78
	BV105	4	27,77	84,41	21,07	0,6
	BV138	5	32,9	100	25,41	2,36
3	BV156	1	7,93	29,34	---	---
	BV142	2	14,89	55,04	7,87	0,07
	BV141	3	21,47	79,39	14,44	0,45
	BV150	4	27,04	100	20,34	1,13
4	BV151	1	6,15	24,82	---	---
	BV152	2	11,43	46,14	5,33	0,82
	BV146	3	16,5	66,62	10,52	0,91
	BV149	4	20,89	84,34	15,1	1,4
	BV148	5	24,77	100	18,91	1,99

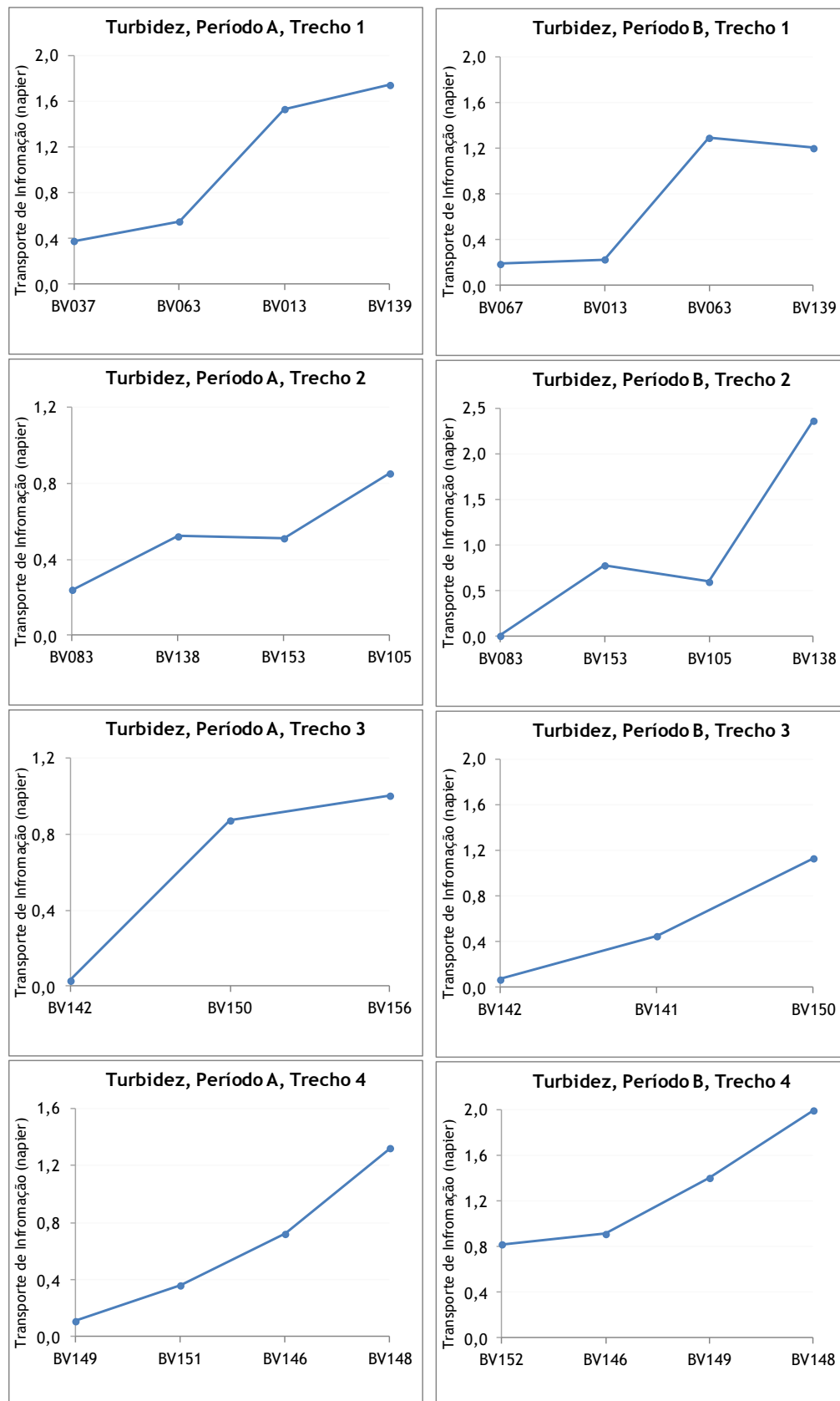
Os resultados apresentados na Figura 5.15 mostram que ocorreram os mesmos resultados para os distintos períodos no que diz respeito às estações de menor importância hierárquica (prioridade 5), exceto para o trecho 2. Nesse trecho a estação BV105 teve sua ordem de prioridade oscilando entre 5 e 4, mas ainda assim, pôde ser considerada a de menor importância nesse trecho. Dessa forma, se necessária a desativação de alguma estação, considerando a variável turbidez, ela deverá ocorrer no trecho 1 na estação BV139, no trecho 2 na estação BV105, no trecho 3 na estação BV150 e, por fim, no trecho 4 na estação BV148. Análogo às simulações das outras variáveis observou-se para turbidez resultados distintos de priorização para os diferentes períodos avaliados.

**FIGURA 5.15** - Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de turbidez, para cada trecho do rio das Velhas.



Em relação à dependência na produção da informação entre as estações do trecho 4, por exemplo, o transporte de informação cresce com o aumento de estações na rede (Figura 5.16), quando considerado o parâmetro turbidez. Nesse caso, a estação BV148 é a que transporta uma quantidade maior de informação já disponibilizada pelas anteriores (ver Tabelas 5.7 e 5.11 – Transporte da informação).

**FIGURA 5.16 -** Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável turbidez



### 5.3.1.4 Fósforo total

Os resultados obtidos com a aplicação do método da entropia para variável fósforo total nos trechos do rio das Velhas são apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Analisando a incerteza envolvida na produção da informação sobre a variável turbidez e a dependência na produção desta informação pela rede de monitoramento no trecho 4, como exemplo, o *ranking* de prioridade obedeceu a seguinte ordem: BV152, BV148, BV146, BV151 e BV149 para o período A e BV149, BV146, BV151, BV152 e BV148 para o período B. Nota-se que a estação BV149 com prioridade 5 (menor importância) no período A, passou para prioridade 1 (maior importância) no período B, que é o período com coleta de dados mais recente. Esse resultado deve ser analisado com bastante cuidado, dado que a importância da estação BV149 aumentou de 5 no período A para 1 no período B.

**TABELA 5.9** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de fósforo total no período A, para cada trecho do rio das Velhas.

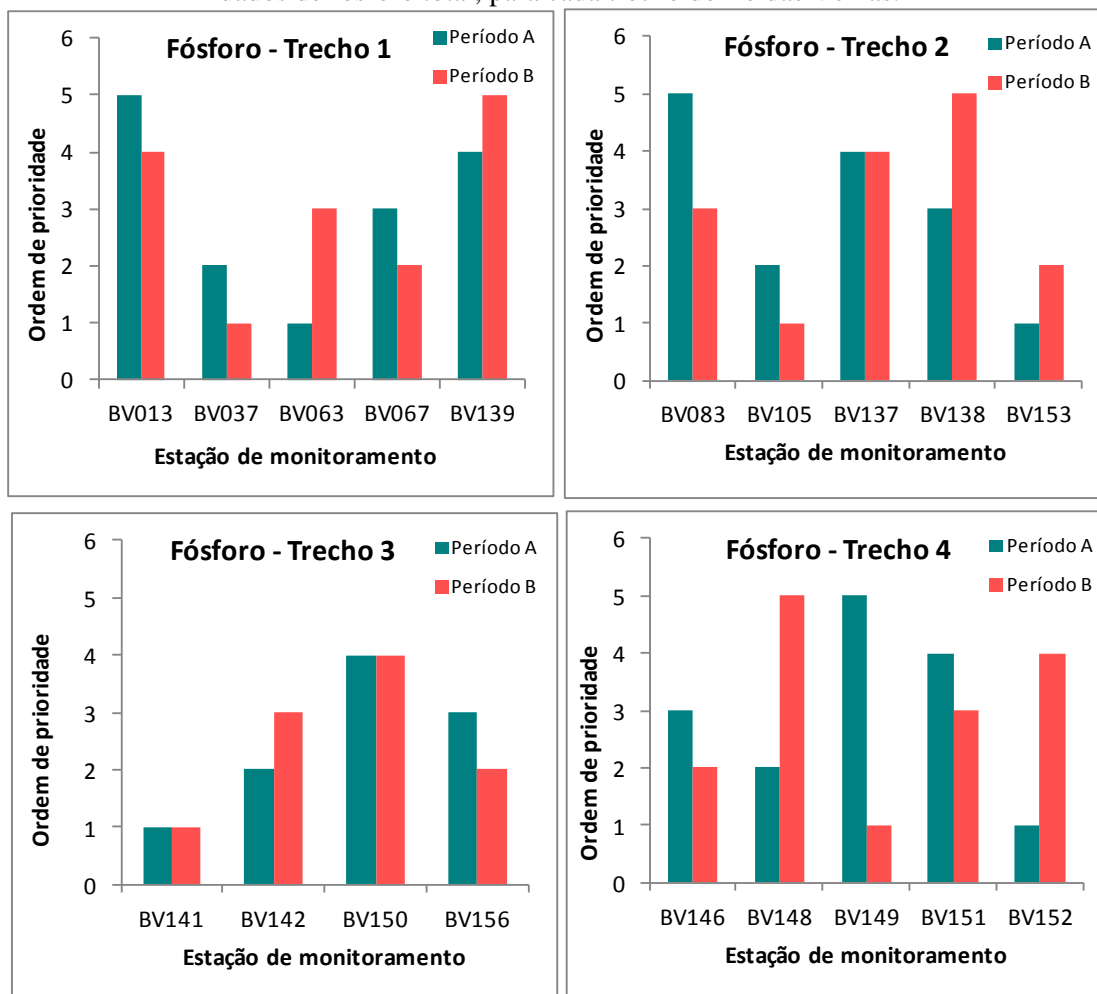
Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV063	1	-1,02	13,25	---	---
	BV037	2	-1,94	25,25	-0,83	0,19
	BV067	3	-3,33	43,23	-2,02	0,07
	BV139	4	-5,4	70,23	-3,98	0,65
	BV013	5	-7,7	100	-6,38	0,98
2	BV153	1	0,26	-14,9	---	---
	BV105	2	0,48	-27,63	0,26	-0,01
	BV138	3	0,12	-7	0,29	0,19
	BV137	4	-0,57	32,98	-0,53	0,65
	BV083	5	-1,72	100	-1,69	1,13
3	BV141	1	-0,29	14,25	---	---
	BV142	2	-0,51	24,97	-0,15	-0,14
	BV156	3	-0,92	45,27	-0,31	-0,2
	BV150	4	-2,03	100	-0,92	0
4	BV152	1	-0,25	3,16	---	---
	BV148	2	-1,6	20,27	-0,07	-0,18
	BV146	3	-3,27	41,38	-1,89	0,28
	BV151	4	-5,53	69,97	-3,74	0,47
	BV149	5	-7,9	100	-5,98	0,45

**TABELA 5.10** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de fósforo total no período B, para cada trecho do rio das Velhas.

Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV037	1	-0,82	11,5	---	---
	BV067	2	-1,89	26,38	-0,48	-0,36
	BV063	3	-3,47	48,59	-1,84	-0,05
	BV013	4	-5,2	72,68	-3,44	-0,03
	BV139	5	-7,15	100	-5,44	0,24
2	BV105	1	0,25	-78,15	---	---
	BV153	2	0,55	-170,82	0,45	-0,2
	BV083	3	0,59	-182,15	0,6	-0,05
	BV137	4	0,28	-87,44	0,22	-0,37
	BV138	5	-0,32	100	-0,13	0,41
3	BV141	1	-0,54	17,61	---	---
	BV156	2	-0,85	27,6	-0,27	-0,27
	BV142	3	-1,5	48,88	-0,65	-0,19
	BV150	4	-3,07	100	-1,42	-0,08
4	BV149	1	-1,54	15,48	---	---
	BV146	2	-2,82	28,34	-1,21	-0,33
	BV151	3	-4,79	48,1	-3,07	0,24
	BV152	4	-7,22	72,51	-5,66	0,87
	BV148	5	-9,96	100	-7,64	0,42

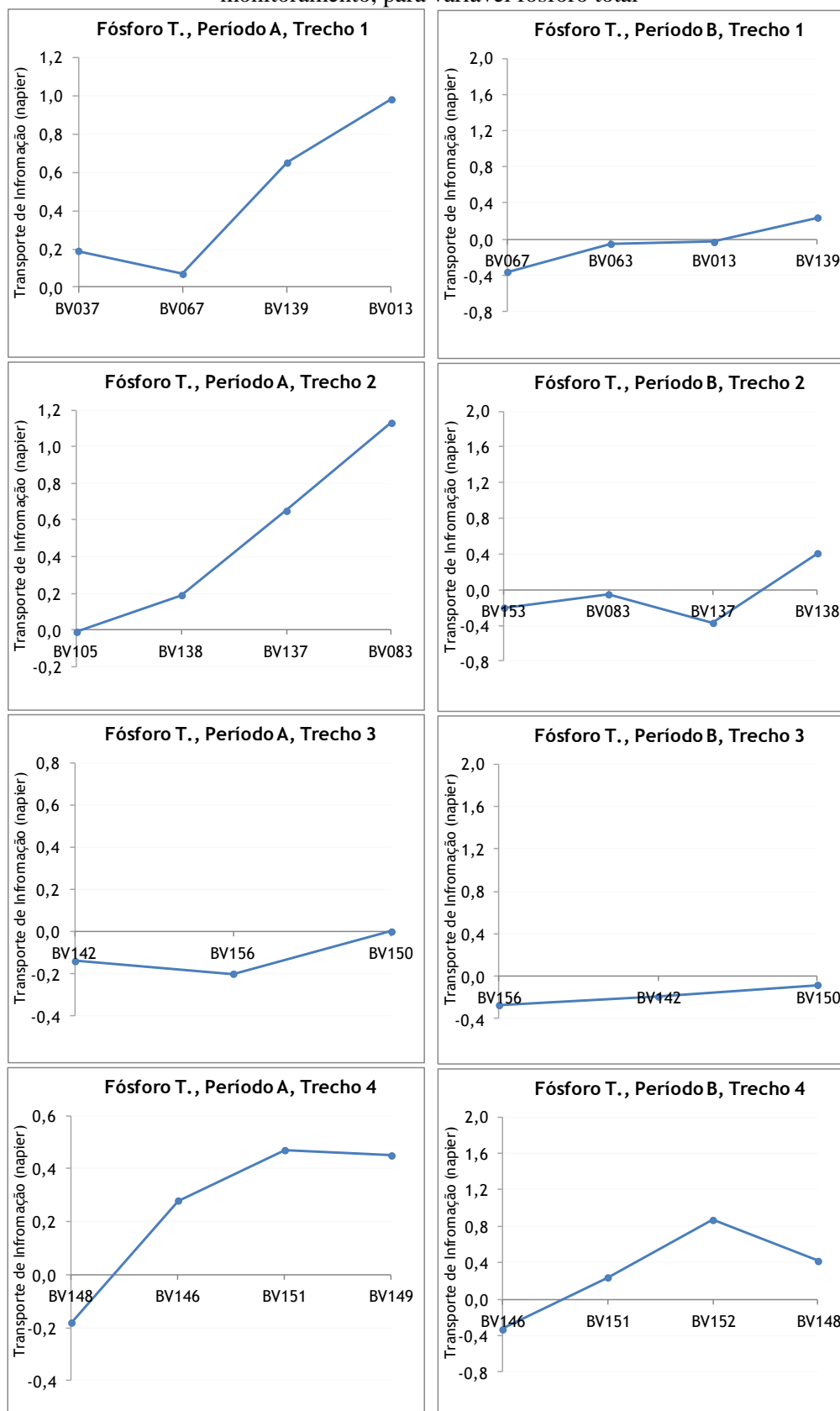
Comparando-se os resultados obtidos nos períodos A e B (Figura 5.17) observa-se houve uma coincidência de resultados para os distintos períodos em relação às ordens de prioridade apenas para os trechos 2 e 3, sendo que nesse último foram coincidentes as estações com menor e maior prioridade. Nas demais simulações realizadas houve arranjos distintos de priorizações em quase todas as estações, fazendo-se necessário aplicar o método a toda a rede para depois se avaliar globalmente as possibilidades de otimização.

**FIGURA 5.17:** Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de fósforo total, para cada trecho do rio das Velhas.



Considerando a dependência na produção da informação entre estas estações no trecho 4, Período B, a quarta estação (BV152) transporta uma quantidade maior de informação já disponibilizada pelas anteriores (ver Tabelas 5.10– Transporte da informação). Nesse caso, observa-se que o transporte de informação no trecho 4 decresce com o acréscimo da quinta estação na rede (BV148), ou seja, a sua inserção na rede volta a adicionar informação sobre o parâmetro fósforo total (Figura 5.18).

**FIGURA 5.18** Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável fósforo total





### 5.3.1.5 Oxigênio dissolvido

Os resultados obtidos com a aplicação do método da entropia para variável oxigênio dissolvido nos trechos do rio das Velhas são apresentados nas Tabelas 5.11 e 5.12.

Avaliando a incerteza envolvida na produção da informação sobre a variável oxigênio dissolvido e a dependência na produção desta informação entre as estações do trecho 1, a estação mais importante, por exemplo, seria a estação BV067 em ambos os períodos. Se necessária a desativação de alguma estação, considerando a variável oxigênio dissolvido no trecho 2, por exemplo, essa poderia ocorrer na estação BV137.

**TABELA 5.11** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de oxigênio dissolvido no período A, para cada trecho do rio das Velhas.

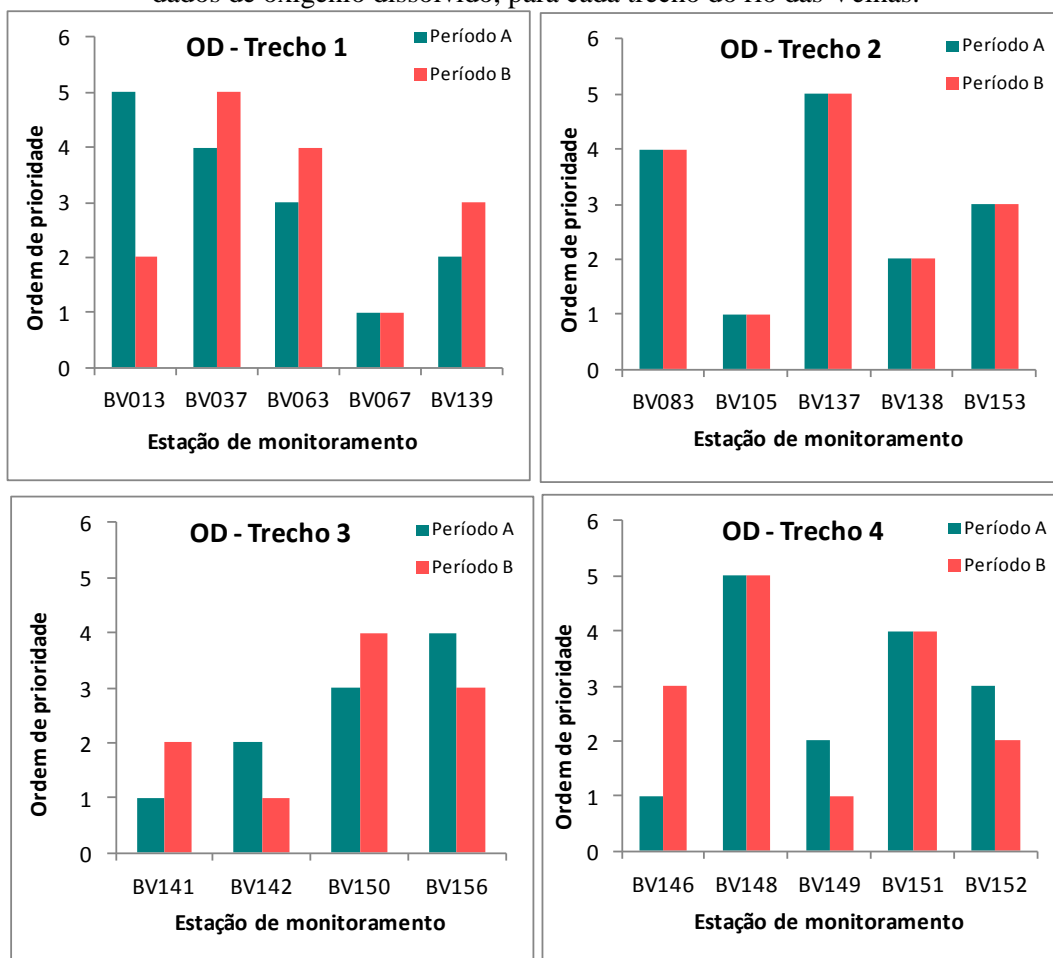
Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV067	1	0,91	57,52	---	---
	BV139	2	1,74	110,2	1,00	-0,09
	BV063	3	2,02	128,24	1,25	0,49
	BV037	4	1,82	115,24	1,22	0,80
	BV013	5	1,58	100	1,58	0,25
2	BV105	1	2,07	34,94	---	---
	BV138	2	3,14	52,87	2,06	0,01
	BV153	3	4,7	79,27	2,93	0,20
	BV083	4	5,74	96,83	4,34	0,36
	BV137	5	5,93	100	5,18	0,56
3	BV141	1	2,53	36,93	---	---
	BV142	2	4,54	66,4	2,20	0,32
	BV150	3	5,82	85,19	4,17	0,37
	BV156	4	6,84	100	5,52	0,31
4	BV146	1	2,29	32,37	---	---
	BV149	2	4,02	56,7	1,82	0,47
	BV152	3	5,16	72,75	3,03	0,99
	BV151	4	5,97	84,28	4,18	0,98
	BV148	5	7,09	100	5,19	0,78

**TABELA 5.12** - Hierarquização das estações pela entropia associada da série de dados de oxigênio dissolvido no período B, para cada trecho do rio das Velhas.

Trecho	Estação	Ordem de Prioridade	Entropia Associada (Napier)	Incerteza (%)	Entropia Condicional (Napier)	Transporte da Informação (Napier)
1	BV067	1	0,97	49,13	---	---
	BV013	2	1,78	90,39	1,17	-0,2
	BV139	3	2,13	107,77	1,36	0,42
	BV063	4	2,17	109,91	1,71	0,42
	BV037	5	1,97	100,00	1,49	0,68
2	BV105	1	1,96	33,16	---	---
	BV138	2	3,41	57,57	1,96	0,01
	BV153	3	4,51	76,09	2,63	0,78
	BV083	4	5,6	94,54	4,63	-0,12
	BV137	5	5,93	100,00	4,55	1,05
3	BV142	1	2,25	36,16	---	---
	BV141	2	3,92	63,00	2,02	0,23
	BV156	3	5,12	82,22	3,46	0,46
	BV150	4	6,23	100,00	4,56	0,57
4	BV149	1	2,24	33,74	---	---
	BV152	2	4,06	61,19	1,9	0,34
	BV146	3	5,46	82,20	3,31	0,75
	BV151	4	6,51	98,01	4,66	0,8
	BV148	5	6,64	100	4,72	1,78

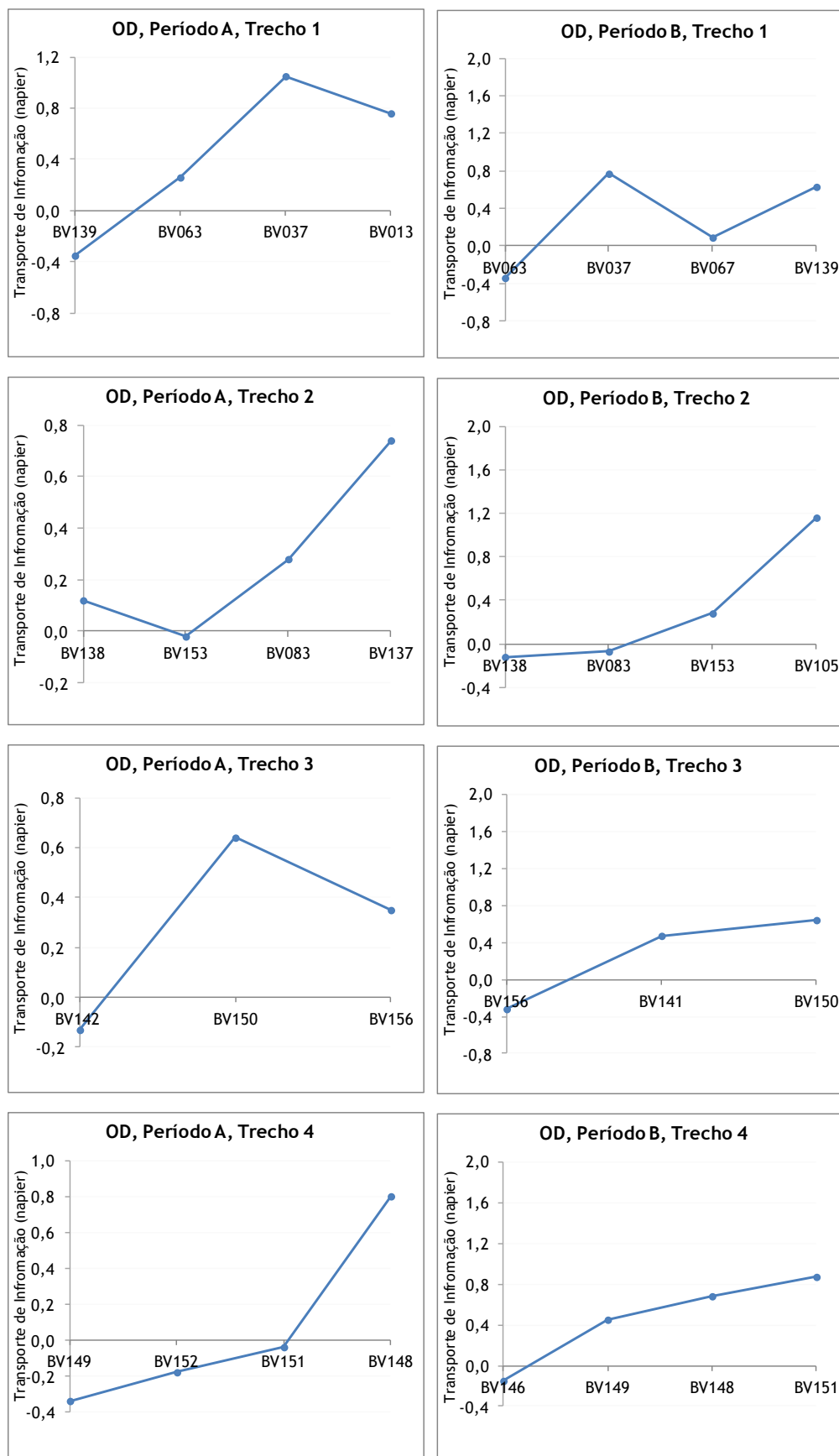
Comparando-se os resultados obtidos nos dois períodos (Figura 5.19) verifica-se que ocorreram os mesmos resultados para os períodos A e B em relação às ordens de prioridade nos trechos 2 e 4, sendo que para o trecho 2 as ordens de prioridades das estações foram totalmente coincidentes nos dois períodos. Nos demais trechos houve arranjos distintos de priorizações em quase todas as estações ao se avaliar a variável oxigênio dissolvido.

**FIGURA 5.19:** Ordem de prioridade das estações pelo método da entropia considerando a série de dados de oxigênio dissolvido, para cada trecho do rio das Velhas.



Com relação a dependência na produção da informação entre as estações no trecho 3, Período A, a terceira estação (BV150) transporta uma quantidade maior de informação já disponibilizada pela anterior (ver Tabela 5.11 - Transporte da informação). Nesse caso o transporte de informações diminuiu com a associação da quarta estação na rede (Figura 5.20), sugerindo que tal associação é necessária para a produção de informação relevante na rede de monitoramento, considerando o parâmetro analisado.

**FIGURA 5.20** Variação do transporte de informação em relação ao número de estações na rede de monitoramento, para variável oxigênio dissolvido



### 5.3.2 Análise conjunta do nível de prioridade de manutenção das estações na rede de monitoramento

Os resultados da priorização das estações pela aplicação do método da entropia nos trechos do rio das Velhas considerando as cinco variáveis analisadas nos períodos de monitoramento A e B encontram-se sintetizados na Tabela 5.18. Esta análise global dos resultados foi importante para a classificação das estações quanto ao seu nível de prioridade, etapa necessária para verificar a sua importância na rede de monitoramento.

**TABELA 5.13** - Resultados da priorização das estações pela aplicação do método da entropia nos trechos do rio das Velhas considerando as cinco variáveis analisadas nos períodos A e B.

Ordem de Prioridade	Trecho	Arsênio total		Coliformes Termotolerantes		Turbidez		Fósforo Total		Oxigênio dissolvido	
		Período A	Período B	Período A	Período B	Período A	Período B	Período A	Período B	Período A	Período B
1	1	BV013	BV037	BV063	BV067	BV067	BV037	BV063	BV037	BV067	BV067
2		BV063	BV063	BV067	BV063	BV037	BV067	BV037	BV067	BV139	BV013
3		BV037	BV067	BV013	BV139	BV063	BV013	BV067	BV063	BV063	BV139
4		BV067	BV013	BV139	BV037	BV013	BV063	BV139	BV013	BV037	BV063
5		BV139	BV139	BV037	BV013	BV139	BV139	BV013	BV139	BV013	BV037
1	2	BV137	BV138	BV153	BV138	BV137	BV137	BV153	BV105	BV105	BV105
2		BV138	BV153	BV083	BV153	BV083	BV083	BV105	BV153	BV138	BV138
3		BV083	BV083	BV138	BV083	BV138	BV153	BV138	BV083	BV153	BV153
4		BV153	BV137	BV105	BV105	BV153	BV105	BV137	BV137	BV083	BV083
5		BV105	BV105	BV137	BV137	BV105	BV138	BV083	BV138	BV137	BV137
1	3	BV142	BV156	BV141	BV156	BV141	BV156	BV141	BV141	BV141	BV142
2		BV156	BV142	BV150	BV141	BV142	BV142	BV142	BV156	BV142	BV141
3		BV141	BV141	BV142	BV142	BV156	BV141	BV156	BV142	BV150	BV156
4		BV150	BV150	BV156	BV150	BV150	BV150	BV150	BV150	BV156	BV150
1	4	BV152	BV152	BV149	BV149	BV152	BV151	BV152	BV149	BV146	BV149
2		BV146	BV149	BV148	BV148	BV149	BV152	BV148	BV146	BV149	BV152
3		BV149	BV146	BV151	BV151	BV151	BV146	BV146	BV151	BV152	BV146
4		BV148	BV148	BV152	BV152	BV146	BV149	BV151	BV152	BV151	BV151
5		BV151	BV151	BV146	BV146	BV148	BV148	BV149	BV148	BV148	BV148

De maneira geral, observou-se que nem sempre as estações sujeitas a uma provável priorização pelo método da entropia no período A são coincidentes com aquelas com maior entropia apresentadas no período B. Isso indica que cada uma das simulações proporciona resultados distintos de priorização, fazendo-se necessário aplicar o método a toda a rede para depois se avaliar globalmente as possibilidades de otimização. Esses resultados corroboram os resultados encontrados por Gontijo Júnior (2012) na avaliação de redes de monitoramento fluviométrico utilizando o conceito de entropia na bacia do rio das Velhas.

O fato do método utilizado considerar apenas uma variável por vez pode ser apontada como uma restrição do método, como apontado por Khalil e Ouarda (2009). Outra restrição, considerando-se o programa utilizado, se deve ao fato do aplicativo analisar apenas cinco estações por vez, com uma série de no máximo 21 dados. No entanto, tal limitação foi reparada fazendo-se a hierarquização conjunta dos resultados das estações de monitoramento, o que possibilitou uma análise global dos resultados de prioridade das 19 estações monitoradas no rio das Velhas.

Os níveis de prioridade obtidos para cada estação de monitoramento nas simulações realizadas para cada variável nos períodos A e B foram considerados como uma pontuação. Por exemplo, a estação BV013 que recebeu nível de prioridade 1, no período A, obteve pontuação 1. Ao final, a pontuação de cada estação obtida nas diferentes simulações foi somada (Tabela 5.19) e, aquela estação que obteve o menor valor, foi considerada a de maior importância hierárquica, ou seja, a sua manutenção na rede de monitoramento seria importante. O segundo menor valor determinou a segunda estação em ordem de prioridade, e assim sucessivamente. As estações que obtiveram a mesma pontuação ficaram empatadas na hierarquização final.

Para permitir uma melhor visualização, a Figura 5.21 destaca, para cada trecho, a ordem de prioridade obtida por cada uma das estações de monitoramento nos períodos A, B e global, ou seja, considerando a pontuação final. É possível observar que, considerando os dados analisados em cada período, as prioridades de manutenção das estações na rede de monitoramento sofrem alterações, de maior ou menor magnitude, como já havia sido observado nas análises individuais dos parâmetros.

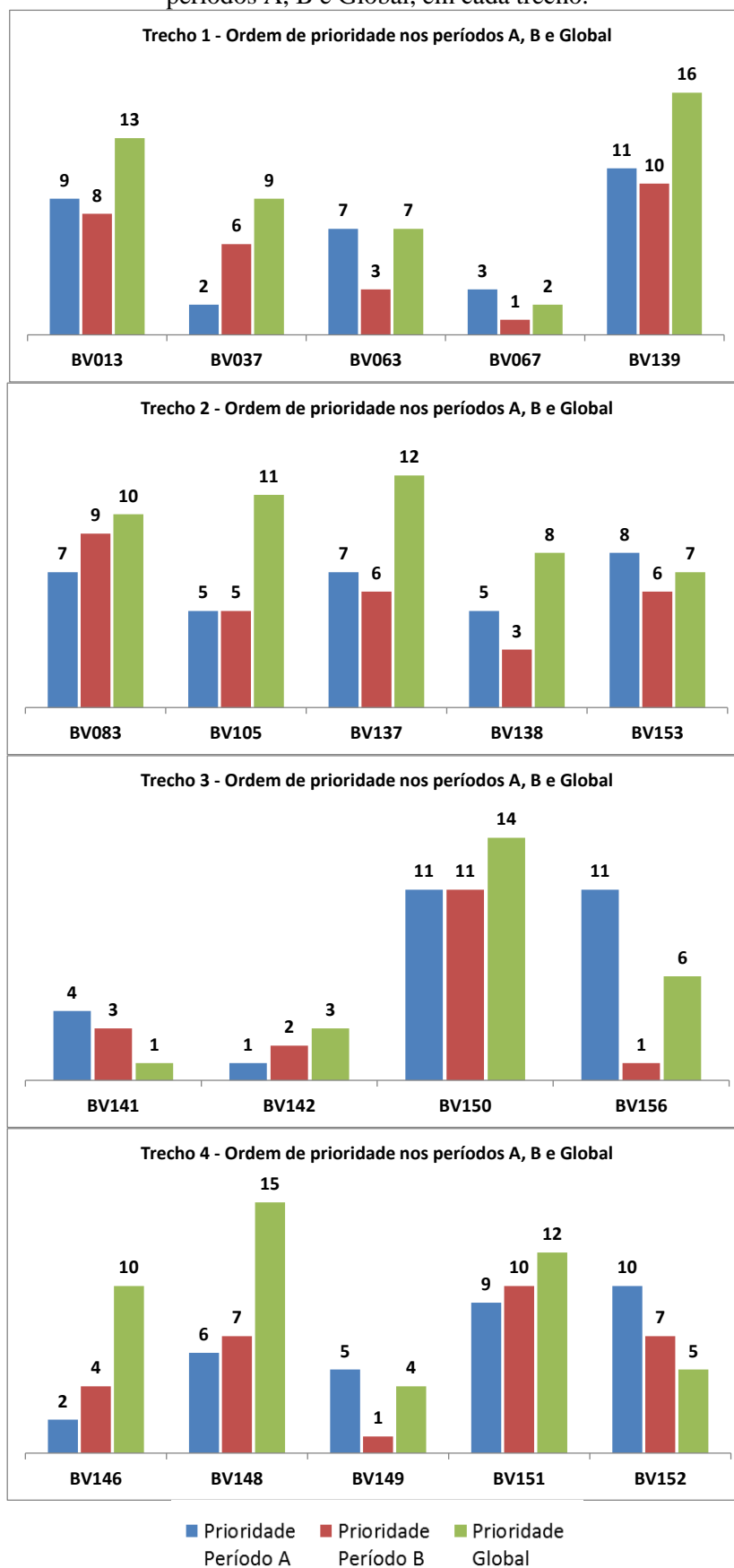
**TABELA 5.14** - Pontuação obtida em cada estação de monitoramento considerando os níveis de prioridade obtidos nas simulações realizadas para cada variável nos períodos A e B.

Estação	Arsênio total		Coliformes		Turbidez		Fósforo Total		Oxigênio		Pontuação final
	Período	Período	Período	Período	Período	Período	Período	Período	Período		
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
BV013	1	4	3	5	4	3	5	4	5	2	36
BV037	3	1	5	4	2	1	2	1	4	5	28
BV063	2	2	1	2	3	4	1	3	3	4	25
BV067	4	3	2	1	1	2	3	2	1	1	20
BV139	5	5	4	3	5	5	4	5	2	3	41
BV083	3	3	2	3	2	2	5	3	4	4	31
BV105	5	5	4	4	5	4	2	1	1	1	32
BV137	1	4	5	5	1	1	4	4	5	5	35
BV138	2	1	3	1	3	5	3	5	2	2	27
BV153	4	2	1	2	4	3	1	2	3	3	25
BV141	3	3	1	2	1	3	1	1	1	2	18
BV142	1	2	3	3	2	2	2	3	2	1	21
BV150	4	4	2	4	4	4	4	4	3	4	37
BV156	2	1	4	1	3	1	3	2	4	3	24
BV146	2	3	5	5	4	3	3	2	1	3	31
BV148	4	4	2	2	5	5	2	5	5	5	39
BV149	3	2	1	1	2	4	5	1	2	1	22
BV151	5	5	3	3	3	1	4	3	4	4	35
BV152	1	1	4	4	1	2	1	4	3	2	23

Analisando o trecho 1, chama a atenção o comportamento da estação BV037, que apresentou um nível de prioridade igual a 2 no período A (dados de julho de 2008 a março de 2010) e no período B (dados de abril de 2010 e dezembro de 2008) passou para 6. Já a estação BV067 subiu do nível de prioridade de 3 para 1 (Figura 5.21), sugerindo uma maior variabilidade dos valores dos parâmetros medidos nessa estação no período B.

No trecho 2, as variações nos níveis de prioridade não foram tão importantes entre as estações de monitoramento, o que acarretou níveis de prioridade menores na avaliação global, mas o mesmo não pode ser dito em relação ao trecho 3. A estação BV141, em função dos níveis de prioridade obtidos nos dois períodos, passou para prioridade 1 na análise global, enquanto a BV156 passou do nível de prioridade 11 para 1, ao se analisar os dois períodos separadamente, passando para prioridade 6 na análise global. Finalmente, no trecho 4, a BV149 também se destaca por apresentar o nível de prioridade igual a 5 no período A e 1 no período B. Isto pode indicar que as características da qualidade das águas, principalmente nas estações BV149 e BV156 sofreram alteração ao longo dos anos que as fizeram subir em ordem de prioridade de manutenção na rede de monitoramento.

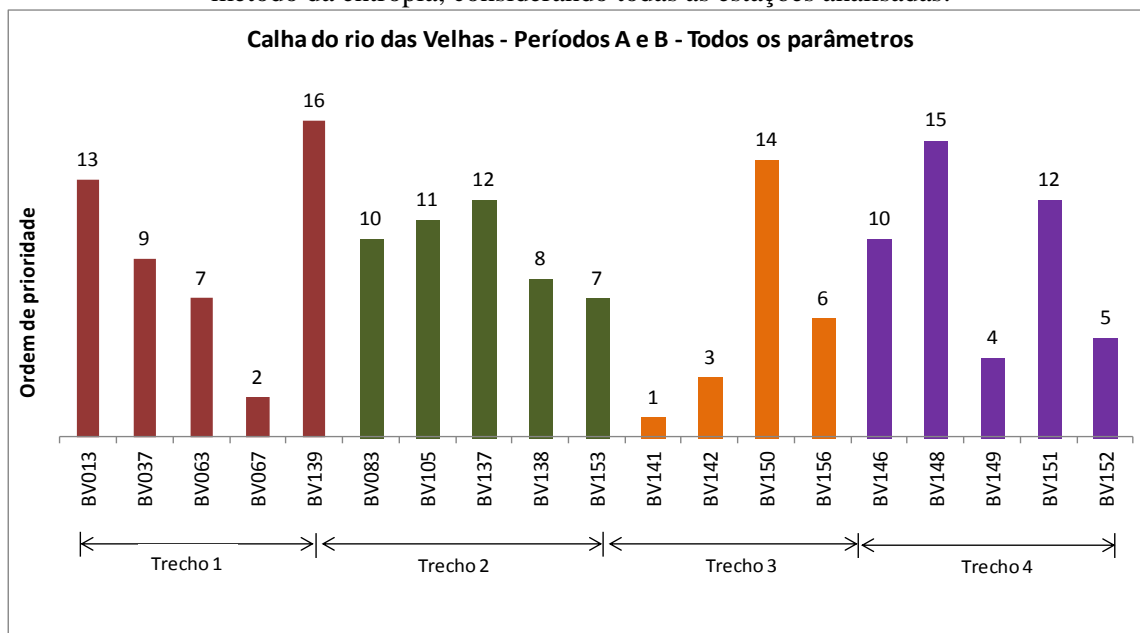
**FIGURA 5.21:** Ordem de prioridade obtida pelas estações de monitoramento, considerando os períodos A, B e Global, em cada trecho.





A Figura 5.22 mostra o resultado final da classificação, obtidos a partir da soma das prioridades nos dois períodos conjuntamente. A partir da análise dos resultados, a classificação permitiu sugerir que as estações mais importantes na manutenção da rede são BV067 (Trecho 1), BV141 e BV142 (Trecho 3), e BV149 (Trecho 4). As que obtiveram a pior classificação e que, segundo o método, poderiam ser desativadas foram as estações BV013 e BV139 (Trecho 1), BV150 (Trecho 3) e BV148 (Trecho 4).

**FIGURA 5.22:** Resultado final da classificação das 19 estações de monitoramento calculada pelo método da entropia, considerando todas as estações analisadas.

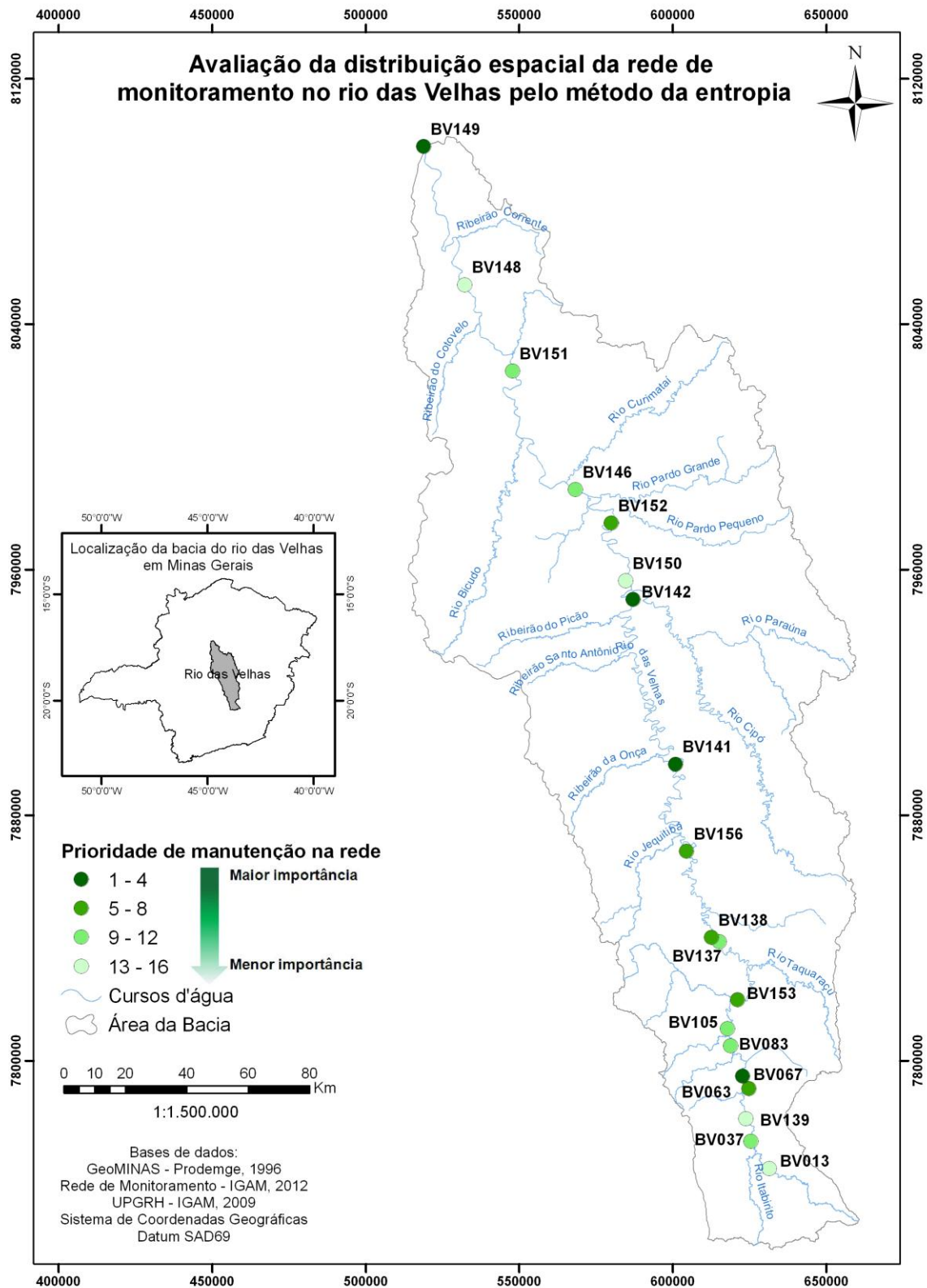


Pode-se observar que, em quase todos os casos, as estações a serem desativadas foram aquelas que apresentaram menor desvio padrão amostral (Apêndice C, Figuras C1 a C4 e Apêndice B, Figuras B.1 a B.5) e, conseqüentemente, a menor variância. Isso mostra que os valores das variáveis obtidos nessas estações estão próximos da média e, portanto esta é a estação que produz a menor quantidade de informação em relação às demais. Segundo Soares (2001), isso leva a concluir que, uma vez que a informação não apresenta variações, o dado não precisa ser tomado com a mesma frequência que os demais, a menos que alguma alteração ocorra na rede. O inverso também pode ser observado, ou seja, as estações mais importantes na manutenção da rede foram, em geral, as que apresentaram os maiores desvios-padrão.

A Figura 5.23 apresenta a espacialização do resultado final da hierarquização conjunta das estações localizadas no rio das Velhas considerando a ordem de importância de manutenção de cada estação na rede de monitoramento pelo método da entropia. Vale destacar que as

faixas de prioridade de manutenção da estação na rede de monitoramento apresentada no mapa é uma sugestão e não uma determinação do modelo utilizado.

**FIGURA 5.23:** Mapa com a avaliação da distribuição espacial da rede de monitoramento do rio das Velhas pelo método da entropia.



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho refere-se à avaliação da distribuição espacial da rede de monitoramento de qualidade das águas superficiais do rio das Velhas operada pelo IGAM, utilizando o método da entropia. O método mostrou-se adequado à aplicação na avaliação de redes de monitoramento de qualidade de águas, sendo coerente com as condições ambientais efetivamente observadas na calha do rio das Velhas.

A análise de agrupamento hierárquico apresentou uma grande contribuição na identificação de comportamentos similares entre diferentes estações de monitoramento de água, já que os agrupamentos formados apresentaram grande concordância com as condições de qualidade das águas verificada ao longo do rio das Velhas. Os testes de Kruskal-Wallis e de comparações múltiplas ajudaram na validação das variáveis responsáveis pelas diferenças e semelhanças verificadas nos agrupamentos formados no rio das Velhas.

Os resultados obtidos mostraram que nem sempre as estações sujeitas a uma provável priorização pelo método da entropia no período mais remoto amostrado (período A – dados de julho de 2008 a março de 2010) são coincidentes com aquelas com maior entropia apresentadas no período mais recente (período B - dados coletados entre abril de 2010 e dezembro de 2011). Isso demonstra a importância de se ter uma série longa, e o mais atual possível, para se fazer a análise criteriosa de alterações na bacia hidrográfica, que possam interferir no resultado final do redimensionamento da rede.

O fato de o método utilizado considerar apenas uma variável por vez também pode ser apontada como uma desvantagem do método. Outra desvantagem ainda, considerando-se o programa utilizado, se deve ao fato do aplicativo analisar apenas cinco estações por vez, com uma série de, no máximo, 21 dados. Isso indica a necessidade de desenvolvimento de um programa que possibilite avaliar maiores conjuntos de dados e de estações de monitoramento ao mesmo tempo.

A partir da análise dos resultados, a classificação permitiu indicar a importância da manutenção de cada estação na rede de monitoramento, considerando a qualidade da informação gerada pelas variáveis monitoradas. Assim, conclui-se que o método da entropia pode ser uma importante ferramenta de decisão para o redimensionamento da rede, já que permitiu identificar estações que poderiam ser priorizadas ou não na rede de monitoramento

do rio das Velhas, considerando a redundância das informações contidas nas diversas séries de dados. Ressalta-se que outros parâmetros indicadores de qualidade das águas podem ser utilizados nesta avaliação, o que torna o modelo flexível, mas sujeito ao conhecimento prévio do usuário para a melhor seleção dos parâmetros a serem utilizados. Esta seleção deve ser apoiada por uma análise científica criteriosa e detalhada, que deve levar em conta as especificidades de cada bacia hidrográfica, sob pena de se obter resultados irrelevantes e pouco representativos.

A aplicação desse método pode, ainda, subsidiar as decisões dos gestores de recursos hídricos sobre a continuidade ou interrupção do funcionamento da estação de monitoramento, podendo contribuir de forma eficaz para o auxílio no redimensionamento de redes de monitoramento de qualidade de água.

## REFERÊNCIAS

ACOSTA, J. A., FAZ. A., MARTINEZ-MARTINEZ, S.; ZORNOZA, R., CARMONA, D.N., CABAS, S. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. *Journal of Geochemical Exploration* 109(1-3): 8-17.2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil: 2012*. Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA, 2012. 264 pag. Disponível em <[www.ana.gov.br/SalaImprensa/PanoramadaQualidadedasAguas.asp](http://www.ana.gov.br/SalaImprensa/PanoramadaQualidadedasAguas.asp)>. Acesso em: 10 nov. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Portal da Qualidade das Águas*. Disponível em: [http://pnqa.ana.gov.br/rede/rede\\_monitoramento.aspx](http://pnqa.ana.gov.br/rede/rede_monitoramento.aspx). Acesso em: 15 dez. 2012.

AMARAL, R.C. *Impacto da Implantação de Perímetros Irrigados na Qualidade das Águas Superficiais da Porção Mineira do Médio São Francisco*. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Minas Gerais. 124 pg. 2012.

ARAÚJO, C.T. *Implementação da informação mútua usando entropia de renyi e aplicação na seleção de genes em experimentos de microarranjos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro/RJ. 64 pg. 2008.

BEVERIDGE, D.; ST-HILAIRE, A.;TAHA, B.M.J.; KHALILA, B.; CONLYB, F.M.; WASSENAARB, L.I.; BENNETTB, E.R. A geostatistical approach to optimize water quality monitoring networks in large lakes: Application to Lake Winnipeg. *Journal of Great Lakes Research*. Available online 9 February 2012. Article in press.

BRASIL. Lei 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: Congresso Nacional, 1981.

BRASIL. L 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 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997.

BRASIL. Lei 9984, 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, 2000.

CAMPOS, A. R. Utilização do modelo de otocodificação para integração de bases e gestão de bacias hidrográficas. IN ANAIS DO VII CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, POÇOS DE CALDAS, MINAS GERAIS, BRASIL, JUN. 2011, CD. 2011.

CHILUNDO, M., KELDERMAN, P.; O'KEEFFEB, J.H. Design of a water quality monitoring network for the Limpopo River Basin in Mozambique. *Original Research Article. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 33, Issues 8-13, Pages 655-665, 2008.

CHRISTOFARO, M.C. *Avaliação probabilística de risco ecológico de metais nas águas superficiais da bacia do rio das Velhas*. Tese de doutoramento – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos ,Belo Horizonte. 251p. 2009.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAL – CPRM. Projeto Geoquímica MultiUsos no Estado de Minas Gerais: Atlas Geoquímico da Bacia do Rio das Velhas. / Eduardo Paim Viglio, Fernanda Gonçalves da Cunha. – Belo Horizonte: CPRM – BH, 2010. 196 pag. 2010.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL; CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 01, de 05 de maio de 2008*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: COPAM, 2008.

DO, H.T.; LO, H.T.; CHIUEH, P.T.; THIL.A.P. Design of sampling locations for mountainous river monitoring. *Environmental Modelling & Software*, 27-28 pages 62 -70. 2012.

FRANÇA, M. S.;FERNANDES, C. V. S. ; KAVISKI, E. ; KNAPIK, H. G. ; PORTO, M.F.A. Análise multivariada dos dados de monitoramento de qualidade e água: estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, CAMPO GRANDE, BRASIL. XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Porto Alegre : ABRH, 2009.

FINOTTI, A.R.; FINKLER, R.; SILVA, M. D.; CEMIM, G.. Monitoramento de Recursos Hídricos em Áreas Urbanas. Caxias do Sul. RS: Educs. 272p. 2009.

GALVÃO, S.G & 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, 2005, GOIÂNIA, BRASIL. XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, GOIÂNIA. INPE, 2005. Pag 2519-2526. 2005.

GONTIJO JR, W.C.. *Avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método Sharp e o conceito de entropia*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF,. 190 pg. 2007.

GONTIJO JR, W.C. & KOIDE, S. Avaliação de Redes de Monitoramento Fluviométrico Utilizando o Conceito de Entropia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 17 n.1 - Jan/Mar, p. 97-109. 2012

HARMANCIOGLU, N.B., YEVJEVICH, V., OBEYSEKERA, J.T.B.. Transfer of hydrologic information along rivers partially fed by karstified limestones. *Karst Water Resources*, IAHS Publ. no.161, 115-131. 1985.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais da Bacia do rio das Velhas em 2009. Relatório Anual*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010. 206 pag. Disponível em <<http://www.igam.mg.gov.br/qualidade-das-aguas>>. Acesso em: 24 maio. 2012.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Qualidade das águas superficiais em Minas Gerais em 2010. Relatório Executivo*. Disponível em <<http://www.igam.mg.gov.br/qualidade-das-aguas>>. Acesso em: 12 jun. 2012.

JARDIM, B.F.M. *Variação dos parâmetros físicos e químicos das águas superficiais da bacia do rio das Velhas - MG e sua associação com as florações de cianobactérias*. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Minas Gerais. 127 pg. 2011.

KHALIL, B. & OUARDA, T. B. M. J. Statistical approaches used to assess and redesign surface water-quality-monitoring networks. *Journal of Environmental Monitoring*, 11, 1915–1929. 2009.

LANNA, A.E. Gestão dos recursos hídricos. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, . 943p. p.727-767. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 4). 2002.

KONDAGESKI J.H & FERNANDES, C.V.S. Calibração de Modelo Matemático de Qualidade da Água Utilizando Algoritmo Genético: Estudo de Caso do Rio Palmital, PR. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 14 n.1, Jan/Mar 2009. p. 63-73. 2009.

MACIEL JR, P. *Legislação – principais conceitos, Zoneamento das Águas*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2000, 112 p.

MAGALHÃES, A.P. Junior. A situação do monitoramento das águas no Brasil – instituições e iniciativas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH*, Porto Alegre, v.5, n 3, p. 113-135, 2000.

MATTOS, R.S. & VEIGA, A..Otimização de entropia: implementação computacional dos princípios maxent e minxent. *Pesquisa Operacional*, v.22, n.1, p.37-59. Janeiro a Junho de 2002.

MARKUS, M., KNAPP, H.V., TASKER, G.D. Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of streamgages. *Journal of Hydrology*, v. 283, p. 107–121. 2003.

MINAS GERAIS. Lei nº 12.584, de 17 de julho de 1997 (Instituto Mineiro de Gestão das Águas). Belo Horizonte, 1997

- MINAS GERAIS. Lei Estadual nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999 (Política Estadual de Recursos Hídricos). Belo Horizonte, 1999.
- MINGOTI, S. A. Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 297 pag. 2005.
- MISHRA A.K. & COULIBALY P. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, v.380, p. 420–437. 2010
- MONDAL, N.C. & SINGH, V.P. Entropy-Based Approach for Assessing Natural Recharge in Unconfined Aquifers from Southern India. *Water Resour Manage*, v. 26, p.2715–2732. 2012
- MOULIN, G.D. *Técnicas de entropia e de geoestatística no dimensionamento de redes pluviométricas*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, Espírito Santo. 89 pg. 2005
- NABI, A.; *et al.* GALLARDO, A.H.; AHMED, S. Optimization of a Groundwater Monitoring Network for a Sustainable Development of the Maheshwaram Catchment, India. *Sustainability*, 3, 396-409. 2011.
- NADDEO, V.; SCANNAPIECO, D.; ZARRA, T.; BELGIORNO, V. River water quality assessment: Implementation of non-parametric tests for sampling frequency optimization. *Land Use Policy*, Vol 30. Pag. 197-205. 2012.
- NING S.K. & CHANG N.B. Optimal expansion of water quality monitoring network by fuzzy optimization approach. *Environmental Monitoring and Assessment* 91: 145–170, 2004.
- NONATO, E.A.; VIOLA, Z.G.G; ALMEIDA, K.C.B.; SHOR, H.H.R.. Tratamento estatístico dos parâmetros da qualidade das águas da bacia do Alto Curso do Rio das Velhas. *Química Nova*, Vol. 30, Nº 4, p. 797-804. 2007.
- PARK, S. Y.; CHOI, J. H.; WANG, S.; PARK, S. S. Design of a water quality monitoring network in a large river system using the genetic algorithm, *Ecological Modelling*, v. 199, n. 3, p. 289-297 . 2006.
- ROSATTO, H.G, BECERRA, A.T.; BOTTA, G.; PRESUTTI, M.E. Runoff estimation in small rural watersheds using DEMS in North West of Argentina. *Soil & Tillage Research* 112: 8–17. 2011.
- SABINO, C.V.S; ABREU, J.F.; LOBATO, V.; SABINO, G.S.; KNUP, E.A.N. Análise de alguns aspectos da qualidade da água da Bacia do Rio Paraopeba utilizando estatística multivariada. *Revista de Biologia e Ciências da terra*. Vol. 8, Nº 2, p. 6-18, 2008
- SANDERS, T.G.; WARD, R.C.; LOFTIS, J.C.; STEELE, T.D., ADRIAN, D.D.; YEVJEVICH, V. Design of Networks for Monitoring Water Quality. *Water Resources Publications*. 328 pag. 5 ed. 2003.
- SANTOS, N. A. P. *Uma abordagem Metodológica para determinar a influência do uso e cobertura do solo como fonte de poluição difusa na alteração da qualidade da água na bacia*



do Rio das Velhas. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, Minas Gerais. 120 pg. 2005.

SHANNON, C.E. A Mathematical Theory of Communication. *Reprinted with corrections from The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

SILVA, V.P.R., CAVALCANTI, E.P.; NASCIMENTO, M.G.; CAMPOS, J.H.B.C.C. Análises da precipitação pluvial no Estado da Paraíba com base na teoria da entropia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.269-274. 2003.

SINGH, V.P. The use of entropy in hydrology and water resources. *Hydrological Processes*, Bristol, v.11, n.1, p.587-626, 1997.

SOARES, P. F. *Projeto e avaliação de desempenho de redes de monitoramento de qualidade de água utilizando o conceito de entropia*. Tese de doutoramento – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, USP, São Paulo. 211p. 2001.

SOARES, P.F.; YSHIBA, J.K., SOARES, D.A.F; LISOT, A.; SIMÕES, F.A.; NETO, G.A. Monitoramento Ambiental de Sistemas Urbanos: Aplicação do Conceito de Entropia na Avaliação do Ruído de Tráfego. *Engenharia Civil UM (Braga)*, v. 27, p. 135-146, 2006.

STAIR, R. M.; REYNOLDS, G. W. Princípios de sistemas de informação: uma abordagem gerencial, 4a. ed., LTC, Rio de Janeiro (2002) *apud* SOARES, P.F.; YSHIBA, J.K., SOARES, D.A.F; LISOT, A.; SIMÕES, F.A.; NETO, G.A. Monitoramento Ambiental de Sistemas Urbanos: Aplicação do Conceito de Entropia na Avaliação do Ruído de Tráfego. *Engenharia Civil UM (Braga)*, v. 27, p. 135-146, 2006.

STROBL, R.O.& ROBILLARD, P.D. Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: a review. *Journal of Environmental Management* 87 (4), 2008. 639-648. 2008.

TUNDISI, J.G & TUNDISI, T.M. *Recursos Hídricos no Século XXI*. São Paulo. Oficina dos Textos. 328 pág. 2011

YANG, X. & W. JIN. GIS-based spatial regression and prediction of water quality in river networks: A case study in Iowa. *Journal of Environmental Management* 91(10): 1943-1951. 2010.

YENILMEZ, F.; KUTERB, N.; EMILC, M.K.; AKSOYA, A. Evaluation of pollution levels at an abandoned coal mine site in Turkey with the aid of GIS. *International Journal of Coal Geology*, 86(1): 12-19. 2010.

# APÊNDICES

# **APÊNDICE A**

## **Dados de Entrada das Variáveis Selecionadas**

Tabela A.1: Série de dados da variável arsênio total obtida no período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Arsênio Total (mg/L)		TRECHO 1					TRECHO 2					TRECHO 3				TRECHO 4					
Código da Estação		BV013	BV037	BV139	BV063	BV067	BV083	BV105	BV153	BV137	BV138	BV156	BV141	BV142	BV150	BV152	BV146	BV151	BV148	BV149	
PERÍODO A	02/07/08	0,0003	0,0003	0,0003	0,0087	0,0067	0,0060	0,0102	0,0151	0,0310	0,0322	0,0378	0,0364	0,0325	0,0262	0,0277	0,0190	0,0172	0,0176	0,0249	
	13/08/08	0,0003	0,0003	0,0003	0,0060	0,0059	0,0044	0,0142	0,0122	0,0313	0,0335	0,0507	0,0376	0,0570	0,0395	0,0425	0,0305	0,0294	0,0265	0,0522	
	10/09/08	0,0003	0,0003	0,0003	0,0128	0,0064	0,0024	0,0109	0,0120	0,0276	0,0336	0,0343	0,0302	0,0576	0,0335	0,0461	0,0359	0,0271	0,0261	0,0330	
	01/10/08	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0008	0,0008	0,0083	0,0009	0,0196	0,0129	0,0123	0,0191	0,0098	0,0230	0,0253	0,0221	0,0095	0,0125	0,0125
	12/11/08	0,0031	0,0003	0,0003	0,0013	0,0110	0,0047	0,0153	0,0110	0,0188	0,0318	0,0668	0,1627	0,1839	0,0433	0,0070	0,0637	0,0085	0,0099	0,0141	
	10/12/08	0,0025	0,0003	0,0003	0,0156	0,0081	0,0055	0,0162	0,0187	0,0143	0,0330	0,0519	0,0605	0,0631	0,0289	0,0822	0,0113	0,0331	0,0262	0,0132	
	14/01/09	0,0007	0,0003	0,0125	0,0200	0,0176	0,0202	0,0249	0,0431	0,1375	0,1082	0,0646	0,0479	0,0606	0,0332	0,0794	0,0214	0,0156	0,0084	0,0220	
	17/02/09	0,0007	0,0034	0,0011	0,0057	0,0066	0,0076	0,0147	0,0172	0,0236		0,0570	0,0470	0,0846	0,0417	0,0417	0,0445	0,0251	0,0267	0,0124	
	17/03/09	0,0046	0,0151	0,0057	0,0116	0,0207	0,0453	0,0325	0,0141	0,0549	0,0183	0,0532	0,0307	0,0786	0,0319	0,0225	0,0165	0,0069	0,0126	0,0066	
	08/04/09	0,0005	0,0022	0,0024	0,0178	0,0088	0,0169	0,0103	0,0154	0,0175	0,0188	0,0321	0,0246	0,0448	0,0248	0,0303	0,0196	0,0156	0,0175	0,0116	
	19/05/09	0,0052	0,0013	0,0003	0,0078	0,0064	0,0083	0,0103	0,0124	0,0233	0,0268	0,0251	0,0274	0,0326	0,0221	0,0191	0,0150	0,0147	0,0147	0,0151	
	17/06/09	0,0003	0,0003	0,0003	0,0124	0,0043	0,0051	0,0079	0,0101	0,0190	0,0201	0,0209	0,0205	0,0229	0,0158	0,0140	0,0114	0,0113	0,0125	0,0145	
	07/07/09	0,0003	0,0003	0,0003	0,0081	0,0072	0,0058	0,0122	0,0140	0,0263	0,0284	0,0287	0,0209	0,0262	0,0166	0,0185	0,0167	0,0146	0,0143	0,0127	
	18/08/09	0,0003	0,0003	0,0003	0,0088	0,0053	0,0032	0,0100	0,0118	0,0236	0,0303	0,0319	0,0281	0,0337	0,0219	0,0251	0,0197	0,0151	0,0137	0,0068	
	16/09/09	0,0023	0,0003	0,0003	0,0140	0,0074	0,0049	0,0117	0,0111	0,0276	0,0277	0,0411	0,0286	0,0369	0,0152	0,0266	0,0128	0,0159	0,0174	0,0102	
	01/10/09	0,0086	0,0021	0,0017	0,0100	0,0119	0,0087	0,0125	0,0533	0,0610	0,0497	0,0433	0,0436	0,0505	0,0204	0,0203	0,0260	0,0130	0,0169	0,0128	
	10/11/09	0,0521	0,0189	0,0075	0,0072	0,0437	0,0279	0,0305	0,0251	0,0547	0,0404	0,0335	0,0370	0,0522	0,0251	0,0239	0,0124	0,0169	0,0177	0,0131	
	08/12/09	0,0121	0,0173	0,0193	0,0273	0,0255	0,0241	0,0321	0,0256	0,0519	0,0397	0,0271	0,0537	0,1090	0,0892	0,0278	0,0223	0,0216	0,0402	0,0208	
	12/01/10	0,0055	0,0062	0,0003	0,0037	0,0072	0,0033	0,0075	0,0088	0,0592	0,0264	0,0854	0,0596	0,0781	0,0186	0,0699	0,0491	0,0221	0,0166	0,0055	
	18/02/10	0,0012	0,0014	0,0004	0,0097	0,0086	0,0104	0,0135	0,0115	0,0120	0,0249	0,0219	0,0208	0,0451	0,0238	0,0247	0,0142	0,0128	0,0110	0,0086	
10/03/10	0,0034	0,0046	0,0017	0,0044	0,0054	0,0078	0,0132	0,0116	0,0286	0,0212	0,0407	0,0431	0,0439	0,0301	0,0286	0,0199	0,0181	0,0205	0,0106		
PERÍODO B	07/04/10	0,0003	0,0003	0,0006	0,0074	0,0082	0,0053	0,0148	0,0116	0,0116	0,0208	0,0167	0,0142	0,0235	0,0091	0,0133	0,0106	0,0140	0,0065	0,0097	
	12/05/10	0,0008	0,0003	0,0030	0,0108	0,0061	0,0067	0,0087	0,0070	0,0190	0,0220	0,0186	0,0198	0,0199	0,0188	0,0084	0,0091	0,0089	0,0139	0,0068	
	08/06/10	0,0182	0,0003	0,0003	0,0224	0,0113	0,0097	0,0140	0,0175	0,0309	0,0339	0,0367	0,0370	0,0385	0,0355	0,0276	0,0246	0,0200	0,0185	0,0191	
	06/07/10	0,0003	0,0003	0,0003	0,0132	0,0086	0,0082	0,0160	0,0226	0,0340	0,0339	0,0358	0,0340	0,0296	0,0217	0,0215	0,0198	0,0195	0,0158	0,0155	
	10/08/10	0,0003	0,0003	0,0003	0,0135	0,0070	0,0060	0,0133	0,0100	0,0346	0,0075	0,0315	0,0291	0,0312	0,0215	0,0255	0,0213	0,0167	0,0195	0,0157	
	09/09/10	0,0158	0,0003	0,0003	0,0138	0,0143	0,0078	0,0215	0,0202	0,0442	0,0431	0,0460	0,0501	0,0595	0,0513	0,0617	0,0524	0,0405	0,0460	0,0557	
	06/10/10	0,0003	0,0003	0,0038	0,0138	0,0100	0,0137	0,0173	0,0200	0,0177	0,0347	0,0476	0,0353	0,0340	0,0308	0,0349	0,0150	0,0125	0,0267	0,0152	
	10/11/10	0,0217	0,0241	0,0125	0,1130	0,0776	0,0503	0,0628	0,1370	0,0674	0,0873	0,0632	0,0685	0,1310	0,0712	0,0722	0,0468	0,0310	0,0363	0,0230	
	02/12/10	0,0134	0,0083	0,0030	0,0155	0,0104	0,0107	0,0198	0,0566	0,0681	0,1520	0,0865	0,0703	0,0820	0,0416	0,0601	0,0171	0,0228	0,0253	0,0133	
	18/01/11	0,0039	0,0195	0,0042	0,0218	0,0315	0,0120	0,0270	0,0214	0,0239	0,0300	0,0486	0,0506	0,0787	0,0473	0,0522	0,0326	0,0261	0,0269	0,0160	
	23/02/11	0,0040	0,0039	0,0003	0,0116	0,0115	0,0096	0,0339	0,0573	0,0642	0,0252	0,0960	0,0564	0,0277	0,0243	0,0293	0,0142	0,0174	0,0162	0,0115	
	10/03/11	0,0003	0,0047	0,0040	0,0187	0,0147	0,0119	0,0195	0,0216	0,0156	0,0363	0,0652	0,0449	0,0838	0,0631	0,0458	0,0180	0,0266	0,0372	0,0231	
	06/04/11	0,0087	0,0003	0,0044	0,0088	0,0087	0,0856	0,0393	0,0289	0,0245	0,0292	0,0293	0,0316	0,0493	0,0229	0,0306	0,0186	0,0155	0,0132	0,0108	
	10/05/11	0,0003	0,0003	0,0003	0,0331	0,0067	0,0050	0,0177	0,0130	0,0196	0,0225	0,0276	0,0268	0,0295	0,0247	0,0195	0,0168	0,0126	0,0134	0,0140	
	08/06/11	0,0003	0,0003	0,0003	0,0213	0,0081	0,0108	0,0183	0,0159	0,0632	0,0443	0,0256	0,0330	0,0307	0,0253	0,0218	0,0146	0,0142	0,0140	0,0134	
	06/07/11	0,0003	0,0003	0,0003	0,0104	0,0063	0,0057	0,0133	0,0154	0,0245	0,0246	0,0264	0,0287	0,0258	0,0197	0,0269	0,0234	0,0142	0,0137	0,0142	
	09/08/11	0,0030	0,0030	0,0030	0,0161	0,0087	0,0054	0,0130	0,0197	0,0364	0,0356	0,0337	0,0343	0,0357	0,0238	0,0297	0,0306	0,0305	0,0286	0,0197	
	05/09/11	0,0003	0,0003	0,0003	0,0120	0,0072	0,0059	0,0110	0,0138	0,0277	0,0295	0,0380	0,0330	0,0315	0,0291	0,0319	0,0299	0,0254	0,0274	0,0217	
	04/10/11	0,0003	0,0003	0,0003	0,0145	0,0060	0,0071	0,0111	0,0278	0,0294	0,0448	0,0123	0,0496	0,0867	0,0277	0,0350	0,0274	0,0154	0,0134	0,0145	
	08/11/11	0,0003	0,0003	0,0003	0,0191	0,0058	0,0055	0,0135	0,0160	0,0306	0,0305	0,1400	0,1660	0,0524	0,0148	0,0213	0,0120	0,0200	0,0249	0,0188	
05/12/11	0,0065	0,1210	0,0056	0,0110	0,0045	0,0250	0,0220	0,0116	0,0167	0,0178	0,1220	0,0681	0,0362	0,0607	0,0279	0,0234	0,0199	0,0205	0,0175		

Tabela A.2: Série de dados da variável coliformes termotolerantes obtida no período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

CT (NMP/100 mL)	TRECHO 1					TRECHO 2					TRECHO 3				TRECHO 4					
Código da Estação	BV013	BV037	BV139	BV063	BV067	BV083	BV105	BV153	BV137	BV138	BV156	BV141	BV142	BV150	BV152	BV146	BV151	BV148	BV149	
PERÍODO A	02/07/08	30	5000	14000	5000	8000	160000	160000	160000	7000	13000	110	110	30	50	30	70	70	2	30
	13/08/08	2	13000	1100	8000	22000	160000	160000	2	50	3500	350	170	130	50	50	230	30	2	2
	10/09/08	50	5000	3000	8000	11000	160000	160000	160000	13000	2800	220	80	2	2	50	2	110	2	
	01/10/08	50	13000	7000	160000	5000	160000	160000	160000	7000	3000	130	80	50	2	30	130	2	2	1700
	12/11/08	5000	8000	13000	50000	17000	160000	160000	50000	13000	30000	17000	11000	50000	5000	22000	1700	900	500	800
	10/12/08	3000	9000	13000	50000	5000	160000	90000	50000	5000	8000	50000	160000	110	500	1400	2200	1700	300	800
	14/01/09	11000	17000	5000	160000	160000	30000	160000	160000	160000	160000	11000	30000	11000	8000	2200	22000	7000	1700	500
	17/02/09	2200	30000	13000	14000	50000	50000	50000	30000	9000		3000	8000	3000	1300	2300	1700	2300	1100	800
	17/03/09	7000	30000	50000	160000	160000	160000	160000	160000	50000	50000	400	5000	11000	1700	1700	800	3000	17000	5000
	08/04/09	1700	7000	200	160000	160000	90000	160000	160000	24000	8000	3000	1700	1400	2200	5000	130	170	110	230
	19/05/09	220	2300	11000	8000	11000	160000	90000	160000	17000	5000	800	800	500	1100	800	170	50	30	30
	17/06/09	220	14000	90000	5000	30000	160000	160000	280	170	30000	23	23	23	50	30	30	30	30	1100
	07/07/09	80	30000	22000	5000	1300	160000	160000	90000	300	1100	140	500	70	130	130	170	23	23	3000
	18/08/09	110	8000	11000	8000	160000	160000	160000	160000	24000	24000	350	110	50	50	170	130	70	1100	80
	16/09/09	1300	8000	8000	2800	1400	17000	400	28000	13000	13000	2300	11000	300	300	130	280	170	7000	800
	01/10/09	8000	30	350	22000	13000	17000	28000	3000	7000	3000	5000	5000	50000	1400	130	500	3000	500	500
	10/11/09	90000	5000	24000	160000	90000	160000	160000	160000	90000	160000	1700	5000	8000	90000	1400	28000	2300	800	700
	08/12/09	14000	2800	8000	13000	7000	22000	22000	160000	28000	160000	770	2800	7000	14000	7000	50000	30000	7000	90000
12/01/10	700	7000	11000	22000	24000	2800	90	11000	350	70	1700	3000	350	90	2200	1700	1100	280	500	
18/02/10	160000	160000	28000	160000	90000	14000	3500	300	170	30	30	23	23	3500	1700	2800	1400	1300	1100	
07/04/10	24000	3500	1100	17000	7000	22000	50000	14000	35000	160000	140	1100	50000	2800	7000	3500	160000	160000	160000	
PERÍODO B	7/4/2010*	24000	3500	1100	17000	7000	22000	50000	14000	35000	160000	140	1100	50000	2800	7000	3500	160000	160000	160000
	12/05/10	13000	17000	17000	2200	160000	160000	160000	160000	160000	800	800	500	800	220	300	800	13000	230	
	08/06/10	22	50	23	1700	13000	160000	160000	160000	13000	24000	170	2800	80	23	230	23	2300	800	1100
	06/07/10	30	24000	90000	30000	17000	2300	160000	5000	160000	160000	23	23	23	50	3000	300	90	160000	4000
	10/08/10	3000	7000	17000	22000	30000	160000	160000	160000	8000	17000	50	50	30	70	70	1700	24000	24000	160000
	09/09/10	30000	160000	30000	160000	22000	160000	160000	30000	14000	28000	9000	160000	22000	280	280		900	5000	90000
	06/10/10	22000	50000	160000	13000	24000	160000	160000	160000	2800	1700	17000	220	350	300	3000	400	50000	28000	24000
	10/11/10	90000	14000	50000	160000	90000	160000	160000	160000	160000	160000	14000	24000	17000	24000	3000	7000	9000	3000	2800
	02/12/10	50000	90000	160000	160000	160000	160000	17000	160000	160000	160000	50000	8000	1700	7000	24000	3000	90000	800	35000
	18/01/11	5000	30000	30000	30000	90000	160000	160000	28000	8000	22000	2300	8000	24	900	5000	1700	30000	35000	160000
	23/02/11	17000	160000	160000	900	160000	160000	160000	160000	160000	160000	30000	3500	50000	7000	3000	160000	30000	13000	17000
	10/03/11	1700	2800	3500	35000	2800	2800	13000	160000	160000	160000	160000	90000	24000	7000	14000	7000	13000	17000	17000
	06/04/11	90000	17000	1700	50000	24000	160000	160000	90000	1700	1700	280	3000	2300	1400	160000	1300	3500	22000	3500
	10/05/11	1700	17000	90000	30000	13000	90000	90000	160000	1700	1400	70	70	140	1300	800	1700	1300	1700	5000
	08/06/11	3000	160000	35000	90000	2800	1700	1700	160000	7000	13000	900	5000	140	220	140	800	300	70	220
	06/07/11	280	17000	24000	13000	800	160000	90000	3000	5000	1700	80	30	220	8000	170	13000	1300	220	35000
	09/08/11	800	30000	3000	5000	7000	160000	160000	160000	160000	160000	2300	23	110	1400	1300	170	800	2300	2200
	05/09/11	300	7000	800	14000	8000	160000	160000	160000	11000	24000	1400	50	40	5000	140	170	160000	160000	35000
	04/10/11	2200	11000	13000	8000	700	160000	160000	160000	160000	160000	90000	5000	750	8000	700	1400	800	350	2800
	08/11/11	1100	17000	130	24000	8000	160000	160000	160000	24000	17000	160000	1300	7000	50000	24000	300	1300	2300	8000
05/12/11	30000	90000	17000	90000	24000	160000	90000	160000	30000	28000	50000	3000	1700	1700	2200	2300		50000	17000	

\*A linha de dados de abril/2010 foi repetida nos dois períodos devido ao grande número de dados faltantes (32%) no mês de março de 2010.

**Tabela A.3:** Série de dados da variável fósforo total obtida no período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Fósforo Total (mg/L)		TRECHO 1					TRECHO 2					TRECHO 3				TRECHO 4				
Código da Estação		BV013	BV037	BV139	BV063	BV067	BV083	BV105	BV153	BV137	BV138	BV156	BV141	BV142	BV150	BV152	BV146	BV151	BV148	BV149
PERÍODO A	02/07/08	0,01	0,05	0,02	0,06	0,06	0,65	0,91	0,80	0,80	0,59	0,46	0,30	0,17	0,10	0,10	0,07	0,06	0,06	0,07
	13/08/08	0,08	0,07	0,08	0,05	0,12	0,52	0,53	0,58	0,22	0,33	0,01	0,28	0,12	0,22	0,21	0,11	0,04	0,18	0,12
	10/09/08	0,01	0,05	0,02	0,09	0,06	0,96	1,12	1,18	0,83	0,69	0,43	0,29	0,30	0,24	0,23	0,21	0,09	0,11	0,11
	01/10/08	0,01	0,03	0,04	0,09	0,05	0,79	0,32	1,09	0,74	0,69	0,56	0,30	0,29	0,20	0,51	0,11	0,08	0,07	0,08
	12/11/08	0,08	0,07	0,06	0,16	0,10	0,48	0,60	0,41	0,26	0,43	0,19	0,71	0,89	0,29	0,88	0,31	0,20	0,22	0,09
	10/12/08	0,04	0,08	0,08	0,17	0,05	0,55	0,75	0,60	0,39	0,41	0,20	0,81	0,19	0,21	0,06	0,10	0,12	0,14	0,11
	14/01/09	0,07	0,21	0,22	0,39	0,14	0,55	0,49	0,15	0,08	0,73	0,22	0,23	0,43	0,21	0,20	0,19	0,16	0,21	0,15
	17/02/09	0,04	0,08	0,06	0,07	0,07	0,19	0,23	0,29	0,20		0,16	0,25	0,22	0,16	0,12	0,15	0,12	0,12	0,10
	17/03/09	0,04	0,16	0,22	0,25	0,30	0,26	0,30	0,23	0,32	0,15	0,22	0,10	0,18	0,20	0,06	0,11	0,05	0,07	0,01
	08/04/09	0,04	0,05	0,02	0,17	0,19	0,20	0,37	0,46	0,30	0,25	0,17	0,15	0,09	0,08	0,13	0,08	0,06	0,07	0,05
	19/05/09	0,01	0,03	0,01	0,04	0,03	0,41	0,53	0,44	0,29	0,39	0,26	0,12	0,12	0,09	0,07	0,10	0,03	0,03	0,02
	17/06/09	0,02	0,03	0,02	0,06	0,04	0,51	0,82	0,72	0,55	0,55	0,37	0,24	0,17	0,10	0,09	0,07	0,06	0,07	0,05
	07/07/09	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,46	0,78	0,68	0,68	0,42	0,33	0,23	0,14	0,09	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04
	18/08/09	0,01	0,04	0,03	0,08	0,06	0,73	1,04	1,00	0,56	0,56	0,39	0,26	0,19	0,14	0,33	0,09	0,07	0,05	0,04
	16/09/09	0,05	0,02	0,02	0,04	0,04	0,44	0,95	0,38	0,36	0,50	0,28	0,24	0,17	0,05	0,09	0,03	0,05	0,06	0,02
	01/10/09	0,01	0,06	0,03	0,03	0,10	0,24	0,61	0,36	0,32	0,28	0,21	0,25	0,26	0,16	0,14	0,09	0,08	0,09	0,06
	10/11/09	0,32	0,37	0,09	0,11	0,03	0,25	0,36	0,27	0,41	0,30	0,25	0,24	0,24	0,14	0,17	0,06	0,10	0,11	0,06
08/12/09	0,05	0,04	0,02	0,03	0,05	0,02	0,07	0,01	0,03	0,03	0,16	0,05	0,13	0,37	0,26	0,06	0,09	0,12	0,08	
12/01/10	0,03	0,03	0,02	0,03	0,05	0,19	0,16	0,19	0,03	0,16	0,02	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,04	0,05	0,06	
18/02/10	0,04	0,07	0,04	0,04	0,02	0,12	0,25	0,23	0,24	0,11	0,17	0,12	0,26	0,14	0,09	0,09	0,08	0,07	0,04	
10/03/10	0,02	0,04	0,07	0,05	0,04	0,21	0,25	0,26	0,19	0,05	0,28	0,15	0,14	0,06	0,06	0,09	0,08	0,06	0,05	
PERÍODO B	07/04/10	0,03	0,17	0,03	0,04	0,05	0,32	0,26	0,41	0,14	0,27	0,25	0,13	0,16	0,16	0,11	0,08	0,06	0,07	0,07
	12/05/10	0,03	0,04	0,03	0,07	0,04	0,17	0,24	0,27	0,11	0,26	0,25	0,22	0,54	0,11	0,11	0,08	0,08	0,07	0,05
	08/06/10	0,02	0,02	0,03	0,08	0,05	0,34	0,56	0,63	0,54	0,45	0,35	0,24	0,18	0,14	0,14	0,12	0,07	0,07	0,06
	06/07/10	0,02	0,04	0,03	0,08	0,05	0,68	0,69	1,21	0,74	0,65	0,38	0,30	0,19	0,12	0,14	0,12	0,09	0,08	0,06
	10/08/10	0,01	0,04	0,03	0,08	0,07	0,60	1,17	1,03	0,82	0,72	0,41	0,29	0,20	0,14	0,14	0,12	0,09	0,08	0,08
	09/09/10	0,01	0,05	0,03	0,08	0,08	0,50	0,64	0,60	0,63	0,37	0,47	0,21	0,20	0,16	0,18	0,16	0,10	0,08	0,13
	06/10/10	0,02	0,04	0,07	0,05	0,04	0,29	0,61	0,42	0,38	0,27	0,15	0,26	0,19	0,12	0,11	0,08	0,08	0,09	0,08
	10/11/10	0,02	0,13	0,17	0,03	0,14	0,20	0,05	0,33	0,07	0,01	0,28	0,12	0,06	0,30	0,20	0,23	0,15	0,11	0,05
	02/12/10	0,20	0,14	0,03	0,09	0,12	0,26	0,23	0,20	0,26	0,08	0,01	0,05	0,19	0,12	0,18	0,13	0,20	0,14	0,10
	18/01/11	0,08	0,04	0,09	0,06	0,17	0,13	0,30	0,15	0,23	0,19	0,17	0,21	0,15	0,18	0,19	0,21	0,10	0,12	0,05
	23/02/11	0,02	0,03	0,04	0,08	0,16	0,28	0,47	0,32	0,02	0,58	0,34	0,33	0,24	0,17	0,15	0,08	0,12	0,11	0,07
	10/03/11	0,08	0,16	0,18	0,27	0,24	0,13	0,41	0,09	0,16	0,33	0,02	0,54	0,11	0,25	0,33	0,15	0,22	0,12	0,28
	06/04/11	0,02	0,04	0,07	0,11	0,05	0,04	0,19	0,29	0,03	0,29	0,23	0,23	0,27	0,18	0,13	0,02	0,08	0,05	0,04
	10/05/11	0,08	0,07	0,05	0,05	0,07	0,17	0,27	0,37	0,26	0,26	0,29	0,03	0,19	0,13	0,14	0,12	0,05	0,07	0,05
	08/06/11	0,02	0,07	0,04	0,10	0,04	0,41	0,67	0,36	0,66	0,46	0,27	0,26	0,18	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,08
	06/07/11	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,09	0,78	0,34	0,40	0,33	0,29	0,33	0,18	0,16	0,13	0,13	0,06	0,09	0,05
	09/08/11	0,03	0,52	0,06	0,10	0,05	0,36	0,54	0,60	0,92	0,68	0,27	0,26	0,22	0,15	0,15	0,17	0,11	0,07	0,05
05/09/11	0,02	0,10	0,03	0,07	0,02	1,02	0,37	0,32	0,46	0,58	0,37	0,28	0,15	0,13	0,16	0,16	0,10	0,09	0,05	
04/10/11	0,04	0,04	0,02	0,07	0,04	0,67	1,20	0,26	0,44	0,46	0,42	0,31	0,29	0,15	0,13	0,13	0,09	0,08	0,07	
08/11/11	0,04	0,07	0,02	0,08	0,03	0,49	0,05	0,24	0,25	0,24	0,59	0,65	0,13	0,12	0,17	0,12	0,10	0,12	0,05	
05/12/11	0,07	0,02	0,02	0,06	0,18	0,09	0,16	0,23	0,31	0,02	0,43	0,44	0,44	0,21	0,24	0,20	0,16	0,13	0,14	

Tabela A.4: Série de dados da variável turbidez obtida no período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Turbidez (UNT)		TRECHO 1					TRECHO 2					TRECHO 3				TRECHO 4				
Código da Estação		BV013	BV037	BV139	BV063	BV067	BV083	BV105	BV153	BV137	BV138	BV156	BV141	BV142	BV150	BV152	BV146	BV151	BV148	BV149
PERÍODO A	02/07/08	4,5	10,9	4,6	10,1	8,9	17,7	23,7	40,1	22,6	31,0	25,2	14,9	22,5	18,4	20,9	14,1	5,7	9,2	24,7
	13/08/08	7,4	11,9	9,8	14,2	3,1	6,3	8,1	12,6	23,7	25,4	21,2	12,1	46,9	22,4	23,8	16,9	27,2	20,5	31,3
	10/09/08	7,1	8,2	10,6	22,9	12,5	27,0	26,7	16,0	19,2	27,0	17,3	21,2	38,9	21,5	34,7	30,3	31,2	30,8	41,3
	01/10/08	16,4	18,4	22,2	22,8	23,2	25,3	25,5	31,2	7,9	9,7	10,6	39,1	40,4	38,0	23,1	23,9	14,1	11,3	18,9
	12/11/08	82,0	107,0	91,8	137,0	149,0	66,9	44,8	82,8	271,0	293,0	357,0	873,0	618,0	305,0	394,0	343,0	121,0	196,0	165,0
	10/12/08	24,3	71,3	133,0	191,0	53,0	39,6	22,7	22,0	47,2	64,4	1742,0	3492,0	150,0	192,0	51,9	92,8	346,0	348,0	89,7
	14/01/09	68,4	268,0	286,0	539,0	402,0	1020,0	768,0	1510,0	3100,0	1588,0	561,0	878,0	1006,0	820,0	556,0	372,0	349,0	454,0	269,0
	17/02/09	54,7	115,0	95,2	132,0	147,0	77,0	84,8	54,0	110,0		530,0	394,0	273,0	155,0	202,0	201,0	354,0	204,0	195,0
	17/03/09	67,7	1328,0	483,0	1246,0	3720,0	2764,0	916,0	291,0	1552,0	1272,0	185,0	206,0	323,0	206,0	136,0	105,0	271,0	479,0	562,0
	08/04/09	105,0	120,0	25,4	390,0	636,0	1076,0	59,5	52,5	20,2	11,7	110,0	218,0	373,0	171,0	150,0	90,9	60,1	90,3	38,2
	19/05/09	7,8	24,9	22,1	23,7	26,4	21,7	22,9	26,3	43,8	40,9	38,8	34,7	48,0	25,6	22,3	74,3	12,6	31,1	18,4
	17/06/09	4,7	15,4	10,8	13,8	17,4	31,8	20,5	13,4	23,6	20,6	13,9	19,0	31,7	13,9	18,5	9,5	16,1	17,5	24,2
	07/07/09	6,7	15,4	18,1	21,0	16,7	23,8	30,3	10,2	29,1	19,9	26,8	29,2	21,5	16,7	14,3	14,7	15,5	13,2	10,6
	18/08/09	3,3	17,6	12,1	21,0	17,3	18,5	16,9	21,0	16,8	20,4	16,0	15,7	35,1	20,1	38,6	14,5	21,6	33,3	23,5
	16/09/09	116,0	81,6	52,7	66,9	46,2	35,0	29,1	13,2	20,9	12,2	119,0	31,7	47,9	52,1	40,5	19,6	32,9	58,7	19,4
	01/10/09	263,0	102,0	10,8	120,0	153,0	109,0	32,0	227,0	376,0	377,0	172,0	298,0	400,0	121,0	64,3	60,9	46,3	31,2	40,5
10/11/09	1406,0	1928,0	373,0	250,0	1038,0	942,0	1074,0	536,0	810,0	603,0	179,0	255,0	344,0	212,0	161,0	349,0	175,0	186,0	120,0	
08/12/09	521,0	690,0	896,0	1198,0	892,0	817,0	788,0	1364,0	776,0	677,0	47,0	335,0	721,0	781,0	493,0	165,0	137,0	266,0	263,0	
12/01/10	97,6	31,2	34,8	115,0	116,0	97,2	91,1	71,1	899,0	867,0	1048,0	582,0	553,0	365,0	536,0	371,0	282,0	224,0	67,8	
18/02/10	52,8	86,8	89,1	167,0	157,0	99,3	85,4	73,2	79,3	52,5	91,2	84,3	202,0	137,0	210,0	61,8	22,8	18,1	21,1	
10/03/10	39,6	81,4	74,5	88,3	66,2	39,3	51,5	141,0	103,0	85,1	267,0	158,0	234,0	247,0	210,0	157,0	163,0	177,0	95,2	
PERÍODO B	07/04/10	771,0	135,0	37,3	132,0	128,0	60,5	28,6	16,7	47,1	46,8	60,7	41,9	44,9	35,2	29,8	26,1	14,9	19,5	16,1
	12/05/10	30,2	29,6	27,8	41,5	49,7	37,6	39,0	38,0	59,6	61,8	63,9	36,2	71,1	28,4	26,4	15,6	13,5	12,4	11,4
	08/06/10	9,3	9,1	6,7	124,0	22,2	37,6	30,6	22,3	31,7	23,0	25,9	17,3	30,5	24,0	16,0	14,5	12,9	11,4	10,1
	06/07/10	3,8	6,0	4,7	7,8	7,3	13,8	24,8	47,7	41,9	37,0	19,3	3,9	7,6	5,4	5,3	4,9	4,8	3,5	10,1
	10/08/10	5,8	5,9	6,7	10,0	7,3	23,3	24,1	23,2	22,5	31,6	10,8	5,8	5,3	5,3	5,0	5,1	6,5	9,6	14,3
	09/09/10	149,0	10,5	6,5	9,3	21,7	22,0	36,2	24,1	46,0	53,7	58,9	6,1	28,9	23,2	19,8	27,2	14,7	29,3	33,6
	06/10/10	15,9	11,3	95,1	33,7	31,2	34,6	27,6	44,2	30,9	27,6	50,4	25,5	19,8	26,7	23,1	46,9	15,9	39,1	32,0
	10/11/10	756,0	878,0	592,0	1092,0	1606,0	603,0	793,0	1150,0	970,0	875,0	374,0	664,0	1200,0	579,0	341,0	200,0	194,0	209,0	229,0
	02/12/10	225,0	142,0	104,0	102,0	102,0	104,0	115,0	1320,0	2120,0	1816,0	2588,0	467,0	259,0	329,0	286,0	352,0	341,0	261,0	203,0
	18/01/11	88,2	647,0	87,6	910,0	946,0	244,0	336,0	193,0	140,0	118,0	91,1	101,0	144,0	141,0	161,0	105,0	97,8	78,8	51,7
	23/02/11	12,7	20,7	23,2	19,8	8,2	35,5	16,6	359,0	270,0	118,0	363,0	116,0	103,0	88,0	83,1	68,8	65,6	91,4	47,1
	10/03/11	76,0	152,0	155,0	297,0	338,0	197,0	212,0	1330,0	698,0	881,0	1244,0	938,0	518,0	517,0	313,0	230,0	432,0	291,0	286,0
	06/04/11	185,0	98,1	71,4	105,0	93,0	1770,0	534,0	471,0	126,0	131,0	81,4	14,0	20,9	109,0	125,0	63,0	70,9	56,8	43,1
	10/05/11	6,1	9,2	9,6	11,4	8,3	13,3	9,0	9,6	22,7	25,8	28,4	26,5	36,3	28,8	24,9	13,4	11,0	10,2	11,8
	08/06/11	4,4	9,3	9,7	315,0	19,1	12,8	17,9	224,0	19,8	51,8	35,5	24,2	22,0	5,8	4,5	17,1	3,8	4,5	5,1
	06/07/11	3,5	6,5	9,1	6,8	5,2	10,1	10,4	13,9	10,4	11,2	19,9	11,0	22,3	42,7	29,0	33,3	13,9	35,3	13,8
	09/08/11	3,3	4,4	6,1	36,8	6,3	35,8	19,0	34,3	11,8	12,4	7,4	7,5	12,1	10,4	26,6	26,1	19,4	20,0	8,2
	05/09/11	3,4	6,2	2,9	7,9	3,1	25,2	28,0	22,4	23,0	11,0	5,2	2,9	6,1	8,9	18,6	31,1	8,9	4,2	17,0
04/10/11	6,8	8,3	3,6	8,3	4,3	19,6	55,4	25,1	199,0	140,0	1820,0	4,2	343,0	258,0	119,0	195,0	95,8	78,5	88,9	
08/11/11	31,3	7,3	7,3	12,2	6,7	9,4	9,0	30,1	33,7	36,1	876,0	233,0	93,1	81,3	135,0	53,5	71,1	71,8	30,7	
05/12/11	37,7	2210,0	515,0	92,6	446,0	328,0	95,0	69,4	160,0	166,0	254,0	729,0	335,0	651,0	251,0	235,0	162,0	179,0	122,0	

Tabela A.5 Série de dados da variável oxigênio dissolvido obtida no período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

OD (mg/L)		TRECHO 1					TRECHO 2					TRECHO 3				TRECHO 4				
Código da Estação		BV013	BV037	BV139	BV063	BV067	BV083	BV105	BV153	BV137	BV138	BV156	BV141	BV142	BV150	BV152	BV146	BV151	BV148	BV149
PERÍODO A	02/07/08	7,9	8,8	8,3	8,5	8,4	7,1	1,6	0,8	2,5	2,6	4,1	5,5	6,5	8,5	10,7	9,4	9,7	10,7	10,8
	13/08/08	7,5	8,1	7,9	7,1	7,1	5,3	0,9	3,3	3,5	3,6	4,6	10,9	12,1	8,3	10,0	12,9	10,4	10,7	12,8
	10/09/08	7,5	7,5	7,6	6,7	6,8	4,1	0,6	1,3	3,9	4,9	7,1	14,0	14,6	10,1	12,4	13,6	8,0	8,7	9,2
	01/10/08	7,1	7,9	7,0	6,9	6,4	4,3	0,6	1,4	3,5	4,3	5,2	12,8	7,5	10,3	9,7	9,8	8,8	9,2	10,8
	12/11/08	7,3	7,8	6,9	6,8	7,2	6,0	2,6	1,6	3,1	3,3	4,3	5,0	3,4	6,0	4,0	2,6	4,8	6,2	5,8
	10/12/08	7,3	7,4	6,9	6,5	6,4	4,5	1,2	1,1	3,1	3,5	2,7	0,5	7,1	6,6	7,0	7,0	7,2	6,9	6,9
	14/01/09	7,1	7,8	7,3	7,4	6,9	7,1	5,6	4,7	2,9	1,8	5,1	5,1	6,0	6,2	6,7	6,6	6,8	6,5	6,3
	17/02/09	7,5	8,0	7,4	7,3	7,2	6,8	5,6	4,3	4,2		5,0	2,1	5,8	6,7	6,5	6,4	6,7	6,5	6,3
	17/03/09	7,2	7,7	7,8	7,0	6,0	6,2	5,6	3,7	3,7	3,7	3,9	6,0	6,1	6,9	6,8	6,8	6,8	6,6	6,1
	08/04/09	7,2	8,1	7,7	7,6	7,6	7,4	5,1	4,7	3,9	4,3	4,7	5,9	7,1	7,1	6,8	7,2	7,4	7,2	6,8
	19/05/09	7,8	8,4	8,0	7,8	8,3	7,0	4,4	4,0	3,8	3,9	5,1	6,4	7,9	8,3	8,5	8,4	9,0	10,0	10,3
	17/06/09	7,4	8,5	8,0	7,6	8,0	6,5	3,1	2,1	3,4	3,3	4,5	5,6	5,8	8,2	8,7	9,5	9,8	10,1	10,9
	07/07/09	7,7	8,8	8,2	8,4	8,0	6,9	2,9	2,1	3,7	4,2	4,3	5,5	7,7	9,1	10,8	9,4	9,6	10,0	9,3
	18/08/09	7,3	8,4	8,3	7,4	7,5	5,0	0,5	1,3	2,7	2,9	4,2	7,0	11,4	8,6	8,4	8,0	7,9	7,9	5,1
	16/09/09	7,1	7,7	7,3	6,6	6,9	5,1	0,8	1,2	2,7	3,1	4,2	9,3	9,1	6,7	6,5	5,6	6,0	6,0	5,6
	01/10/09	7,5	7,9	7,2	7,1	7,1	6,2	2,7	2,3	2,8	3,6	3,5	5,1	5,1	6,2	5,4	5,8	5,9	6,7	6,1
	10/11/09	7,1	7,7	6,8	6,7	6,8	6,5	4,7	3,2	3,8	4,1	4,0	5,9	6,5	6,5	6,4	6,7	6,5	6,6	6,2
08/12/09	7,8	8,2	7,5	7,5	7,2	7,2	6,0	5,8	3,5	3,5	4,6	6,2	6,1	6,6	6,4	6,7	6,7	6,5	6,6	
12/01/10	7,3	7,4	6,8	7,2	7,0	6,6	5,1	4,0	3,6	3,2	3,1	5,1	6,0	6,4	6,0	6,5	6,6	6,4	6,4	
18/02/10	7,3	7,2	6,8	6,9	6,9	5,6	3,7	2,9	3,2	3,0	3,7	5,5	6,0	6,6	6,5	6,4	6,8	6,9	7,6	
10/03/10	7,2	7,5	7,0	6,9	7,1	6,4	4,7	3,9	4,5	4,5	3,2	6,1	6,3	6,7	6,6	6,5	6,8	6,7	6,4	
PERÍODO B	07/04/10	7,5	8,2	7,6	7,5	7,6	6,6	4,6	3,6	4,0	3,9	4,5	6,8	7,4	8,8	9,5	8,3	8,4	8,8	10,7
	12/05/10	7,0	8,4	7,7	7,7	7,6	6,7	4,4	3,3	3,8	4,1	4,8	6,5	6,9	7,5	6,8	7,2	7,7	8,0	9,1
	08/06/10	7,4	8,7	8,5	7,7	8,3	6,4	3,1	2,0	3,9	3,7	4,8	6,2	7,8	8,3	8,0	8,0	8,4	8,1	7,0
	06/07/10	7,8	8,8	8,6	7,7	8,0	6,0	1,6	1,0	2,1	2,0	4,6	5,8	6,8	7,4	7,9	7,3	7,9	7,6	8,0
	10/08/10	7,3	8,3	7,8	7,5	7,7	5,9	1,0	1,1	2,7	3,5	4,6	6,3	7,4	8,1	8,2	9,0	8,3	8,0	7,6
	09/09/10	7,1	7,9	7,7	7,2	7,2	5,8	1,6	1,5	3,7	3,9	4,2	7,1	13,6	9,2	11,1	12,8	9,4	10,2	12,7
	06/10/10	6,7	7,4	6,9	7,0	6,8	6,0	2,7	3,2	3,4	4,0	3,3	6,7	6,6	7,6	9,3	7,0	6,1	6,1	6,1
	10/11/10	6,9	7,9	7,2	7,0	7,1	6,5	5,4	4,3	2,8	1,8	3,7	5,7	5,4	6,6	5,8	6,8	6,8	6,9	6,3
	02/12/10	7,1	7,6	6,6	6,8	6,6	6,0	4,4	5,2	1,0	1,0	1,7	3,6	4,9	5,8	5,9	6,1	5,9	6,0	5,8
	18/01/11	7,0	8,0	7,2	7,6	7,3	6,4	5,4	4,4	4,3	3,8	4,5	5,6	6,2	6,3	6,2	6,4	6,5	6,3	6,0
	23/02/11	7,1	7,3	6,7	6,8	5,6	4,7	1,3	0,5	1,1	1,1	1,5	2,0	4,6	5,9	6,1	6,8	7,0	6,7	6,3
	10/03/11	7,3	7,8	7,3	7,2	6,9	6,7	5,5	5,7	3,6	3,7	2,7	2,8	5,5	6,2	6,3	6,7	6,8	6,6	6,4
	06/04/11	7,6	8,2	7,5	7,1	6,9	6,8	5,7	4,3	3,8	3,7	4,8	6,1	6,7	6,4	6,5	6,6	7,0	6,9	6,5
	10/05/11	7,6	7,8	7,6	7,6	7,8	6,3	3,7	3,0	3,6	4,0	5,6	6,5	7,1	7,7	7,4	7,5	7,9	7,9	7,9
	08/06/11	8,8	8,7	7,8	6,7	7,9	6,3	2,6	0,5	2,7	2,9	3,4	4,1	6,9	7,9	8,1	8,3	8,6	8,4	7,5
	06/07/11	7,9	8,4	8,2	8,2	8,7	6,8	2,8	2,2	4,3	4,5	4,9	6,2	8,1	10,5	12,7	10,6	8,0	7,6	8,0
	09/08/11	7,7	8,1	8,0	7,3	7,3	5,3	0,9	0,8	2,2	3,5	4,5	6,0	11,3	8,9	11,6	11,8	13,0	13,3	14,5
05/09/11	7,8	8,3	8,3	7,4	7,8	5,0	0,7	0,6	2,6	3,1	4,2	7,0	10,6	9,4	10,3	12,9	7,0	7,8	8,5	
04/10/11	7,6	8,2	7,6	6,9	7,2	4,7	1,1	1,7	2,0	2,3	1,1	4,0	3,0	6,1	4,3	6,4	6,0	6,1	6,1	
08/11/11	7,6	7,9	7,5	6,8	7,5	5,5	1,6	1,4	4,0	4,8	1,7	3,6	6,6	6,8	6,6	6,8	6,1	6,0	5,5	
05/12/11	7,8	8,0	7,5	7,1	7,3	6,0	5,1	2,8	3,4	3,9	3,1	1,8	5,6	6,3	6,8	7,0	7,0	6,8	6,5	



# **APÊNDICE B**

## **Estatística descritiva das variáveis no rio das Velhas**

**Tabela B.1** Estatística descritiva da variável arsênio total para o período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Estação	Número de Dados	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância
BV013	42	0,005	0,001	0,009	8,4E-05
BV037	42	0,006	0,000	0,019	3,7E-04
BV139	42	0,002	0,000	0,004	1,6E-05
BV063	42	0,015	0,012	0,017	2,8E-04
BV067	42	0,012	0,008	0,013	1,7E-04
BV083	42	0,013	0,008	0,015	2,4E-04
BV105	42	0,018	0,014	0,011	1,1E-04
BV153	42	0,022	0,015	0,022	4,9E-04
BV137	42	0,035	0,028	0,023	5,3E-04
BV138	41	0,036	0,030	0,025	6,5E-04
BV156	42	0,045	0,037	0,027	7,6E-04
BV141	42	0,044	0,036	0,031	9,4E-04
BV142	42	0,053	0,044	0,033	1,1E-03
BV150	42	0,031	0,025	0,016	2,6E-04
BV152	42	0,033	0,028	0,018	3,4E-04
BV146	42	0,023	0,020	0,012	1,5E-04
BV151	42	0,019	0,017	0,007	5,3E-05
BV148	42	0,020	0,017	0,009	7,7E-05
BV149	42	0,017	0,014	0,010	1,0E-04

**Tabela B.2** Estatística descritiva da variável coliformes termotolerantes para o período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Estação	Número de Dados	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância
BV013	42	16.995	2.600	33.016	1,1E+09
BV037	42	31.000	13.500	46.588	2,2E+09
BV139	42	29.452	13.000	43.464	1,9E+09
BV063	42	51.276	22.000	60.795	3,7E+09
BV067	42	45.162	17.000	57.444	3,3E+09
BV083	42	115.800	160.000	65.415	4,3E+09
BV105	42	115.374	160.000	61.738	3,8E+09
BV153	42	105.871	160.000	68.851	4,7E+09
BV137	42	46.291	13.000	62.198	3,9E+09
BV138	41	59.854	24.000	69.873	4,9E+09
BV156	42	16.349	1.150	37.455	1,4E+09
BV141	42	13.368	2.250	36.255	1,3E+09
BV142	42	7.765	425	15.036	2,3E+08
BV150	42	7.335	1.350	17.144	2,9E+08
BV152	42	7.355	1.400	24.904	6,2E+08
BV146	41	7.853	1.300	26.068	6,8E+08
BV151	41	19.273	1.300	43.531	1,9E+09
BV148	42	21.427	1.700	46.791	2,2E+09
BV149	42	24.941	2.500	48.834	2,4E+09

**Tabela B.3** Estatística descritiva da variável fósforo total para o período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Estação	Número de Dados	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância
BV013	42	0,0445	0,0300	0,06	0,003
BV037	42	0,0821	0,0500	0,10	0,009
BV139	42	0,0543	0,0300	0,05	0,003
BV063	42	0,0888	0,0700	0,07	0,005
BV067	42	0,0798	0,0500	0,06	0,004
BV083	42	0,3802	0,3300	0,24	0,059
BV105	42	0,5071	0,4800	0,31	0,097
BV153	42	0,4524	0,3600	0,30	0,088
BV137	42	0,3721	0,3150	0,25	0,062
BV138	41	0,3688	0,3300	0,21	0,043
BV156	42	0,2757	0,2700	0,14	0,019
BV141	42	0,2633	0,2450	0,16	0,027
BV142	42	0,2195	0,1900	0,14	0,020
BV150	42	0,1579	0,1450	0,07	0,004
BV152	42	0,1733	0,1400	0,14	0,020
BV146	42	0,1188	0,1100	0,06	0,003
BV151	42	0,0929	0,0800	0,04	0,002
BV148	42	0,0933	0,0800	0,04	0,002
BV149	42	0,0731	0,0600	0,05	0,002

**Tabela B.4** Estatística descritiva da variável oxigênio dissolvido para o período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Estação	Número de Dados	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância
BV013	42	7,4214	7,3500	0,37	0,13
BV037	42	8,0167	8,0000	0,43	0,18
BV139	42	7,5357	7,5500	0,52	0,28
BV063	42	7,2548	7,2000	0,47	0,22
BV067	42	7,2833	7,2000	0,64	0,40
BV083	42	6,0524	6,2500	0,84	0,71
BV105	42	3,1714	3,0000	1,85	3,42
BV153	42	2,6857	2,5500	1,53	2,33
BV137	42	3,2619	3,5000	0,80	0,63
BV138	41	3,4268	3,6000	0,91	0,83
BV156	42	4,0310	4,2500	1,16	1,35
BV141	42	5,8548	5,9000	2,53	6,40
BV142	42	7,2167	6,6500	2,44	5,94
BV150	42	7,4833	7,0000	1,29	1,68
BV152	42	7,7667	6,8000	2,10	4,40
BV146	42	7,9071	7,0000	2,27	5,17
BV151	42	7,5714	7,0000	1,51	2,29
BV148	42	7,6929	6,9000	1,65	2,72
BV149	42	7,7452	6,7000	2,25	5,06

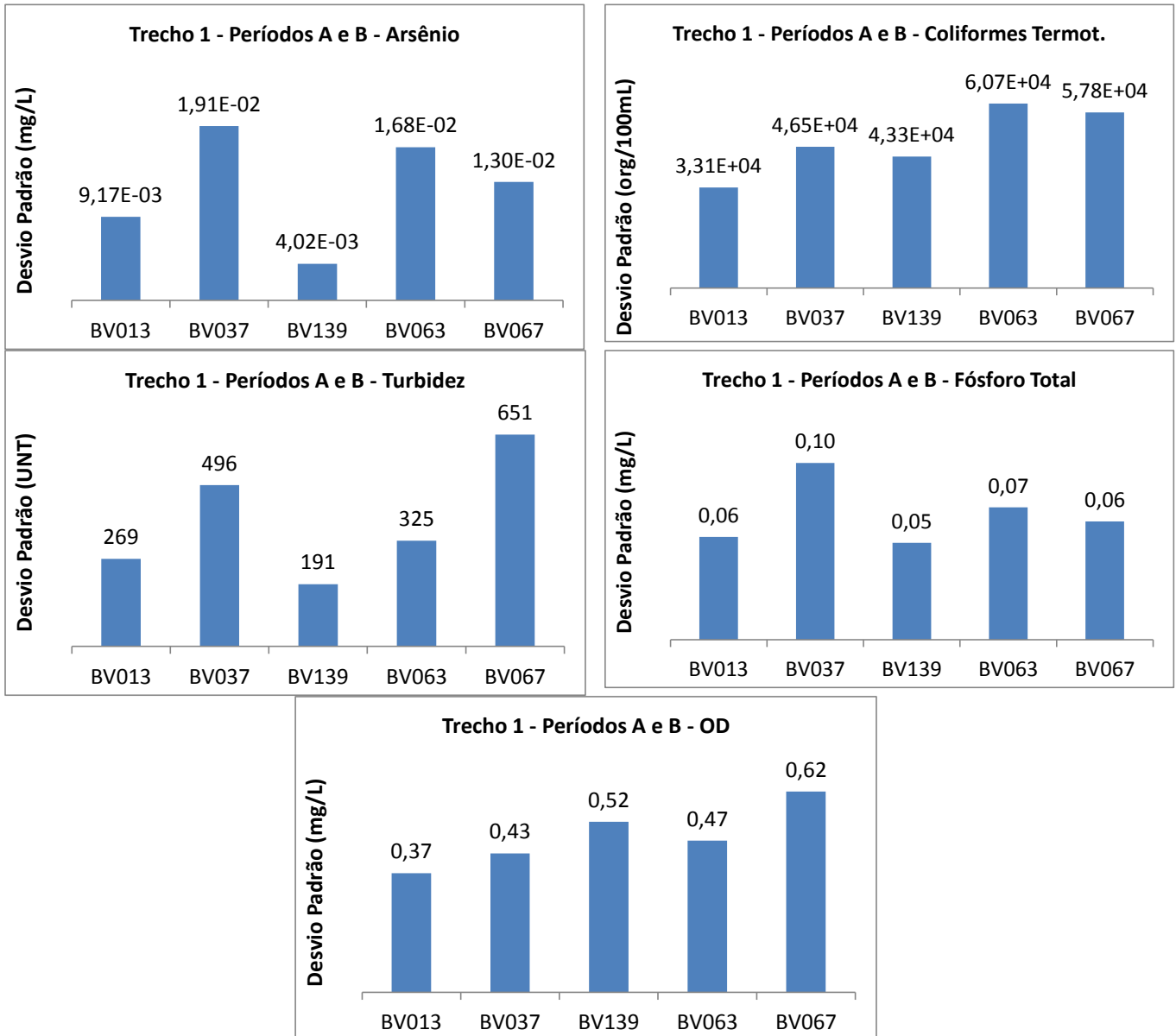
**Tabela B.5** Estatística descritiva da variável turbidez obtida para o período de julho de 2008 a dezembro de 2011, no rio das Velhas – MG

Estação	Número de Dados	Média	Mediana	Desvio Padrão	Variância
BV013	42	128,1033	30,7500	2,7E+02	7,3E+04
BV037	42	227,1264	27,2500	5,0E+02	2,5E+05
BV139	42	108,0243	24,3000	1,9E+02	3,7E+04
BV063	42	194,3974	77,6000	3,2E+02	1,1E+05
BV067	42	275,2512	38,7000	6,4E+02	4,2E+05
BV083	42	261,7007	36,7000	5,5E+02	3,0E+05
BV105	42	159,1124	30,4500	2,8E+02	8,0E+04
BV153	42	239,9195	42,1500	4,3E+02	1,8E+05
BV137	42	319,8914	46,5500	6,3E+02	3,9E+05
BV138	41	262,7459	51,8000	4,5E+02	2,0E+05
BV156	42	325,1367	72,6500	5,7E+02	3,2E+05
BV141	42	272,9969	37,6500	5,8E+02	3,3E+05
BV142	42	210,7795	59,5500	2,8E+02	7,7E+04
BV150	42	165,2093	66,7000	2,2E+02	4,6E+04
BV152	42	129,6188	46,2000	1,5E+02	2,3E+04
BV146	42	103,5898	57,2000	1,1E+02	1,3E+04
BV151	42	99,3929	32,0500	1,2E+02	1,5E+04
BV148	42	105,1295	37,2000	1,2E+02	1,6E+04
BV149	42	81,5198	32,8000	1,1E+02	1,2E+04

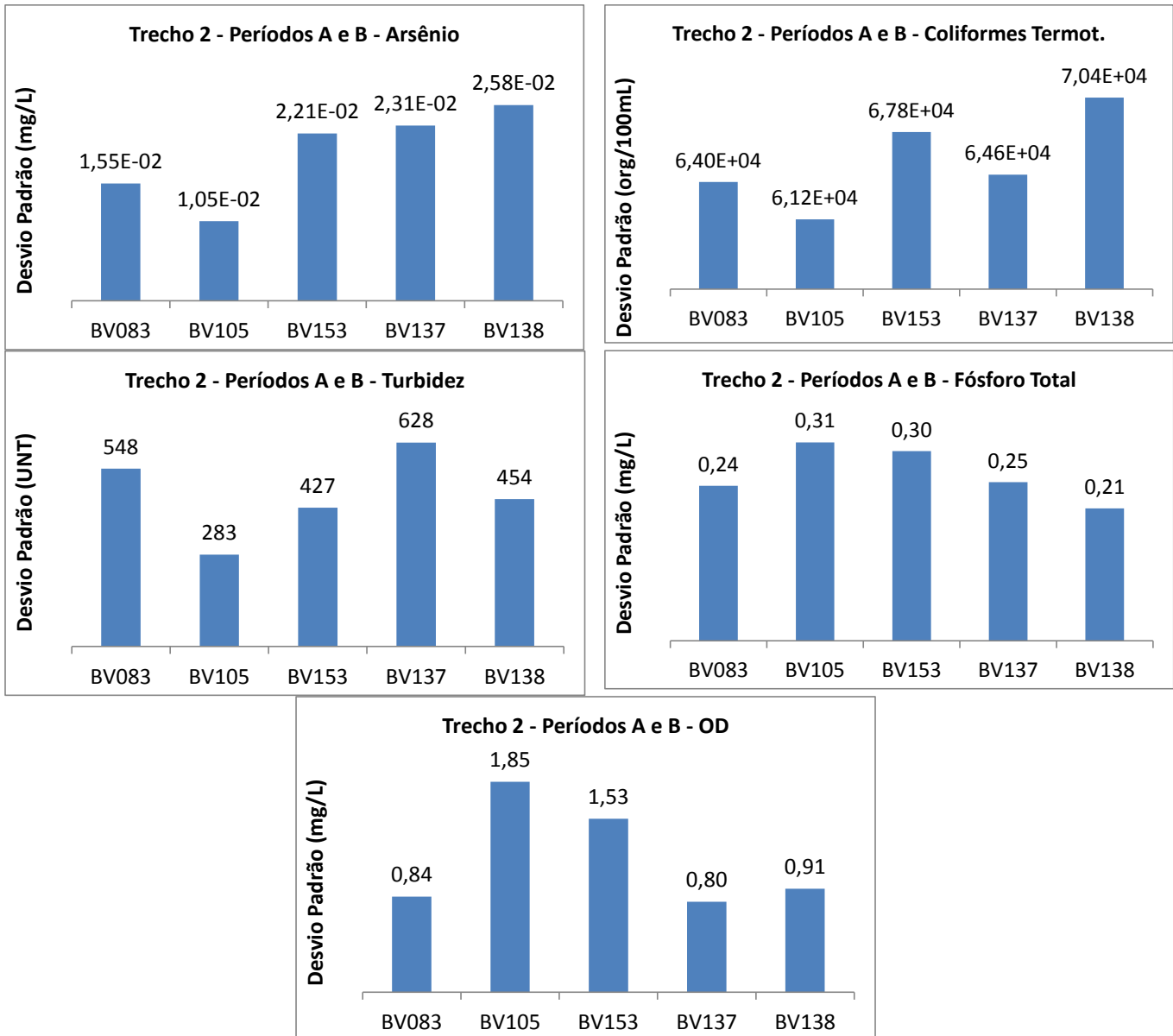
# APÊNDICE C

Gráficos dos valores de desvio-padrão da série de dados mensais do rio das Velhas

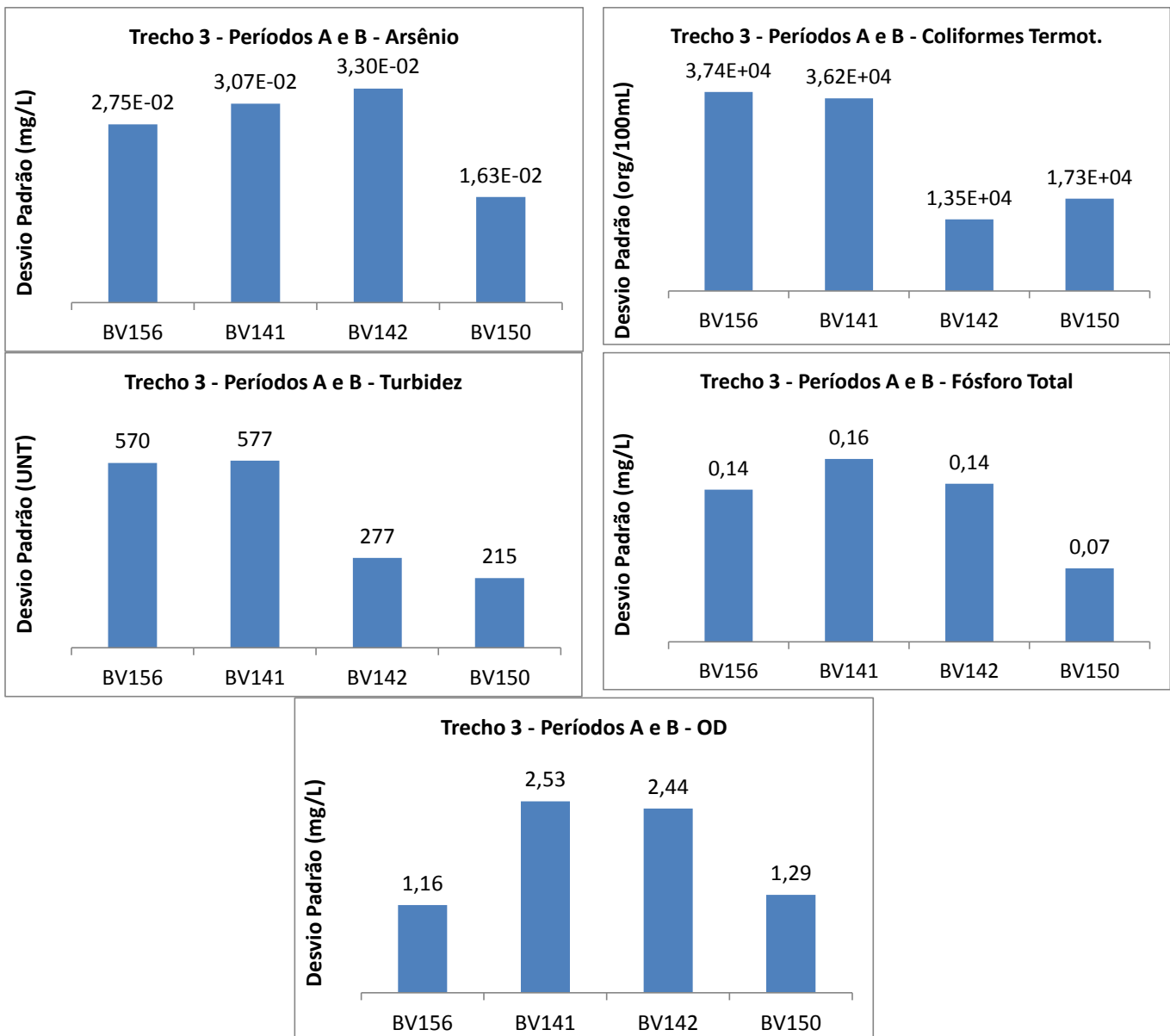
**Figura C.1** Gráficos dos valores de desvio-padrão das concentrações de arsênio, coliformes termotolerantes, fósforo total, oxigênio dissolvido e valores de turbidez no **Trecho 1**



**Figura C.2** Gráficos dos valores de desvio-padrão das concentrações de arsênio, coliformes termotolerantes, fósforo total, oxigênio dissolvido e valores de turbidez no **Trecho 2**

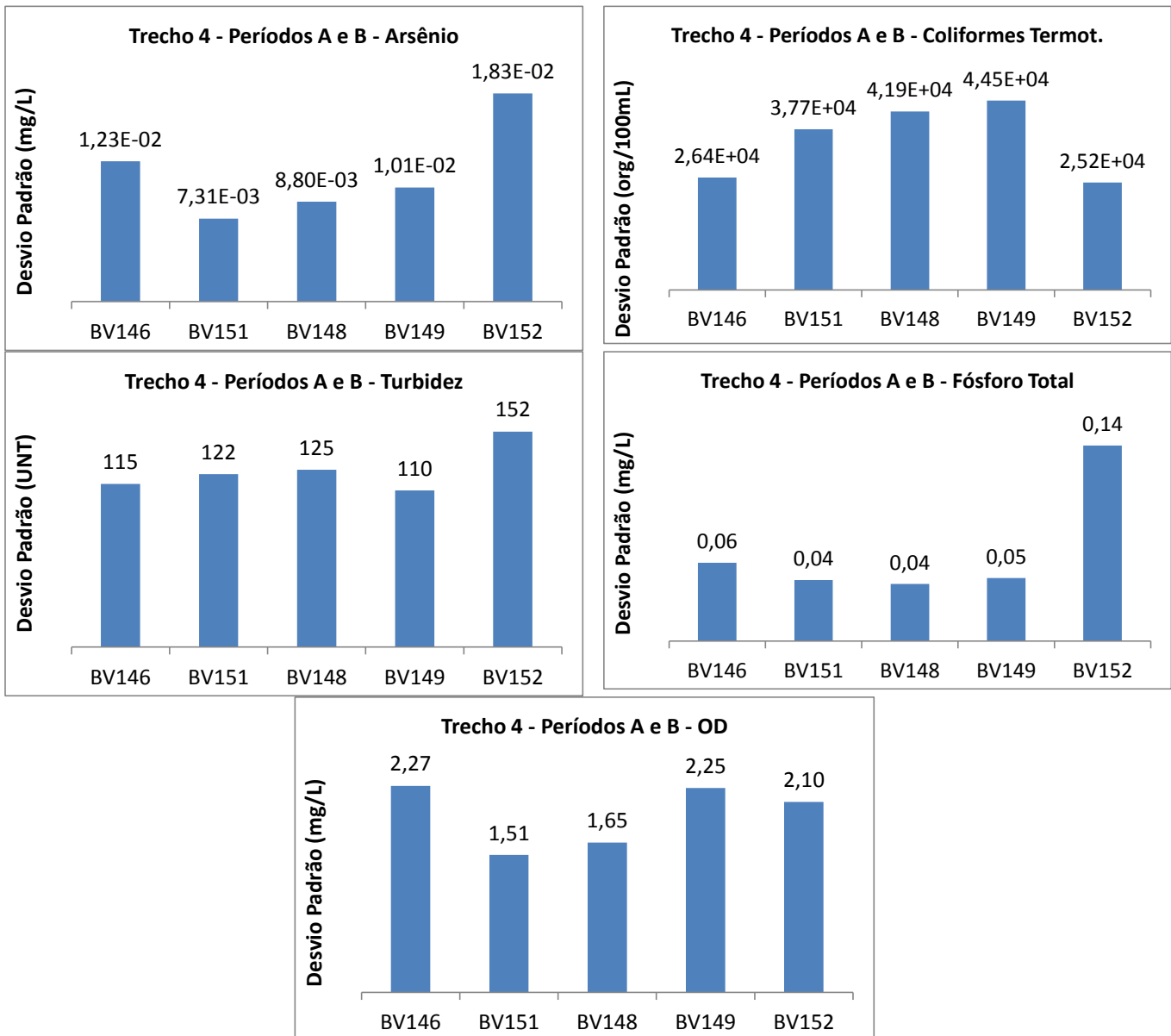


**Figura C.3** Gráficos dos valores de desvio-padrão das concentrações de arsênio, coliformes termotolerantes, fósforo total, oxigênio dissolvido e valores de turbidez no **Trecho 3**





**Figura C.4** Gráficos dos valores de desvio-padrão das concentrações de arsênio, coliformes termotolerantes, fósforo total, oxigênio dissolvido e valores de turbidez no **Trecho 4**



# **ANEXO I**

Procedimento proposto por Soares (2001) para aplicação do conceito de entropia para análise de redes de monitoramento com relação à distribuição espacial

Segundo Soares (2001), para aplicação do conceito de entropia para análise de redes de monitoramento com relação à frequência espacial, pode-se utilizar o seguinte procedimento, baseado nos conceitos extraídos de Amorocho e Espildora (1973), Caseldon e Husain (1980), Chapman (1986), Husain (1989), Harmancioglu (1994), Harmancioglu e Singh (1998) e Ozkul et al., (2000):

### **Etapa 1:**

Considerar que existem  $M$  estações de monitoramento na bacia hidrográfica.

A série de dados de qualidade da água da variável selecionada em cada estação de monitoramento será denotada por  $X$  onde  $m$  varia de 1 até  $m$ .

A representação dos dados desta série ao longo do tempo será denotada por  $X_{m,i}$  onde  $i$  varia de 1 até  $N$ , onde  $N$  é o tamanho da amostra

A duração da amostragem será considerada igual para todas as  $M$  estações, mas o número total de amostras,  $N$ , disponíveis em cada estação pode ser diferente porque podem existir valores perdidos ou intervalos sem amostragem na série considerada.

### **Etapa 2:**

Para a distribuição multivariada normal e log-normal a *Entropia Associada* ou *conjunta*,  $H(X_m)$ , pode ser calculada como:

$$H(X_m) = \left(\frac{M}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln|C| + \frac{M}{2} - M \ln(\Delta X) \quad \text{equação 3.1}$$

Na qual:

$H$  = entropia associada (ou própria, com  $M=1$ )

$X_m$  = vetor de  $M$  variáveis

$M$  = número de amostras (ou estações)

$|C|$  = determinante da matriz das covariâncias  $C$

$\Delta X$  = intervalo de amostragem dos dados

Utilizando-se a formulação proposta por Soares (2001) para a análise de séries de dados de qualidade, verificou-se que a parcela referente ao intervalo de amostragem poderia ser desprezada, já que era a mesma para todas as séries.

A entropia associada ou conjunta representa fisicamente a soma das incertezas de alguma variável ambiental particular, a qual pode ser reduzida pela amostragem nas  $M$  estações.

A unidade utilizada para quantificação da entropia adotada por Soares (2001) é denominada *napier*.

### **Etapa 3:**

Cálculo da entropia,  $H(X_m)$ , de cada estação  $m$ , onde  $m = 1, \dots, M$ , da variável de qualidade de água  $X$ , observada na estação de monitoramento e calculada pela equação 3.2 onde  $M$  recebe o valor 1.

$$H(X_m) = \left(\frac{1}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{1}{2}\right) \ln|C| + \frac{1}{2} - \ln(\Delta X) \quad \text{equação 3.2}$$

A estação com o mais alto valor de  $H(X_m)$  será a estação com prioridade 1, porque este será o local onde ocorre a maior variância na variável  $X$  de qualidade de água selecionada. Desta forma, o maior ganho de informações será obtido se forem obtidas mais observações nesta estação, para se tentar diminuir a variabilidade amostral.

Para a identificação das prioridades das estações da rede de monitoramento, o número de identificação da estação  $m$ , será trocado pelo índice  $j$ , de forma que a  $m$ -ésima estação  $X_m$  com a maior entropia, será denotada por  $X_j = X_1$ , significando que essa estação terá prioridade um. Classificando-se as estações segundo a prioridade, ao se ter a classificação final, pode-se retirar as estações com prioridades menores ou reduzir as variáveis monitoradas onde estas possam ser descritas através do monitoramento nas demais estações da rede.

### **Etapa 4:**

Associar a estação que recebeu a prioridade um com cada uma das estações restantes, para selecionar-se o par que resultará o menor transporte de informações. A estação de monitoramento que preencher esta condição será a estação de prioridade 2,  $X_j = X_2$ , de tal forma que obedeça a seguinte condição:

$$\min \{H(X_1) - H(X_1|X_2)\} = \min \{T(X_1, X_2)\} \quad \text{equação 3.3}$$

Onde  $H(X_1|X_2)$  é a entropia condicional, que pode ser calculada do seguinte modo:

$$H(X_1|X_2) = H(X_1, X_2) - H(X_2) \quad \text{equação 3.4}$$

Que de forma generalizada fica:

$$H(X_1, \dots, X_{j-1}|X_j) = H(X_1, \dots, X_{j-1}, X_j) - H(X_j) \quad \text{equação 3.5}$$

Onde

$$H(X_1, \dots, X_j) = \left(\frac{j}{2}\right) \ln(2\pi) + \left(\frac{j}{2}\right) \ln|C| + \frac{j}{2} - j \ln(\Delta X) \quad \text{equação 3.6}$$

Onde  $|C|$  é o determinante da Matriz de covariância  $C$ .

O menor valor da diferença dada pela equação 3.3 será aquele gerado pelo maior valor da entropia condicional da combinação de estações de monitoramento, calculada pela equação 3.6.

### **Etapa 5:**

O mesmo procedimento é continuado pela combinação sucessiva das estações restantes, até a estação  $M$ , selecionando-se a estação cuja combinação produz o menor transporte de informação. Fisicamente, o significado desse transporte de informação é a dependência de uma estação de monitoramento com relação à informação gerada pelas outras, ou seja, quanto maior o transporte de informação entre as estações, quando estas se associam, mais redundante ou desnecessária a informação será. Se por outro lado, o transporte de informações diminuir com a associação das estações de monitoramento, e tal associação é necessária para a produção de informação relevante na rede de monitoramento considerada.

A combinação que produz o menor transporte de informações deve satisfazer à seguinte equação:

$$\min \{H(X_1, \dots, X_{j-1}) - H(X_1, \dots, X_{j-1}|X_j)\} = \min \{T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j)\} \quad \text{equação 3.7}$$

Onde  $X_1$  é a estação de monitoramento com prioridade 1 e  $X_j$  é a estação com prioridade  $j$ -ésima.

A entropia condicional pode ser calculada através da equação 3.5 e o Transporte de informação,  $T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j)$ , pode ser calculado como:

$$T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j) = H(X_1, \dots, X_{j-1}) - H(X_1, \dots, X_{j-1} | X_j) \quad \text{equação 3.8}$$

Desta forma, o transporte de informação fica sendo dado por

$$T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j) = H(X_1, \dots, X_{j-1}) - [H(X_1, \dots, X_{j-1} | X_j)] \quad \text{equação 3.9}$$

Para a função densidade de probabilidade de variáveis múltiplas distribuídas de forma normal, o transporte de informações pode ser dado por

$$T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j) = -\left(\frac{1}{2}\right) \ln(1 - R^2) \quad \text{equação 3.10}$$

Onde  $R$  é o coeficiente de correlação múltipla e,  $R^2$ , o coeficiente de determinação.

De acordo com o procedimento descrito, fica assegurada que a estação de monitoramento  $X_j$  possui a menor correlação com as outras estações da rede, ou seja, produz sua informação com a menor dependência da informação gerada pelas outras estações da rede.

### **Etapa 6:**

Realizando-se os passos do procedimento descrito, pode-se avaliar os resultados a cada passo pela definição da porcentagem  $t_j$  de informação não transferida ou independente entre as estações de monitoramento, sendo esta dada pela seguinte equação:

$$t_j = \frac{H(X_1, \dots, X_{j-1} | X_j)}{H(X_1, \dots, X_{j-1})} = \frac{H(X_1, \dots, X_j) - H(X_j)}{H(X_1, \dots, X_{j-1})} \quad \text{equação 3.11}$$

A porcentagem de Informação Transferida ( $1 - t_j$ ), pode ser calculada como:

$$(1 - t_j) = \frac{T((X_1, \dots, X_{j-1}), X_j)}{H(X_1, \dots, X_{j-1})} \quad \text{equação 3.12}$$

Nesse ponto o ponto o projetista pode decidir a quantidade máxima de informação repetida ou redundante que ele irá permitir na rede de monitoramento.

Se o projetista especificar o limite superior de informação transferida ou redundante como  $(1-t_j)$  em porcentagem, pode-se selecionar que combinação de estações produzirá esta porcentagem pré especificada e desta forma estas estações selecionadas deverão fazer parte da rede de monitoramento. As estações que forem adicionadas após o sistema alcançar o valor  $(1-t_j)$ , irão aumentar a informação redundante e então os responsáveis pelo sistema de monitoramento podem decidir pela exclusão dessas estações.

### **Etapa 7:**

A avaliação descrita na etapa 6 também pode ser feita alternativamente através da definição de  $k_j$ , ou seja, a relação entre a incerteza explicada pelo número  $j$  de estações de monitoramento que produzem a informação não redundante, do total número  $M$  de estações da rede.

$$k_j = \frac{H(X_1, \dots, X_j)}{H(X_1, \dots, X_{j-1}, X_{j+1}, \dots, X_M)} \quad \text{equação 3.13}$$

Deste modo pode-se especificar um limite superior  $k_j^*$  como a porcentagem de incerteza que pode ser removida da rede de monitoramento.

Este limite superior,  $k_j^*$ , pode ser alcançado através da combinação de um certo numero de estações de monitoramento ou locais de amostragem que produzem  $k_j > k_j^*$ , podem ser interrompidas.

No procedimento descrito, os benefícios de cada combinação de estações de monitoramento são mensurados em termos de menor transporte de informações ou da maior entropia condicional produzida pela combinação das estações de monitoramento, pois quanto menor o transporte de informação mais independente é a estação na produção de informações.

Para selecionar a melhor combinação de estações, é suficiente comparar-se os custos e benéficos representados por  $t_j$  ou  $k_j$ . Os custos poderão ser aumentados pela adição de novas estações ou diminuídos pela opção de descontinuidade de algumas estações.