

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DA BACIA DO ALTO CURSO DO RIO DAS VELHAS

Eliana A. Nonato

Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG; Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte - MG, Brasil

Zenilde G. G. Viola

Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Rua Espírito Santo, 495, 30160-030 Belo Horizonte - MG; Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, 31270-901 Belo Horizonte - MG, Brasil

Katiane C. B. Almeida

Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Rua Espírito Santo, 495, 30160-030 Belo Horizonte - MG, Brasil

Heloiza H. R. Schor*

Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, CP 702, 31270-901 Belo Horizonte - MG, Brasil

Recebido em 16/2/06; aceito em 15/9/06; publicado na web em 26/3/07

STATISTICAL TREATMENT OF WATER QUALITY PARAMETERS MEASURED AT THE UPPER COURSE OF THE RIO DAS VELHAS BASIN. Water quality was monitored at the upper course of the Rio das Velhas, a major tributary of the São Francisco basin located in the state of Minas Gerais, over an extension of 108 km from its source up to the limits with the Sabara district. Monitoring was done at 37 different sites over a period of 2 years (2003-2004) for 39 parameters. Multivariate statistical techniques were applied to interpret the large water-quality data set and to establish an optimal long-term monitoring network. Cluster analysis separated the sampling sites into groups of similarity, and also indicated the stations investigated for correlation and recommended to be removed from the monitoring network. Principal component analysis identified four components, which are responsible for the data structure explaining 80% of the total variance of the data. The principal parameters are characterized as due to mining activities and domestic sewage. Significant data reduction was achieved.

Keywords: Rio das Velhas basin; water quality; multivariate analysis.

INTRODUÇÃO

Os corpos de água do estado de Minas Gerais vêm sendo monitorados desde 1977, sob coordenação do Instituto Mineiro de Gestão das Águas-IGAM desde 2001, com objetivos de levantar, conhecer e divulgar as condições da qualidade das águas superficiais do Estado e propor ações de planejamento e controle de usos das mesmas.

Com uma rede atual de 29 estações de amostragem na Bacia do Rio das Velhas, este programa de monitoramento vem sendo continuamente avaliado, visando aprimorar a localização dos pontos de amostragem, os parâmetros analisados e a frequência do monitoramento. Os relatórios anuais vêm alertando sobre a situação crítica na qual encontram-se suas águas, acusando problemas relacionados tanto a fontes pontuais de poluição, representadas pelos esgotos sanitários, atividades de mineração e efluentes de pequenas indústrias, quanto a fontes difusas, representadas pela drenagem pluvial da área urbana e rural e por rejeitos de mineração. Os resultados indicam, preliminarmente, que a situação de qualidade das águas da bacia vem piorando ao longo dos anos, fato que pode estar relacionado a uma maior pressão do uso e ocupação do solo na região exigindo ações de controle ambiental específicas^{1,2}.

Os resultados dos trabalhos realizados evidenciaram a necessidade premente de instalação e operação de um sistema de monitoramento que permita caracterizar a situação ambiental da

região com nível de detalhe ampliado, permitindo maior efetividade nas ações de controle ambiental visando a melhoria das condições ambientais. Os estudos e levantamentos realizados sobre a qualidade das águas da bacia do rio das Velhas têm sido direcionados para o atendimento a objetivos gerais, de modo que a distribuição espacial dos pontos de amostragem e os parâmetros considerados não são suficientes para o pleno conhecimento da região. Assim, o IGAM vem realizando desde 2003, paralelamente ao monitoramento de toda a bacia do Rio das Velhas, o "Programa de Aperfeiçoamento do Monitoramento da Qualidade das Águas da Bacia do Alto Curso do Rio das Velhas"³, que objetiva o aumento do nível de conhecimento das condições de qualidade das águas de uma área específica de grande importância econômica e social do Rio das Velhas e de seus formadores e, em particular, dos pontos críticos para o abastecimento de água, permitindo avaliações mais precisas da efetividade dos sistemas de controle ambiental implantados.

Esse programa de monitoramento é dispendioso e por isso há necessidade de otimização da rede de amostragem proposta bem como da frequência de amostragem e do número de parâmetros analisados, sem perda da informação. Com essa finalidade foram empregadas as técnicas de análise estatística multivariada e de análise exploratória, especificamente análise de agrupamentos e análise de componentes principais, técnicas que têm sido empregadas frequentemente em tratamento de bases de dados de poluição^{4,6}, no tratamento da base de dados constituída de medidas de parâmetros químicos e físico-químicos feitas no período de 2003-2004 em águas da bacia do alto curso do Rio das Velhas. Os resultados desse estudo estão aqui apresentados.

*e-mail: hhrschor@ufmg.br

REDE DE MONITORAMENTO

O Rio das Velhas tem sua nascente na Serra do Veloso, proximidade de Ouro Preto, e deságua no Rio São Francisco, em Guaiçuí, distrito de Várzea da Palma, próximo a Pirapora, com uma vazão média de 265 m³/s, percorrendo uma extensão de 716 km e drenando uma bacia de 29.173 km². Para facilitar a descrição da bacia, ela é dividida em alto, médio e baixo curso⁷. O alto curso da bacia do Rio das Velhas compreende uma área de 1.943 km², englobando desde a proximidade de sua nascente entre a Serra de Antônio Pereira, município de Ouro Preto, distrito de São Bartolomeu, até os limites dos municípios de Raposos e Sabará englobando os municípios de Belo Horizonte, Contagem e Caeté. O médio curso compreende a região do Rio Paraúna, o principal afluente do Rio das Velhas, do córrego Salobinho ao norte, até os municípios de Curvelo e Corinto. O baixo curso compreende os municípios de Corinto, Diamantina, Buenópolis e Pirapora⁷.

O trecho enfocado apresenta um percurso de cerca de 108 km da região do alto curso do Rio das Velhas e sua localização no Estado de Minas Gerais e na bacia do Rio das Velhas é apresentada na Figura 1.

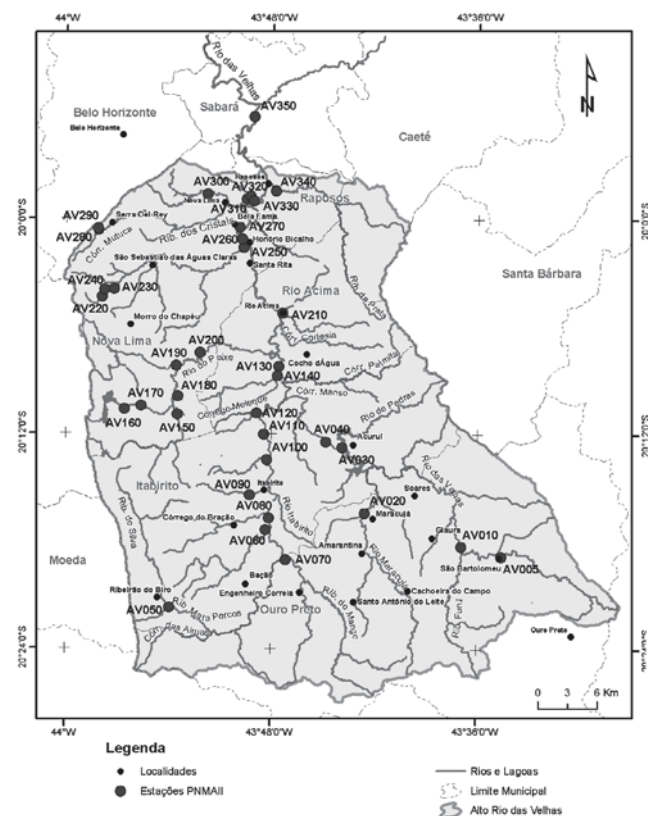


Figura 1. Localização da área em estudo no Estado de Minas Gerais e na bacia do Rio das Velhas indicando os pontos de amostragem

A bacia do Rio das Velhas, notadamente seu alto curso, abriga um dos principais mananciais de abastecimento urbano de água da região metropolitana de Belo Horizonte, atendendo a cerca de 50% de sua população, equivalente a 2 milhões de habitantes. Ao mesmo tempo, as águas do alto curso do Rio das Velhas recebem efluentes de esgotos municipais e industriais de grande parte da região metropolitana de Belo Horizonte³.

A importância econômica do alto curso do Rio das Velhas advém do intenso desenvolvimento de atividades de mineração representadas, principalmente, por explorações de minério de ferro, ouro e gemas e da crescente ocupação urbana associada à forte expansão

imobiliária que configura um cenário de aparente incompatibilidade de usos, que tende a gerar conflitos de interesses inconciliáveis³.

Este estudo foi realizado na rede de amostragem definida pelo “Programa de Aperfeiçoamento do Monitoramento da Qualidade das Águas da Bacia do Alto Curso do Rio das Velhas”. Esta rede é composta por 7 estações operadas pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA (AV220, AV230, AV240, AV260, AV270, AV280 e AV290), 6 estações (AV040, AV110, AV130, AV210, AV310, AV330 e AV350) monitoradas pelo Programa Águas de Minas² e mais 24 novas estações de amostragem, que permitem uma melhor caracterização da situação de qualidade e dos efeitos de fontes pontuais e difusas de poluição, a partir da análise de parâmetros físico-químicos e biológicos. O “Programa de Aperfeiçoamento do Monitoramento da Qualidade das Águas da Bacia do Alto Curso do Rio das Velhas” engloba no total 37 estações de monitoramento divididas em *redes básicas*³ AV005, AV010, AV030, AV040, AV050, AV080, AV110, AV130, AV160, AV180, AV200, AV210, AV330, AV340, AV345 e AV350, *redes dirigidas para controle da poluição*³ AV020, AV060, AV070, AV090, AV100, AV120, AV140, AV150, AV170, AV190, AV250, AV300, AV310 e AV320 e em *redes dirigidas para o abastecimento doméstico*³, AV220, AV230, AV240, AV260, AV270, AV280 e AV290.

Foram adotadas as frequências de amostragem mensal, para córregos que drenam áreas reconhecidamente impactadas³, estações AV090, AV100, AV120, AV140, AV150, AV300 e AV320, e trimestral para as demais estações. Os serviços de coleta e análise de amostras de água foram realizados pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC.

Os dados analisados representam 39 parâmetros físico-químicos monitorados nas 37 estações de amostragem ao longo da bacia do Alto Curso do Rio das Velhas, que avaliam o grau de contaminação das águas. A partir de alguns desses parâmetros são calculados os indicadores da situação ambiental que são o Índice de Qualidade das Águas, IQA, e a Contaminação por Tóxicos, CT. O IQA reflete a interferência por esgotos sanitários, nutrientes e sólidos³. Os valores de IQA variam de 0 a 100 e o nível de qualidade da água é avaliado como excelente ($90 < IQA \leq 100$), bom ($70 < IQA \leq 90$), médio ($50 < IQA \leq 70$), ruim ($25 < IQA \leq 50$) e muito ruim ($0 < IQA \leq 25$). A CT é avaliada considerando-se a concentração de amônia, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianetos, cobre, cromo hexavalente, índice de fenóis, mercúrio, nitritos, nitratos e zinco. A CT é classificada como baixa ($< 1,2P$), média ($2P < CT < 1,2P$) ou alta ($> 2P$), onde P corresponde ao limite para o contaminante tóxico³ definido na classe de enquadramento do curso d’água pelo Conselho Estadual de Política Ambiental⁸ para o trecho onde está localizada a estação de amostragem.

Entre as 37 estações de monitoramento, as estações AV030, AV160 e AV180 foram avaliadas com coletas em diferentes profundidades por se tratarem de represas. Assim, nos pontos AV030E, AV160E e AV180E, as amostras foram coletadas, respectivamente, a 0,15; 1,0 e 0,125 m da superfície e nos pontos AV030F, AV160F e AV180F as amostras foram coletadas a 4,5; 12,5 e 7,5 m de profundidade, respectivamente. Os parâmetros analisados de acordo com as normas padronizadas^{9,10} estão listados na Tabela 1. A frequência das análises dos parâmetros foi igual à frequência de amostragem, que variou entre mensal, trimestral e semestral, ou menor para alguns parâmetros de ocorrência pouco comum ou que apresentaram pequena variabilidade anual.

TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Inicialmente foram calculadas as medianas no período de 2003 a 2004 de cada parâmetro em cada estação de amostragem. Considerando que nas estações AV030, AV160 e AV180 as amostras fo-

Tabela 1. Parâmetros analisados em águas do alto curso do Rio das Velhas. As análises laboratoriais atendem às normas aprovadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial ou, na sua ausência, aos métodos indicados na ref. 9. Os limites de detecção dos métodos de análise deverão, na medida das possibilidades técnicas, ser pelo menos 10 vezes inferiores aos padrões definidos para águas de classe 1 de enquadramento, de acordo com a deliberação normativa do conselho de política ambiental- COPAM nº 10/86.

PARÂMETRO	ENSAIO/ LIMITE DE DETECÇÃO
Alcalinidade total	Potenciometria ¹
Arsênio	EAA* gerador de hidretos ¹ / $< 0,0003$ mg/L
Bário	EAA* plasma ¹ / $< 0,005$ mg/L
Chumbo	EAA* forno de grafite ¹ / $< 0,005$ mg/L
Cloreto	Colorimetria ² / $< 0,3$ mg/L
Cobre	EAA*plasma ¹ / $< 0,004$ mg/L
Coliformes fecais	Tubos múltiplos ¹
Condutividade elétrica	Condutimetria ¹
Cor	Colorimetria ¹ / < 5 UPt
Demanda bioquímica de oxigênio	Winkler/incubação ³ / < 2 mg/L
Demanda química de oxigênio	Titulometria ³ / < 5 mg/L
Dureza cálcio	Titulometria ¹
Dureza magnésio	Titulometria ¹
Estreptococos	Tubos múltiplos ¹
Ferro solúvel	EAA*plasma ¹ / $< 0,03$ mg/L
Ferro total	EAA* plasma ¹ / $< 0,03$ mg/L
Fluoretos	Potenciometria ¹ / $< 0,25$ mg/L
Fósforo	Colorimetria ¹ / $< 0,010$ mg/L
Índice de fenóis	Colorimetria ³ / $< 0,001$ mg/L
Manganês	EAA*plasma ¹ / $< 0,003$ mg/L
Níquel	EAA* forno de grafite ¹ / $< 0,004$ mg/L
Nitrogênio amoniacal	Colorimetria ³ / $< 0,10$ mg/L
N Nitrato	Colorimetria ¹ / $< 0,010$ mg/L
N Nitrito	Colorimetria ¹ / $< 0,010$ mg/L
N orgânico	Colorimetria ¹ / $< 0,10$ mg/L
Oxigênio dissolvido	Titulometria ¹ / $< 0,5$ mg/L
pH <i>in loco</i>	Potenciometria ¹
pH laboratorial	Potenciometria ¹
Potássio	EAA*- plasma ¹ / $< 0,10$ mg/L
Selênio	EAA* gerador de hidretos ¹ / $< 0,0005$ mg/L
Sódio	EAA*plasma ¹ / $< 0,05$ mg/L
Sólidos dissolvidos	Gravimetria ³ / < 1 mg/L
Sólidos em suspensão	Gravimetria ³ / < 1 mg/L
Sulfatos	Gravimetria ¹ / < 1 mg/L
Surfactantes aniônicos	Colorimetria ³ / $< 0,05$ mg/L
Temperatura da água	Termometria ¹
Temperatura do ar	Termometria ¹
Turbidez	Turbidimetria ¹
Zinco	EAA*plasma ¹ / $< 0,02$ mg/L

Ensaio realizado de acordo com procedimentos da 1= APHA-“American Public Health Association”; 2 = USGS-“United States Geological Survey”; 3 = ABNT-NBR (Associação Brasileira de Normas Técnicas/ Normas Brasileiras). *EAA = Espectrometria de absorção atômica

ram coletadas em profundidades diferentes, os dados foram organizados em uma matriz **X** de elementos x_{ik} , onde *i* corresponde a cada uma das 40 linhas compostas pelas 37 estações de amostragem e de 3 pontos coletados abaixo da superfície (AV030F, AV160F e AV180F) e *k* aos 39 parâmetros medidos.

Devido às diferenças nas escalas dos parâmetros monitorados, eles foram ranqueados através da Equação 1

$$x_{ik}^* = \frac{x_{ik} - \bar{x}_i}{s_i} \tag{1}$$

onde \bar{x}_i é a média nos 40 pontos de amostragem do *i*-ésimo parâmetro e s_i seu desvio padrão. Assim foi construída a nova matriz das medianas ranqueadas, objeto do tratamento estatístico. Essa padronização mostrou-se mais adequada para a base de dados em estudo devido à grande variação dos índices de contaminação nos diferentes pontos de coleta¹¹.

A técnica de agrupamento hierárquico, combinada com a análise de componentes principais¹²⁻¹⁵ e a avaliação de gráficos de dispersão entre estações foram utilizadas com a finalidade de avaliar as similaridades das estações de amostragem e parâmetros monitorados. Para análise dos dados foi utilizado o pacote de programas “Advanced Data Analysis Software S-PLUS 4.5”¹⁶.

A análise de agrupamentos produz um dendrograma, onde as amostras são aglomeradas através de um critério de similaridade com respeito aos parâmetros medidos. A proximidade das estações no dendrograma indica similaridade em relação aos parâmetros. Neste trabalho, a distância Euclidiana foi calculada na matriz das medianas ranqueadas das estações e como técnica hierárquica aglomerativa foi utilizado o método de Ward, que utiliza a análise das variâncias para determinar as distâncias entre os agrupamentos, como método de agregação. Complementarmente às medidas de distância, a medida de similaridade também foi utilizada na construção do dendrograma, onde, no eixo vertical são representadas as amostras e no eixo horizontal o índice de similaridade, s_{ij} , entre os pontos *i* e *j* calculado pela expressão

$$s_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{d_{max}} \tag{2}$$

onde d_{ij} é a distância entre os pontos *i* e *j* e d_{max} é a distância máxima encontrada entre os pontos¹¹⁻¹⁶.

O propósito da análise de componentes principais é a redução da complexidade dos dados multivariados e a detecção de estrutura na relação entre os dados, transformando-os em um novo conjunto de variáveis, as chamadas *componentes principais*, escritas como uma combinação linear das variáveis originais. As contribuições de cada variável nas componentes principais correspondem aos pesos (“loadings”). Nas novas componentes geradas, as *n* componentes que expliquem a maior variabilidade dos dados são escolhidas de modo a caracterizar a base de dados. A primeira componente principal explica a maior *proporção da variância total* entre todas as combinações lineares dos dados originais, a segunda terá menor proporção de variância total que a primeira e assim sucessivamente. A *proporção da variância total* é definida como

$$\frac{Var[Y_j]}{Variância total de X} = \frac{\lambda_j}{\text{traço}(\sum_{n \times n})} = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \tag{3}$$

onde $\text{traço}(\sum_{n \times n}) = \sum_{i=1}^n \sigma_{ii} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ e $\sigma_{ii} = Var[X_i]$, $i = 1, 2, \dots, n$

e os autovalores, λ_j , da matriz de covariância $\Sigma_{n \times n}$ representam a variância da j -ésima componente principal^{12,17,18}.

O método de Cattell¹⁴ foi empregado para escolha das n componentes mais importantes, propondo uma separação visual das componentes mais importantes das menos importantes através do *gráfico de autovalores* da matriz de covariância em função das componentes principais^{12,17,18}. O número de componentes principais importantes para descrição da variabilidade dos dados é bem menor que o número de parâmetros da base de dados original pois, a partir de certa componente limite, a variância das componentes tende a zero, sendo desnecessária a inclusão dessas componentes na nova base de dados reduzida.

RESULTADOS

O dendrograma exibido na Figura 2 mostra as estações agrupadas e o isolamento das estações AV310, Rio das Velhas a montante do Ribeirão de Água Suja, e AV320, Rio das Velhas a montante do Córrego da Mina.

A separação das estações no dendrograma reflete os resultados obtidos no monitoramento das águas dos cursos do Alto Rio das Velhas³ que apontam as melhores condições de qualidade da água, segundo o índice de qualidade das águas, IQA, e contaminação por tóxicos, CT, para a estação AV005, Rio das Velhas a montante de São Bartolomeu, enquanto as estações isoladas no dendrograma, AV310 e AV320, apresentaram os piores IQA e CT. A qualidade das águas do Ribeirão Água Suja, AV310, apresentou nível ruim nas coletas, segundo os índices CT e IQA³. A estação AV320, Rio das Velhas a montante do Córrego da Mina, apresentou IQA médio e alto índice de CT. As demais estações apresentaram valores intermediários³. O isolamento das duas últimas estações mais contaminadas no dendrograma sugere que a proximidade entre as estações reflete o grau de contaminação das águas. A proximidade da estação AV005 no dendrograma às estações AV090, Córrego Carioca a montante da cidade de Itabirito, AV170, Córrego Lagoa Grande a montante da represa das Codornas, AV100, Córrego da Onça a montante do Rio Itabirito, AV120, Córrego Moleque a montante do Rio Itabirito, e AV140, Córrego Fazenda Velha a montante do

Rio das Velhas, AV150, Ribeirão Congonhas a montante da Represa das Codornas, AV240 Córrego Seco na captação Fechos, AV290 Córrego Mutuca na captação Mutuca, barragem auxiliar e AV280 Córrego Mutuca na captação Mutuca, barragem principal, sugere contaminações mais baixas ou pouco significativas nessas estações, confirmadas pelo bom IQA e baixa CT. A estação AV340, Ribeirão da Prata a montante do Rio das Velhas apresentou IQA médio e baixa CT. As estações AV070, AV080, AV300, AV330 e AV350, agrupadas proximamente às estações AV310 e AV320, foram avaliadas como de baixa qualidade em relação aos índices IQA e CT³. A proximidade de estações no dendrograma de agrupamento indica também uma possível correlação entre elas.

Com base na análise do dendrograma de agrupamento foi investigada a correlação entre as estações mais próximas nos agrupamentos através dos gráficos de dispersão das variáveis de cada par de estações e cálculo do coeficiente de correlação de Pearson¹⁷. A linearidade indicativa da correlação entre as estações pode ser empregada para redução da base de dados, eliminando estações correlacionadas.

Na Figura 3 estão representadas as dispersões das variáveis de alguns pares de estações próximas no dendrograma: no painel A as estações AV220 e AV230, localizadas no Córrego Fechos na barragem principal e na barragem auxiliar, respectivamente, com coeficiente de correlação $r = 0,96$; no painel B as estações AV240, localizada no Córrego Seco na captação Fechos e AV290, localizada no Córrego Mutuca na captação Mutuca, barragem auxiliar, com $r = 0,90$; no painel C as estações AV240 e AV280 localizadas na barragem principal do Córrego Mutuca na captação Mutuca com $r = 0,61$; e no painel D as estações AV280 e AV290 com $r = 0,75$. As estações AV260 e AV270 localizadas no Rio das Velhas em Bela Fama na alça direita e na alça esquerda respectivamente também estão correlacionadas, com $r = 0,86$. É possível eliminar da amostragem algumas das estações correlacionadas empregando-se um critério de seleção, como os valores de IQA, CT e o valor de r acima do mínimo 0,8, por exemplo. Sugere-se assim a eliminação das estações AV220 e AV240 por apresentarem melhores índices de qualidade das águas em relação às respectivas estações correlacionadas, reduzindo a rede de monitoramento do Alto Rio das Velhas. A estação AV280, apesar de correlacionada com a estação AV290, apresentou valor de $r = 0,61$ com a estação AV240 e por isso deve ser mantida no monitoramento da rede de abastecimento doméstico. As estações AV260 e AV270, com $r = 0,86$ e IQA de médio a ruim, devem também ser mantidas.

O método de Cattell, aplicado aos autovalores da matriz de covariância para as 10 primeiras componentes principais apresentadas na Figura 4, mostra que a partir da quarta componente os autovalores tendem para valores menores que 1,5, valor considerado pouco significativo, mostrando que as 4 primeiras componentes principais são as mais importantes. As proporções das variâncias totais dessas 4 componentes principais são 44, 19, 10 e 7%, respectivamente. Essas componentes somadas explicam 80% da variabilidade dos dados.

As contribuições dos 6 parâmetros mais importantes nas 4 primeiras componentes principais estão representadas na Figura 5. Na componente 1 os parâmetros com maior peso são nitrogênio amoniacal, nitritos, K, Na, nitratos e condutividade; na componente 2, são fósforo, estreptococos, coliformes fecais, surfactantes DBO e DQO; na componente 3, são bário, turbidez, ferro total, sólidos em suspensão, temperatura do ar e cor e na componente 4, são pH lab, pH loco, cor, ferro solúvel, temperatura do ar e alcalinidade. Os demais parâmetros estão correlacionados com aqueles presentes nas componentes principais mais importantes. Por exemplo, os teores de arsênio estão correlacionados com DBO, DQO, surfactantes, fósforo, nitrogênio amoniacal, alcalinidade, nitratos, coliformes fecais,

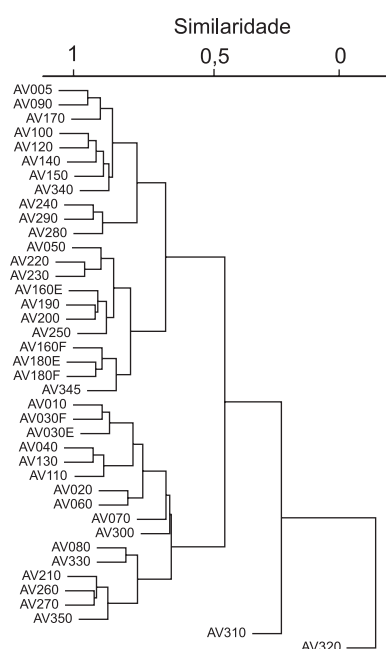


Figura 2. Dendrograma indicando as estações separadas em grupos e o isolamento das estações AV310 e AV320

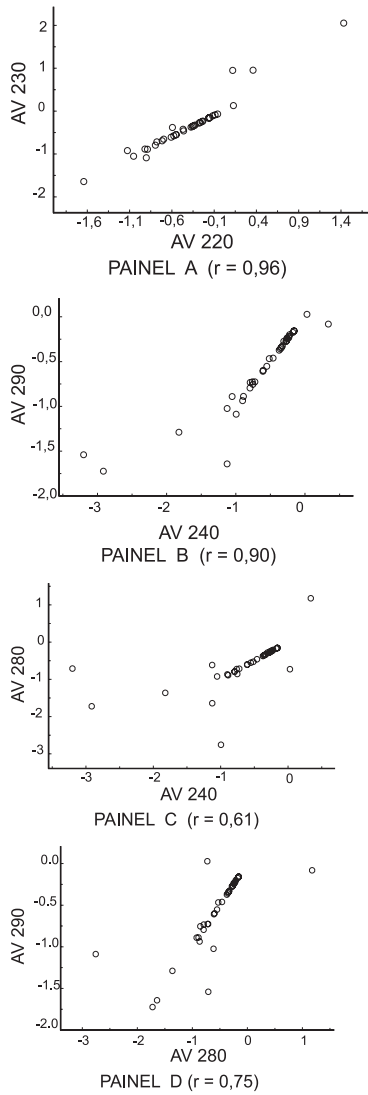


Figura 3. Dispersões das variáveis de pares de estações próximas no dendrograma: painel A, estações AV220 e AV230; painel B, estações AV240, AV290; painel C, estações AV240 e AV280; painel D, estações AV280 e AV290. Os valores de r correspondem ao coeficiente de correlação de Pearson

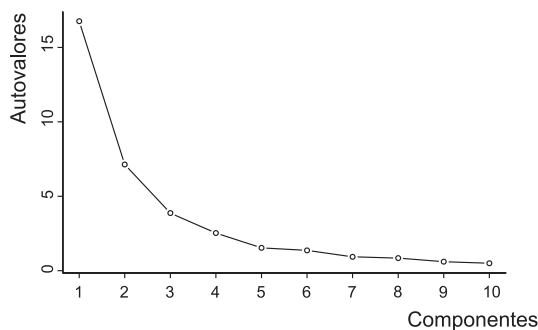


Figura 4. Gráfico de autovalores da matriz de covariância para 10 componentes principais da base de dados. Quatro componentes principais descrevem 80% da variabilidade dos dados

Na e K, presentes nas componentes 1 e 2. Os parâmetros mais importantes nas componentes 1 e 2 são característicos de efluentes domésticos e industriais, indicando contaminação por estes efluentes nas águas do Alto Curso do Rio das Velhas.

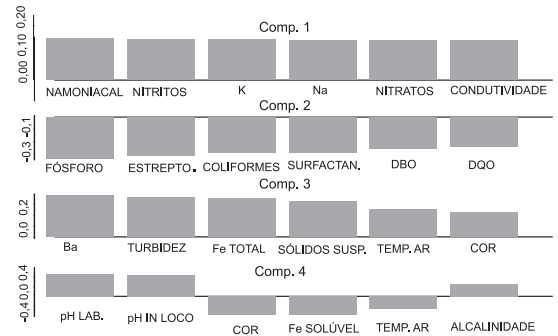


Figura 5. As contribuições dos 6 parâmetros mais importantes nas 4 primeiras componentes principais

Representando graficamente os escores e os pesos (“loadings”) de cada parâmetro nas componentes principais é possível avaliar a importância desses parâmetros e das estações na base de dados. Na Figura 6 estão representados por vetores os pesos de cada parâmetro nas componentes principais 1 e 2 e simultaneamente os escores de cada medida em um gráfico “biplot”, onde pesos e escores foram escalonados por métodos convencionais^{5,14,17,19}. Quanto mais paralelo é o vetor de peso ao eixo da componente principal maior é a importância do parâmetro correspondente. Novamente é observada a nítida separação das estações AV310 e AV320 das demais, como na análise de agrupamentos. Observa-se também uma distinção das estações AV300, Córrego da Barragem Nova Lima, e AV330, Rio das Velhas a jusante do Córrego da Mina das estações restantes.

A proximidade das estações ao vetor de peso de cada parâmetro monitorado reflete a importância do parâmetro na separação das estações. Pode-se observar que a separação da estação AV320 se deve principalmente aos parâmetros fluoretos, dureza Mg, sulfatos, condutividade, sólidos dissolvidos, dureza Ca, Ni, Cu, Se, nitritos, Na, K, Zn, Mn, nitratos e N amoniacal, que apresentam correlação negativa com o parâmetro oxigênio dissolvido. Estes parâmetros caracterizam os impactos causados por lançamento de esgoto sem tratamento e atividades minerárias. A separação da estação AV310 deve-se principalmente à alcalinidade, As, DBO, DQO, fenóis, surfactantes, coliformes fecais, estreptococos, fósforo, turbidez, ferro solúvel, ferro total, que apresentam correlação negativa com o

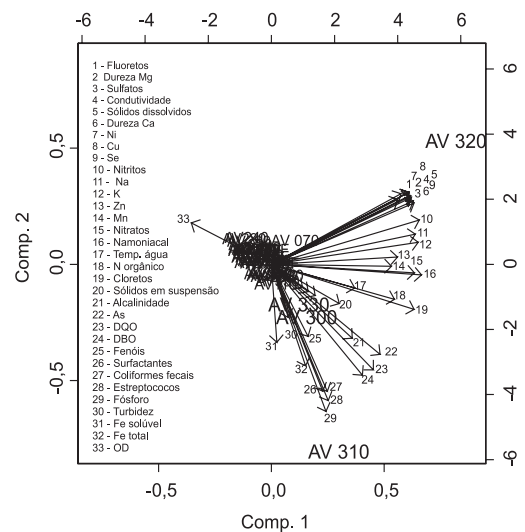


Figura 6. Gráfico “biplot” de escores e pesos (“loadings”) para as duas primeiras componentes principais para todas as estações da rede de monitoramento do alto curso do Rio das Velhas. Escala de escores no intervalo de -1 a +1 e escala de pesos no intervalo de -6 a +6

parâmetro oxigênio dissolvido. Os parâmetros que distinguem a estação AV310 são justificados pelos impactos dos lançamentos, tanto de origem doméstica quanto industrial e minerária, provenientes do município de Nova Lima.

A análise de componentes também foi realizada separadamente nas matrizes formadas pelas estações que compõem cada um dos três grupos de estações da rede de monitoramento, a *rede básica*, a *rede dirigida para controle da poluição* e a *rede dirigida para o abastecimento doméstico*, buscando caracterizá-las nos seus respectivos grupos. O gráfico "biplot" de escores e pesos de cada parâmetro para as duas primeiras componentes principais para as estações da *rede básica*, AV005, AV010, AV030, AV040, AV050, AV080, AV110, AV130, AV160, AV180, AV200, AV210, AV330, AV340, AV345 e AV350 é mostrado na Figura 7.

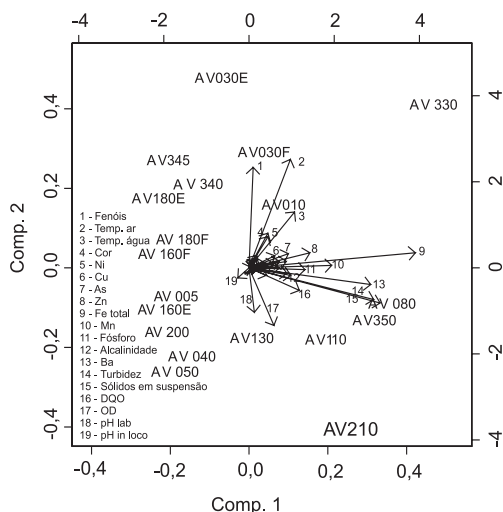


Figura 7. Gráfico "biplot" de escores e pesos ("loadings") para as duas primeiras componentes principais para as estações da rede básica, constituída das estações AV005, AV010, AV030, AV040, AV050, AV080, AV110, AV130, AV160, AV180, AV200, AV210, AV330, AV340, AV345 e AV350. Escala de escores no intervalo de $-0,4$ a $+0,6$ e escala de pesos no intervalo de -4 a $+5$

Entre as estações que compõem a *rede básica*, a estação AV080, Rio Itabirito a montante de Itabirito, AV350, Rio das Velhas a montante do Ribeirão Sabará, AV110, Rio Itabirito a jusante do Córrego do Onça, AV210, Rio das Velhas a jusante de Rio Acima, e AV330, Rio das Velhas a jusante do Córrego da Mina foram caracterizados os parâmetros Zn, ferro total, Mn, Ba, sólidos em suspensão e turbidez, que caracterizam atividades de mineração. As estações AV030E e AV030F foram discriminadas por parâmetros como fenóis e temperatura da água e do ar e cor. As inconformidades verificadas em relação aos índices de fenóis estão relacionadas à descarga de esgotos sanitários e efluentes industriais nas proximidades dessa estação. A estação AV130, Rio das Velhas a jusante do Rio Itabirito, apresenta discriminação pelo parâmetro oxigênio dissolvido, refletindo na melhor qualidade da água nessa estação. As demais estações que compõem a rede básica não apresentaram parâmetros que as discriminassem.

O gráfico "biplot" de escores e pesos de cada parâmetro para as duas primeiras componentes principais para as estações da *rede dirigida para controle da poluição*, constituída das estações AV020, AV060, AV070, AV090, AV100, AV120, AV140, AV150, AV170, AV190, AV250, AV300, AV310 e AV320 é mostrado na Figura 8.

A análise de componentes principais com as estações que compõem a *rede dirigida para o controle de poluição* apresenta distinta separação das estações extremamente poluídas AV310 e AV320. Essas estações são discriminadas por parâmetros que caracterizam

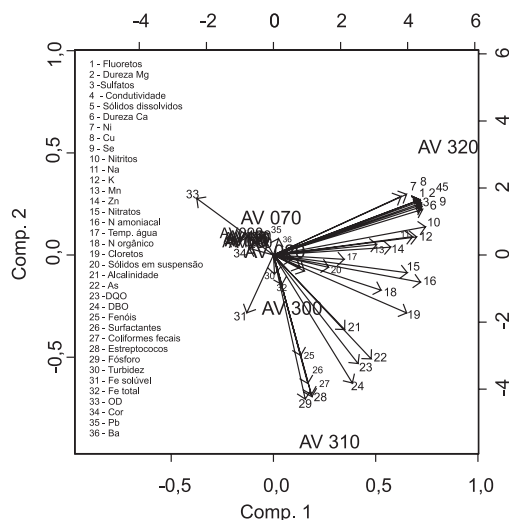


Figura 8. Gráfico "biplot" de escores e pesos ("loadings") para as duas primeiras componentes principais para as estações da rede dirigida para controle da poluição, constituída das estações AV020, AV060, AV070, AV090, AV100, AV120, AV140, AV150, AV170, AV190, AV250, AV300, AV310 e AV320. Escala de escores no intervalo de -1 a $+1$ e escala de pesos no intervalo de -6 a $+6$

rejeitos de mineração e também de poluição doméstica e industrial. Como os índices de contaminação dessas duas estações são bem superiores aos das demais, não é possível determinar os parâmetros que caracterizam as demais estações da rede de controle de poluição. Para essa finalidade, uma nova análise foi realizada excluindo as estações AV310 e AV320. O novo gráfico "biplot" de escores e pesos para esse subgrupo de estações é mostrado na Figura 9.

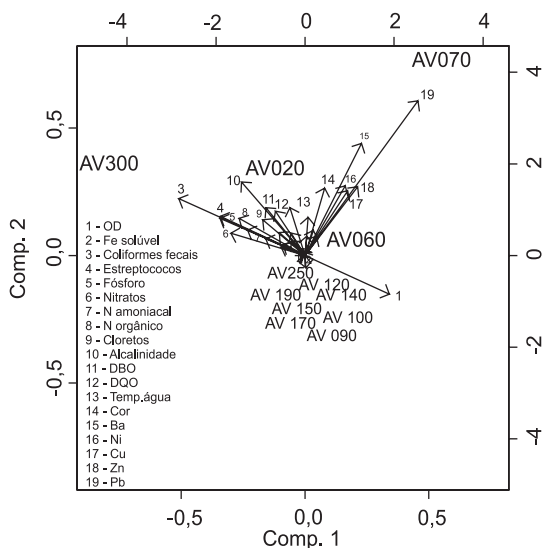


Figura 9. Gráfico "biplot" de escores e pesos ("loadings") escalonados para as duas primeiras componentes principais para as estações da rede dirigida para controle da poluição, excluindo as estações AV310 e AV320. Escala de escores no intervalo de -1 a $+1$ e escala de pesos no intervalo de -5 a $+4$

Nessa análise é observada a discriminação das estações AV070, Ribeirão Mata Porcos, próximo de sua confluência com o Ribeirão Sardinha, caracterizada pelos parâmetros Pb, Ba, Ni, Zn e cor, característicos de atividades de mineração. Próximo a este ponto, a estação AV060, Ribeirão Carioca a montante da confluência do Ribeirão Mata Porcos também é distinguida pelos mesmos parâmetros, evidenciando a influência de rejeitos de mineração. A estação AV300, Córrego da

Barragem em Nova Lima, é discriminada pelos parâmetros coliformes fecais, estreptococos, fósforo, nitratos, nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico e cloretos provenientes de efluentes sanitários. A estação AV020, Rio Maracujá a montante da confluência do Córrego dos Padres, foi caracterizada pelos parâmetros alcalinidade, DBO e DQO, também característicos de efluentes sanitários. As demais estações são discriminadas pelo parâmetro oxigênio dissolvido, característico de água de boa qualidade.

O gráfico “biplot” de escores e pesos de cada parâmetro para as 2 primeiras componentes principais para as estações da *rede dirigida para abastecimento doméstico*, constituída das estações AV220, AV230, AV240, AV260, AV270, AV280 e AV290 é mostrado na Figura 10.

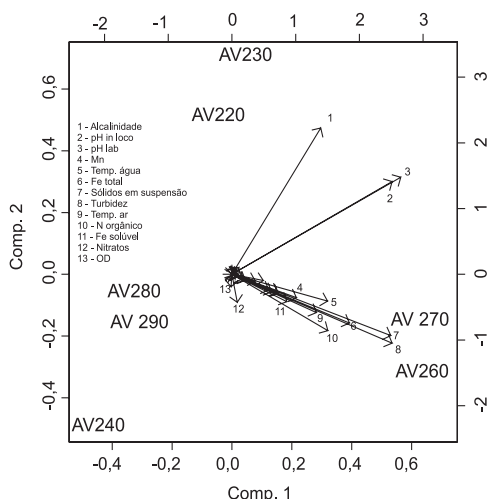


Figura 10. Gráfico “biplot” de escores e pesos (“loadings”) para as duas primeiras componentes principais para as estações AV220, AV230, AV240, AV260, AV270, AV280 e AV290, que constituem a rede dirigida para abastecimento doméstico. Escala de escores no intervalo de -0,6 a +0,8 e escala de pesos no intervalo de -2,5 a +3,5

Para as estações que compõem a *rede dirigida ao abastecimento doméstico*, as estações AV260, Rio das Velhas em Bela Fama (alça direita), e AV270, Rio das Velhas em Bela Fama (alça esquerda), são discriminadas pelos parâmetros sólidos em suspensão, turbidez e Fe total, característicos de efluentes de mineração. As estações AV220, Córrego dos Fechos na barragem principal, e AV230, Córrego dos Fechos na barragem auxiliar são discriminadas pelos parâmetros alcalinidade e pH. A discriminação por esses parâmetros não é considerada relevante, uma vez que essas estações apresentaram excelente IQA e baixa contaminação por tóxicos³. As estações AV240, AV280 e AV290 não são discriminadas por nenhum parâmetro de poluição, estando entre as menos poluídas da rede de abastecimento.

Com base na variabilidade explicada pelas componentes principais, foram avaliados os agrupamentos das estações considerando-se apenas os principais parâmetros de cada uma das quatro componentes principais mais importantes, ou seja, nitrogênio amoniacal, nitritos, K, Na, nitratos, condutividade; fósforo, estreptococos, coliformes fecais, surfactantes, DBO, DQO, bário, turbidez, ferro total, sólidos em suspensão, temperatura do ar, cor, pH lab, pH *in loco*, ferro solúvel e alcalinidade, somando 22 parâmetros. O dendrograma obtido é mostrado na Figura 11.

A redução de parâmetros não produziu alterações significativas nos agrupamentos das estações por similaridade. Esta observação permite concluir que a caracterização e avaliação das estações poderiam ser realizadas apenas com o monitoramento destes parâmetros mais importantes.

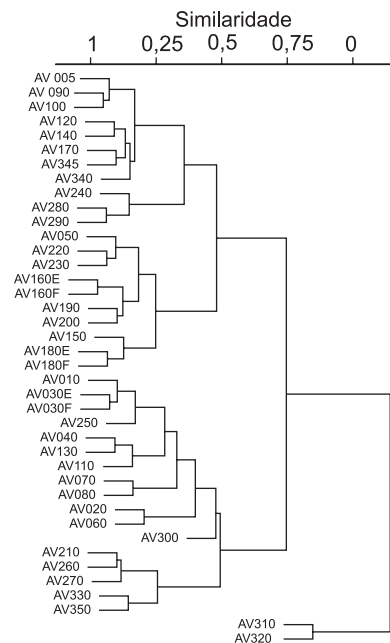


Figura 11. Dendrograma obtido na análise com os 22 principais parâmetros de cada uma das quatro componentes principais mais importantes, ou seja, nitrogênio amoniacal, nitritos, K, Na, nitratos, condutividade, fósforo, estreptococos, coliformes fecais, surfactantes, DBO, DQO, bário, turbidez, Fe total, sólidos em suspensão, temperatura do ar, cor, pH laboratorial, pH *in loco*, ferro solúvel e alcalinidade. A estação AV005 apresentou o melhor índice de qualidade da água e baixa contaminação por tóxicos³

Uma nova tabela de parâmetros a serem analisados pode ser proposta com base nos parâmetros mais importantes na discriminação das estações, selecionados a partir da análise de componentes principais e dos seus respectivos teores medianos. Os parâmetros considerados são nitrogênio amoniacal, nitritos, K, Na, nitratos, condutividade; fósforo, estreptococos, coliformes fecais, surfactantes, DBO, DQO, bário, turbidez, ferro total, sólidos em suspensão, temperatura do ar, cor, pH laboratorial, pH *in loco*, cor, ferro solúvel e alcalinidade. Os parâmetros pH laboratorial e pH *in loco* são empregados para controle e evidência de conservação das amostras. Eles devem conter a mesma informação, o que fica evidente no tratamento estatístico.

CONCLUSÃO

O tratamento estatístico dos dados de monitoramento da qualidade da água na região do Alto Curso do Rio das Velhas mostrou que apenas 22 parâmetros de qualidade descrevem as 4 componentes principais mais importantes, explicando 80% da variabilidade dos dados. Entre os principais parâmetros estão presentes variáveis que caracterizam impacto causado pelo lançamento de esgoto sanitário, como nitrogênio amoniacal, nitratos, nitritos, fósforo, estreptococos, coliformes fecais, DBO e DQO. Esta observação nos permite concluir que o principal impacto causado no Alto Curso do Rio das Velhas é atribuído à falta de saneamento básico.

Alguns parâmetros característicos de efluentes de mineração, sólidos em suspensão, turbidez, Fe total, estão entre os mais importantes, evidenciando o impacto ambiental causado por essa atividade na região.

Foi observada a correlação entre pares de algumas estações da rede dirigida para o abastecimento, o que recomenda a eliminação de uma das estações correlacionadas, reduzindo o número de esta-

ções nesse grupo em futuro monitoramento. Um critério foi estabelecido, eliminando as estações que apresentam melhores valores de IQA e CT em relação às suas respectivas estações correlacionadas.

As estações AV240, AV280 e AV290 não são discriminadas por nenhum parâmetro, estando entre as de águas de melhor qualidade da rede dirigida para o abastecimento. As estações AV260 e AV270, localizadas no Rio das Velhas em Bela Fama nas alças direita e esquerda, respectivamente, são distinguidas pelos parâmetros sólidos em suspensão e turbidez, característicos de atividades minerárias e são as mais contaminadas desse grupo. Essas estações são importantes no abastecimento da cidade de Belo Horizonte e sua contaminação aumenta o custo do tratamento da água.

Nas estações da rede dirigida para o controle da poluição destacam-se as estações AV310, Rio das Velhas a montante do Ribeirão de Água Suja, e AV320, Rio das Velhas a montante do Córrego da Mina, como as águas de pior qualidade de toda a rede de monitoramento. A situação dessas estações exige medidas urgentes de saneamento. Por outro lado, a análise estatística destacou as estações onde a qualidade da água é melhor, particularmente a estação AV005, Rio das Velhas a montante de São Bartolomeu.

A avaliação das principais variáveis responsáveis pelo agrupamento das estações permitiu a preparação de um novo mapa de monitoramento de parâmetros de controle de poluição a ser empregado em futuro monitoramento do Alto Curso da Bacia do Rio das Velhas.

AGRADECIMENTOS

Ao Ministério do Meio Ambiente que financiou o projeto de monitoramento da bacia do Alto Curso do Rio das Velhas (PNMAII), à FAPEMIG pelo apoio financeiro e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas pela disponibilização dos dados para publicação.

REFERÊNCIAS

1. Fundação Estadual do Meio Ambiente, *Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais em 1997*, Belo Horizonte, 1998; *Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais em 1998*, Belo Horizonte, 1999; *Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais em 2000*, Belo Horizonte, 2001. (Projeto: Águas de Minas - Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais).
2. Instituto Mineiro de Gestão das Águas; *Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio São Francisco em 2001 – Sub-Bacia do Rio das Velhas*, Belo Horizonte, 2002; *Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio São Francisco em 2002 – Sub-Bacia do Rio das Velhas*, Belo Horizonte, 2003; *Relatório de monitoramento das águas superficiais na Bacia do Rio São Francisco em 2003 – Sub-Bacia do Rio das Velhas*, Belo Horizonte, 2004.
3. Belo Horizonte: Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais; *Aperfeiçoamento do monitoramento da qualidade das águas da Bacia do Alto Curso do Rio das Velhas*, 2003, (Relatório 1 - Marco Zero); *Aperfeiçoamento do monitoramento da qualidade das águas da Bacia do Alto Curso do Rio das Velhas*, 2004, (Relatório 2 – Avaliação dos Resultados do ano de 2003).
4. Einax, J. W.; Truckenbrodt, D.; Kampe K.; *Microchem. J.* **1998**, *58*, 315.
5. Aruga, R.; Negro, G.; Ostacoli, G.; *Fresenius J. Anal.* **1993**, *346*, 968.
6. Vasquez, A.; Costoya, M.; Peña, R. M.; Garcia, S.; Herrero, C.; *Chemosphere* **2003**, *51*, 375.
7. Guimarães, A. P.; *Paisagem física do Rio das Velhas*, UFMG/IGC: Belo Horizonte, 1953.
8. Conselho Estadual de Política Ambiental, Deliberação Normativa COPAM N° 10/86. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas e dá outras providências. Minas Gerais, Belo Horizonte, jan. 1987.
9. American Public Health Association; *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 19th ed., APHA: Washington, 1995.
10. Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR 10560/1988, NBR 10740/1989, NBR 10664/1989, NBR 10738/1989 e NBR 12614/1992.
11. Smolinski, A.; Walkzak, B.; Einax, J.W.; *Chemom. Intell. Lab. Syst.* **2002**, *64*, 45.
12. Mingoti, S. A.; *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*, 1^a ed., Editora UFMG: Belo Horizonte, 2004.
13. Martens, H.; Naes, T.; *Multivariate Calibration*, John Wiley and Sons: Chichester, 1989.
14. Matthias, O.; *Chemometrics: statistics and computer application in analytical chemistry*, Wiley – VCH: Weinheim, 1999.
15. Forina, M.; Armanino, C.; Raggio, V.; *Anal. Chim. Acta* **2002**, *454*, 13.
16. *Advanced Data Analysis Software- S-PLUS*, MathSoft Inc., Seattle, 1995.
17. *S-PLUS 4 Guide to Statistics*, Data Analysis Product Division, MathSoft, Seattle, 1997.
18. Johnson, R. A.; *Applied Multivariate Statistical Analysis*, 4th ed., Prentice-Hall: Upper Saddle River, 1998.
19. Gabriel, K. R.; *Biometrika* **1971**, *453*, 58.