IV-073 - CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DAS SUB-BACIAS DO RIO SÃO FRANCISCO, NO ESTADO DE MINAS GERAIS: identificação da sub-bacia mais impactada

Ana Laura Cerqueira Trindade[(1)]
Bióloga pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG.
Katiane Cristina de Brito Almeida
Bióloga pela PUC de Minas Gerais e Curso de Especialização em Meio Ambiente e Gestão de Recursos Hídricos pelo CEFET - MG. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG. Analista Ambiental no Instituto Mineiro de Gestão das Águas – MG, atualmente é coordenadora do Programa Águas de Minas.
Pedro Engler Barbosa
Graduando de Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais. Bolsista de iniciação científica da FAPEMIG no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG).
Maria Flávia Pires Barbosa
Bacharel em Turismo e Mestre em Geografia pelo Instituto de Geociência da Universidade Federal de Minas Gerais.
Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira[(2)]
Engenheira Eletricista, Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da UFMG.

Endereço[(1)]**:** Av. Antônio Carlos, 6.627 - Campus Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901- Brasil – Tel: +55 (31) 3409-3645 – Fax: +55 (31) 3409-1882 - email: alauract@hotmail.com; [(2)]silvia@desa.ufmg.br.

RESUMO

Programas regulares de monitoramento da qualidade das águas são essenciais para a adequada gestão dos recursos hídricos, porém eles geram um complexo conjunto de dados, muitas vezes difíceis de interpretar e analisar para se concluir quais ações devem ser tomadas. Técnicas estatísticas multivariadas surgem como alternativas eficientes para extrair informações desses dados. O objetivo geral dessa pesquisa foi analisar os dados de monitoramento da qualidade das águas superficiais da porção mineira da bacia do rio São Francisco, obtidos pelo monitoramento do Programa Águas de Minas (IGAM), para identificação da sub-bacia mais impactada entre as dez Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs) da bacia do rio São Francisco. O resultado da Análise de Cluster indicou quatro grupos de UPGRHs e os testes de Kruskal-Wallis permitiram identificar alguns parâmetros que são mais significativos para a distinção dos grupos, possibilitando identificar que as Unidades SF5 e SF10 são as sub-bacias com características que mais se destacam entre as dez UPGRHs. Foi possível confirmar a maior degradação da UPGRH SF5 (sub-bacia do rio das Velhas), tendo como critério de decisão os impactos antrópicos.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade das águas, Análise de Cluster, sub-bacias do rio São Francisco, sub-bacia rio das Velhas.

INTRODUÇÃO

O monitoramento e a avaliação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas são fatores primordiais para a adequada gestão dos recursos hídricos. Esses procedimentos permitem a caracterização e a análise de tendências em bacias hidrográficas, sendo essenciais para várias atividades, tais como planejamento, outorga, cobrança e enquadramento dos cursos de água (ANA, 2011), como também para a elaboração de estratégias importantes para o manejo sustentável do uso dos recursos hídricos (BU *et al.*, 2010). Desta forma, programas regulares de monitoramento são necessários para estimativas confiáveis da qualidade da água, tendo em vista as variações espaciais e temporais na hidroquímica de um rio.

Entretanto, o monitoramento da água por um longo período e em vários pontos de amostragem produz uma grande e complexa matriz de dados contendo um grande número de parâmetros físico-químicos, que são difíceis de interpretar para chegar a conclusões compreensíveis e significativas (SIMEONOV *et al*., 2003; ZHANG *et al*., 2011), sendo muitas vezes subutilizados. Métodos estatísticos multivariados são excelentes ferramentas exploratórias para a interpretação desses complexos conjuntos de informações, sendo algumas dessas técnicas (Análise de Cluster, Análise Discriminante e Análise de Componentes Principais/Análise Fatorial) empregadas em diversos trabalhos para alcançar diferentes objetivos (CHANG *et al*., 2008; ZHANG *et al*., 2011; ZHOU *et al*., 2007).

Em Minas Gerais, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), por meio da coordenação do Projeto Águas de Minas, é responsável pelo monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas do estado. Em execução desde 1997, o programa disponibiliza uma série histórica de dados da qualidade das águas e gera informações indispensáveis ao gerenciamento correto dos recursos hídricos (IGAM, 2011).

A pesquisa em questão buscou efetuar uma análise destes dados de monitoramento da bacia do rio São Francisco, tendo como objetivo comparar, em termos de qualidade da água, as dez Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs) que estão inseridas nessa bacia, localizadas no estado de Minas Gerais. Desta forma, foi possível identificar a UPGRH mais impactada e os fatores responsáveis por essa degradação.

METODOLOGIA

Nesse trabalho, foram analisados os dados de monitoramento do Projeto Águas de Minas, disponibilizados pelo IGAM. O banco de dados utilizado se encontra em planilhas do Microsoft Office Excel. Foi utilizado um subconjunto de dados, composto por 150 estações da Rede Básica (pontos fixos de monitoramento do IGAM), distribuídas entre as dez UPGRHs, com coletas trimestrais no período de 2008 a 2011 (Tabela 1). Foram analisados os 36 parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade da água apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: UPGRHs da bacia do rio São Francisco, seus cursos d'água principais correspondentes e o total de estações de monitoramento, considerando a Rede Básica.

UPGRH	Sub-bacia	Total de estações
SF1	Alto curso do rio São Francisco até a confluência com o Rio Pará	7
SF2	Rio Pará	25
SF3	Rio Paraopeba	30
SF4	Entorno da represa de Três Marias	17
SF5	Rio das Velhas	33
SF6	Rios Jequitaí e Pacuí	4
SF7	Rio Paracatu	8
SF8	Rio Urucaia	12
SF9	Rios Pandeiros e Calindó	7
SF10	Rio Verde Grande	7
	Total	**150**

Tabela 2: Parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade da água analisados.

Alcalinidade total (Alc_T)	Cor Verdadeira (Cor)	Oxigênio Dissolvido (OD)
Alumínio Dissolvido (Al_{diss})	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	pH in loco (pH)
Arsênio Total (As_T)	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Potássio Dissolvido (K_{diss})
Bário Total (Ba_T)	Dureza Total ($Dur._T$)	Sódio Dissolvido (Na_{diss})
Cálcio Total (Ca_T)	Fenóis Totais (Fen_T)	Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)
Chumbo Total (Pb_T)	Ferro Dissolvido (Fe_{diss})	Sólidos em Suspensão Totais (SST)
Cianeto Livre (CN^-)	Fósforo Total (P_T)	Sólidos Totais (ST)
Cloreto Total (Cl^-)	Magnésio Total (Mg_T)	Substâncias Tensoativas (MBAS)
Clorofila a (Cl-*a*)	Manganês Total (Mn_T)	Sulfato Total ($SO_4^{-2}{}_T$)
Cobre Dissolvido (Cu_{diss})	Níquel Total (Ni_T)	Temperatura da Água (T_{H2O})
Coliformes Termotolerantes (Coli. Term.)	Nitrato ($N\text{-}NO_3^-$)	Turbidez (Turb.)
Condutividade elétrica *in loco* (CE)	Nitrogênio Amoniacal Total ($N\text{-}NH_4^+{}_T$)	Zinco Total (Zn_T)

Para realizar a comparação das UPGRHs foram empregadas, primeiramente, as análises multivariadas (Análise de Cluster) utilizando as medianas trimestrais de cada parâmetro monitorado, calculadas considerando todas as estações de cada UPGRH. O uso das medianas se justifica pelo fato das Unidades de Planejamento apresentarem números muito diferentes de estações de monitoramento e, consequentemente, de coletas, e as análises multivariadas exigirem o mesmo número de dados em cada UPGRH. Assim, foram utilizadas 16 medianas trimestrais de cada parâmetro, para cada UPGRH, correspondentes aos quatro anos – 2008-2011 – com quatro trimestres cada. Ressalta-se que a utilização das medianas neste tipo de análise é reportada por diversos autores que efetuaram trabalhos semelhantes ao apresentado nesta pesquisa (CHRISTOFARO, 2009; FRANÇA *et al*., 2009; OUYANG, 2005). Também, foi necessário padronizar as medianas, transformando-as em escala Z (média 0 e desvio padrão 1: $Z=(X - \mu)/\sigma$), a fim de se evitar interferências no resultado devido às diferentes unidades e ordens de grandeza dos parâmetros.

A Análise de Cluster (AC) com ligação completa foi realizada para agrupar, em função do nível de similaridade, as UPGRHs da bacia do rio São Francisco, levando em consideração os dados físico-químicos e microbiológicos do monitoramento da qualidade da água.

Em busca de explicações para os agrupamentos encontrados na AC, foram realizados testes de Kruskal-Wallis, comparando, inicialmente, os agrupamentos e, depois, cada uma das UPGRHs separadamente, com o objetivo de identificar os parâmetros responsáveis pelas diferenças e semelhanças encontradas na AC. Foram utilizados, para apoio das ferramentas estatísticas, os gráficos box-plots, que permitem uma melhor visualização das diferenças entre cada sub-bacia, considerando todos os parâmetros selecionados. Todas as análises citadas acima foram realizadas no software Statistica 8.0.

A partir da análise dos resultados, as comparações permitiram determinar a sub-bacia mais impactada na bacia do rio São Francisco.

RESULTADOS

O banco de dados original utilizado para o desenvolvimento da pesquisa continha, a princípio, 150 estações da Rede Básica, com coletas trimestrais compreendidas entre os anos 2008 e 2011, possuindo 2.383 coletas e 101.052 observações, distribuídas entre as dez UPGRHs. No entanto, para o emprego das análises multivariadas foi necessário elaborar um novo banco de dados, contendo apenas as 16 medianas trimestrais (quatro anos com quatro trimestres cada) de cada um dos 36 parâmetros analisados, para cada UPGRH, totalizando 5760 observações.

Para comparar as UPGRHs foi utilizada a Análise de Cluster com o objetivo de identificar quais sub-bacias apresentavam maiores similaridades entre si. A distância Euclidiana foi usada para medir a ligação dos agrupamentos. O resultado do agrupamento encontra-se apresentado no dendograma da Figura 1.

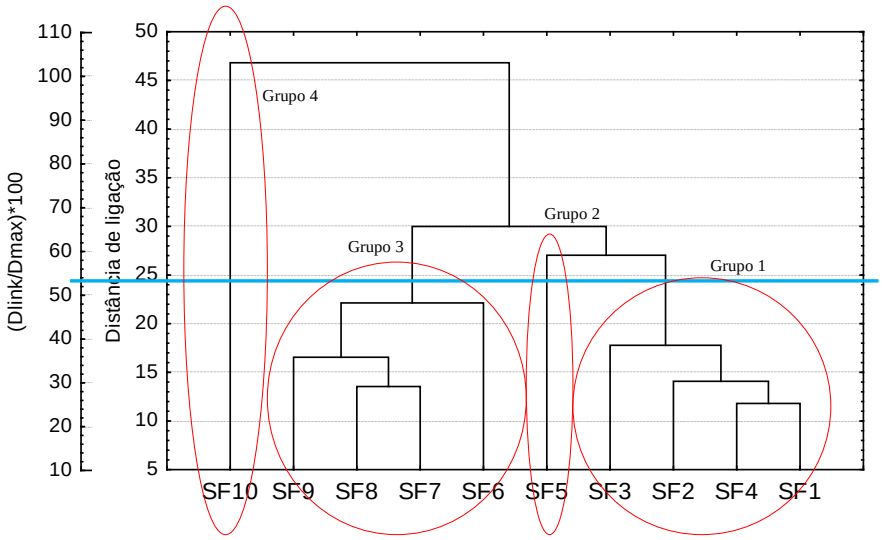

Figura 1: Dendograma da Análise de Cluster para o banco de dados de medianas do período de 2008 a 2011: 150 estações, quatro anos de série histórica e 36 parâmetros.

Para determinar o corte no gráfico que determina o número de grupos formados pela AC, procedeu-se como recomendado por Vicini, 2005, sendo traçada, então, uma linha de corte na distância Euclidiana 24,59. É possível visualizar quatro agrupamentos na Figura 1. O Grupo 1 é formado pelas Unidades SF1, SF2, SF3 e SF4 e o Grupo 3 pelas Unidades SF6, SF7, SF8 e SF9. Tais agrupamentos são condizentes com a localização das sub-bacias, refletindo também a sua proximidade geográfica (Figura 2). A UPGRH SF5, que se refere à Unidade do rio das Velhas, uma sub-bacia sabidamente impactada e que possui características que a distingue das demais, com alta densidade populacional e nível de industrialização (IGAM, 2010a; POMPEU *et al.*, 2005; TRINDADE *et al.*, 2012), pode ser considerada um grupo, assim como a Unidade SF10 (sub-bacia do rio Verde Grande), completamente isolada das demais. Isso mostra que essas duas UPGRHs (SF5 e SF10) se diferenciam e se destacam em relação às demais, sendo necessário investigar as causas deste comportamento.

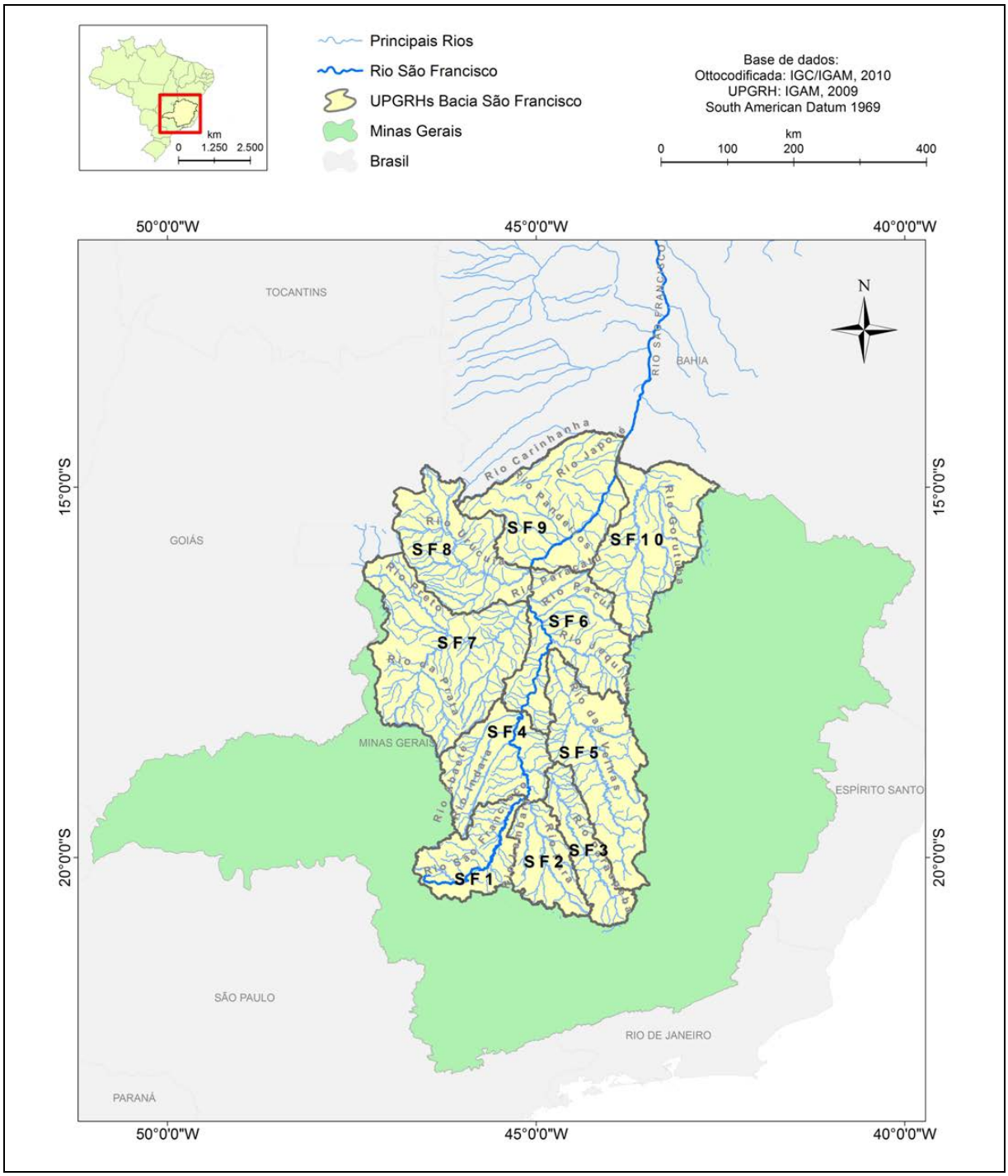

Figura 2: Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs) da bacia do rio São Francisco em Minas Gerais.

Foi realizado, então, o teste Kruskal-Wallis dos 36 parâmetros estudados, para identificar os parâmetros que se diferenciam estatisticamente entre os agrupamentos. A um nível de significância de 5%, as medianas dos parâmetros Alc_T, As_T, Ca_T, Cl^-_T, Cl-*a*, Cu_{diss}, Coli. Term., CE, DBO, DQO, $Dur._T$, Fe_{diss}, P_T, Mg_T, Mn_T, Ni_T. $N\text{-}NO_3^-$, $N\text{-}NH_4^+{}_T$, OD, pH, K_{diss}, Na_{diss}, SDT, ST, $SO_4^{-2}{}_T$, T_{H2O} e Zn_T apresentaram diferenças entre os quatro grupos de sub-bacias. Com esses 27 parâmetros, foi realizado um novo teste Kruskal-Wallis, agora comparando todas as dez UPGRHs separadamente, utilizando-se os dados de todas as coletas, não mais as medianas. Da mesma forma que esses parâmetros são significativos para distinguir os quatro grupos da AC, eles são também importantes para encontrar diferenças entre as UPGRHs ($p<0,05$).

Analisando os box-plots desses parâmetros (alguns apresentados na Figura 3), por UPGRH, é possível perceber que as sub-bacias SF5 e SF10 apresentam concentrações superiores às demais Unidades, a saber:

SF5: As_T, Coli. Term., DBO, P_T, Mn_T, $N\text{-}NO_3^-$, $N\text{-}NH_4^+{}_T$
SF10: Alc_T, Ca_T, Cl^-_T, Cl-*a*, CE, $Dur._T$, Mg_T, OD, K_{diss}, Na_{diss}, SDT, $SO_4^{-2}{}_T$

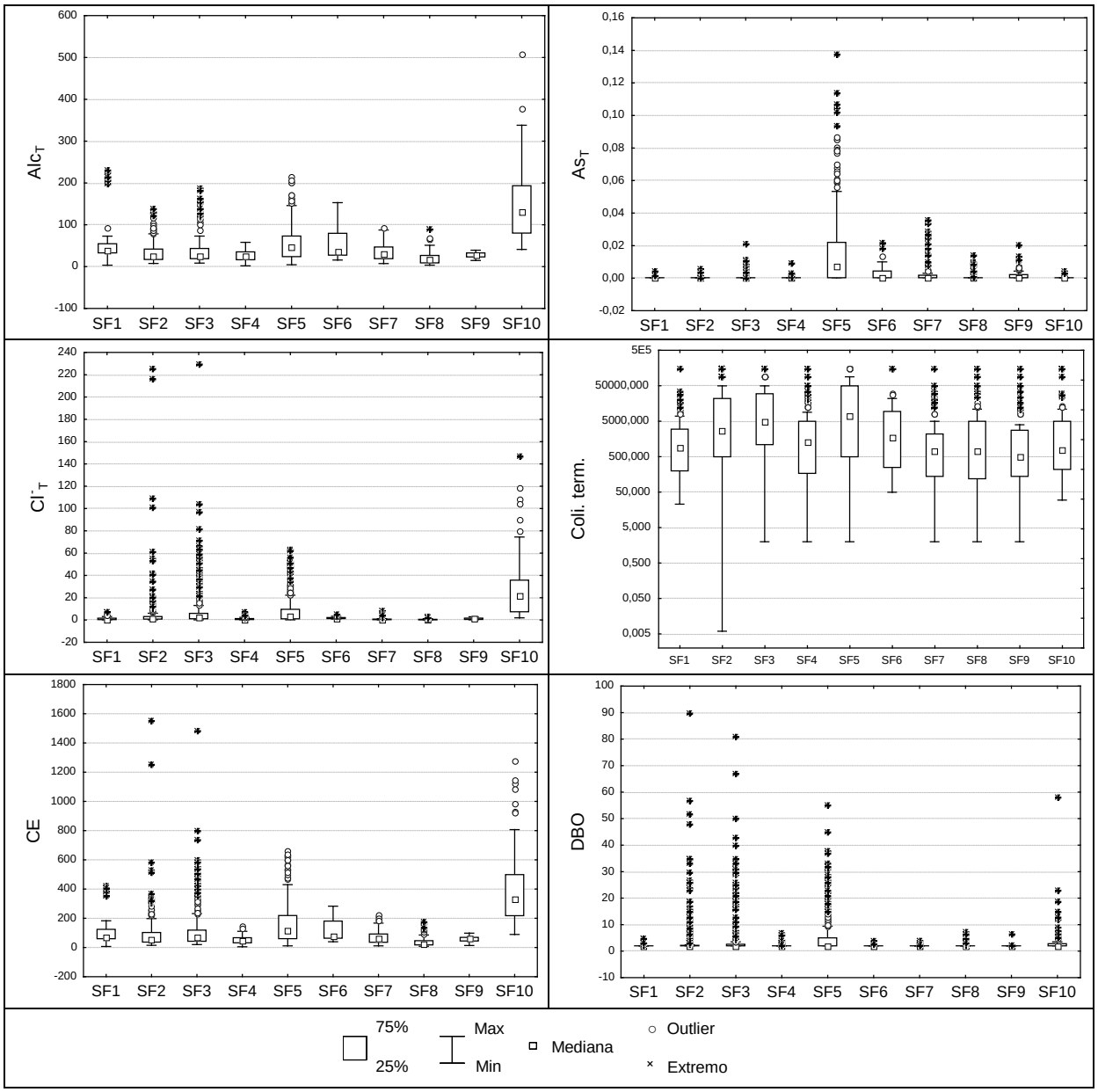

Figura 3: Box-plot de alguns parâmetros significativos para distinção entre as UPGRHs.

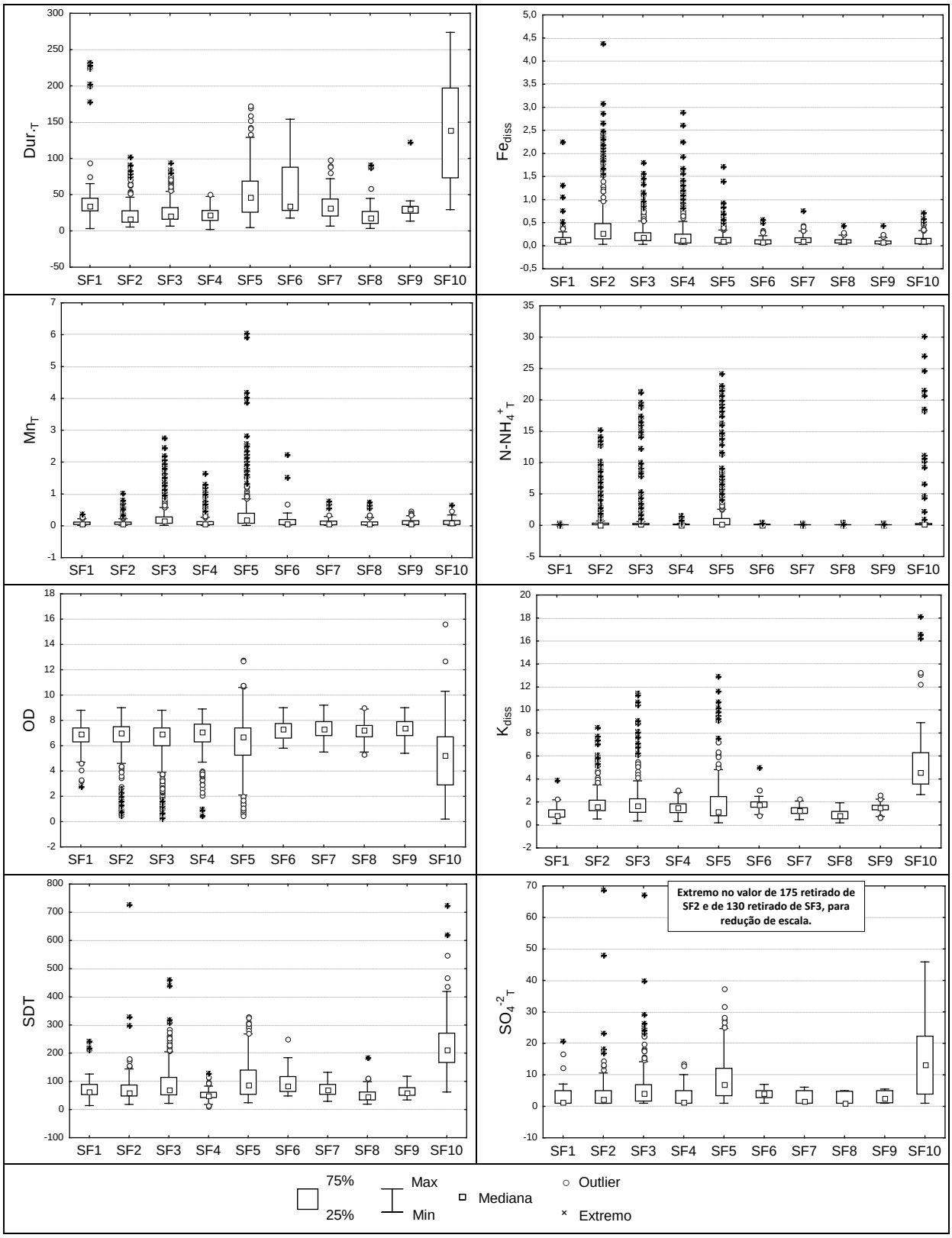

Figura 3: Box-plot de alguns parâmetros significativos para distinção entre as UPGRHs (continuação).

Observando os resultados das análises estatísticas (AC, Kruskal-Wallis e box-plots), percebe-se que a Unidade SF10 se encontra completamente isolada na AC por possui características diferentes, principalmente associadas aos parâmetros relacionados com características intrínsecas da sub-bacia, condições naturais como sais e íons

dissolvidos, e que podem ser justificados por tipo de solo, geologia, intemperismos e cargas difusa. Ouyang (2005) considera Alcalinidade, Salinidade, Cálcio e Magnésio como parâmetros relacionados a minerais, sendo interpretados como representantes da influência de fontes naturais. Apesar das características geológicas dessa UPGRH, com rochas calcárias, sedimentos arenosos e feições cársticas (ANA, 2011b), explicarem em grande parte o destaque da Unidade SF10 para os 12 parâmetros citados acima, há que se considerar também a influência de ações antrópicas, como os efluentes domésticos e industriais, principalmente na área de influência do município Montes Claros (IGAM, 2010a).

Já a UPGRH SF5 se destaca por contaminação orgânica, com valores de Coli. Term., DBO, $N\text{-}NO_3^-$, $N\text{-}NH_4^+{}_T$, parâmetros associados à poluição por efluentes, maiores que nas demais Unidades. Em relação ao Arsênio, os valores mais elevados podem ser explicados pela liberação natural desse elemento presente nas rochas, reflexo da ampla distribuição de Arsênio no Quadrilátero Ferrífero (BORBA *et al*., 2000) e das atividade minerárias. As fontes de Arsênio na sub-bacia do rio das Velhas concentram-se em seu alto curso, que é uma região cuja importância econômica advém das explorações de minério de ferro, ouro e gemas (IGAM, 2010b). Segundo Pompeu *et al*. (2005), as fontes mais importantes de poluição nessa Unidade SF5 estão localizadas no alto curso do rio das Velhas, onde são lançados os rejeitos de mineração e a maior parte dos efluentes domésticos e industriais da Região Metropolitana de Belo Horizonte

É possível observar que as sub-bacias SF2 e SF3 também apresentam valores elevados para Coli. Term., DBO e $N\text{-}NH_4^+{}_T$, o que pode justificar a aproximação dessas UPGRHs à Unidade SF5 no dendograma da Figura 1, além de se destacarem para o parâmetro Fe_{diss}. As UPGRHs SF7, SF8 e SF9 são as menos impactadas, não se destacando para nenhum parâmetro, e a SF6 possui uma qualidade de água intermediária entre interferências antrópicas e condições naturais da sub-bacia.

CONCLUSÕES

Conforme apontam os resultados, as UPGRHs SF5 e SF10 são as que apresentam maiores diferenças em relação às demais. A SF10 é diferente pelas suas condições naturais enquanto a SF5 se destaca pela contaminação orgânica.

Em termos de impactos ambientais relacionados com as atividades antrópicas, a sub-bacia do rio das Velhas (SF5) pode ser considerada a mais impactada da bacia do rio São Francisco, já que apresenta o maior contingente populacional e a mais expressiva atividade econômica. Estes impactos estão concentrados, principalmente, na Região Metropolitana de Belo Horizonte, que apresenta os maiores focos de poluição de toda a bacia.

Ainda que a degradação da sub-bacia do rio das Velhas seja largamente alardeada pelos órgãos de fiscalização e pelos pesquisadores da área ambiental, a realização de estudos que utilizam metodologias criteriosas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas é importante para corroborar os resultados das pesquisas efetuadas e, principalmente, para aumentar o conhecimento da evolução da qualidade da água na área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) por terem disponibilizados os dados e viabilizado essa pesquisa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pelo apoio permanente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. *Portal da Qualidade das Águas*. Disponível em < http://pnqa.ana.gov.br/rede/rede_avaliacao.aspx>. Acesso em: 01 jul. 2011.
2. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande* (versão para discussão na CTC). 2011b. Relatório Síntese. Disponível em: < http://www.verdegrande.cbh.gov.br/planobacia/20110225_PRHVerdeGrandeRelatorioSintese.pdf>.
3. BORBA, Ricardo Perobelli; FIGUEIREDO, Bernardinho Ribeiro; RAWLINS, Barry; MATSCHULLAT, Jorg. Arsenic in water and sediment in the Iron Quadrangle, state of Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, n. 30, v. 3, p. 558-561, set. 2000.
4. BU, Hongmei; TAN, Xiang; LI, Siyue; ZHANG, Quanfa. Temporal and spatial variations of water quality in the Jinshui River of the South Qinling Mts., China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, n. 73, p. 907-913, 2010.
5. CHANG, Heejun. Spatial analysis of water quality trends in the Hain River basin, South Korea. *Water research*, n. 42, p. 3285-3304, 2008.
6. CHRISTOFARO, Cristiano. *Avaliação probabilística de risco ecológico de metais nas águas superficiais da Bacia do rio das Velhas - MG*. 2009. 274 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
7. FRANÇA, Marianne Schaefer; SCAPULATEMPO, Cristovão Vicente; KAVISKI, Eloy; KNAPIK, Heloise Garcia; PORTO, Mônica Ferreira do Amaral. Análise multivariada de dados de monitoramento de qualidade de água: estudo de caso da Bacia do Alto Iguaçu. In: XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, Campo Grande, MS. *Anais*... Campo Grande: ABRH, 2009.
8. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais da bacia do rio São Francisco e seus afluentes em 2009*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010a. 287p. : mapas. Relatório anual.
9. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais na sub-bacia do rio das Velhas em 2009*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010b. 206p. : mapas. Relatório anual.
10. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Qualidade da Água*. Disponível em < http://www.igam.mg.gov.br/qualidade-das-aguas>. Acesso em: 01 jul. 2011.
11. OUYANG, Ying. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, n. 39, p. 2621-2635, 2005.
12. POMPEU, Paulo S; ALVES, Carlos Bernardo M; CALLISTO, Marcos. The effects of urbanization on biodiversity and water quality in the Rio das Velhas basin, Brazil. *American Fisheries Society Symposim*, n. 47, p. 11-22, 2005.
13. SIMEONOV, V.; STRATIS, J. A.; SAMARA, C.; ZACHARIADIS, G.; VOUTSA, D.; ANTHEMIDIS, A.; SOFONIOU, M.; KOUIMTZIS, Th. Assessmente of the surfasse water quality in Northen Greece. *Water Research*, n. 37, p. 4119-4124, 2003.
14. TRINDADE, Ana Laura C.; BARBOSA, Pedro E.; OLIVEIRA, Sílvia M. A. C. Comparação das sub-bacias do rio São Francisco utilizando dados de monitoramento de qualidade da água. In: Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 9, 2012, Poços de Caldas. *Anais*... Poços de Caldas: 2012. p.4 – 1-3.
15. VICINI, Lorena. *Análise multivariada da teoria à prática*. 2005. 215 f. Monografia (Especialização) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
16. ZHANG, Xuan; WANG, Qishan; LIU, Yanfang; WU, Jing; YU, Miao. Application of multivariate statistical techniques in the assessment of water quality in the Southwest New Territories and Kowloon, Hong Kong. *Environ Monit Assess*, n. 173, p. 17-27, 2011.
17. ZHOU, Feng; LIU, Yong; GUO, Huaicheng. Application of Multivariate Statistical Methods to Water Quality Assessment of the Watercourses in Northwestern New Territories, Hong Kong. *Environ Monit Assess*, n. 132, p. 1-13, 2007.