

IV-068 - AVALIAÇÃO TEMPORAL DO CHUMBO NOS CURSOS D'ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – MG

Cristiano Christofaro ⁽¹⁾

Biólogo - UFMG. Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (DESA/UFMG). Professor Adjunto da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM.

Mônica M. Diniz Leão

Engenheira Química - UFMG. Doutora em Engenharia de Anti-Poluição (INSA-FR). Professora Associada da Universidade Federal de Minas Gerais- DESA/UFMG.

Endereço ⁽¹⁾: UFVJM – Campus II - Depto. Engenharia Florestal - Rodovia MG 367 n. 5000. Alto do Jacuba - Diamantina, MG; CEP 39100-000 – Brasil.. Telefone: +55 (38) 3532-1248. Fax: +55 (38) 3532-1200 - e-mail: cristiano.christofaro@ufvjm.edu.br

RESUMO

O Chumbo é um elemento encontrado naturalmente na forma metálica e em uma grande variedade de sais minerais e compostos orgânicos, apresentando toxicidade em concentrações elevadas. Monitoramentos realizados na Bacia do Rio das Velhas – MG demonstram a ocorrência desse metal em todas as estações de amostragem distribuídas ao longo de seu curso d'água principal e afluentes. Assim, o presente estudo objetiva avaliar as tendências temporais da concentração de Chumbo nos cursos d'água da bacia do Rio das Velhas, considerando os dados das vinte e nove estações de monitoramento obtidos de 1998 a 2007. As análises incluíram a verificação da sazonalidade, autocorrelação e testes de tendência temporal não-paramétricos de Mann-Kendall e Mann-Kendall Sazonal. Oito estações de amostragem apresentaram sazonalidade, com as maiores concentrações verificadas no período chuvoso. A autocorrelação foi praticamente inexistente, o que pode estar associado à baixa frequência amostral verificada no programa de monitoramento (três a seis meses). Apenas sete estações apresentaram tendência negativa significativa, indicando uma redução na concentração do Chumbo ao longo do período estudado. Os resultados demonstraram que os estudos de tendência temporal apresentam grande relevância para a gestão da poluição dos recursos hídricos a partir de dados de monitoramento, fornecendo subsídios para medidas preventivas e corretivas diferenciadas entre as estações de amostragem e períodos do ano, podendo ainda ser utilizado na avaliação da efetividade dessas medidas.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, Qualidade da Água, Poluição Hídrica, Chumbo, Metais, Rio das Velhas.

INTRODUÇÃO

Monitoramentos da qualidade da água de longo prazo consistem em abordagens eficientes para um melhor conhecimento da hidrogeoquímica e poluição de cursos d'água. No entanto, esses estudos geram uma grande quantidade de dados distribuídos ao longo do tempo, cujas análises devem se valer de técnicas específicas de análise (Helsel & Hirsch 2002; Shumway & Stoffer, 2006). A estimativa da tendência temporal de um determinado conjunto de dados ambientais é importante tanto para a comunidade científica quanto para os órgãos de controle ambiental, uma vez que essa informação pode embasar atuações preventivas e corretivas.

A bacia do rio das Velhas, localizada na região central do Estado de Minas Gerais, compreende uma área de 29.173 Km², onde estão localizados 51 municípios que abrigam uma população de aproximadamente 4,8 milhões de habitantes. Nos últimos anos, os cursos de água desta bacia vêm sendo monitorados no âmbito do Projeto “Águas de Minas”. Com uma rede atual de 29 estações de amostragem, esse monitoramento indica a presença de poluentes relacionados tanto a fontes pontuais de poluição, representadas pelos esgotos sanitários, atividades de mineração e efluentes industriais, quanto a fontes difusas, representadas pela drenagem pluvial da área urbana e rural e por rejeitos de mineração (IGAM, 2008).

Dentre os diversos poluentes detectados na bacia do Rio das Velhas, destaca-se o Chumbo. Esse metal consiste em um elemento encontrado naturalmente na forma metálica e em uma grande variedade de sais minerais e compostos orgânicos. Suas fontes naturais incluem emissões vulcânicas e intemperismo geoquímico, sendo as rochas ígneas e metamórficas as maiores fontes geológicas. O escoamento sobre o solo consiste na principal

fonte de Chumbo nos ambientes aquáticos. Atualmente, as fontes antrópicas desse metal estão relacionadas principalmente à indústria de metais, inclusive naquelas de reciclagem, sendo verificada sua presença em baterias, laminados, soldas, pigmentos, munições, tintas, cerâmicas e várias outras aplicações (Newman & Unger, 2002). A toxicidade dos sais de Chumbo depende das condições ambientais do meio, como a dureza, o pH e a salinidade. Porém, em geral, os compostos inorgânicos apresentam menor toxicidade do que os compostos orgânicos. Além da redução na biodiversidade, os efeitos de altas concentrações de Chumbo no Ecossistema incluem a inibição do processo de nitrificação (WHO, 1989).

No presente estudo, serão avaliadas as tendências temporais da concentração de Chumbo nos cursos d'água da bacia do Rio das Velhas, considerando os dados obtidos de 1998 a 2007 em cada uma das vinte e nove estações de monitoramento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A bacia do rio das Velhas está localizada na região central do Estado de Minas Gerais, entre as latitudes 17° 15'S e 20° 25'S e longitudes 43° 25'W e 44° 50'W (Figura 1). Apresenta uma forma alongada na direção norte-sul e corresponde à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos SF5 (São Francisco 5). O rio das Velhas tem sua nascente principal na cachoeira das Andorinhas, Município de Ouro Preto, numa altitude de aproximadamente 1.500 m. Toda a bacia compreende uma área oficial de 29.173 Km², onde estão localizados 51 municípios que abrigam uma população de aproximadamente 4,8 milhões de habitantes (destes, aproximadamente 89% residem em distritos e municípios integralmente inseridos na bacia). O rio das Velhas encontra-se com o rio São Francisco em Barra do Guaicuí, Distrito de Várzea da Palma, numa altitude de 478m (IGAM 2008).

Desde 1997, a bacia hidrográfica do Rio das Velhas vem sendo monitorada no âmbito do programa “Águas de Minas” (IGAM, 2008). Nesse programa, 29 (vinte e nove) estações de amostragem são utilizadas para o monitoramento de diversos metais, incluindo o Chumbo, na bacia do Rio das Velhas (Figura 1), com frequência de amostragem trimestral ou semestral. Para a análise de tendência executada no presente estudo foram utilizados os dados do Chumbo coletados de 1998 a 2007 nas 29 estações de amostragem localizadas ao longo do rio das Velhas e afluentes.

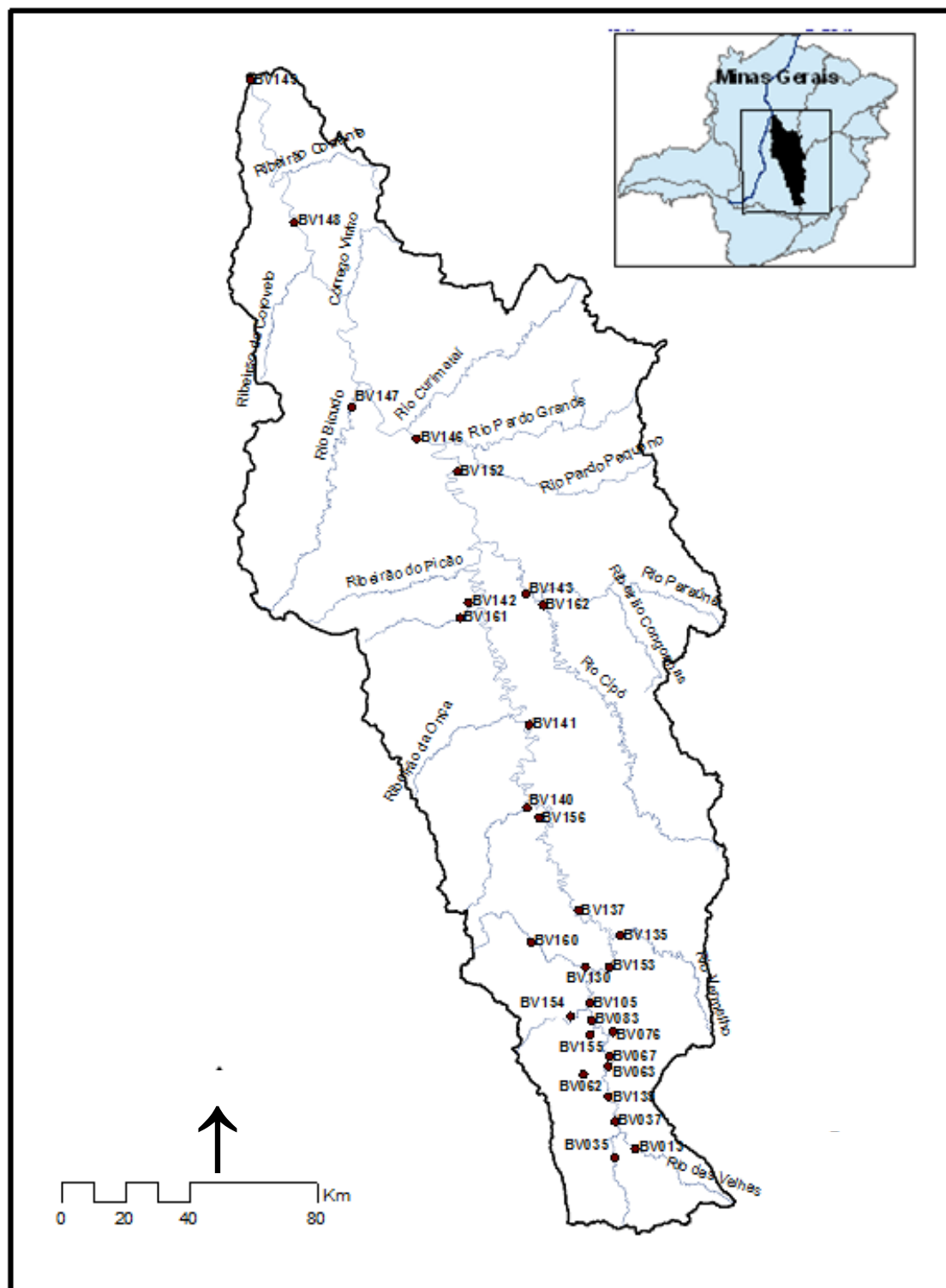


Figura 1: Localização em Minas Gerais e disposição das estações de amostragem do Chumbo na bacia hidrográfica do Rio das Velhas – MG, no âmbito do programa “Água de Minas”. Elaborado a partir dos dados disponíveis em www.igam.mg.gov.br e IGAM (2008).

Análises estatísticas

Uma série temporal pode ser definida como um conjunto de informações arranjadas em ordem cronológica (Hipel & McLeod, 1994). Assim, pode-se concluir que a ordem de ocorrência das observações é crucial para a análise de séries temporais. Baseado nessa premissa, diversas técnicas e métodos de análise de séries temporais foram desenvolvidas e aplicadas (Hipel & McLeod, 1994; Helsel & Hitch, 2002; Berthouex & Brown, 2002). No presente estudo, a análise das séries temporais percorrerá os seguintes passos: análise exploratória dos dados por período do ano, teste de Kruskal-Wallis para verificar diferenças significativas entre as estações do ano e testes de verificação das tendências.

Após a confecção de *boxplots*, considerando as estações de amostragem dos afluentes e curso d'água principal, os dados foram plotados por trimestre ou semestre, de acordo com a frequência de coleta adotada na respectiva estação de amostragem. Assim, para fins das análises subsequentes, cada semestre ou trimestre de coleta passou a ser considerado uma estação do ano. De acordo com (Helsel & Hirsch, 2002) a utilização de *boxplots* consiste no método gráfico mais adequado para representação da sazonalidade, principalmente nos casos em que se verifica um padrão único de tendência em todas as estações do ano.

A seguir, o teste de Kruskal-Wallis (KW) foi utilizado para a verificação de diferenças significativas entre os trimestres, ou semestres, em que foram realizadas as coletas. Uma vez verificada diferença significativa entre os períodos do ano, considerou-se que a série de dados apresenta sazonalidade. A sazonalidade consiste em uma fonte potencialmente elevada de variação nas séries de dados de qualidade da água. Assim, seus efeitos devem ser compensados ou "removidos" de forma a permitir uma melhor caracterização das tendências temporais. Caso contrário, os testes estatísticos subsequentes podem apresentar pouco poder de detecção das tendências eventualmente existentes na série analisada (Helsel & Hirsch, 2002).

A verificação das tendências temporais foi feita a partir do teste de tendências de Mann-Kendall (MK) ou teste sazonal de tendências de Mann-Kendall (SMK), de acordo com a ocorrência de sazonalidade. Tais testes, não paramétricos, são adequados para utilização nos casos em que são verificadas tendências monotônicas e também naqueles em que não são feitas correções de variáveis exógenas, como a vazão, que influenciam na variação da série temporal. Por serem robustos, lidam bem com falhas nas séries de dados e com dados abaixo do limite de detecção, o MK e o SMK são bastante utilizados em estudos ambientais para verificação de tendências monotônicas (Helsel & Hitch, 2002).

Nos casos em que em que o valor de 'p' do teste KW para sazonalidade não foi considerado significativo ($p > 0,05$), verificou-se a ocorrência de tendência temporal por meio do teste Mann-Kendall (MK). Esse teste não-paramétrico, criado na década de 1945, tem como idéia principal a determinação do sinal das diferenças pareadas entre as amostragens consecutivas de uma série temporal, sendo esse sinal correspondente à tendência (negativa ou positiva) da série de dados (Hess *et al.* 2001).

Nos casos em que foram verificados valores significativos de p no teste KW ($p \leq 0,05$), utilizou-se o teste Sazonal de Mann-Kendall (SMK) para verificar a existência de tendência nas séries temporais em cada estação de amostragem, no período analisado. O SMK consiste em uma variação do teste MK no qual a estatística *Tau* de Kendall é calculada considerando-se a existência de sazonalidade na série de dados. Todos os testes relativos à análise de tendências temporais foram executados no programa R (v. 2.8.1) (R Development Core Team, 2008), juntamente com o pacote "Kendall" (McLeod, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações medianas, o primeiro e o terceiro percentil e os *outliers* mensurados em cada estação de monitoramento de Chumbo podem ser visualizados na Figura 2. O teste Kruskal-Wallis demonstrou que as medianas das concentrações nas diferentes estações de monitoramento apresentam diferenças significativas entre si ($p = 0,01$). Praticamente todas as estações apresentaram *outliers*, com destaque para as estações BV035 - Rio Itabirito, BV062 - Rib. Água Suja, BV063, BV143 - Rio Paraúna, BV147 - Rio Bicudo e BV148, com pelo menos quatro ocorrências. A presença excessiva de *outliers* nesses pontos pode indicar ocorrência de eventos de curta duração e frequência irregular que causaram o aumento na concentração de Chumbo por períodos relativamente curtos, ou erros no processo de mensuração das amostras. Amostragens mais frequentes nesses pontos podem ser necessárias para uma melhor caracterização da contaminação por esse metal.

Verificou-se que não há diferença significativa entre as medianas das estações de monitoramento localizadas no curso d'água principal ($p = 0,54$) (Figura 2B). Assim, do ponto de vista estatístico as concentrações de Chumbo ao longo do curso do Rio das Velhas não apresentam variação significativa.

As estações de monitoramento localizadas nos afluentes do Rio das Velhas apresentaram diferenças significativas entre si ($p = 0,0037$) (Figura 2C). As maiores medianas para o Chumbo foram verificadas na estações BV154 – Ribeirão do Onça e BV155 – Ribeirão Arrudas, afluentes que recebem grande parte dos efluentes provenientes da capital do estado e de sua região metropolitana. Porém, as elevadas concentrações verificadas nesses afluentes não foram suficientes para interferir significativamente nas concentrações do curso d'água principal imediatamente a jusante, uma vez que as estações BV083 e BV105 não apresentaram valores discrepantes em relação às demais localizadas no Rio das Velhas.

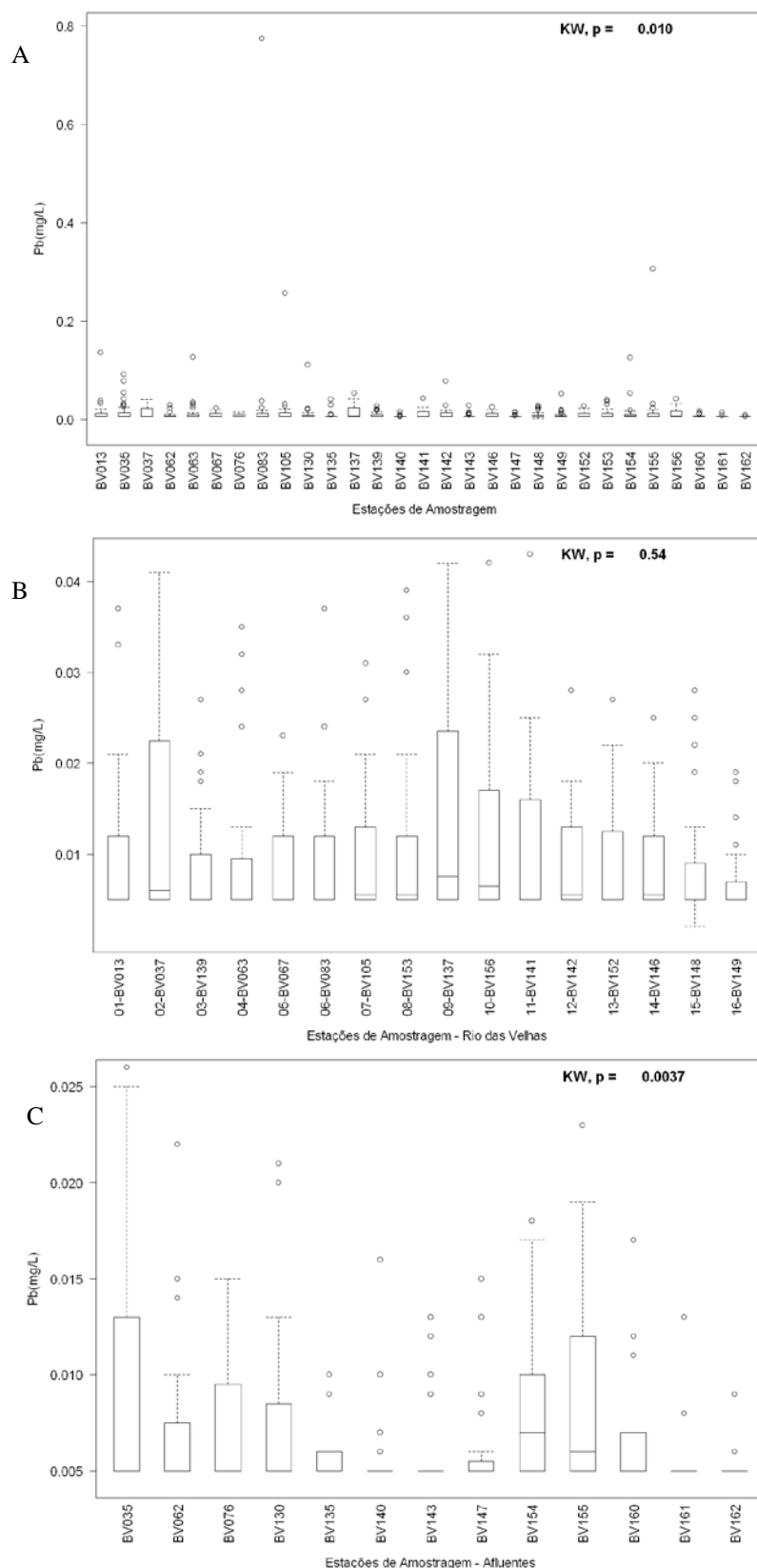


Figura 2: *Boxplots* com as concentrações de Chumbo verificadas nas estações de amostragem da bacia hidrográfica do Rio das Velhas de 1998 a 2007. A – Todas as estações de amostragem. B – Curso d'água principal ordenado de montante para jusante, sem a influência dos *outliers* na escala. C – Afluentes, sem influência dos *outliers* na escala.

A Figura 3 apresenta *boxplots* das concentrações de Chumbo em cada um dos trimestres/semestres em que as coletas foram executadas, bem como os resultados do teste Kruskal-Wallis para verificação da sazonalidade. Os gráficos que apresentam dois períodos indicam coleta semestral.

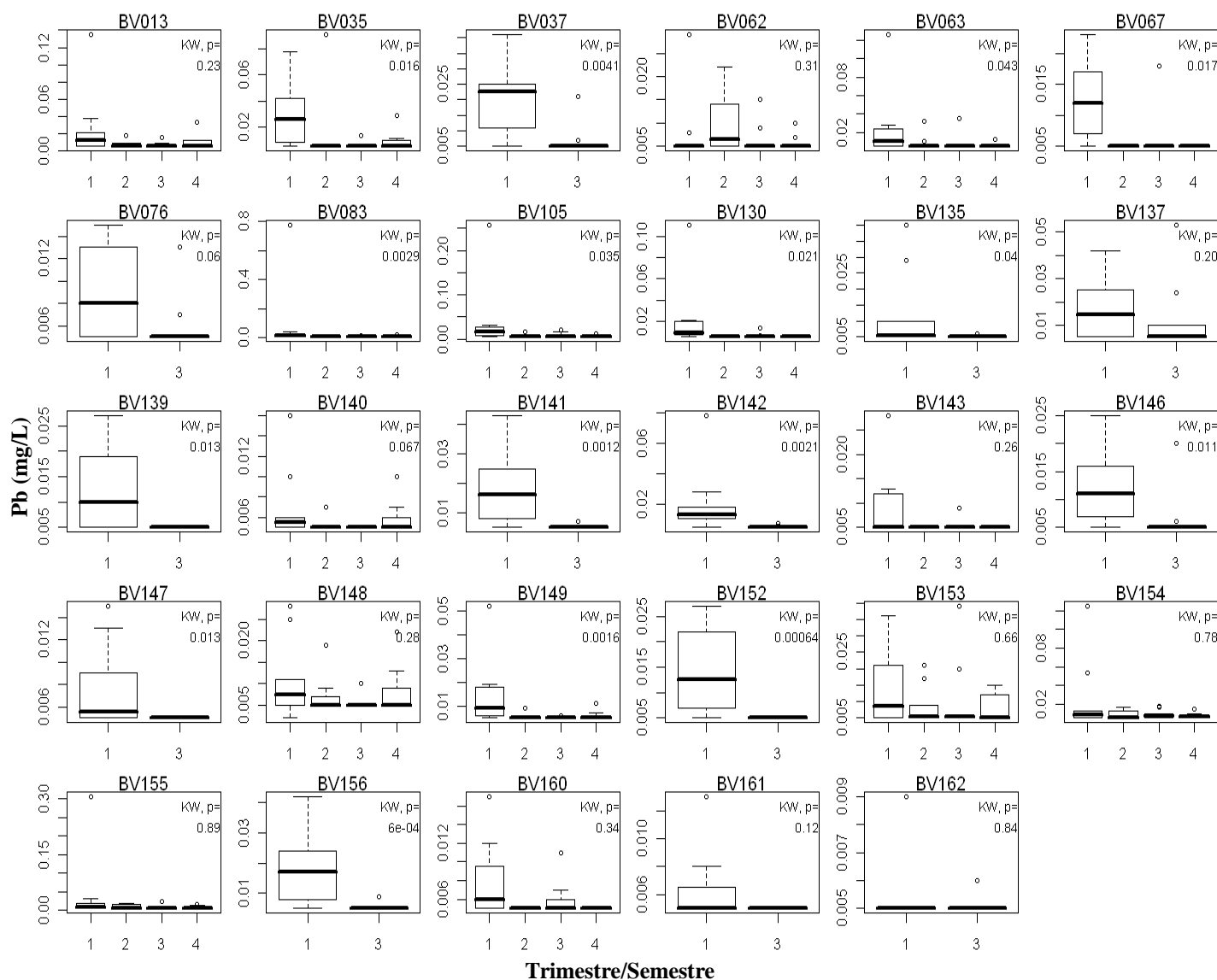


Figura 3: Boxplots e teste Kruskal-Wallis das concentrações de Chumbo por trimestre/semestre nas estações de amostragem da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Valores de p abaixo de 0,05 indicam diferença significativa entre as concentrações verificadas por período considerado.

Os resultados do teste de Kruskal-Wallis indicaram a ocorrência de sazonalidade em dezesseis estações de monitoramento: BV035 - Rio Itabirito, BV037, BV063, BV067, BV083, BV105, BV130 - Rib. da Mata, BV135 - Rio Taquaraçu, BV139, BV141, BV142, BV146, BV147 - Rio Bicudo, BV149, BV152 e BV156. Apenas quatro dessas estações estão localizadas em afluentes do curso d'água principal: BV035 (Rio Itabirito), BV130 (Ribeirão da Mata), BV135 (Rio Taquaraçu) e BV147 (Rio Bicudo). As demais estações encontram-se distribuídas ao longo do curso do Rio das Velhas.

Em todos os casos que foi verificada sazonalidade significativa, as maiores concentrações são verificadas no primeiro trimestre/semestre (Figura 3). Uma vez que nesse período verifica-se a maior abundância de chuva na bacia, o aumento na concentração pode estar relacionado à predominância da lixiviação do solo em relação à diluição causada pela chuva, ou seja, pode estar ligada à ocorrência de poluição difusa.

A figura 4 apresenta as tendências temporais do Chumbo nas séries de dados, bem como os resultados dos testes MK ou SMK, realizados em cada um dos 29 pontos de amostragem.

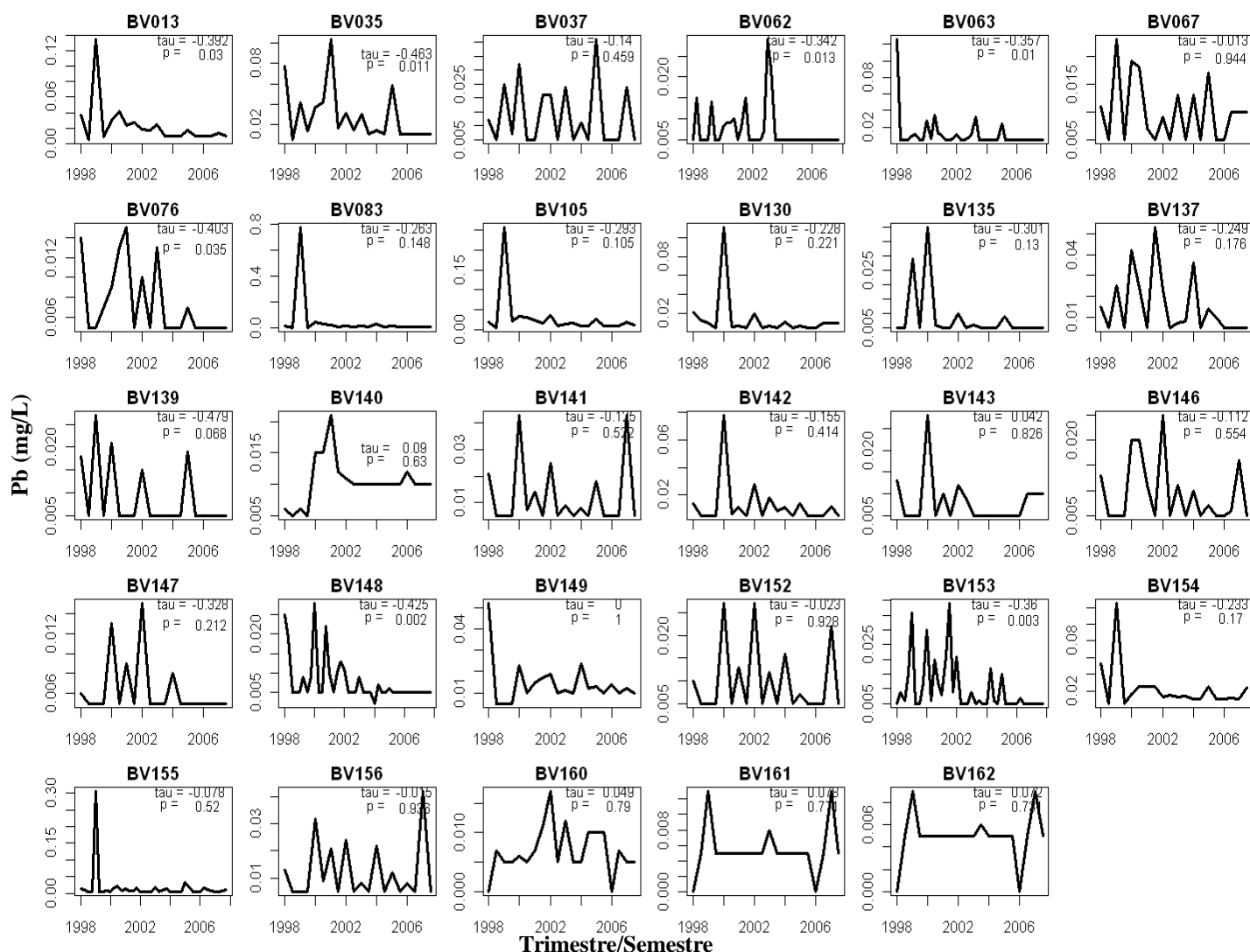


Figura 4: Tendências temporais do Chumbo de 1998 a 2007 e resultado do teste de Mann-Kendall e Sazonal de Mann-Kendall nas estações de amostragem das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas.

Os resultados indicam que sete estações de monitoramento apresentaram tendência negativa significativa ($p \leq 0,05$) no período analisado. Três se encontram em afluentes: BV035 (Rio Itabirito), BV062 (Ribeirão Água Suja) e BV076 (Ribeirão Sabará). As outras quatro estações de monitoramento estão distribuídas ao longo do Rio das Velhas: BV013, BV063, BV148 e BV153. Dentre as estações que apresentaram tendência significativa, duas apresentaram sazonalidade (BV035 - Rio Itabirito e BV063).

Os testes MK e SMK apresentam como desvantagem o fato de serem aplicados apenas a dados univariados, não sendo aplicáveis à avaliação de múltiplas fontes simultâneas de variação. Nessa situação recomenda-se a utilização de análises de regressão multivariadas. No caso específico do teste SMK, outra desvantagem inclui o fato de que o resultado final consiste em uma média dos valores verificados em cada estação do ano. Assim, fortes tendências contrárias nas diversas estações do ano podem se anular, gerando uma falsa ausência de tendência no resultado final do teste (Helsel & Hirsch, 2002).

As vantagens desse teste incluem todas aquelas associadas a testes não-paramétricos, tais como: imunidade a transformações nos dados, robustez, bom desempenho no caso de falhas nas séries de dados, *outliers* e nos casos de dados abaixo do limite de detecção (Helsel & Hirsch, 2002). Além disso, a flexibilidade de incorporar dados com diferentes distribuições de probabilidade faz com que os testes MK e SMK sejam vantajosos em relação a testes baseados em regressão linear, que exigem que os resíduos apresentem distribuição normal (Helsel & Frans, 2006).

CONCLUSÕES

Os testes Mann-Kendall e Mann-Kendall Sazonal, com 95% de confiança, demonstram que, entre 1998 e 2007, as concentrações de Chumbo tiveram tendência de redução em pelo menos sete estações de amostragem monitoradas.

Dezesseis estações de monitoramento apresentaram comportamento sazonal, duas delas apresentando tendência temporal significativa. Assim, na maioria das estações de amostragem da bacia do Rio das Velhas, as medidas de controle podem ser intensificadas no período chuvoso, especificamente no primeiro trimestre/semestre.

Os resultados do estudo demonstram o potencial de utilização de análises de tendências como ferramenta de auxílio na gestão da qualidade das águas em bacias hidrográficas. Assim, além de poderem embasar a adoção de medidas preventivas e/ou corretivas diferenciadas entre as estações de amostragem e períodos do ano, essas análises também podem permitir a avaliação da eficiência de medidas de controle adotadas. No entanto, deve-se atentar às limitações associadas aos testes utilizados, incluindo sua restrição à caracterização de tendências monotônicas e, no caso do teste sazonal, a possibilidade de interferência dos resultados obtidos em cada estação do ano no valor final do teste (Helsel & Hirsch, 2002).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BERTHOUEX, P.M. & BROWN, L.C., Statistics for environmental engineers, second edition 2nd ed. CRC. 2002.
2. HESS, A. IYER, H., MALMB, W. Linear trend analysis: a comparison of methods. Atmospheric Environment 35. 5211–5222. 2001.
3. HELSEL, D.R. & FRANS, L.M., *Regional Kendall test for trend*. 2006. Disponibilizado em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es051650b?prevSearch=helsel&searchHistoryKey=> [Acesso Dezembro 12, 2008]
4. HELSEL, D.R. & HIRSCH, R.M., *Statistical methods in water resources*. Pap/Dsk. Elsevier Science Pub Co. 2002.
5. HIPEL, K.W. & MCLEOD, A.I., Time series modelling of water resources and environmental systems. Elsevier Science Pub Co. 1994.
6. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM Monitoramento das águas Superficiais na Bacia do Rio das Velhas 1998-2007. Belo Horizonte: IGAM, 161 p., 2008.
7. MCLEOD, A., Kendall: Kendall Rank Correlation and Mann-Kendall Trend Test. 2005. Em: <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim> [Acesso Dezembro 12, 2008].
8. NEWMAN, M.C. & UNGER, M.A., Fundamentals of ecotoxicology, second edition 2nd ed. CRC. 2002.
9. R DEVELOPMENT CORE TEAM, R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. 2008. Disponibilizado em: <http://www.R-project.org>.
10. SHUMWAY, R.H. & STOFFER, D.S., Time series analysis and its applications: with R examples 2nd ed. Springer. 2006.
11. WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Lead – Environmental Aspects. Environmental Health Criteria 85. International Programme on Chemical Safety – IPCS. Geneva: WHO, 1989.