

TENDÊNCIAS TEMPORAIS E ESPACIAIS DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANGA, MINAS GERAIS

*Temporal and spatial trends in the quality of surface waters in the Piranga River watershed,
Minas Gerais*

Alex Cardoso Pereira^{1*}

Ana Augusta Passos Resende²

Gustavo Bastos Braga³

Tatiane Yuri Ramos Oda⁴

RESUMO

Este estudo apresenta uma análise da tendência temporal e espacial da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Piranga, sub-bacia hidrográfica do Rio Doce, em Minas Gerais, Brasil. Foram aplicados testes estatísticos, multivariados e não paramétricos para avaliar 19 parâmetros de qualidade de 7 estações da rede de monitoramento do Igam/ANA, obtidos no período de 2008 a 2018. Os resultados das análises de correlação de Spearman e de tendência Mann-Kendall sugeriram que 73,68% dos parâmetros apresentam valores com tendências de variação, com maiores alterações associadas a cloreto total, condutividade elétrica *in loco*, ferro, nitrato e pH. A análise de agrupamentos hierárquicos definiu três grandes grupos de estações de monitoramento, agrupadas segundo a região dentro da bacia hidrográfica, correspondentes à parte alta, média e baixa. No entanto, ao longo de toda a bacia hidrográfica, foi observado a degradação da qualidade da água durante o período avaliado, principalmente relacionada ao lançamento de esgotos domésticos e escoamento superficial de áreas agrícolas. O fato de 4 das 7 estações apresentarem uma tendência temporal de estabilização, em valores considerados como regulares, merece atenção dos atores sociais da bacia hidrográfica para ações de recuperação da qualidade das águas superficiais nos cursos d'água da região, principalmente na região da nascente e da foz do Rio Piranga.

¹ Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa – UFV. Mestre Engenharia Civil pela UFV – e-mail: alex.c.pereira@ufv.br. * Autor correspondente.

² Doutora em Engenharia Agrícola (Recursos Hídricos e Ambientais) pela Universidade Federal de Viçosa – UFV e pós-doutorado na Universidade de Concepcion, Chile. Professora Associada no Departamento de Engenharia Civil da UFV – e-mail: ana.augusta@ufv.br

³ Doutor em Extensão Rural pela Universidade Federal de Viçosa – UFV. Mestre em Administração pela Universidade Federal de Viçosa. Professor adjunto da Universidade Federal de Viçosa – e-mail: gustavo.braga@ufv.br

⁴ Doutoranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa - UFV. Mestre em Engenharia Civil pela UFV – e-mail: tatiana.oda@ufv.br

Palavras-chave: Qualidade da água. Análise de agrupamentos hierárquicos. Correlação de Spearman. Mann-Kendall. Índice de Qualidade da Água.

ABSTRACT

This study presents an analysis of the temporal and spatial trend of surface water quality in the Piranga River watershed, a sub-basin of the Doce River, in Minas Gerais, Brazil. Statistical, multivariate and non-parametric tests were applied to assess 19 quality parameters of 7 stations in the IGAM/ANA monitoring network, obtained from 2008 to 2018. The results of Spearman correlation and Mann-Kendall trend analysis suggested that 73.68% of the parameters show values with varying trends, with greater changes associated with total chloride, in loco electrical conductivity, iron, nitrate and pH. The analysis of hierarchical clusters defined three large groups of monitoring stations, grouped according to the region within the hydrographic basin, corresponding to the upper, middle and lower parts. However, throughout the entire hydrographic basin, degradation of water quality was observed during the evaluated period, mainly related to the release of domestic sewage and surface runoff from agricultural areas. The fact that the WQI – Water quality Index – of 4 of the 7 stations present a temporal trend of stabilization, in values considered as regular, deserves attention from the social actors of the hydrographic basin for actions to recover the quality of surface water in the watercourses of the region, especially in the region from the source and mouth of the Piranga river.

Keywords: Water quality. Analysis of hierarchical clusters. Spearman's correlation. Mann-Kendall. Water Quality Index.

Data de submissão: 22/03/2021

Data de aprovação: 09/06/2021

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água de um corpo hídrico reflete várias interferências, incluindo litologia da bacia, condições climáticas e interferências antropogênicas (KALSCHEUR *et al.*, 2012; VOZA *et al.*, 2015; TRINDADE, 2017). Segundo Oliveira *et al.* (2017), os corpos d'água superficiais são caracterizados como os mais vulneráveis à poluição devido à facilidade de acesso ao lançamento de águas residuárias industriais e domésticas, principalmente em bacias urbanas.

Do ponto de vista temporal, as oscilações de qualidade da água podem refletir as formas de uso e ocupação do solo, sendo o monitoramento, uma importante ferramenta de

análise. O monitoramento envolve um conjunto de procedimentos que visa analisar certas características de um sistema, sempre o correlacionando ao objetivo estabelecido, que pode ser tanto a manutenção quanto a recuperação da qualidade da água, incluindo sua variação espacial temporal (ALVES *et al.*; BRITTO *et al.*, 2018).

O monitoramento das variáveis de qualidade da água pode ser considerado como um dos pré-requisitos para o sucesso de qualquer sistema de gestão das águas, já que o monitoramento possibilita a obtenção de informações necessárias, a atualização dos bancos de dados, e o acompanhamento do processo de uso dos corpos hídricos, que apresenta os efeitos sobre as características qualitativas das águas, visando subsidiar as ações de controle ambiental (CARVALHO *et al.*, 2015).

Na gestão adequada dos recursos hídricos, o primeiro passo é o monitoramento da qualidade da água, para caracterizar parâmetros físicos e químicos que permitam diagnosticar as mudanças causadas por ações antrópicas ou naturais, no uso e ocupação do solo ao longo do tempo em um curso d'água ou em uma bacia hidrográfica (BARRETO *et al.*, 2014; MORETTO *et al.*, 2012).

Segundo Trindade *et al.* (2017), os métodos estatísticos multivariados são excelentes ferramentas exploratórias para a interpretação desse complexo conjunto de informações e são com frequência utilizados concomitantemente com as análises de tendência. As análises de tendência temporal possibilitam a avaliação de longas séries de dados, sendo úteis para o acompanhamento e a predição da evolução da qualidade da água (COELHO *et al.*, 2017).

Para a análise de tendência temporal deste estudo foi utilizado o teste de Mann-Kendall. Esse método não paramétrico é utilizado para análise de tendência da qualidade das águas superficiais (MOSTAFAEI, 2014; SAMSUDIN *et al.*, 2017; DIAMANTINI *et al.*, 2018; MAINALI; CHANG, 2018; FRAGA *et al.*, 2021).

Os estudos sobre qualidade das águas superficiais na bacia hidrográfica do Rio Doce apresentam informações sobre os indicadores de qualidade, porém não apresentam um estudo de tendência temporal e espacial.

Santolin *et al.* (2015) apresentam um estudo sobre a concentração de metais em sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Doce, porém não avaliaram as tendências de longo prazo nos indicadores de qualidade de água. Passos *et al.* (2021) empregaram técnicas estatísticas multivariadas para selecionar e avaliar os parâmetros da qualidade da água e agrupar

as estações de acordo com a similaridade dos parâmetros, mas apenas analisando a sazonalidade nos períodos de seca e de chuvas no agrupamento das estações.

No estudo de Fraga *et al.* (2021) foram realizadas as tendências temporais dos parâmetros de qualidade das águas superficiais da Circunscrição Hidrográfica do Rio Piranga (CH DO1), que engloba a bacia hidrográfica do Rio Piranga. Esse estudo avalia também os impactos do rompimento da barragem de rejeitos do município de Mariana na qualidade da água do Rio Doce, a partir do encontro do Rio Piranga com o Rio do Carmo.

No presente estudo foi realizada uma análise das tendências temporais e espaciais dos parâmetros de qualidade de água monitorados na bacia hidrográfica do Rio Piranga, da nascente em Ressaquinha até a foz do Rio Piranga em Ponte Nova. Acredita-se que esse trabalho possa contribuir para o esclarecimento sobre os fatores que afetam a qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Piranga, a partir de uma análise temporal dos parâmetros de qualidade de água.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, abriga população aproximada de 300.000 habitantes e localiza-se no estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil. Abrange uma área de cerca de 6.600 km² e suas coordenadas geográficas estão entre 20°16' e 21°11' de latitude sul e 42°42' e 43°49' de longitude oeste (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010). O relevo é fortemente ondulado e a altitude varia entre 324 e 1452 m e o bioma dominante na área é o bioma da Mata Atlântica (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010).

Segundo o Instituto Mineiro de Gestão das Águas Igam (2018), a maior parte dos solos apresenta baixa fertilidade, o que, associada a declividades acentuadas de encostas, favoreceu o desenvolvimento de atividades econômicas com baixo valor agregado. As principais classes de cobertura do solo são as pastagens, que subsidiam atividade pecuária, e áreas de cultivo agrícola com ocupação por lavouras temporárias e permanentes. Em relação ao uso e ocupação do solo, a tipologia que ocupa a maior área é a pecuária (aproximadamente 57% da área), seguida pela Floresta Estacional Semi-decidual (cerca de 30%), perfazendo mais de 87% da área total da bacia.

Segundo o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010), as pastagens apresentam alto nível de degradação devido ao modelo de uso e ocupação da região, onde não é comum a aplicação de tecnologias de conservação do solo. Também, existem consideráveis áreas plantadas com eucalipto, as quais, em conjunto com as demais caracterizam exploração antropogênica da área. A cobertura vegetal natural da região é definida por remanescentes florestais.

A Bacia Hidrográfica possui 28 municípios completamente inseridos na mesma. A população da região é predominantemente rural, sendo que as áreas urbanas representam menos de 1% da área total. O clima, segundo a classificação de Köppen-Geiger, enquadra-se como tropical de altitude com chuvas durante o verão e verões frescos. A temperatura média anual varia em torno de 18°C e a precipitação média anual é de 1.400 mm (SALVADOR, 2014).

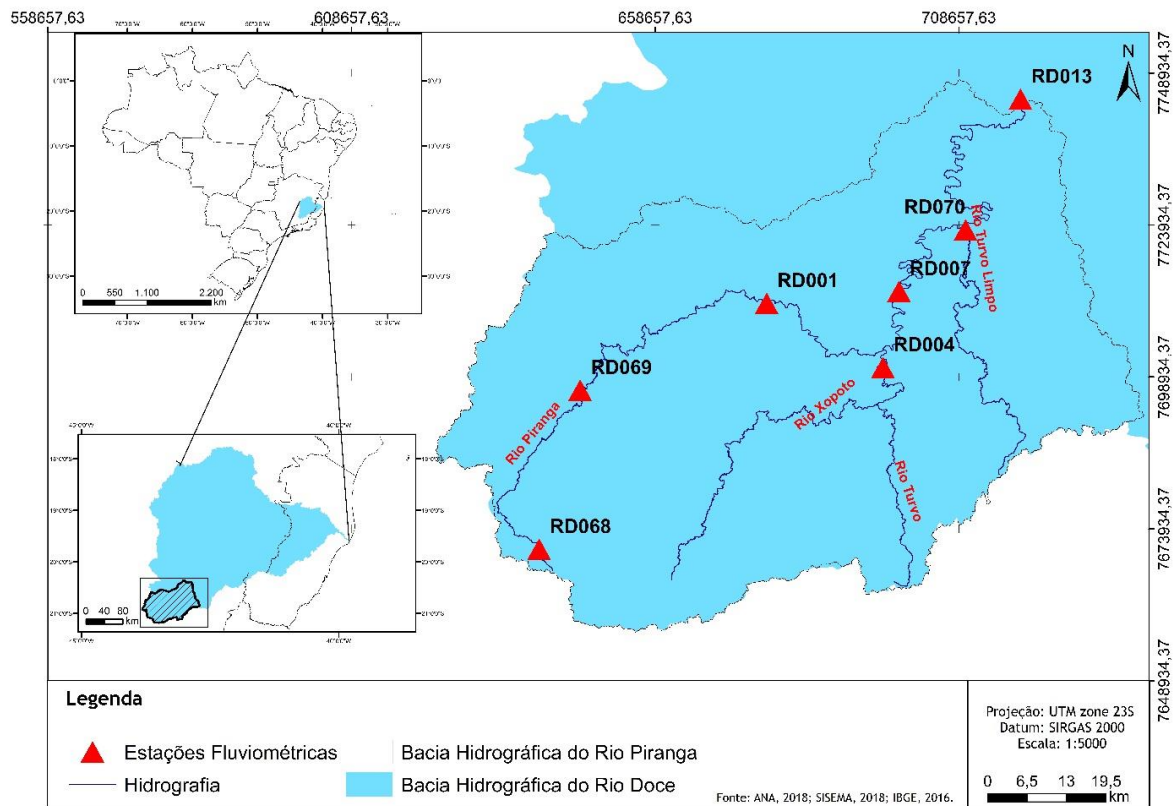
A Tabela 1 apresenta as informações sobre as estações de monitoramento de qualidade da água da sub-bacia do Rio Piranga, ordenadas de montante para jusante. Em relação à classe de enquadramento da DN COPAM/CERH nº 01/08 (COPAM; CERH, 2008), todos os trechos dos cursos d'água avaliados enquadram-se na classe 2. O Mapa 1 mostra a localização das estações fluviométricas.

Tabela 1 – Descrição das estações de monitoramento

Estação	Descrição	Curso d'água	Coordenadas geográficas	
			Latitude	Longitude
RD068	Rio Piranga próximo à sua nascente	Rio Piranga	-21.0603	-43.6569
RD069	Rio Piranga no distrito de Piranguita	Rio Piranga	-20.8236	-43.5942
RD001	Rio Piranga na cidade de Piranga	Rio Piranga	-20.6906	-43.2994
RD004	Rio Xopotó próximo a sua foz no Rio Piranga	Rio Xopotó	-20.7853	-43.1158
RD007	Rio Piranga na cidade de Porto Firme	Rio Piranga	-20.6703	-43.0881
RD070	Rio Turvo próximo à sua foz no Rio Piranga	Rio Turvo	-20.5794	-42.9881
RD013	Rio Piranga a jusante da cidade de Ponte Nova	Rio Piranga	-20.4167	-42.9000

Fonte: Agência Nacional das Águas (2018)

Mapa 1 – Localização das estações da sub-bacia do Rio Piranga analisadas para o estudo das tendências temporais e espaciais



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

2.2 Dados analisados

Para a análise estatística foram analisadas as séries históricas, considerando os dados de monitoramento da qualidade das águas da sub-bacia hidrográfica do Rio Piranga obtidos entre 2008 e 2018, de 7 estações fluviométricas pertencentes à rede básica de monitoramento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam)/Agência Nacional de Águas (ANA) da bacia hidrográfica do Rio Doce. Foram analisados 19 parâmetros, correspondendo a 280 coletas trimestrais, que totalizaram 5.320 observações.

As informações sobre os parâmetros de qualidade das águas superficiais das estações fluviométricas estavam disponibilizadas no Portal HidroWeb⁵ da ANA e no Portal de

⁵ <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>

monitoramento do Igam⁶, ferramentas integrantes do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Para a escolha dos parâmetros avaliados nessa pesquisa, levou-se em conta as variáveis que compõem o Índice de Qualidade de Água – IQA, assim como outros parâmetros utilizados por Alves *et al.*, (2018), Britto *et al.*, (2018) e Trindade *et al.*, (2017) em estudos similares de tendência temporal e espacial da qualidade das águas superficiais de bacias hidrográficas brasileiras.

Os parâmetros estudados foram cloreto total (Cl^{-1}), coliformes termotolerantes (Coli. term.), coliformes totais (Coli. totais), condutividade elétrica in loco (Cond.) demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), ferro total (Fe), fósforo total (P), manganês total (Mn), nitrato ($N-NO_3^-$), nitrogênio amoniacal total ($N-NH_4^+$), oxigênio dissolvido (OD), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos suspensos totais (SST), sólidos totais (ST), temperatura da água (Temp.), turbidez (Turb.) e o Índice de Qualidade das Águas (IQA).

2.3 Análise das tendências temporais

As análises de tendências temporais foram realizadas de maneira individual para cada estação. Os dados dos parâmetros das estações de monitoramento foram previamente testados e não mostraram aderência à distribuição normal. Sendo assim, foram utilizados os testes não paramétricos de correlação de Spearman, de Kruskal-Wallis e de Mann-Kendall. Para a análises estatísticas foi utilizado o *software* Minitab®.

Para a análise das séries temporais adotou-se o seguinte procedimento:

- verificação da autocorrelação da série temporal, por meio de teste de correlação de Spearman;
- averiguação das diferenças significativas entre os dados medidos nas diferentes estações do ano por meio do teste de Kruskal-Wallis;
- verificação da predição da evolução da qualidade da água por meio do teste de tendências temporárias de Mann-Kendall.

Em termos estatísticos, a determinação se o valor de uma variável geralmente diminuiu ou aumentou (melhorou ou piorou) ao longo do tempo significa determinar se a

⁶ <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/monitoramento-de-qualidade-das-aguas>

distribuição de probabilidade dessa variável mudou ao longo do tempo. Também é interessante descrever a quantidade ou razão dessa mudança, com base em variações de algum valor central de distribuição, como a média ou a mediana (HELSEL; HIRSCH, 1992).

Para a avaliação da presença ou ausência de sazonalidade, os quatro trimestres da série histórica de cada parâmetro, para cada estação, foram comparados por meio do teste de Kruskal-Wallis, ao nível de significância de 5%. Para as séries que apresentaram diferença significativa entre os trimestres ($p < 0,05$), foi levada em conta a existência de influência da sazonalidade nos dados, caso contrário, não foi identificado a sazonalidade.

Para os testes de Mann-Kendall, todos os dados da série histórica das coletas trimestrais foram utilizados. Da mesma maneira que nos testes de correlação, foram interpretados como tendência significativa os resultados cujo valor p-valor foram menores que 0,05 para esses o teste de tendência.

Para as estações cujos resultados foram superiores a 0,05 (não significativos) para o teste de correlação, mas significativos apenas no teste de Mann-Kendall, conforme proposto por Trindade *et al.* (2017), consideraram-se esses resultados como inconclusivos, mas com possibilidade de redução (quando os valores são negativos) ou de elevação (com valores positivos).

Em cada estação pesquisada na bacia hidrográfica do Rio Piranga, foi apontado se a tendência verificada para o parâmetro ao longo do tempo foi de elevação, redução, ou, se não houve tendência. Dessa forma, foi possível identificar, no geral, se a qualidade da água melhorou, piorou ou se não havia sofrido alteração ao longo do tempo na bacia hidrográfica do Rio Piranga.

2.4 Análise das tendências espaciais

Para procedimento de agrupamento hierárquico utilizado foi o escolhido o método de Ward, no qual a similaridade é medida pela distância euclidiana quadrática. Como todas as variáveis analisadas são quantitativas, a distância euclidiana é a medida de distância mais empregada, justificando a escolha do método de Ward (SEIDEL *et al.*, 2008).

As 7 estações estudadas da bacia hidrográfica do Rio Piranga foram agrupadas de forma hierárquica, de acordo com suas similaridades, levando em consideração os dados físico-químicos e microbiológicos do monitoramento da qualidade da água.

Os indicadores que compõe o IQA (oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, pH, DBO, nitrato, fósforo, temperatura, turbidez e sólidos totais) foram excluídos da análise de agrupamento hierárquico para evitar duplicidade dos dados, uma vez o IQA foi incluído na análise.

Os dados foram padronizados por parâmetro, com transformação para escala Z (média zero e desvio padrão 1: $Z = (X - \mu)/\sigma$), a fim de evitar interferências no resultado por conta de diferentes unidades de medida dos parâmetros. O objetivo dessa análise foi verificar as variações espaciais na bacia hidrográfica do Rio Piranga, em função da qualidade da água das diversas estações de monitoramento.

Para determinar a linha de corte no gráfico que estabelece o número de grupos (*clusters*), procedeu-se como recomendado por Vicini (2005), que utiliza os valores das distâncias euclidianas de ligação entre as variáveis para determinar em qual valor do eixo Y essa linha será traçada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das tendências temporais

Os resultados dos testes estatísticos propostos na metodologia foram organizados em planilhas, individualmente para cada variável, conforme exemplificado na Tabela 2, para os sólidos totais (ST).

Tabela 2 – Resultados das análises de tendência temporal do parâmetro ST, nas 7 estações estudadas da sub-bacia hidrográfica do Rio Piranga, ordenadas de montante para jusante

(Continua)

Estação	Correlação de Spearman ¹	Teste de Kruskal-Wallis ²	Influência de sazonalidade	Teste Mann-Kendall			Tau de Kendall ³	Tendência
				z^3	Test for Upward Trend ⁴	Test for Downward Trend ⁴		
RD068	0,412	0,473	Não	2,32955	0,009915	0,990085	0,267839	Elevação
RD069	0,028	0,471	Não	0,301917	0,381358	0,618642	0,035766	Sem tendência
RD001	-0,112	0,471	Não	-0,38206	0,64879	0,35121	-0,04287	Sem tendência

Estação	Correlação de Spearman ¹	Teste de Kruskal-Wallis ²	Influência de sazonalidade	Teste Mann-Kendall			Tau de Kendall ³	Tendência
				z^3	Test for Upward Trend ⁴	Test for Downward Trend ⁴		
RD004	-0,222	0,472	Não	-2,11485	0,982779	<i>0,017221</i>	-0,14233	Inconclusivo com possibilidade de redução ⁵
RD007	<i>-0,360</i>	0,471	Não	-1,99966	0,977232	<i>0,022768</i>	-0,21869	Redução
RD070	-0,193	0,47	Não	-0,5156	0,696932	0,303068	-0,05987	Sem tendência
RD013	0,077	0,479	Não	0,732877	0,231817	0,768183	0,058726	Sem tendência

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Nota: ¹ Valor do coeficiente R de correlação de Spearman. Valores em itálico são estatisticamente significativos ($p < 0,05$); ² Valor p relacionado à estatística do teste. Valores em itálico são estatisticamente significativos ($p < 0,05$); ³ Valor da estatística do teste; ⁴ Valor p relacionado à estatística do teste. Valores em itálico são estatisticamente significativos ($p < 0,05$); ⁵ Os testes correlação de Spearman e Mann-Kendall não apresentaram o mesmo resultado quanto à significância da tendência.

Os resultados estatisticamente significativos ($p < 0,05$) dos testes de correlação de Spearman e Mann-Kendall sugerem que existe uma tendência de alteração do parâmetro ao longo do tempo (entre 2008 e 2018), em determinada estação. Os valores de τ de Kendall indica o sentido da tendência do parâmetro ao longo do tempo, podendo ser tendência de elevação (quando os valores são positivos) ou tendência de redução (quando com valores negativos).

Na maioria dos casos analisados, os testes de correlação de Spearman e Mann-Kendall foram coincidentes quanto à indicação da existência ou não de tendência, porém foram encontradas situações, como para os sólidos suspensos totais (SST), na estação RD013, verificada na Tabela 2, em que os testes não apontaram o mesmo resultado quanto à significância da tendência temporal. O resultado das tendências, baseado na análise dos testes estatísticos, foi apresentado na última coluna da Tabela 2, podendo elas ser definidas como redução, inconclusivo com possibilidade de redução, elevação, inconclusivo com possibilidade de elevação, ou sem tendência. A Tabela 3 apresenta a análise final, com a indicação de todas as tendências existentes na sub-bacia hidrográfica do Rio Piranga ao longo dos anos 2008 a 2018.

Tabela 3 – Tendências temporais dos parâmetros na sub-bacia hidrográfica do Rio Piranga, nas 7 estações estudadas, ordenadas de montante para jusante

Parâmetro	Estação						
	RD068	RD069	RD001	RD004	RD007	RD070	RD013
Cloreto total	↑	↑?	↑?	↑	↑?	↑	↑
Coli. Termotolerante	-	-	↑	-	-	-	-
Coli. totais	-	-	-	-	-	-	↓
Condutividade elétrica	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
DBO	-	-	↓	-	-	-	-
DQO	-	-	↑	-	-	-	↑
Fe _T	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑
P _T	-	-	-	-	-	-	-
Mn _T	-	-	↓	↓	↓	↓	↓
N-NO ₃ ⁻	↑	↑	↑	↑	↑	↑?	↑
N-NH ₄ ⁺ _T	↑	-	-	-	-	↓	-
OD	-	-	-	-	-	-	↓
pH	-	-	↑	↑	↑	↑	↑
SDT	↑	-	-	-	-	↑	↑
SST	-	-	-	↓	↓	↓	↓?
ST	↑	-	-	↓?	↓	-	-
Temperatura	↓	↓?	-	-	-	-	-
Turbidez	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓
IQA	-	-	-	↑	↑	↑	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Nota: Coli. term.: coliformes termotolerantes; Coli. Totais: coliformes totais; Cond.: condutividade elétrica *in loco*; DBO: demanda bioquímica de oxigênio; DQO: demanda química de oxigênio; Fe total : ferro total; P total: fósforo total; Mn total: manganês total; N-NO₃⁻: nitrato; N-NH₄⁺ total: nitrogênio amoniacal total; OD: oxigênio dissolvido; pH: potencial hidrogeniônico; SDT: sólidos dissolvidos totais; SST: sólidos suspensos totais; ST: Sólidos totais; IQA: índice de qualidade das águas.; ↑: tendência de elevação; ↓: tendência de redução; ↑?: tendência inconclusiva, com possibilidade de elevação; ↓?: tendência inconclusiva, com possibilidade de redução; -: sem tendência.

Pelas tendências temporais estatisticamente significativas verificadas na bacia hidrográfica do Rio Piranga, é possível perceber que os parâmetros que mais apresentaram tendência de redução, considerando as 7 estações, foram turbidez (85,75%), manganês (71,42%), sólidos suspensos totais (57,14%), sólidos totais (28,57%). Os parâmetros coliformes totais, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio amoniacal total, oxigênio dissolvido e temperatura tiveram todos uma tendência de redução de 14,28%.

Já a tendência de elevação se mostrou mais expressiva para as concentrações de cloreto total (100%), condutividade elétrica *in loco* (100%), nitrato (100%), ferro total (85,71%), pH (71,42%), sólidos dissolvidos totais (57,14%) e IQA (42,85%). Com exceção do

IQA, a tendência de elevação da concentração dos parâmetros sinaliza uma piora na qualidade da água superficial.

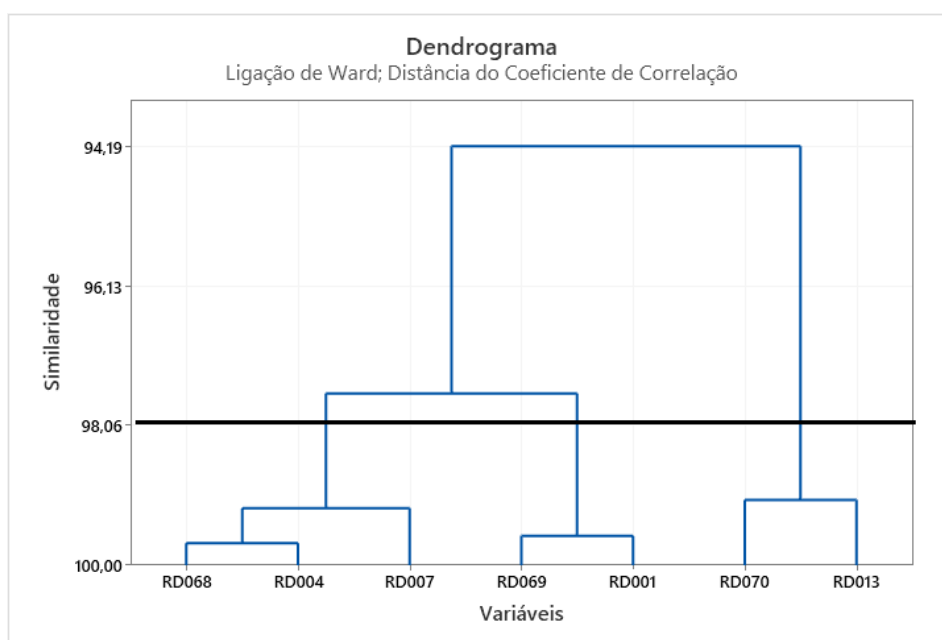
Os resultados os parâmetros coliformes termotolerantes e ferro total apresentam valores médios superiores ao estabelecido pela Deliberação Normativa (DN) Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM)/Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (CERH) nº 01/08 ao longo da série histórica na bacia hidrográfica do Rio Piranga, para corpos d'água enquadrados como Classe 2 (COPAM; CERH, 2008).

A maioria dos parâmetros não apresentaram nenhuma tendência de alteração das concentrações ao longo do período investigado, sendo fósforo total (100%), coliformes termotolerantes (85,71%), coliformes totais (85,71%), DBO (85,75%), DQO (71,42%), temperatura (71,42%) e oxigênio dissolvido (85,71%) os parâmetros mais expressivos.

3.2 Análise das tendências espaciais

O dendrograma resultante da análise de agrupamentos hierárquicos que mostra o agrupamento das estações de monitoramento da bacia hidrográfica do Rio Piranga, em função de suas similaridades em relação aos 10 parâmetros estudados (FIGURA 1).

Figura 1 – Dendrograma resultante da AC para agrupamento das estações



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Nota: Linha cortando o gráfico indica o limite para delimitação dos grupos formados.

Analisando a Figura 1, observa-se a formação de 3 agrupamentos de estações de monitoramento. O primeiro grupo é formado pelas estações RD068, RD004 e RD007. A estação RD068 está próxima à nascente do Rio Piranga e a estação RD004 está localizada após a confluência dos rios Xopotó e Turvo, no município de Presidente Bernardes. A terceira estação do grupo é a RD007, localizada no terço médio do Rio Piranga, no município de Porto Firme. As estações estão localizadas em regiões com menor adensamento urbano.

Nenhum dos valores médios dos parâmetros da série histórica do primeiro grupo estão em desconformidade com a DN 01/08 (COPAM; CERH, 2008), porém o valor médio do IQA da estação RD068 foi 64,0, enquanto da RD004 foi 68,18 e da RD007 foi 66,42. A presença de gado, falta de cercamento na área das nascentes e a falta de tratamento do esgoto doméstico nas comunidades rurais isoladas existentes na área são fatores que contribuem para que a estação RD068 (próxima à nascente) possua um valor médio de IQA menor que as demais do grupo.

O segundo grupo é formado pelas estações RD069, RD001. Essas estações estão localizadas no Rio Piranga, entre os municípios de Santana dos Montes e Piranga. A média do IQA para série histórica das estações RD069 e RD001 foram de 69,55 e 67,63, sendo considerado como regular. As estações RD069 e RD001 tiveram as médias de concentração de ferro total mais elevadas das 7 estações avaliadas, ambas acima dos valores de referência da DN 01/18.

O terceiro grupo é formado pelas estações RD070 e RD013. As duas estações estão localizadas na parte à jusante da sub-bacia hidrográfica do Rio Piranga, sendo a estação RD070 localizada no município de Guaraciaba e a estação RD013 localizada após a cidade de Ponte Nova, antes do encontro do Rio Piranga com o Rio do Carmo, onde se forma o Rio Doce.

Os valores médios de IQA da série histórica das duas estações foram de 60,13 para a estação RD070 e 57,0 para a estação RD013. As estações RD070 e RD013 obtiveram o menor valor de IQA das 7 estações estudadas, e a estação RD013 foi a única estação onde a média da série histórica do parâmetro coliformes termotolerantes foi acima do valor de referência da DN 01/08. Deve-se ser levado em consideração que, o trecho onde a estação RD013 está localizada é a jusante do ponto de lançamento de esgoto doméstico sem tratamento produzido na cidade de Ponte Nova. Fato similar ocorre na estação RD070, que fica a jusante da cidade de Viçosa (maior cidade da região), que também não realiza o tratamento do esgoto sanitário gerado pelos moradores da cidade.

Em síntese, a análise de agrupamento hierárquico dividiu as estações de monitoramento da bacia hidrográfica do Rio Piranga em três grandes grupos, de acordo com os parâmetros de qualidade das águas superficiais. Com exceção do primeiro grupo, o segundo e o terceiro grupo foram formados por estações subsequentes. O primeiro grupo também apresentou estações subsequentes, no caso as estações RD004 e RD007, sendo a exceção, a estação RD068.

Tendo em vista as tendências temporais identificadas, associando os resultados da Tabela 3 com a localização das estações apresentadas na Tabela 1 e no Mapa 1, foi desenvolvida uma análise das tendências espaciais de cada parâmetro na bacia hidrográfica do Rio Piranga.

Para o parâmetro cloreto total, houve tendências de elevação ao longo de toda a sub-bacia hidrográfica, incluindo as inconclusivas. O aumento significativo foi concentrado no baixo curso do Rio Piranga, onde está a maior concentração urbana, tendo provavelmente como principais fontes que contribuem para o aumento os dejetos humanos e animais.

Os parâmetros coliformes termotolerantes e coliformes totais não apresentaram tendências temporais na maioria das estações estudadas. Apenas a estação RD001 apresentou tendência de elevação de coliformes termotolerantes, enquanto a RD013 apresentou tendência de redução de coliformes totais.

Os parâmetros DBO, DQO e OD não apresentam tendências temporais na maioria das estações. Em relação ao DBO, apenas a estação RD001 apresentou tendência de redução. A DQO apresentou tendência de aumento nas estações RD001 e RD013. O OD apresentou tendência de redução na estação RD013, que pode ser justificada pela maior concentração populacional.

Em relação ao parâmetro ferro total, apenas a estação RD068 não apresentou tendência temporal. As demais estações apresentam tendência de elevação da concentração de ferro dissolvido. Segundo o Plano de Ações de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento de Recursos Hídricos Piranga – PARH Piranga (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010), os metais manganês total e ferro dissolvido, vinculando-se às ocorrências de cor verdadeira, turbidez e sólidos em suspensão totais e, embora sejam constituintes naturais dos solos da região, podem estar sendo carregados pelas chuvas para o meio hídrico principalmente devido ao manejo inadequado do solo na pecuária assim como na mineração.

A concentração de manganês total não apresentou tendência temporal nas estações RD068 e RD069, estações na parte alta do Rio Piranga. Nas demais estações apresentou tendência de redução, diferentemente da concentração de ferro dissolvido.

A turbidez mostrou o mesmo comportamento dos SST, demonstrando tendência significativa de redução ao longo de toda a bacia hidrográfica. Apenas na estação próxima à nascente do Rio Piranga não houve tendência temporal significativa para turbidez e SST. Já em relação aos SDT, as estações da parte alta e da parte baixa do Rio Piranga apresentaram tendência de elevação.

O parâmetro N-NH⁴⁺ só exibiu alterações ao longo do tempo em estações pontuais, não sugerindo a existência de tendência na sub-bacia como um todo. O parâmetro fósforo total não apresentou tendência temporal em nenhuma das 7 estações avaliadas.

O nitrato total apresentou tendência temporal de elevação significativa em toda a sub-bacia hidrográfica do Rio Piranga. O aumento da concentração de nitrato total pode se correlacionar às atividades agropecuárias desenvolvidas na região, uma vez que as atividades agrícolas ocupam a maior parte da bacia hidrográfica (FRAGA *et al.*, 2021).

O IQA das estações RD068, RD069, RD001 e RD013 não apresentaram tendência temporal significativa, enquanto o das estações RD004, RD007 e RD070 apresentaram tendência significativa para elevação.

Observou-se que onde o IQA apresentou tendências temporais de elevação, ocorreu a redução dos SST e da turbidez. Isso ocorreu nas estações localizadas na parte média do Rio Piranga e na estação localizada no rio Turvo, em Guaraciaba.

No geral, os resultados mostraram que a maioria dos cursos d'água da sub-bacia hidrográfica do Rio Piranga apresentaram valores estáveis dos parâmetros ao longo do período estudado, com maiores alterações associadas cloreto total, condutividade elétrica in loco, ferro total, nitrato e o pH da água. Porém, segundo Trindade *et al.* (2017), resultados negativos para a existência de tendência não provam a ausência de tendência.

A frequência de coleta nas estações fluviométricas deve ser levada em consideração para a otimização da rede de monitoramento. Para Britto *et al.* (2017), quem deve decidir a possibilidade de alterações na frequência de amostragem deve considerar as tendências de concentração dos parâmetros, a história dos resultados e, especialmente, o conhecimento específico do corpo de gestão. Segundo o estudo de Fraga *et al.* (2020), a frequência mensal de

amostragem dos parâmetros de qualidade das águas superficiais é a mais indicada para as sub-bacias hidrográficas do rio Doce.

A utilização de métodos estatísticos multivariados como ferramentas exploratórias para a interpretação de dados sobre qualidade das águas superficiais concomitantemente com as análises de tendência proporciona um instrumento orientador para tomada de decisão a respeito dos recursos hídricos.

4 CONCLUSÕES

A análise das tendências temporais e espaciais por meio de métodos estatísticos multivariados dos parâmetros de qualidade das águas superficiais monitoradas por estações fluviométricas são fundamentais para o estudo da evolução da qualidade da água em uma bacia hidrográfica.

Na bacia hidrográfica do Rio Piranga foi observado que a estação de monitoramento localizada próxima a do encontro do Rio Piranga com o rio do Carmo, após a cidade de Ponte Nova, apresentou as maiores variações em relação aos parâmetros estudados. Esse fato pode ser explicado devido à maior concentração populacional nas proximidades da calha do Rio Piranga, que contribui principalmente com lançamento de esgoto sanitário sem tratamento no curso d'água.

A elevação das concentrações de cloreto total e nitrato total, em todas as estações da área de estudo, evidencia a degradação da qualidade da água por meio do lançamento de esgoto doméstico sem tratamento nos cursos d'água da região. Nenhuma variável apresentou tendência de melhora em todas as estações simultaneamente. O fato de o IQA não mostrar tendência temporal de elevação, já que o indicador apresentou estabilidade ao longo da série histórica, demonstra a necessidade de fortalecimento das ações para recuperação da qualidade das águas superficiais na sub-bacia. Destaca-se a importância da ação de órgãos colegiados como os comitês de bacia hidrográfica para a implantação de programas e projetos que visam a melhoria da qualidade das águas superficiais.

Destaca-se ainda que a elevação da concentração de ferro total ocorreu ao longo de toda a sub-bacia hidrográfica, sendo que a média da série histórica está em desconformidade com a DN 01/2008 (COPAM; CERH, 2008). Tal aumento da concentração pode estar ocorrendo devido ao aumento do escoamento superficial que carrega sedimentos para os cursos

d'água, o que demanda um estudo maior sobre as causas do aumento da concentração de ferro total nos rios da bacia hidrográfica.

Por fim, a técnica de agrupamento hierárquico associado às análises temporais de cada estação apresentou promissores resultados. As análises especiais na bacia hidrográfica do Rio Piranga possibilitam tomadas de decisão de acordo com as prioridades apresentadas pelas análises temporais dos parâmetros de qualidade das águas superficiais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **HidroWeb**: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>. Acesso em: 10 out. 2018.

ALVES, J. P. H. *et al.* Monitoring water quality of the Sergipe River basin: an evaluation using multivariate data analysis. **RBRH**, Porto Alegre, v. 23, e27, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170124>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/nfGR8xzpRsYgBPjPbtP9FyJ/?lang=en> Acesso em: 28 out. 2018.

BARRETO, L. V. *et al.* Relação entre vazão e qualidade da água em uma seção de rio. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v.9, n.1, p.118-129, 2014.

BRITTO, F. B. *et al.* Surface water quality assessment of the main tributaries in the lower São Francisco River, Sergipe. **RBRH**, Porto Alegre, v. 23, e28, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170061>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/BBJ9HdwX9wrtFdYcP3RLkFx/?lang=en> Acesso em: 28 out. 2018.

CARVALHO, K. Q. *et al.* Influence of urban area on the water quality of the Campo River basin, Paraná state, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v.75, n.4, p. 96-106, 2015.

COELHO, M. *et al.* Statistical validity of water quality time series in urban watersheds. **RBRH**, Porto Alegre, v. 22, e51, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217160071>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/KyMFpKdRKYHvzh8pjQhvGCM/?lang=en> Acesso em: 28 out. 2018.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais); CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (Minas Gerais). **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/ CERH-MG n. 1, de 5 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. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>. Acesso em: 21 mar. 2021.

CONSORCIO ECOPLAN-LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce.** Governador Valadares, 2010.

DIAMANTINI, E. *et al.* Driver detection of water quality trends in three large European river basins. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.612, p. 49-62, 2018.

FRAGA, M. D. *et al.* Use of multivariate statistical methods to analyze the monitoring of surface water quality in the Doce River basin, Minas Gerais, Brazil. **Environ Sci Pollut Res**, Switzerland, v.27, p. 35303–35318, 2020.

FRAGA, M. S. *et al.* Avaliação da qualidade das águas superficiais na circunscrição hidrográfica do Rio Piranga utilizando análise estatística multivariada e não-paramétrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.14, n.2, p. 694-710, 2021.

HELSEL, D.R.; HIRSCH, R.M. **Trend analysis: statistical methods in water resources.** Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1992.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce e dos Planos de Ações de Recursos Hídricos para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce.** Belo Horizonte: IGAM, 2007.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Séries históricas de monitoramento de qualidade das águas superficiais do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: IGAM, 2018. Repositório Institucional. Disponível em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/405>. Acesso em: 28 out. 2018.

KALSCHEUR, K. N. *et al.* Effects of anthropogenic inputs on the organic quality of urbanized streams. **Water Research**, London, v.46, p.2515-2524, 2012.

MAINALI, J; CHANG H. Landscape and anthropogenic factors affecting spatial patterns of water quality trends in a large river basin, South Korea. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.564, p. 26-40, 2018.

MORETTO, D. L. *et al.* Calibration of water quality index (WQI) based on Resolution n° 357/2005 of the Environment National Council (CONAMA). **Acta Limnologica Brasiliensia**, Rio Claro, v.24, n.1, p. 29-42, 2012.

MOSTAFAEI, A. Application of multivariate statistical methods and water-quality index to evaluation of water quality in the Kashkan River. **Environmental Management**, Switzerland, v.53, p.865-881, 2014.

PASSOS, J. B. C. *et al.* Multivariate statistics for spatial and seasonal quality assessment of water in the Doce River basin, Southeastern Brazil. **Environ Monit Assess**, Switzerland, v. 93, n. 125, 2021.

OLIVEIRA, J. C. O. *et al.* Análise da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Pará – MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: ABRH, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323915701_ANALISE_DA_QUALIDADE_DAS_AGUAS_SUPERFICIAIS_DA_BACIA_HIDROGRAFICA_DO_RIO_PARA-MG. Acesso em: 28 de out. 2018.

SALVADOR, M. M. **Identificação e avaliação de eventos extremos na bacia hidrográfica do Rio Piranga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

SANTOLIN, C. V. A. *et al.* Distribution and environmental impact evaluation of metals in sediments from the Doce River Basin, Brazil. **Environ. Earth Sci.**, Switzerland, v.74, p.1235-1248, 2015.

TRINDADE, A. L. C. *et al.* Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 13-24, fev. 2017.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 f. Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/adriano/livro/Caderno%20dedatico%20multivariada%20-%20LIVRO%20FINAL%201.pdf>. Acesso em: 28 out. 2018.

VOZA, D. *et al.* Application of multivariate statistical techniques in the water quality assessment of Danube River, Serbia. **Archives of Environmental Protection**, Polish, v. 41, n. 4, p. 96-103, 2015.