

Uso de estatística multivariada para avaliação de parâmetros de qualidade da água na Bacia do Rio Paracatu

Victor Crespo de Oliveira ^{1*}, Leonardo França da Silva ², Bruna Nogueira Rezende ³, Isabely Cristina Lourenço dos Santos ⁴, Marcos Antônio Pereira da Fonseca Maltez ⁵, Carlos Eduardo Alves Oliveira ⁶

¹Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Paulista, Brasil. (*Autor correspondente: victor.oliveira1@ufv.br).

²Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

³Doutoranda em Ciências, Universidade de São Paulo, Brasil.

⁴Mestranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

⁵Doutorando em Agronegócios, Universidade Federal Rio Grande do Sul, Brasil.

⁶Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 04/10/2022 – Revisado em: 20/01/2023 – Aceito em: 02/04/2023

RESUMO

As alterações na qualidade e quantidade das águas superficiais estão diretamente relacionadas com ações antrópicas e o uso e ocupação do solo. Deste modo, objetivou-se com este estudo avaliar se houve alteração nos parâmetros de qualidade da água na Bacia do rio Paracatu no período de 2009 e 2019, por meio do uso de técnicas da estatística multivariada. Para isso, foram obtidos dados mensais junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Com base na análise realizada foi possível caracterizar a localização das estações de monitoramento, quanto à indício de contaminação por atividades agrícolas, contaminação por esgoto doméstico ou ausência de indicativo de contaminação. Para o ano de 2009 foi verificado que a qualidade da água da bacia do Paracatu foi afetada em maior magnitude, pelas atividades agrícolas, 6 estações ao todo. Já no ano 2019, não houve destaque de uma fonte de poluição, havendo 3 estações em cada categoria determinada. De modo geral, foi possível constatar que entre os anos de 2009 e 2019 houveram indicadores de melhoria dos parâmetros de qualidade da água para a Bacia do Rio Paracatu, dado que, houve aparente redução do nível de poluição proveniente de atividades agrícolas e aumento do número de estações de monitoramento sem indícios de poluição tanto por atividade agrícola como por esgoto doméstico. Este cenário indicou que houveram alterações positivas dos parâmetros de qualidade da água no período avaliado, no que tange os aspectos ambientais.

Palavras-Chaves: Qualidade da água, Comparativo, Cluster, Análise de Componentes Principais.

Use of multivariate statistics to evaluate water quality parameters in the Paracatu River Basin

ABSTRACT

Changes in the quality and quantity of surface water are directly related to anthropic actions and soil use and occupation. Thus, the objective of this study was to evaluate whether there was a change in the water quality parameters in the Paracatu River Basin in the period 2009 and 2019, through the use of multivariate statistics techniques. For this, monthly data were obtained from the Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Based on the analysis carried out, it was possible to characterize the location of the monitoring stations, regarding signs of contamination by agricultural activities, contamination by domestic sewage or absence of indicative contamination. For the year 2009 it was found that the water quality of the Paracatu basin was affected to a greater extent by agricultural activities, 6 stations in all. In the year 2019, there was no highlight of a source of pollution, with 3 stations in each determined category. In general, it was possible to verify that between the years 2009 and 2019 there were indications of improvement in the parameters of water quality for the Paracatu River Basin, given that there was an apparent reduction in the level of pollution from agricultural activities and an increase in the number of monitoring stations with no signs of pollution either by agricultural activity or by domestic sewage. This scenario indicated that there were positive changes in the water quality parameters in the evaluated period, with regard to environmental aspects.

Keywords: Water Quality, Comparative, Cluster, Principal Component Analysis.

Oliveira, V. C., Silva, L. F., Resende, B. N., Santos, I. C. L., Maltez, M. A. P. F., Oliveira, C. E (2023). Uso de estatística multivariada para avaliação de parâmetros de qualidade da água na Bacia do Rio Paracatu. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.11, n.2, p.71-85.



1. Introdução

Questões voltadas aos problemas socioambientais merecem constante atenção, de tal que se busquem soluções que possibilitem a melhor aproximação do que se entende por desenvolvimento sustentável. A gestão dos recursos hídricos, por sua vez, é de extrema importância, visto que a água é um elemento indispensável para a vida na Terra, e o seu uso e gozo é um direito de todos (Oliveira et al., 2017).

As alterações na qualidade e quantidade das águas superficiais estão diretamente relacionadas com ações antrópicas e com processos de degradação do uso e cobertura do solo. De forma geral, ações que alteram repentinamente o uso e cobertura do solo, como aumento das áreas irrigadas, substituição de florestas nativas por pastagem, expansão de áreas urbanas, dentre outras, causam impactos diretos na qualidade da água, alterando parâmetros como concentração de sólidos dissolvidos e de nutrientes e disponibilidade de oxigênio (Mouri et al. 2011; Foote et al. 2015; Mishra et al. 2021). Em virtude da escassez hídrica que ocorre em determinados territórios, e do alto custo associado ao tratamento de água, é necessário identificar os poluentes e as fontes de contaminação, a fim de preservar a qualidade e quantidade das fontes superficiais e subterrâneas de água (Anazawa, 2018).

De acordo com Silva (2019), há uma forte relação entre o avanço demográfico e as alterações na qualidade e disponibilidade das águas, o que leva à ocorrência de impactos negativos de ordem ambiental, social e econômica. Como consequência do avanço demográfico, destaca-se aumento da deposição de efluentes de origem doméstica, assim como, o crescimento de instalações industriais e empreendimentos que dependem diretamente da utilização dos recursos hídricos. Vale destacar que, a deposição de efluentes domésticos em curso hídrico, sem o devido tratamento, é capaz de gerar degradação na qualidade da água, uma vez que afeta diretamente os parâmetros biológicos, químicos e físicos da água (Gloria, Horn & Hilgemann, 2017). Em relação aos setores industrial e agronegócio, destaca-se a contaminação hídrica por efluentes industriais, caracterizados por conter substâncias e elementos utilizados durante os processos, tais como presença de metais pesados e antibióticos.

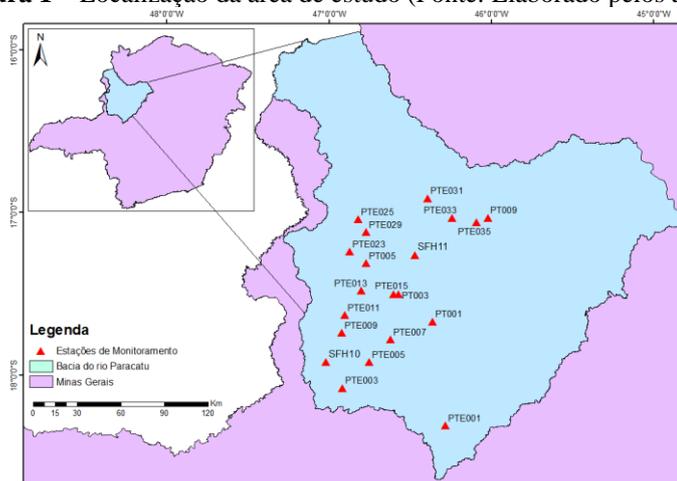
O monitoramento da qualidade das águas apresenta-se como uma importante ferramenta de manutenção e preservação dos recursos hídricos. Para a avaliação da disponibilidade quali-quantitativa dos recursos hídricos, podem ser aplicados vários modelos estatísticos, sendo a técnica da estatística multivariada, cuja finalidade é auxiliar na identificação de variáveis e parâmetros que interferem diretamente nos recursos hídricos, uma das mais utilizadas. Esta técnica pode fazer uso de *clusters*, que permitem realizar a classificação dos parâmetros de acordo com um critério de seleção predeterminado. A classificação resultante pode apresentar alta homogeneidade interna (dentro do *cluster*) e alta heterogeneidade externa (entre os *clusters*), convertendo-se em uma ferramenta robusta que fornece resultados confiáveis e mais visuais, auxiliando na interpretação dos dados e tomada de decisão (Maia, Silva, & Libânio, 2019).

Ante o exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar se houve alteração nos parâmetros de qualidade da água na Bacia do rio Paracatu no período de 2009 e 2019, por meio do uso de técnicas da estatística multivariada.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A bacia do rio Paracatu (Figura 1) é uma sub-bacia do rio São Francisco e encontra-se inserida quase totalmente na região Noroeste do estado de Minas Gerais, com pequenas áreas adentrando no estado de Goiás e no Distrito Federal. Neste estudo, a avaliação foi realizada considerando-se apenas a porção da bacia situada no estado de Minas Gerais.

Figura 1 – Localização da área de estudo (Fonte: Elaborado pelos autores).

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A bacia em estudo possui uma área de drenagem de aproximadamente 20,745 km², e é integrada pelas sub-bacias do rio da Prata, rio Escuro, rio Verde, ribeirão Entre Ribeiros, Ribeirão Escurinho e um trecho do rio Preto (IGAM, 2013). Abrange cerca de 16 municípios, que possuem população total de aproximadamente 280.736 mil habitantes (CBH do Rio Paracatu, 2019). A bacia destaca-se pela intensa atividade agrícola, agricultura irrigada e mineração. Conflitos entre os usuários de água são frequentes, em virtude do crescimento da irrigação, aliado à baixa eficiência dos sistemas utilizados e ao excesso dos limites outorgados (Silva, 2019).

2.2 Elaboração dos mapas

Para elaboração dos mapas que constam neste trabalho, foi utilizada como ferramenta de processamento e representação gráfica dos dados geospaciais o *software* ArcGIS[®], versão 10.3, de licença do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Para a elaboração dos mapas da bacia hidrográfica, utilizou-se o *shapefile* de otocodificação de bacias hidrográficas disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e os limites das unidades federativas disponibilizados pelo IBGE, ambos na escala 1:250.000. Para confeccionar o mapa de uso e cobertura do solo da bacia, utilizou-se a base de dados do MapBiomias (2021), considerando os anos de 2009 (coleção 4.1) e 2019 (coleção 5.0). Vale mencionar que a classificação feita pelo MapBiomias baseia-se no algoritmo *Random Forest*, utilizando árvores de decisões automáticas. As coleções de imagens utilizadas apresentavam resolução espacial de 30 m, e foram produzidas pelos satélites Landsat 5, 7 e 8.

2.3 Análise dos dados

Os parâmetros de qualidade da água foram avaliados por meio da análise de componentes principais (ACP) e da análise de *Cluster* (AC). A manipulação e análise dos dados foi conduzida no *software* R (versão 1.4.1717). Inicialmente, a base de dados foi padronizada utilizando escala Z (média igual a zero e desvio padrão igual a um), utilizando a função *vegdist* do pacote *Vegan* (OKSANEN et al., 2017). A análise de *cluster* hierárquica foi realizada considerando o agrupamento dos *clusters* baseados na mínima variância, realizada por meio do pacote *stats* (versão 3.6.2), utilizando a função *hclust* e método *ward.D*. Esta análise foi aplicada para verificar a semelhança entre as estações de monitoramento consideradas no estudo. A Análise de Componentes Principais (ACP) foi realizada e utilizou-se a metodologia *Broken-Stick Model*, para determinação da quantidade de componentes principais a serem retirados. Para auxiliar na visualização dos dados da ACP, foram elaborados gráficos do tipo *biplot*.

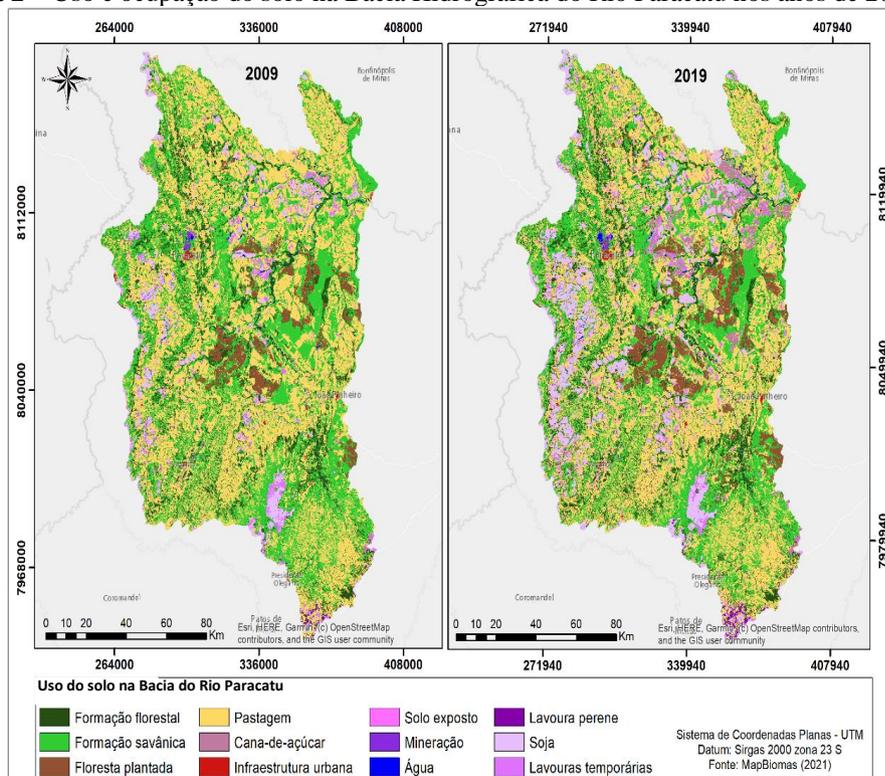
Vale destacar que a correlação entre os componentes principais e os parâmetros de qualidade das águas foi classificada como forte (maior que 0,75), moderada (entre 0,75 e 0,5) ou fraca (entre 0,5 e 0,3), considerando o módulo deste valor (Liu et al., 2003; Gao et al., 2016).

Os dados de monitoramento da qualidade de água foram obtidos junto ao Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM), sendo referentes às médias mensais dos meses de janeiro a dezembro dos anos de 2009 e 2019. Ao todo, foram utilizados dados de 20 estações de monitoramento localizadas na Bacia do rio Paracatu, e os parâmetros considerados foram: cloreto total ($\text{mg.L}^{-1} \text{Cl}$), clorofila a ($\mu\text{g.L}^{-1}$), coliformes totais (NMP.100 ml^{-1}), condutividade elétrica ($\mu\text{mho.cm}^{-1}$), cor verdadeira (mg Pt.L^{-1}), DBO ($\text{mg.L}^{-1} \text{O}_2$), DQO ($\text{mg.L}^{-1} \text{O}_2$), feoftina a ($\mu\text{g.L}^{-1}$), ferro dissolvido ($\text{mg.L}^{-1} \text{Fe}$), fósforo total ($\text{mg.L}^{-1} \text{P}$), manganês total ($\text{mg.L}^{-1} \text{Mn}$), nitrato ($\text{mg.L}^{-1} \text{N}$), nitrito ($\text{mg.L}^{-1} \text{N}$), oxigênio dissolvido ($\text{mg.L}^{-1} \text{O}_2$), pH, sólidos totais (mg.L^{-1}), temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$), turbidez (UNT) e zinco total ($\text{mg.L}^{-1} \text{Zn}$).

3. Resultados e Discussão

Os mapas de uso e ocupação do solo na região da Bacia do Rio Paracatu nos anos de 2009 e 2019 estão ilustrados na Figura 2. Conforme as características do uso e ocupação do solo desta região nos períodos avaliados, foram definidas as seguintes classes: formação florestal, formação savânica (ou cerrado), floresta plantada, pastagem, cana-de-açúcar, soja, lavouras temporárias (milho, feijão, mandioca, dentre outras), lavoura perene, mineração, infraestrutura urbana, solo exposto e água. Vale mencionar que, cana-de-açúcar e soja também são consideradas lavouras temporárias, contudo foram alocadas em classes isoladas para que fosse possível distinguir o comportamento dessas isoladamente.

Figura 2 – Uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu nos anos de 2009 e 2019



Fonte: Resende et al. (2022).

Na Tabela 1 estão listadas as classes de uso e ocupação do solo consideradas, com suas respectivas áreas e percentual de ocupação na Bacia do Rio Paracatu, para os dois períodos avaliados (Resende et al., 2021).

Tabela 1 – Percentual das áreas da Bacia do Rio Paracatu ocupadas pelas categorias de uso e cobertura solo, nos anos de 2009 e 2019

Classes de uso do solo	2009		2019	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Formação Florestal	2.244,78	10,83	2.363,09	11,39
Formação Savânica	6.969,23	33,63	6.175,77	29,77
Floresta Plantada	699,25	3,37	1.045,77	5,04
Pastagem	9.356,78	45,15	8.148,62	39,28
Cana-de-açúcar	5,28	0,03	309,87	1,49
Soja	692,49	3,34	1.507,06	7,26
Lavouras temporárias	616,84	2,98	988,44	4,76
Lavoura perene	20,27	0,10	51,66	0,25
Mineração	21,85	0,11	18,09	0,09
Solo exposto	15,04	0,07	30,20	0,15
Água	74,53	0,36	66,82	0,32
Infraestrutura urbana	28,65	0,14	39,58	0,19
Total	20.744,99	100	20.744,97	100

Fonte: Resende et al. (2022).

Como pode ser observado por meio da Tabela 1, no ano de 2009 a classe mais predominante foi a de pastagem, totalizando 45,15% da área total da bacia hidrográfica, seguida pelas classes formação savânica (33,63%) e formação florestal (10,83%). Ressalta-se que a ocupação do solo pelas classes floresta plantada e agricultura (cana-de-açúcar, soja, lavouras temporárias, lavouras perenes) tinham baixas expressividades no ano de 2009 (3,37% e 6,45%, respectivamente). Entretanto, ao ser realizada a mesma avaliação no ano de 2019, observou-se que ocorreram profundas mudanças neste cenário, principalmente em decorrência do crescimento das classes floresta plantada e agricultura, esta última ocupando mais que o dobro da área ocupada no ano de 2009, 13,76%, fato este que está fortemente relacionado ao aumento significativo das classes cana-de-açúcar, soja e lavouras temporárias; 4966%, 217% e 159%, respectivamente.

Por meio da observação comparativa de uso e ocupação dos solos nos dois anos em questão (Figura 2 e Tabela 1), pode-se verificar que os maiores aumentos de áreas ocorreram para as classes soja (3,92%), lavouras temporárias (1,78%), floresta plantada (1,67%) e cana-de-açúcar (1,46%). Por outro lado, as classes pastagem e cerrado apresentaram as maiores quedas, reduzindo suas áreas de ocupação em 5,87% e 3,86%, respectivamente. De modo geral, enfatiza-se que a redução das áreas de ocupação destas classes pode estar diretamente relacionada com a expansão das classes agricultura e floresta plantada.

Na Tabela 2 estão listadas as Análises de Componentes Principais (ACP's) dos dados de qualidade da água para os anos de 2009 e 2019, exibindo os três primeiros componentes principais (CPs) do ano de 2009 e os dois primeiros CPs do ano de 2019, por explicarem a maior parte da variação total dos dados.

Tabela 2 – Análise de componentes principais (ACP) dos anos de 2009 e 2019, para os parâmetros de qualidade da água de 20 estações de monitoramento na Bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

Parâmetros	2009			2019	
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2
Cloreto total	0,085	<u>-0,635</u>	<u>-0,746</u>	0,254	0,853
Clorofila a	-0,750	0,036	0,065	0,857	0,048
Coliformes totais	-0,758	-0,183	0,096	0,421	0,407
Condutividade elétrica	0,308	-0,828	0,311	0,206	0,817
Cor verdadeira	-0,983	0,071	0,057	<u>0,637</u>	<u>-0,596</u>
DBO	0,153	<u>-0,593</u>	0,412	0,294	<u>0,668</u>
DQO	-0,784	-0,398	-0,159	0,754	-0,263
Feoftina a	0,118	<u>0,571</u>	-0,032	0,923	-0,278
Ferro dissolvido	-0,799	0,081	0,087	-0,370	-0,383
Fósforo total	<u>-0,639</u>	-0,007	-0,250	0,251	0,825
Manganês total	-0,990	-0,028	0,058	0,888	-0,316
Nitrato	0,133	<u>-0,629</u>	<u>-0,638</u>	0,158	0,808
Nitrito	-0,135	-0,407	-0,584	0,128	0,794
Oxigênio Dissolvido	-0,185	0,356	<u>-0,691</u>	-0,176	<u>-0,718</u>
pH	0,057	<u>-0,684</u>	0,311	0,242	0,296
Sólidos Totais	-0,942	-0,182	0,126	0,960	-0,179
Temp. da água	-0,332	0,472	-0,102	0,045	-0,163
Turbidez	-0,979	0,015	0,035	0,890	-0,377
Zinco total	-0,334	-0,435	0,281	<u>0,727</u>	0,081
Autovalor	7,028	3,572	2,367	6,296	5,532
Variância (%)	36,989	18,802	12,459	33,134	29,113
Variância acum. (%)	36,989	55,792	68,250	33,134	62,248

* Os valores em negrito apresentam correlação forte; Valores sublinhados apresentam correlação moderada.

**Legenda: DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

No ano de 2009, os três CP's que foram retidos explicaram 68,25% da variação dos dados, sendo que os dois primeiros foram responsáveis por 55,79% da variação total (Tabela 2). A CP1-2009 explicou 36,99% da variância, apresentando contribuição forte negativa para os seguintes parâmetros: clorofila a, coliformes totais, cor verdadeira, DQO, manganês total, sólidos totais e turbidez. No CP1-2009, não foram identificados parâmetros com contribuição forte positiva, e apenas para o parâmetro condutividade elétrica foi identificada contribuição fraca (CV = 0,308).

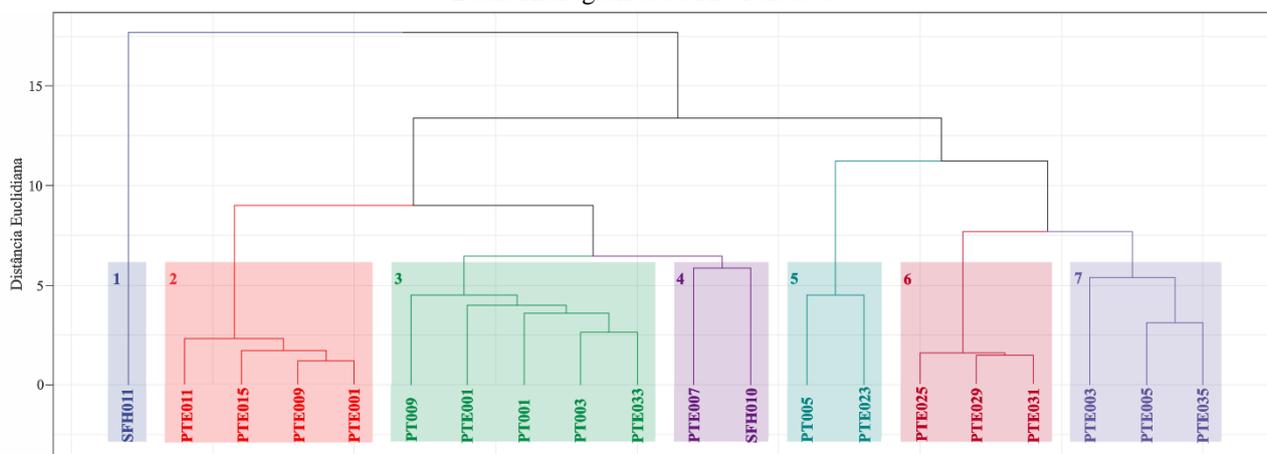
No CP2-2009, o único parâmetro com correlação forte foi a condutividade elétrica, que apresentou correlação negativa de -0,828. Contudo, os parâmetros Cloreto total (-0,635), DBO (-0,593), feoftina a (0,571), nitrato (-0,629) e pH (-0,684) apresentaram correlação moderada. Para o CP3-2009, não foram determinados parâmetros com correlação forte, apenas três parâmetros com correlação moderada [Cloreto total (-0,746), nitrato (-0,638) e OD (-0,691)], e todos esses apresentaram correlação negativa com o CP3-2009. Destaca-se que, a maior correlação positiva apresentada no CP3-2009 foi classificada como fraca [DBO (0,412)].

Para o ano de 2019, os dois CP's que foram retidos explicaram 62,25% da variação dos dados, sendo que o CP1-2019 foi o que explicou a maior variação (33,13%). De acordo com Tabela 2, verifica-se que o CP1-2019 apresentou correlação forte na maioria dos parâmetros que também foram assim classificados no

CP1-2009. Contudo, diferentemente do CP1-2009, a relação dos parâmetros com o CP1-2019 foi majoritariamente positiva. Os parâmetros com correlação forte com o CP1-2019 foram os seguintes: clorofila a (0,857), DQO (0,754), feofitina a (0,923), manganês total (0,888), sólidos totais (0,960) e turbidez (0,890). No CP2-2019, as maiores contribuições fortes positivas foram obtidas para cloreto total (0,853), condutividade elétrica (0,817), fósforo total (0,825), nitrato (0,808) e nitrito (0,794). A maior correlação negativa foi moderada, referente ao parâmetro oxigênio dissolvido [OD (-0,718)].

Com base nos dados listados na Tabela 2, foram gerados dendrogramas para os dois anos em estudo, com o agrupamento das estações de monitoramento realizado por semelhança dos parâmetros de qualidade da água. Para o ano de 2009 (Figura 3), as estações foram organizadas em sete grupos, sendo o maior representado por cinco estações (PT009, PTE001, PT001, PT003 e PTE033). O segundo maior grupo foi composto por quatro estações, que foram PTE011, PTE015, PTE009 e PTE013. Houve dois agrupamentos com três estações cada (PTE025, PTE029 e PTE031) (PTE003, PTE005 e PTE035), dois agrupamentos com duas estações (PTE007 e SFH010) (PT005 e PTE023) e apenas um grupo foi composto por uma única estação (SFH011).

Figura 3 – Dendrograma da análise de *cluster* para os dados dos parâmetros de qualidade da água em 2009 na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu.



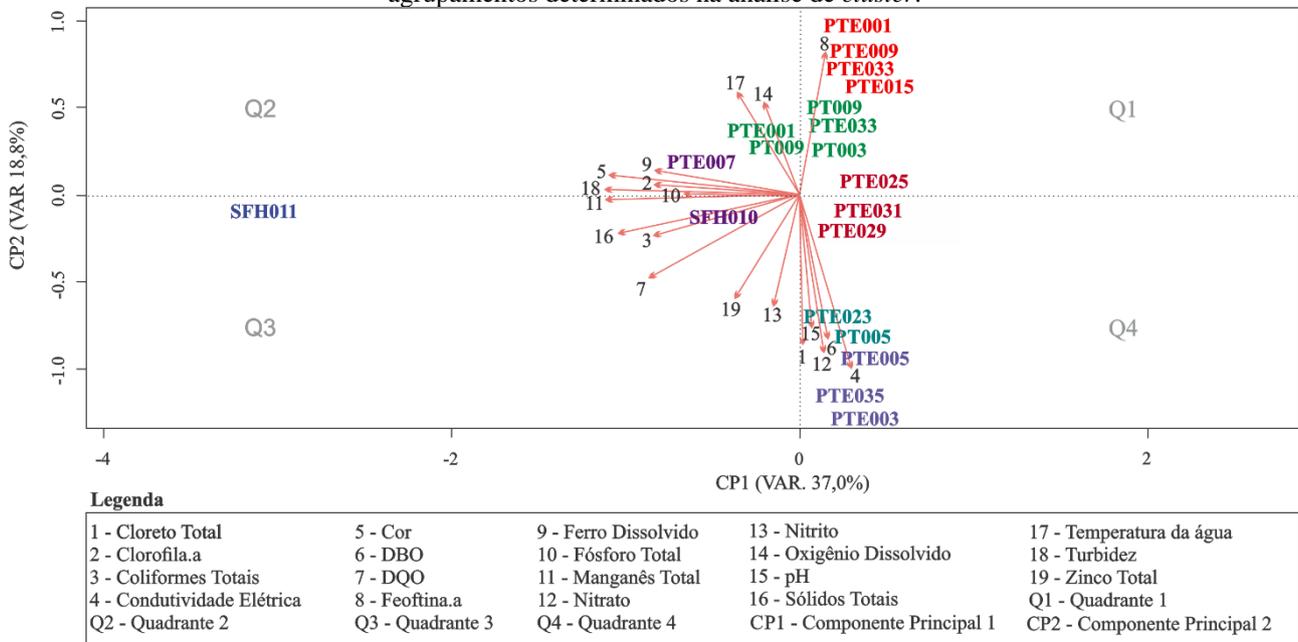
Fonte - Elaborado pelos autores (2022).

Como se pode observar na Figura 3, a estação SFH011 foi a que apresentou a maior distância euclidiana, quando comparada a todas as outras estações. Desta forma, pode-se dizer que é a estação que apresenta comportamento dos parâmetros da qualidade da água mais diferentes dentre as estações analisadas. As estações que apresentaram a menor distância euclidiana foram PTE009 e PTE013. Assim, é possível afirmar que as características da água destas duas estações são as que mais apresentaram semelhança dentre todas as estações analisadas, comparando-se uma estação com outra (duplas).

O gráfico tipo *biplot* ilustrado na Figura 4 permite avaliar quais foram os parâmetros de qualidade da água que influenciaram a configuração do agrupamento ilustrado na Figura 3. Por meio da análise da Figura 4, pode-se verificar que o CP1 apresentou maior relação inversa (sinal negativo) com os parâmetros cor verdadeira, ferro dissolvido, clorofila a turbidez, fosforo total, manganês total, sólidos totais, coliformes totais e DQO. Estes são parâmetros que estão diretamente relacionados à poluição das águas por esgoto doméstico (Cardoso et al., 2014; Barbosa et al., 2015). Assim, pode-se inferir que o CP1 está associado a ausência de poluição por esgoto doméstico, uma vez que se relaciona de forma inversa aos parâmetros citados. Destaca-se que o ângulo dos vetores desses parâmetros entre o CP1 é pequeno, o que indica a grande importância destes parâmetros para o CP1, pois quanto menor o ângulo (vetor-eixo componente principal), maior é a importância do parâmetro para a componente principal (Nonato et al., 2007).

A estação SFH011 apresentou comportamento discrepante dentre todas as analisadas, sendo diferente das demais principalmente pelos parâmetros associados ao lado negativo do CP1 (Figura 4). Na estação SFH011, os valores de cor verdadeira, ferro dissolvido, clorofila a turbidez, fósforo total, manganês total, sólidos totais, coliformes totais e DQO foram muito altos, quando comparados aos valores das outras estações. Este resultado justifica o posicionamento da estação SFH011 na Figura 4, e é uma indicação de que durante o ano de 2009 possivelmente houve grande aporte de esgoto doméstico sem tratamento nas proximidades desta estação, contaminando as águas da região.

Figura 4 – Gráfico *biplot* dos componentes principais 1 e 2 (CP1 e CP2) para os parâmetros de qualidade da água e estações de monitoramento avaliados no ano de 2009 na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu, com destaque para os sete agrupamentos determinados na análise de *cluster*.



Fonte - Elaborado pelos autores (2022).

Conforme ilustrado na Figura 4, o CP2 apresentou maior relação direta com a feoftina a, ao passo que, apresentou relação inversa com condutividade elétrica, nitrato, DBO e cloreto total. Ao avaliar estas relações, é possível inferir que o CP2 pode estar associado diretamente à ausência de poluição das águas pela agricultura. A relação inversa obtida para estes parâmetros citados é um indicativo de que a atividade agrícola na região não aumentou o teor de matéria orgânica e a condutividade elétrica da água na região (devido ao transporte de compostos iônicos - potássio, fósforo e nitrogênio) e, portanto, há indícios de que estas atividades foram bem manejadas (Medeiros et al., 2018).

As relações entre a localização das estações nos quadrantes do gráfico ilustrado na Figura 4 e a presença ou não de poluição estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Localização das estações de monitoramento por quadrante (Figura 4) e sua relação com a incidência de poluição das águas das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu.

Localização da estação	Q1	Q2	Q3	Q4
Poluição por esgoto doméstico	-	X	X	-
Poluição pela atividade agrícola	-	-	X	X

* (X) indica presença da poluição no quadrante

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

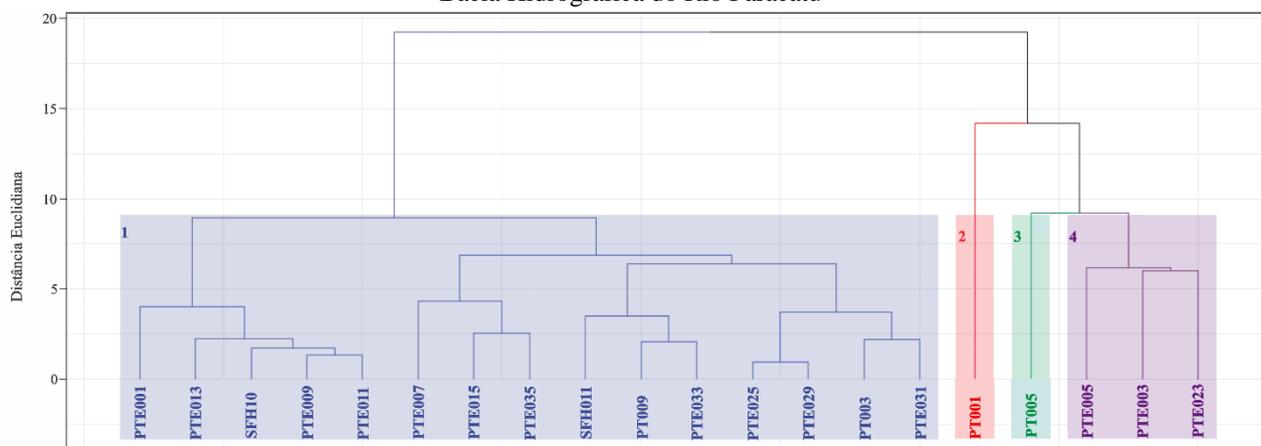
De modo geral, devido às associações feitas para cada componente principal (CP1 e CP2), pode-se dizer que as estações localizadas nos quadrantes 2 e 3 (Q2 e Q3) estão mais sujeitas a terem sido impactadas pela poluição de esgoto doméstico (Tabela 3). Quanto mais à esquerda e próximo da linha central a estação monitorada estiver, maior será a carga de poluição doméstica presente na região (como é o caso da estação SFH011). Desta forma, constata-se que a poluição por esgoto doméstico não foi predominante nas estações avaliadas em 2009 (Figura 4), uma vez que, a maioria das estações espalharam-se ao longo do eixo CP2, apresentando pouca distribuição ao longo do eixo CP1. Apenas três das vinte estações apresentaram maiores evidências de poluição por esgoto doméstico, estas pertencentes aos grupos um e quatro.

A distribuição das estações ao longo do eixo CP2 foi mais heterogênea, com predomínio de estações nos quadrantes Q1 e Q2. A distribuição das estações no Q1 indicou ausência de parâmetros de poluição das águas devido atividades agrícolas e esgoto doméstico (Tabela 3), ou seja, quanto mais a estação estiver na parte superior do Q1, menor é a tendência de apresentar poluição devido às duas origens. O contrário também é verdadeiro. Isto significa que quanto mais na parte inferior do Q3 a estação estiver localizada, maior é a evidência de que houve contaminação das águas por atividades agrícolas e esgoto doméstico. Partindo desta análise, pode-se inferir que nove estações apresentaram algum tipo de distúrbio nas águas devido à influência da agricultura (PTE003, PTE035, PTE005, PTE023, PT005, PTE029, SFH010, SFH011 e PTE031 – listadas em sequência da maior para a menor influência da poluição das águas devido a atividades agrícolas). Neste âmbito, estação e agrupamento mais poluídos devido a agricultura foram PTE003 e grupo 2, respectivamente.

As estações que apresentaram parâmetros característicos tanto de poluição por esgoto doméstico quanto por contaminação agrícola foram SFH010 e SFH011. As estações localizadas mais ao centro do gráfico (Figura 4) e localizadas no quadrante Q1 são as que tendem a apresentar melhores padrões de qualidade da água. Deste modo, as estações pertencentes ao grupo 2, 3 e 6 foram as que possivelmente apresentaram os melhores valores dos parâmetros de qualidade da água.

Para o ano de 2019, foram determinadas quatro classes para o agrupamento das estações, devido à melhor explicação de cada grupo (Figura 5).

Figura 5 – Dendrograma da análise de *cluster* para os dados dos parâmetros de qualidade da água em 2019 na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu

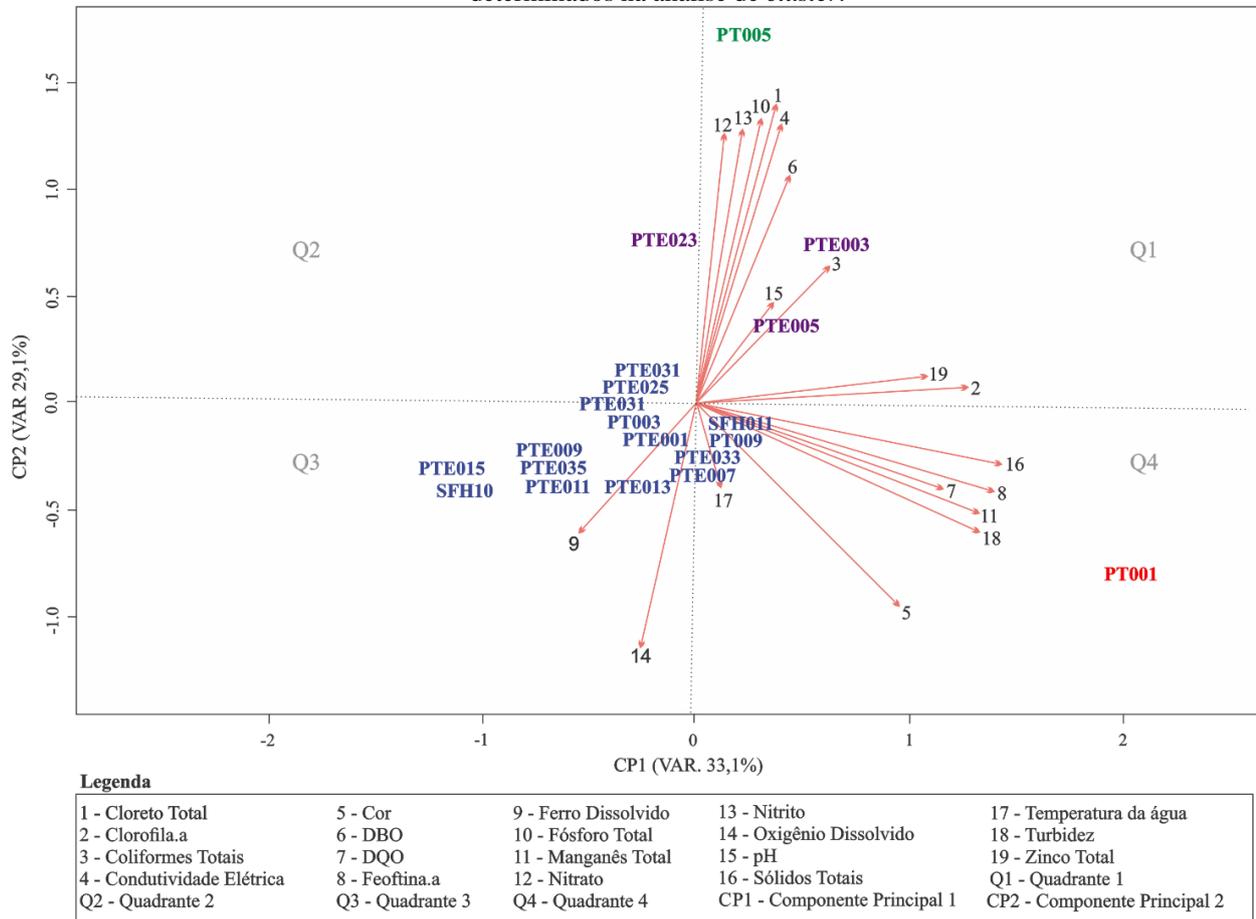


Fonte - Elaborado pelos autores (2022).

Conforme ilustrado na Figura 5, o maior agrupamento foi o número 1 (15 estações), seguido pelo grupo 4 (3 estações) e os dois menores grupos 2 e 3 foram formados por apenas uma estação cada. A estação PT001 foi a estação mais diferente dentre todas as avaliadas (Figura 5), devido a maior distância euclidiana determinada para esta estação. Em contrapartida, as estações que apresentaram os valores dos parâmetros de qualidade da água mais semelhantes entre si foram PTE025 e PTE029, ambas pertencentes ao grupo 1.

Para verificar quais foram os principais parâmetros que determinaram os agrupamentos ilustrados na Figura 5, foi confeccionado um gráfico *biplot* (Figura 6), para os componentes principais 1 e 2 (CP 1 e CP2). Por meio da análise da Figura 6, constata-se que os parâmetros coliformes totais, zinco total, clorofila a sólidos totais, DQO, feoftina a manganês total, turbidez e cor verdadeira apresentaram importante contribuição positiva para o CP1. Similarmente a análise realizada para o ano de 2009, pode-se inferir que o CP1 está relacionado a poluição das águas por esgoto doméstico, com base na contribuição dos parâmetros citados e nos trabalhos de Cardoso et al. (2014) e Barbosa et al. (2015).

Figura 6 – *Biplot* dos componentes principais 1 e 2 (CP1 e CP2) para os parâmetros de qualidade da água e estações de monitoramento avaliados em 2019 na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu, com destaque para os quatro agrupamentos determinados na análise de *cluster*.



*Q1, Q2, Q3 e Q4 são os quadrantes do gráfico e as cores dos nomes das estações remetem ao agrupamento gerado na análise de *cluster*.

**Legenda: DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

Fonte - Elaborado pelos autores (2022).

Para o CP2, houve correlação forte positiva dos parâmetros cloreto total, fósforo total, condutividade elétrica, nitrato, nitrito, bem como contribuição moderada negativa do parâmetro oxigênio dissolvido e cor verdadeira. Estes resultados são um indicativo de que o uso do solo para atividades agrícolas impactou a qualidade da água no local, pois, de acordo com o Camara et al. (2019), este tipo de atividade pode desequilibrar o pH, aumentar o aporte de metais pesados, nutrientes (fósforo e nitrogênio) e material orgânico. Tais alterações estão associadas a redução da qualidade da água, devido a redução do pH, aumento da

condutividade elétrica, aumento da demanda bioquímica de oxigênio, redução do oxigênio dissolvido e aumento da concentração de nutrientes (fósforo total, nitrito, nitrato) e metais pesados. Dessa forma, ao considerar os parâmetros de qualidade da água que influenciaram o CP2-2019, pode-se inferir que este componente principal está relacionado com a poluição das águas devido à atividade agrícola.

Partindo das análises e determinações acima descritas, a interpretação do gráfico ilustrado na Figura 6 implica que as estações localizadas nos quadrantes Q1 e Q4 apresentaram parâmetros da qualidade da água que se relacionam com a contaminação por esgoto doméstico, ao passo que as estações localizadas no quadrante Q1 e Q2 estão mais associadas à poluição das águas devido ao uso do solo pelas atividades agrícolas. Isto significa que quanto maior for o valor do eixo CP2 da estação, maior será a contaminação das águas devido à atividade agrícola (Figura 6).

A Tabela 4 lista as relações entre a localização da estação no gráfico ilustrado na Figura 6 com a provável origem de contaminação da água.

Tabela 4 - Localização das estações de monitoramento por quadrante (Figura 6) e sua relação com a incidência de poluição das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu.

Localização da estação	Q1	Q2	Q3	Q4
Poluição por esgoto doméstico	X	-	-	X
Poluição pela atividade agrícola	X	X	-	-

* (X) indica presença da poluição no quadrante

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Conforme pode-se verificar por meio da Tabela 4, as estações localizadas no Q1 apresentaram parâmetros que indicam tanto contaminação por esgoto doméstico quanto por atividades agrícolas. No quadrante Q2, as estações indicaram contaminação devido a atividades agrícolas, mas não por esgoto doméstico. As estações localizadas no Q3 podem ser consideradas as que apresentaram melhores parâmetros do ponto de vista da qualidade da água, haja vista que não indicaram contaminação por esgoto doméstico nem por atividades agrícolas. No quadrante Q4, as estações que ali foram localizadas não indicaram contaminação das águas devido à atividade agrícola, mas apresentaram contaminação por esgoto doméstico.

De modo geral, quanto mais à direita e distante do eixo CP1 a estação estiver localizada, maior é a contaminação por esgoto doméstico. Assim, é possível inferir que a estação PT001 (grupo 2) foi a mais contaminada por esgoto doméstico no período de 2019, dentre todas as estações avaliadas. Também pode-se verificar que a maioria das estações não apresentaram problemas na qualidade da água por deposição de esgoto doméstico, sendo que apenas quatro das vinte estações avaliadas indicaram distúrbio nos parâmetros de qualidade em decorrência deste tipo de poluição (PT001, PTE003, PTE005, PT005).

O agrupamento 3, composto somente pela estação PT005, foi o que mais se diferenciou (maior distância euclidiana – Figura 5), em virtude de seus valores de cloreto total, fósforo total, nitrito, nitrato e condutividade elétrica, que foram muito acima da média das outras estações avaliadas. Como a localização da estação PT005 no gráfico da Figura 6 está no quadrante Q1, afastada do eixo CP1 e próxima do eixo CP2, tornou-se evidente que a qualidade da água desta estação foi afetada mais diretamente pela atividade agrícola, tendo a poluição por esgoto doméstico menor influência.

Diferentemente do comportamento verificado no ano de 2009, as estações avaliadas em 2019 apresentaram comportamento mais homogêneo (Figura 5), como pode ser verificado pela distribuição do grupo 1. O grupo 1 foi o que apresentou os melhores parâmetros de qualidade da água (maioria das estações estão localizadas no quadrante Q3) e, portanto, pode-se inferir que maioria das estações deste grupo não apresentaram grandes distúrbios em decorrência da poluição por esgoto doméstico ou atividade agrícola. As três estações que compõem o grupo 4 ficaram mais dispersas e apresentaram indícios de distúrbios por poluição agrícola e esgoto doméstico.

Ao comparar os resultados de 2009 e 2019 (Tabela 5), verificou-se que a distribuição das estações no ano de 2019 foi mais homogênea, indicando maior regularidade dos parâmetros da qualidade da água avaliados

entre as estações. Conforme pode ser observado por meio da Figura 7, os agrupamentos gerados na análise de *cluster*, para os dois anos analisados, tiveram forte relação com a posição geográfica das estações, fato que pode ser verificado pela proximidade das estações enquadradas em um mesmo grupo. Isto era um resultado esperado, devido a influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água de uma região.

Tabela 5 - Classificação das estações de monitoramento de acordo com análise realizada do ano de 2009 e 2019.

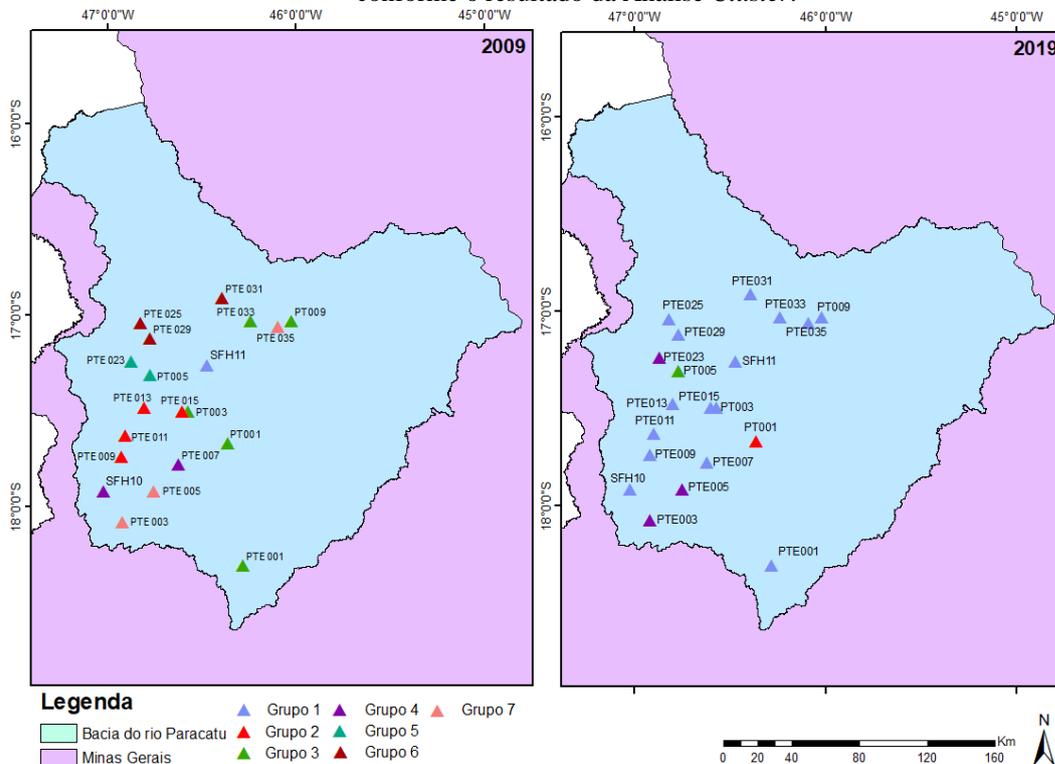
Classificação	A+ED	ED	A	S/ A+ED
Número de estações	2009	3	3	6
	2019	3	3	11

* As colunas da tabela indicam a quantidade de estações que apresentaram: (A + ED) poluição, devido Agricultura e Esgoto doméstico; (ED) poluição somente por esgoto doméstico; (A) poluição somente devido à agricultura; (S/ A+ED) sem indicativo de poluição de atividades agrícolas e de esgoto doméstico. Ao todo foram analisadas 20 estações.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Conforme listado na Tabela 5, constatou-se que entre os anos de 2009 e 2019 houve redução da quantidade de estações com potencial de contaminação pela atividade agrícola. Eram seis estações em 2009 e passaram a ser três estações em 2019. Esta redução veio acompanhada de um aumento da classe sem indicativo de poluição de atividades agrícolas e de esgoto doméstico (S/A+ED), dado que no ano de 2009 eram oito estações e no ano de 2019 observaram-se onze estações. As outras classes (A+ED e ED) listadas na Tabela 5 permaneceram com a mesma quantidade de estações em ambos os anos.

Figura 7 –Localização das estações de monitoramento na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu representadas conforme o resultado da Análise *Cluster*.



Fonte - Elaborado pelos autores (2022).

Com base nos resultados listados na Tabela 5 e nas análises realizadas, fez-se possível inferir que, do ponto de vista global, a qualidade da água da bacia do Paracatu apresentou indícios de melhoria entre os anos de 2009 e 2019, devido à redução aparente da poluição proveniente da agricultura e aumento da quantidade de estações sem indícios de poluição de atividades agrícolas e de esgoto doméstico. Esta melhoria dos parâmetros na qualidade da água vai de encontro com os preceitos defendidos pela resolução CONAMA 357/05 (Brasil, 2005), que norteia, em esfera federal, a caracterização dos parâmetros da qualidade das águas. Esta resolução aponta que o uso e os padrões de qualidade da água são aspectos fundamentais para à vida, bem como para o desenvolvimento das mais diversas atividades humanas. Dessa forma, a melhoria evidenciada pode trazer melhores condições para o desenvolvimento e qualidade de vida humana na região estudada.

4. Conclusões

O uso de técnicas da estatística multivariada permitiu uma melhor visualização das relações entre os parâmetros avaliados, além de ter facilitado o estabelecimento de conexões com a qualidade da água nas estações de monitoramento avaliadas nos anos de 2009 e 2019. A análise de *cluster* agrupou as estações por semelhança dos parâmetros da qualidade da água, sendo verificado que, para os dois anos avaliados, as estações agrupadas foram próximas geograficamente. Este era um resultado esperado, devido à influência do uso do solo sob as características da água.

A Análise de Componentes Principais determinou a relação dos parâmetros de qualidade com os componentes principais, ao passo que a análise por meio de gráficos do tipo *biplot* possibilitou melhor visualizar esta relação, facilitando a realização de inferências com que processo ou fenômeno cada Componente Principal estava relacionado. Neste estudo, os Componentes Principais foram associados a fontes de poluição das águas por atividades agrícolas e deposição de esgoto doméstico, CP1 e CP2, respectivamente.

No ano de 2009, foi verificado que a qualidade da água da bacia do Paracatu foi afetada em maior magnitude, pelas atividades agrícolas. Já no ano de 2019, três estações apresentaram indícios de poluição das águas tanto por esgoto doméstico, quanto por atividades agrícolas, não havendo destaque para uma fonte de poluição. Ao comparar os dois anos, notou-se que em 2019 houve redução das estações impactadas por poluição de origem agrícola, e aumento do número de estações sem indicativos de poluição agrícola e esgoto doméstico. Desta forma, ficou evidente que no ano de 2019 houveram modificações positivas nos parâmetros de qualidade da água, o que significou melhoria da qualidade da água da bacia do Paracatu em comparação com o ano de 2009. Sugere-se que, em estudos futuros, o monitoramento da qualidade da água seja realizado de forma pontual, associando os resultados com as diretivas vigentes impostas pela legislação brasileira, a fim de acompanhar os parâmetros de qualidade de água, direcionando esforços para minimização de lançamentos efluentes.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Viçosa pelo suporte ao desenvolvimento deste trabalho, e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de bolsas de pesquisa.

6. Referências

Anazawa, T. M. A (2018). Escassez hídrica na Região Metropolitana de Campinas entre 2013-2015: a perspectiva de um desastre socialmente construído. **Cadernos Metrópole**, 20(42), 347-369.

Barbosa, T., Geraldo, M., Calazans, G., & Oliveira, S (2015). Avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia do rio Paracatu por meio de técnicas multivariadas. **Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 12.

Brasil. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <<https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-no-357-de-17-de-marco-de-2005/view#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20classifica%C3%A7%C3%A3o%20dos,efluentes%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAsncias>>. Acesso em: 24 set. 2022.

Camara, M., Jamil, N. R., & Abdullah, A. F. B (2019). Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review. **Ecological Processes**, 8(1), 1-10.

Cardoso, S. S., Nishimura, P. Y., Padial, P. R.; Mariani, C. F., Moschini-Carlos, V., & Pompêo, M. L. M., (2014). Compartimentalização e qualidade da água: o caso da Represa Billings. **Ecologia e Meio Ambiente**, 28(1), 1-14.

CBH do Rio Paracatu - Comitê da bacia hidrográfica do rio Paracatu, 2019, (SF7) – Minas Gerais, Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-paracatu-sf7-minas-gerais/>. Acesso em: 23 nov. 2021.

Foote, K. J., Joy, M. K., & Death, R. G. (2015). New Zealand dairy farming: milking our environment for all its worth. **Environmental management**, 56(3), 709-720.

Gao, L., Wang, Z.; Shang, J., Cheng, J., Tang, C., Yi, M., Zhao, X. (2016). Distribution characteristics and sources of trace metals in sediment cores from a trans-boundary watercourse: An example from the Shima River, Pearl River Delta. **Ecotoxicology and environmental safety**, 134(1), 186-195.

Gloria, L. P., Horn, B. C., & Hilgemann, M. (2017). Avaliação da qualidade da água de bacias hidrográficas através da ferramenta do índice de qualidade da água IQA. **Revista Caderno Pedagógico**, 14(1), 1-17.

Liu, C. W., Lin, K. H., & Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. **Science of the total environment**, 313(1-3), 77-89.

Maia, K. P., Silva, G. A., & Libânio, (2019). M. Aplicação de análise multivariada no estudo da frequência de amostragem e do número de estações de monitoramento de qualidade da água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 24(5), 1013-1025.

Medeiros, W. M. V., Silva, C. E. D., & Lins, R. P. M. (2018). Avaliação sazonal e espacial da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Longá, Piauí, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, 13, 1-17.

Mishra, A., Alnahit, A., & Campbell, B. (2021). Impact of land uses, drought, flood, wildfire, and cascading events on water quality and microbial communities: A review and analysis. **Journal of Hydrology**, 596, 125707.

Mouri, G., Takizawa, S., & Oki, T. (2011). Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural–urban catchment, Shikoku, Japan: effects of land cover and human impact. **J. Environ. Manag.** 92, 1837–1848.

Nonato, E. A., Viola, Z. G. G., Almeida, K. C. B., & Schor, H. H. R. (2007). Tratamento Estatístico dos Parâmetros da Qualidade das Águas da Bacia do Alto Curso do rio das Velhas. **Quim. Nova**, 30(4), 797-804.

Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R.; Legendre, P.; Mcglinn, D., Minchin, P.R., O'Hara, R.B Simpson, G.L., Solymos, P. (2017). **Vegan: Community Ecology Package**. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>>. Acesso em: 22/11/2021.

Oliveira, M. M. D., Mendes, M., Hansel, C. M., & Damiani, S. (2017). Cidadania, meio ambiente e sustentabilidade. **Caxias do Sul, RS: Educs**, 39(Especial 2022), 75-92.

Rezende, B. N., Boulomytis, V. T. G, Duarte, S. N., Collares, M. F. A., Veloso, M. F., Martins I. T. A., Assis, K. C. C., Jacomazzi, M. A., Ramirez, A. J. F., Johansson, F. T., Nascimento, J. G., Pacheco, A. B., Lopes, T. R., Ricardo, H. C., Marques, P. A. (2021). Alterações no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Paracatu e suas implicações na qualidade da água. **XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Belo Horizonte, MG, Brasil, 10.

Silva, A. R (2019). **Avaliação do processo de eutrofização das águas superficiais, do cenário nacional ao local: estudo de caso nas bacias hidrográficas costeiras dos rios Ratoles, Itacorubi e Tavares (Ilha de Santa Catarina, Brasil)**. Tese de doutorado, Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.