

**ENGENHARIAS****Modelagem multivariada para identificação de fontes de poluição, por meio de parâmetros limnológicos da qualidade da água: um estudo de caso do Arroio Grande/RS**

Multivariate modeling for source identification using water quality limnological parameters: a case study from Arroio Grande/RS

Luana Nunes Centeno¹, Samanta Tolentino Ceconello²

RESUMO

A qualidade da água esta diretamente relacionada com os diferentes usos a que se destina, e esta qualidade reflete diretamente nos parâmetros físicos, químicos e biológicos destas águas. Diante disso o objetivo deste estudo foi analisar as correlações existente entre os parâmetros de qualidade da água e identificar suas possíveis fontes de poluição, por meio de ferramentas de modelagem multivariada, no Arroio Grande/RS. Para tanto foram utilizados dados secundários de qualidade da água, disponibilizados pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. Foi empregada a matriz de correlação seguido da análise fatorial e análise de componentes principais, obtendo-se a formação de três componentes principais extraída através da análise de componentes principais, sendo que na CP1 as possíveis fontes de poluição foram processos de erosão nas margens do manancial e pela ressuspensão de sedimentos do fundo do manancial, já a CP2 pode estar relacionada a despejos domésticos e a CP3 a atividades agropecuárias. Com base neste estudo foi possível concluir que a matriz de correlação possibilitou compreender o relacionamento entre as variáveis, e através da análise fatorial/análise de componentes principais foi possível identificar as prováveis fontes de poluição do Arroio Grande.

Palavras-chave: Análise fatorial; correlação; Arroio Grande/RS; fontes de poluição.

ABSTRACT

The quality of the water is directly related to the different uses for which it is intended, and this quality reflects directly on the physical, chemical and biological parameters of these waters. Therefore, the objective of this study was to analyze the correlations between water quality parameters and identify their possible sources of pollution, using multivariate modeling tools, in Arroio Grande/RS. For this purpose, secondary water quality data, made available by the Henrique Luis Roessler State Environmental Protection Foundation, were used. The correlation

¹ Doutoranda em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas/RS – Brasil. E-mail: luanunesceneno@gmail.com

² Docente dos Cursos Superiores de Tecnologia em Gestão e Saneamento Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense – IFSul, Câmpus Pelotas/RS – Brasil. E-mail: satolentino@gmail.com



matrix followed by factor analysis and principal component analysis was used, obtaining the formation of three main components extracted through principal component analysis, and in CP1 the possible sources of pollution were erosion processes at the margins of the source. and by the resuspension of sediments from the bottom of the spring, CP2 may be related to domestic waste and CP3 to agricultural activities. Based on this study, it was possible to conclude that the correlation matrix made it possible to understand the relationship between the variables, and through factor analysis / principal component analysis it was possible to identify the likely sources of pollution in Arroio Grande.

Keywords: *Factor analysis; correlation; Arroio Grande/RS; Sources of pollution.*

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural renovável e finito (GLORIA; HORN; HILGEMANN, 2017) o que torna o seu monitoramento e gestão de suma importância. (ZAMBERLAN *et al.*, 2013). Entretanto a qualidade dos recursos hídricos, é fortemente influenciada pelos processos de urbanização e atividades agropecuárias. (SANTOS *et al.*, 2017). O que torna essencial o monitoramento da qualidade das águas, pois este possibilita verificar os impactos ambientais ocorridos no corpo hídrico, tornando possível o seu controle apropriado. (BRASIL, 2005).

Entretanto, o custo de monitoramento da resposta da qualidade da água frente às mudanças e aos impactos decorrentes das atividades antrópicas é elevado (WANG *et al.*, 2015), necessitando-se de ferramentas que auxiliem no processo de avaliação dos parâmetros de qualidade da água. Dentre as ferramentas que podem auxiliar nesse processo está a estatística multivariada.

A estatística multivariada vem sendo utilizada em estudos ambientais, como ferramenta para facilitar a interpretação dos resultados advindos de programas de monitoramento. Dentre os trabalhos encontrados na literatura pode-se citar os estudos realizados por Abreu e Cunha (2015), Alexakis *et al.* (2016), Bhutiani *et al.* (2016), Voza *et al.* (2015) e Yang *et al.* (2015).

Uma das técnicas multivariadas utilizadas em estudos ambientais é a Análise Fatorial (AF). (AL-MUTAIRI; ABAHUSSAIN; EL-BATTAY, 2014; BERTOSSI *et al.*, 2013; SUN *et al.*, 2016). A AF é um conjunto de técnicas estatísticas relacionadas entre si, onde são analisados os inter-relacionamentos entre as variáveis, buscando-se reduzir o número de variáveis originais, para tornar os dados mais claros e facilmente interpretáveis. (VICINI *et al.*, 2018).

Um método de ordenação empregado para a extração dos fatores, obtidos na AF, é a Análise de Componentes Principais (ACP), com o objetivo de buscar combinações lineares, ou seja, componentes principais, de variáveis correlacionadas. (HAIR *et al.*, 2009; VICINI *et al.*, 2018).

Diante o exposto o objetivo deste estudo foi analisar as correlações existente entre os parâmetros de qualidade da água e identificar suas possíveis fontes de poluição, por meio de ferramentas de modelagem multivariada, no Arroio Grande/RS.



2. MATERIAL E MÉTODOS

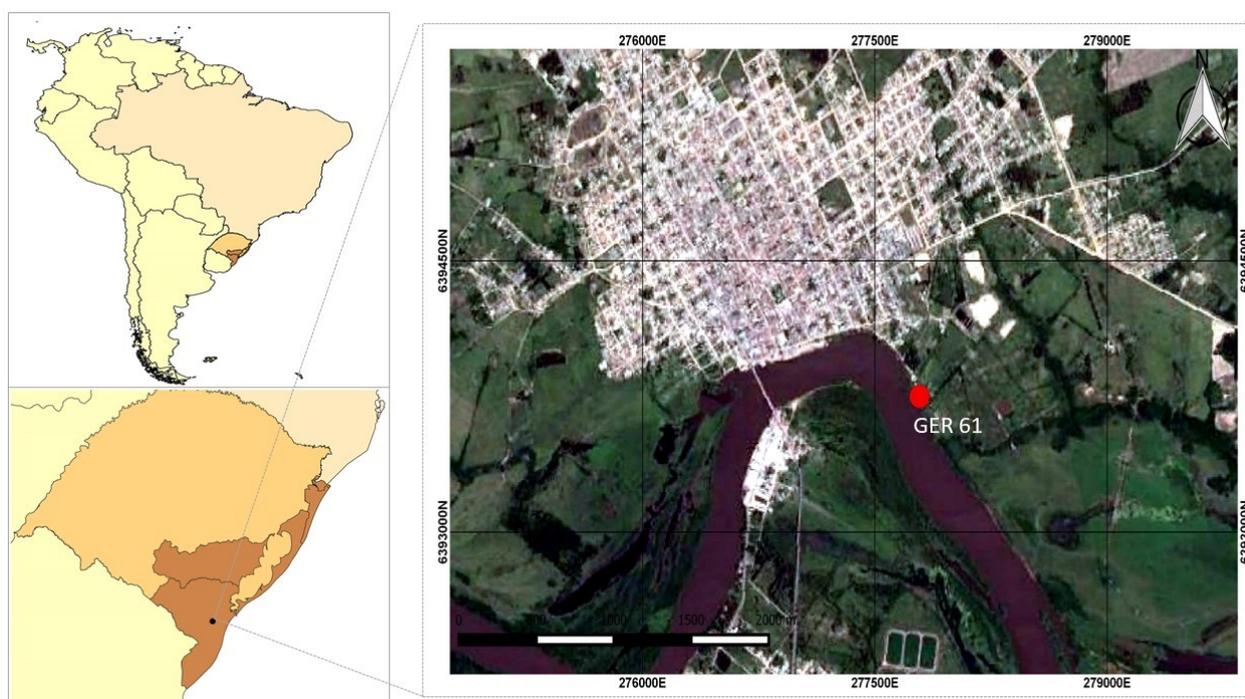
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com a Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul - SEMA (2019), as bacias hidrográficas (BH) do Rio Grande do Sul se originaram de subdivisões das três regiões hidrográficas do Estado, totalizando até o presente momento, 25 unidades.

A BH do Litoral é formada pelas bacias do Leste e do extremo Sul do Estado e é dividida em cinco bacias, sendo elas: Tramandaí, Litoral Médio, Camaquã, Mirim - São Gonçalo e Mampituba.

Neste estudo foi realizada a análise temporal de um ponto localizado na Bacia Hidrográfica Mirim - São Gonçalo, denominado de acordo com a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler - FEPAM (2019) como GER 62. O mesmo está localizado, nas coordenadas Latitude 365454,10 Sul e longitude 6456932,31 Oeste, na qual o sistema de referência adotado foi o WGS84 UTM fuso 22 Sul (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização do ponto GER 61.



Fonte: Elaborada pelas autoras.

No entorno do ponto encontram-se diversas atividades agropecuárias, além disso, este rio sofre diversas interferências antrópicas como o trânsito de embarcações, o lançamento de resíduos sólidos e despejos domésticos, que são dispostos sem nenhum tratamento no manancial, bem como os resíduos químicos de agrotóxicos, utilizados principalmente nas lavouras de arroz. (FEPAM, 2019).



2.2. OBTENÇÃO DOS DADOS

Foram utilizados neste estudo os dados secundários de qualidade da água disponibilizados livremente pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM/RS), dentre os anos de 2005 a 2013. As coletas e análises de água ocorrem a cada seis meses, sendo que os parâmetros empregados neste estudo foram: Cl: Cloretos; CT: Coliformes Termotolerantes; PT: Fósforo Total; NH₃: Nitrogênio Amoniacal; NT: Nitrogênio Total; OD: Oxigênio Dissolvido; pH: Potencia Hidrogeniônico; ST: Sólidos Totais; T_{H2O}: Temperatura da Água e TH: Turbidez.

As coletas foram realizadas pela FEPAM, de acordo com a metodologia descrita por CETESB (1987). Os métodos analíticos bem como a preservação das amostras seguiram os procedimentos definidos por APHA (2005).

2.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

2.3.1. Matriz de correlação

Todos os dados referentes aos parâmetros de qualidade da água obtidos para o ponto estudado, foram analisados através de uma matriz de correlação, com o objetivo de identificar se há correlações significativas entre as variáveis em cada manancial, foi utilizado o teste t-Student, com um nível de significância de 5%; sendo os que passaram no teste destacados em vermelho (Tabela 1). O p-valor foi calculado com base na matriz de correlação, utilizando o software R, versão .3. 4. 3., onde a hipótese nula é aceita (H₀), quando o p-valor for menor do que o nível de significância adotado, ou seja, 0,05, concluindo-se que efetivamente existe uma relação significativa entre essas variáveis.

2.3.2. Modelagem multivariada: análise fatorial e de componentes principais

Primeiramente os dados de qualidade da água foram normalizados, para que todos apresentassem a mesma unidade de medida, construindo-se, posteriormente, uma matriz de dados expressos por $X = (x_i, j)$, em que $i = 1 \dots n$ amostragens e $j = 1 \dots p$ variáveis (10). Em seguida, transformou-se a matriz de dados originais em uma matriz de correlações [R] (p x p), sendo que “p” corresponde as variáveis de qualidade da água a serem analisadas.

Através da AF foi possível transformar o conjunto original das variáveis observadas em um novo conjunto, denominados fatores, estes fatores foram extraídos através da ACP e deu origem as Componentes Principais (CP's). Segundo Hair *et al.* (2009), as três primeiras componentes, devem explicar o máximo de variabilidade total dos dados, de forma que a primeira não esteja correlacionada com a segunda e a segunda não esteja correlacionada com a terceira, e esta não esteja correlacionada nem com a primeira nem com a segunda, e assim sucessivamente, até que as CP's expliquem mais do que 70% da variância total dos dados.

Para a normalização dos dados, construção dos fenogramas, obtenção da matriz de correlação, bem como a AF e posteriormente a ACP foi utilizado o software R, versão .3. 4. 3.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a compilação dos dados de qualidade da água, a matriz de dados escalonados foi obtida e transformada em uma matriz de correlação (Tabela 1). Observa-se que as variáveis PT e T_{H_2O} ; PT e TH e OD e TH se mostraram correlacionadas significativamente ($p < 0,05$).

Tabela 1 – Matriz de correlação com as 10 variáveis de qualidade da água do Arroio Grande.

		Cl ⁻	CT	PT	NH ₃	NT	OD	pH	ST	T _{H₂O}	TH
Cl ⁻	r	1,000									
	p	---									
CT	r	-0,022	1,000								
	p	0,967	---								
PT	r	-0,406	0,011	1,000							
	p	0,425	0,983	---							
NH ₃	r	0,661	-0,169	-0,467	1,000						
	p	0,153	0,749	0,351	---						
NT	r	-0,051	-0,353	-0,166	0,198	1,000					
	p	0,923	0,493	0,754	0,707	---					
OD	r	-0,423	0,271	0,743	-0,153	0,259	1,000				
	p	0,403	0,604	0,091	0,773	0,620	---				
pH	r	0,558	-0,772	-0,376	0,518	0,012	0,660	1,000			
	p	0,250	0,072	0,463	0,292	0,983	0,154	---			
ST	r	-0,643	-0,408	-0,200	0,022	0,425	0,047	0,020	1,000		
	p	0,168	0,422	0,705	0,967	0,401	0,929	0,971	---		
T _{H₂O}	r	0,629	-0,232	-0,932	0,631	0,121	0,810	0,662	0,064	1,000	
	p	0,181	0,658	0,007	0,180	0,820	0,051	0,152	0,904	---	
TH	r	-0,422	-0,167	0,823	-0,284	0,419	0,864	0,364	0,092	0,795	1,000
	p	0,405	0,752	0,044	0,585	0,408	0,027	0,479	0,862	0,059	---

Cl⁻: Cloretos; CT: Coliformes Termotolerantes; PT: Fósforo Total; NH₃: Nitrogênio Amoniacal; NT: Nitrogênio Total; OD: Oxigênio Dissolvido; pH: Potencia Hidrognônico; ST: Sólidos Totais; T_{H₂O}: Temperatura da Água e TH: Turbidez.

Fonte: Elaborada pelas autoras.

Sendo que a correlação negativa existente entre PT e T_{H₂O} pode ser compreendida pelo fato do aumento da temperatura favorecer as taxas de reações físico-químicas e biológicas da água, além de ser um parâmetro importante para os microrganismos. (SPERLING, 2007). À medida que ocorre aumento da temperatura na água, o fósforo tende a apresentar menores concentrações, sendo resultado da sua assimilação pelos microrganismos, responsáveis pela degradação da matéria orgânica presente na água. (BARBOSA, 2014).

A elevação do OD pode aumentar a concentração de turbidez na água, pelo fato de estar relacionado com a produção de algas, as quais são responsáveis pela produção de oxigênio pela fotossíntese. (SPERLING, 2007). Por fim, com o aumento do PT pode haver um aumento da TH, uma vez que a produção de algas é altamente dependente das concentrações de fósforo presentes na água. (LIBÂNIO, 2010).



Após a decomposição da matriz de correlação foi possível encontrar a variância total dos dados. (HAIR *et al.* 2009), conforme apresentado na Tabela 2. Após a compilação dos dados de qualidade da água, a matriz de dados escalonados foi obtida e transformada em uma matriz de correlação (Tabela 1). Observa-se que as variáveis PT e T_{H_2O} ; PT e TH e OD e TH se mostraram correlacionadas significativamente ($p < 0,05$).

Tabela 2 – Fatores encontrados e a explicação da variância da amostra contendo as 10 variáveis de qualidade da água do Arroio Grande.

Fator	Variância Total Explicada (%)	Variância Total Acumulada (%)
1	46,761	46,761
2	18,788	65,549
3	15,463	81,012
4	12,506	93,517
5	6,483	100,000

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Observa-se que os três primeiros fatores explicaram 81,01% da variância total dos dados (Tabela 3). Sakizadeh *et al.* (2015) necessitaram de 4 componentes principais para explicar 81,60% da variância total dos dados e, assim, conseguir interpretar um conjunto de dados de qualidade da água de um rio, localizado na Malásia.

Tabela 3 – Componentes principais extraídas da AF, contendo as 10 variáveis de qualidade da água do Arroio Grande.

Variável	CP ₁	CP ₂	CP ₃
Cl ⁻	-0,680	-0,273	-0,288
CT	0,253	-0,548	-0,685
PT	0,888	-0,035	0,069
NH ₃	-0,672	0,354	-0,515
NT	-0,042	0,795	-0,024
OD	0,815	0,336	-0,445
pH	-0,718	0,147	0,433
ST	-0,008	0,755	0,243
T_{H_2O}	-0,992	0,039	0,007
TH	0,799	0,451	-0,001

Cl⁻: Cloretos; CT: Coliformes Termotolerantes; PT: Fósforo Total; NH₃: Nitrogênio Amoniacal; NT: Nitrogênio Total; OD: Oxigênio Dissolvido; pH: Potencia Hidrogeniônico; ST: Sólidos Tótais; T_{H_2O} : Temperatura da Água e TH: Turbidez.

Fonte: Elaborada pelas autoras.

Observa-se na Tabela 3 que as variáveis Cl⁻, CT, e NH₃ não apresentaram cargas fatoriais significativas, em nenhuma das três componentes principais extraídas (HAIR *et al.*, 2009). Buscando uma maximização das cargas dessas três variáveis, para uma das três componentes principais, foi aplicada a rotação dos fatores (Tabela 4).



Tabela 4 – Componentes principais extraídas da AF, após a rotação de fatores, contendo as 10 variáveis de qualidade da água do Arroio Grande.

Variável	CP ₁	CP ₂	CP ₃
Cl ⁻	0,362	0,296	0,474
CT	-0,010	-0,946	0,059
PT	0,287	0,244	0,888
NH ₃	-0,165	0,321	0,430
NT	-0,905	-0,310	0,238
OD	0,434	0,843	0,126
pH	0,097	0,107	0,058
ST	0,883	0,288	0,358
T _{H2O}	0,882	0,244	0,357
TH	-0,928	-0,004	-0,293

Cl⁻: Cloretos; CT: Coliformes Termotolerantes; PT: Fósforo Total; NH₃: Nitrogênio Amoniacal; NT: Nitrogênio Total; OD: Oxigênio Dissolvido; pH: Potencia Hidrogeniônico; ST: Sólidos Tótais; T_{H2O}: Temperatura da Água e TH: Turbidez.

Fonte: Elaborada pelas autoras.

A componente principal 1, responsável por 46,76% da variância total dos dados, é representada pelas variáveis NH₃, ST, T_{H2O} e TH, a erosão do corpo hídricos e atividades pesqueiras que decorrente dos movimentos das embarcações que podem causar a ressuspensão de sedimentos do fundo do manancial. Por conseguinte, a componente principal 2, composta pelas variáveis CT e OD, possui 18,79% da variância total dos dados, e possivelmente esteja associada a despejos domésticos e a componente principal 3, que representa 14,46% da variância dos dados, é representada pela variável PT, a atividades agropecuárias.

As variáveis Cl⁻, NH₃ e pH não apresentaram cargas fatoriais significativas, ou seja, acima de 0,70 (HAIR *et al.*, 2009), após a rotação de fatores, sendo assim, retiradas do estudo. A variável CT maximizou sua carga fatorial na segunda componente principal extraída, enquanto o pH teve sua carga fatorial reduzida. Segundo Sperling (2007), a variável CT é de suma importância para o monitoramento dos corpos d'água, uma vez que são indicadores de doenças patogênicas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi possível concluir que a matriz de correlação possibilitou compreender o relacionamento entre as variáveis estudadas, e através da análise fatorial/análise de componentes principais foi possível identificar as prováveis fontes de poluição do Arroio Grande.

Ademais, os autores sugerem que para estudos futuros, sejam analisadas espacialmente as variáveis em destaques em cada componente principal extraída, por meio de índices que visem analisar a qualidade da água do Arroio Grande.



5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e também à FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Roessler), por disponibilizar os dados para o desenvolvimento desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, C. H. M.; CUNHA, A. C. Qualidade da água em ecossistemas aquáticos tropicais sob impactos ambientais no Baixo Rio Jari-AP. **Biota Amazônia**, v.5, n.2, p.119-131, 2015.

ALEXAKIS, D. *et al.* Suitability of water quality indices for application in lakes in the Mediterranean. **Water Resources Management**, v.30, n.5, p.1621-1633, 22 jan. 2016.

AL-MUTAIRI, N.; ABAHUSSAIN, A.; EL-BATTAY, A. Spatial and temporal characterizations of water quality in Kuwait Bay. **Marine Pollution Bulletin**, v.83, n.1, p.127-131, jun. 2014.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

BARBOSA, V. **A última gota**. São Paulo: Planeta do Brasil, 2014.

BERTOSSI, A. P. A. *et al.* Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando estatística multivariada. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.34, n.5, p.2025-2036, set. 2013.

BHUTIANI, R. *et al.* Assessment of Ganga river ecosystem at Haridwar, Uttarakhand, India with reference to water quality indices. **Applied Water Science**, v.6, n.2, p.107-113, 17 jun. 2014.

BRASIL. **Resolução no 357, de 17 de março de 2005**. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 18 mar. 2005. Seção 1. p.58-63.

CETESB. **Guia de coleta e preservação de amostras de água**. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1987.

FEPAM. **Monitoramento da qualidade da água da região hidrográfica das bacias litorâneas**. Site oficial da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Roessler, 2019. Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/monitor_agua_litoral.asp. Acesso em: 01 jul. 2019.

GLORIA, Lucivania Pereira; HORN, Bruna Carolina; HILGEMANN, Maurício. Avaliação da qualidade da água de bacias hidrográficas através da ferramenta do índice de qualidade da água - IQA. **Caderno Pedagógico**, v.14, n.1, p.103-119, jan. 2017.



HAIR JR., J. F. *et al.* **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2010.

SAKIZADEH, M. Artificial intelligence for the prediction of water quality index in groundwater systems. **Modeling Earth Systems and Environment**, v.2, n.1, p.8-17, 22 dez. 2015.

SANTOS, Rosa Cecília Lima *et al.* Aplicação de índices para avaliação da qualidade da água da Bacia Costeira do Sapucaia em Sergipe. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, n.1, p.33-46, 3 ago. 2017.

SEMA. **Bacias hidrográficas do RS**. Site oficial da Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2019.

SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

SUN, W. *et al.* Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. **Ecological Indicators**, v.66, p.306-312, jul. 2016.

VICINI, Lorena; SOUZA, Adriano Mendonça; MORALES, Fidel Ernesto Castro; SOUZA, Francisca Mendonça. **Técnicas Multivariadas Exploratórias: teorias e aplicações no software Statistica®**. Santa Maria: UFSM, 2018.

VOZA, D. *et al.* Application of multivariate statistical techniques in the water quality assessment of Danube river, Serbia. **Archives of Environmental Protection**, v.41, n.4, p.96-103, 1 jan. 2015.

WANG, Q. *et al.* Combined multivariate statistical techniques, water pollution index (wpi) and daniel trend test methods to evaluate temporal and spatial variations and trends of water quality at Shanchong river in the Northwest Basin of lake Fuxian, China. **PLOS ONE**, v.10, n.4, p.1-17, 2 abr. 2015.

YANG, Q. *et al.* Multivariate statistical analysis of hydrochemical data for shallow ground water quality factor identification in a Coastal Aquifer. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.24, p.769-776, jan. 2015.

ZAMBERLAN, João Fernando *et al.* Índices sazonais de qualidade da água de irrigação via análise multivariada na região central do rio grande do sul. **Irriga**, v.18, n.3, p.376-386, 8 out. 2013.

Submetido em: **04/08/2019**

Aceito em: **17/08/2020**