



FATORES RELACIONADOS À CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ÁREAS URBANAS

Sergio Dovidauskas¹
Isaura Akemi Okada²
Felipe Rodrigues dos Santos³
Marina Miyuki Okada⁴
Rita de Cássia Briganti⁵
Marco Antônio Moreira Souto⁶

Recursos Hídricos e Qualidade da Água

Resumo

A contaminação por nitrato em águas para consumo humano tem sido relacionada às ocorrências de alguns tipos de câncer e de metemoglobinemia em crianças até 3 meses de idade (“síndrome do bebê azul”). Também tem sido sugerido que esse íon possa ser usado como um indicador para identificar sistemas de abastecimento suspeitos de conter também outros contaminantes importantes, como fármacos e hormônios. Esse trabalho apresenta dados sobre a contaminação por nitrato em águas de abastecimento público de áreas urbanas de 50 municípios da região nordeste do estado de São Paulo, que utilizam exclusivamente manancial subterrâneo. Para identificar fatores correlacionados com a presença de nitrato, durante um ano foram realizados 21 ensaios físico-químicos e 2 ensaios microbiológicos em 2.119 amostras. Em adição, 4 variáveis demográficas foram incluídas no estudo. Os dados foram examinados por análise multivariada (Análise de Componentes Principais e Análise Hierárquica de Agrupamentos). Os resultados mostraram que a concentração de nitrato na água está correlacionada positivamente com a condutividade, com o número de internações por diarreia e gastroenterite de origem infecciosa presumível, e com as concentrações de cálcio, magnésio e cloreto, e correlacionada negativamente com o Produto Interno Bruto per capita. Quando comparada à análise univariada (considerando apenas a concentração de nitrato), a análise multivariada produziu informações mais completas e precisas sobre situações de risco e de potencial de risco e, quando variáveis demográficas foram consideradas, mostrou que pode auxiliar na interpretação da dinâmica da ação antropogênica sobre os mananciais subterrâneos e do impacto dessa ação sobre a saúde.

Palavras-chave: Água de poços; Ações antrópicas; Nitrato; Análise de Fatores.

¹Dr. Instituto Adolfo Lutz – Centro de Laboratório Regional de Ribeirão Preto VI, sergio.dovidauskas@ial.sp.gov.br.

²Me. Instituto Adolfo Lutz – Centro de Laboratório Regional de Ribeirão Preto VI, isaura.okada@ial.sp.gov.br.

³Biól. Treinamento Técnico – Centro de Laboratório Regional de Ribeirão Preto VI, felipe.umbro10@gmail.com.

⁴Quím. Instituto Adolfo Lutz – Centro de Laboratório Regional de Ribeirão Preto VI, marina.okada@ial.sp.gov.br.

⁵Quím. Instituto Adolfo Lutz – Centro de Laboratório Regional de Ribeirão Preto VI, rita.briganti@ial.sp.gov.br.

⁶Téc. Instituto Adolfo Lutz – Centro de Laboratório Regional de Ribeirão Preto VI, marcosouto90@gmail.com.



INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água potável é um direito humano básico e um componente fundamental de qualquer política eficaz para a proteção da saúde. Contudo, a qualidade da água destinada ao consumo humano vem sendo prejudicada mundialmente por ações antrópicas sobre os mananciais que incluem principalmente as contaminações por agrotóxicos e por efluentes domésticos e industriais (WHO, 2017). No Brasil, é competência do Ministério da Saúde elaborar normas e estabelecer o padrão de potabilidade da água para consumo humano a serem observados no território nacional. Essa atribuição originou em 1986 o Programa Nacional de Vigilância de Qualidade de Água Para Consumo Humano, posteriormente designado como Programa Nacional de Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada à Qualidade da Água Para Consumo Humano (Vigiagua), que desenvolve ações que garantam acesso da população à água em quantidade suficiente e qualidade adequada (BRASIL, 2005). Em particular, no Estado de São Paulo foi implantado em 1992 o Programa de Vigilância da Água Para Consumo Humano (Proagua) que possui, em essência, os mesmos objetivos do Programa Nacional (VALENTIM *et al.*, 2012).

O Proagua normalmente inclui análises de amostras de água coletadas pelas Vigilâncias Sanitárias Municipais nos parâmetros temperatura, pH, cloro residual livre (CRL), cor, turbidez, concentração de fluoreto, coliformes totais e *Escherichia coli*. Contudo, nos últimos anos tem sido dedicada atenção especial à vigilância da qualidade de águas oriundas de mananciais subterrâneos em virtude da constatação de contaminações por nitrato observadas em áreas urbanas de diversos municípios (VARNIER, 2019). Essas contaminações têm sido relacionadas a padrões de ocupação urbana, como, por exemplo, áreas em que essa ocupação é mais antiga e/ou com alta densidade populacional, presença de cemitérios, existência de fossas desativadas e de antigas redes coletoras de esgoto passíveis de vazamentos (CETESB, 2019). Embora o interesse da Saúde Pública com a presença do nitrato em águas destinadas ao consumo humano esteja principalmente relacionado às ocorrências de metemoglobinemia (“síndrome do bebê azul”, em crianças até três meses de idade) e de alguns tipos de câncer, tem sido sugerido que o nitrato possa ser usado como um indicador para identificar sistemas de abastecimento suspeitos de

também conter outros contaminantes importantes, como fármacos e hormônios por exemplo (SCHAIDER *et al.*, 2019). O valor máximo permitido (VMP) pela legislação brasileira em águas destinadas ao consumo humano é $10 \text{ mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$ expresso em termos do conteúdo de nitrogênio (nesse trabalho, as concentrações de nitrato serão expressas dessa forma, comumente referidas como nitrogênio-nitrato ou N-NO_3); a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), por sua vez, considera os teores de $5 \text{ mgN-NO}_3 \text{ L}^{-1}$ e $10 \text{ mgN-NO}_3 \text{ L}^{-1}$ como valores de prevenção e de intervenção, respectivamente, no sentido de definir ações preventivas e regras para aplicação de resíduos em solos agrícolas, em processos de licenciamento e fiscalização ambiental e no gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 2019).

Nesse contexto, esse trabalho apresenta dados sobre a presença de nitrato nas águas de abastecimento público de áreas urbanas de 50 municípios da região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil, que fazem uso exclusivo de manancial subterrâneo – nessa região existem ainda 11 municípios que fazem uso apenas de manancial superficial para o abastecimento, enquanto outros 29 utilizam ambos mananciais. Esses 90 municípios constituem a Rede Regional de Atenção à Saúde 13 (RRAS 13), indicada na Figura 01. Utilizando amostras oriundas do Proagua, foram analisados 14 parâmetros além dos nove citados no parágrafo anterior, no intuito de identificar, por meio de análise multivariada, fatores correlacionados com a contaminação por nitrato. Na avaliação de riscos à Saúde



Figura 01 – A região do estudo (em azul).

Pública, objetivou-se comparar essa abordagem multivariada com a que considera apenas os níveis de nitrato nas águas de cada município. Finalmente, foram introduzidas fatores demográficos na análise para verificar se tais variáveis correlacionam com a presença de nitrato.



METODOLOGIA

No período de um ano, foram coletadas 2.119 amostras de águas de abastecimento público por agentes das Vigilâncias Sanitárias de cada um dos 50 municípios que utilizam manancial subterrâneo, seguindo protocolo do Proagua. No momento da coleta, foram realizadas medidas de temperatura, CRL e pH e, em seguida, foram encaminhadas aos laboratórios sob refrigeração. No laboratório de análises físico-químicas foram realizadas as medidas de cor, turbidez e condutividade, e foram determinadas as concentrações dos íons lítio, sódio, amônio, potássio, cálcio, magnésio, fluoreto, clorito, bromato, cloreto, brometo, clorato, nitrato, fosfato e sulfato. No laboratório de análises microbiológicas foram realizadas as determinações de coliformes totais e *Escherichia coli*. Todos os métodos citados, de medidas e de ensaios, estão descritos na literatura (APHA *et al.*, 2012; DOVIDAUSKAS *et al.*, 2017). No tratamento e análise dos dados foram utilizados os softwares *Microsoft Excel®* 2019, *OriginPro®* 2019b e *The Unscrambler®* versão 10.3. Como parte do pré-tratamento para a análise multivariada inicial, o número de amostras foi reduzido representando-se cada município pela respectiva série de médias nas 21 variáveis físico-químicas e pela porcentagem de resultados positivos nas análises microbiológicas, resultando em uma matriz 50x22. Para a inclusão de variáveis demográficas na análise multivariada final, os dados dos municípios relativos à número de habitantes, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e Produto Interno Bruto per capita (PIB pc) foram obtidos no sítio eletrônico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, www.ibge.gov.br, acesso em 29/01/2021), e os relacionados ao número de internações por diarreia no período desse estudo foram obtidos no sítio eletrônico do Ministério da Saúde (DATASUS, www2.datasus.gov.br, acesso em 28/01/2021), utilizando a lista de morbidade CID-10 “Diarreia e gastroenterite de origem infecciosa presumível” – para inclusão na análise multivariada, o número de internações foi expresso em relação a 1.000 habitantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da matriz de correlações entre as 22 variáveis indicou que as correlações

de Pearson mais significativas com a concentração de nitrato envolveram a condutividade ($r = 0,459$) e as concentrações de cálcio ($r = 0,424$), magnésio ($r = 0,644$) e cloreto ($r = 0,891$). Altas correlações positivas entre as concentrações de nitrato e cloreto em águas têm sido atribuídas a contaminações devido a atividade antrópica (VICENTE *et al.*, 2018), como aquelas devidas a padrões de ocupação urbana já citadas (em áreas rurais, a contaminação pode ter sua origem em atividades agrícolas como no uso excessivo de fertilizantes e adubos). Em vista dessas correlações, procedeu-se a uma Análise de Componentes Principais (ACP) envolvendo os 50 municípios e as respectivas séries dessas cinco variáveis. Os gráficos de escores e de pesos da ACP estão na Figura 02.

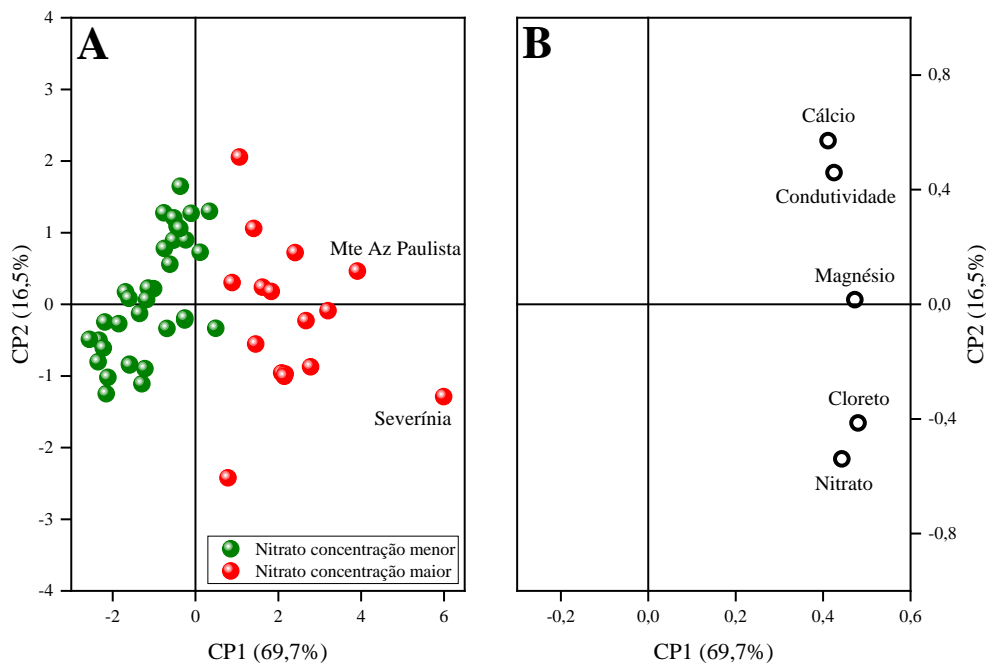


Figura 02: ACP envolvendo 50 municípios e 5 variáveis (condutividade e concentrações de cálcio, magnésio, cloreto e nitrato). A) gráfico de escores; B) gráfico de pesos.

A ACP indica que a dispersão das amostras no gráfico de escores, que ocorre principalmente ao longo da Primeira Componente Principal (CP1, Figura 02A), é resultado da correlação significativa entre as cinco variáveis, predominando no lado esquerdo os municípios que apresentam maiores concentrações de nitrato, como indica a Figura 02B. A menor dispersão ao longo da Segunda Componente Principal (CP2, Figura 02A) discrimina



os municípios caso tenham teores mais relevantes de cloreto e nitrato (valores negativos em CP2 na Figura 02B) ou valores relativamente maiores de condutividade e concentração de cálcio (valores positivos em CP2 na Figura 02B). Não é possível definir claramente um limite entre os municípios que os separe em dois grupos, mas é importante observar que dois municípios, com contaminações por nitrato já descritas na literatura, possuem os dois maiores escores em CP1, localizando-se mais à direita no gráfico de escores: Monte Azul Paulista (DOVIDAUSKAS *et al.*, 2015) e Severínia (DOVIDAUSKAS *et al.*, 2018). A divisão em dois grupos apresentada na Figura 02A (municípios com maiores e menores concentrações de nitrato) foi efetuada em vista do resultado da Análise Hierárquica de Agrupamentos realizada com os mesmos dados, que é mostrada na Figura 03, onde observa-se (em vermelho) o grupo de 16 municípios com teores de nitrato mais significativos.

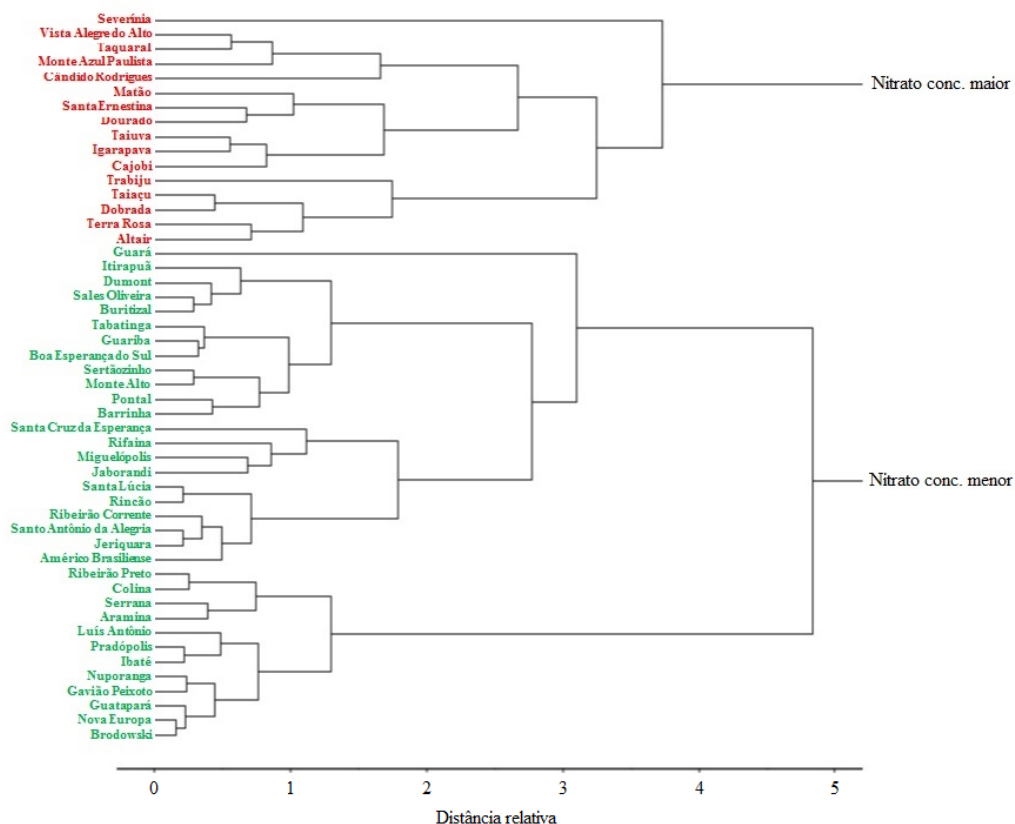


Figura 03: AHA (método Ward, dois grupos) envolvendo 50 municípios e 5 variáveis (condutividade e concentrações de cálcio, magnésio, cloreto e nitrato).

Os resultados da ACP foram confrontados com os resultados da abordagem univariada (considerando apenas as concentrações médias de nitrato obtidas para cada município), da seguinte forma: comparou-se a ordem decrescente dos escores obtidos em CP1 com a ordem decrescente das concentrações médias de nitrato, conforme descrito na Tabela 01 para 24 municípios. Nessa tabela é possível observar que, dos 16 municípios com maiores escores em CP1, 13 estão também presentes entre as primeiras 16 posições quando se considera a ordem decrescente das concentrações médias de nitrato.

Contudo, a diferença principal entre as duas abordagens está nas diferentes ordens obtidas. As alterações mais importantes de posição foram: (i) Severínia ocupou a 1ª posição nas duas séries, mas Monte Azul Paulista passou do segundo lugar em termos de escores para a 7ª posição em termos de médias – isso sugere que a abordagem multivariada é mais adequada para descrever esse município, com reconhecida contaminação por nitrato do manancial utilizado para o abastecimento e que foi considerada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo como uma área de restrição para uso ou interferência em recursos hídricos subterrâneos, entre os anos de 2013 a 2019 (DAEE, 2017); (ii) Cândido Rodrigues é um município na 20ª posição na ordem baseada nas médias, contrastando com a 6ª posição em termos de escores – nesse caso, a análise multivariada sugere que o perfil físico-químico das águas de Cândido Rodrigues assemelha-se àqueles atribuídos a municípios com diversos graus de contaminação evidenciados pelos diversos escores calculados ao longo de CP1, configurando assim risco em potencial; (iii) Matão ocupou a 14ª posição em termos de escores, e a 24ª em termos de médias e, nesse caso, uma análise das amostras individuais desse município revelou que teores elevados de nitrato (entre 5,9 e 6,5 mg L⁻¹) estavam localizados principalmente em um povoado distante da área central do município – isso sugere que a análise multivariada, lidando com perfis físico-químicos, foi mais eficiente em detectar uma situação que requer atenção.

A Figura 4 exibe o mapa da região com a indicação dos 50 municípios analisados de acordo com a ACP. Nota-se que a distribuição espacial não é uniforme, ocorrendo municípios com baixas concentrações de nitrato predominantemente na parte leste, enquanto municípios com concentrações mais elevadas ocorrem em maior número à oeste.



Tabela 01: Comparação entre as ordens decrescentes dos 24 maiores escores em CPI e das 24 maiores médias de concentrações de nitrato.

<i>ORDEM</i>	<i>MUNICÍPIO</i>	<i>ESCORE CPI</i>	<i>MUNICÍPIO</i>	<i>CONC. MÉDIA</i>
1	Severínia	5,994	Severínia	6,481
2	Monte Azul Pta	3,912	Dobrada	4,342
3	Vta Aleg Alt	3,202	Trabiju	4,236
4	Terra Roxa	2,781	Taiapu	4,037
5	Taquaral	2,668	Altair	3,555
6	Când Rodrigues	2,409	Taquaral	3,157
7	Dobrada	2,166	Monte Azul Pta	3,064
8	Altair	2,145	Terra Roxa	3,040
9	Taiapu	2,082	Vta Aleg Alt	2,966
10	Cajobi	1,830	Cajobi	2,374
11	Taiuva	1,616	Igarapava	2,119
12	Igarapava	1,453	Sta Ernestin	2,084
13	Dourado	1,406	Miguelópolis	1,797
14	Matão	1,064	Taiuva	1,712
15	Sta Ernestin	0,886	Aramina	1,610
16	Trabiju	0,786	Rifaina	1,517
17	Miguelópolis	0,491	Dourado	1,375
18	Pontal	0,338	Luis Antônio	1,177
19	Barrinha	0,112	Barrinha	1,149
20	Sertãozinho	-0,104	Când Rodrigues	1,013
21	Itirapuã	-0,235	Serrana	0,773
22	Rifaina	-0,256	Am Brasil	0,707
23	Jaborandi	-0,258	Pontal	0,688
24	Tabatinga	-0,368	Matão	0,637

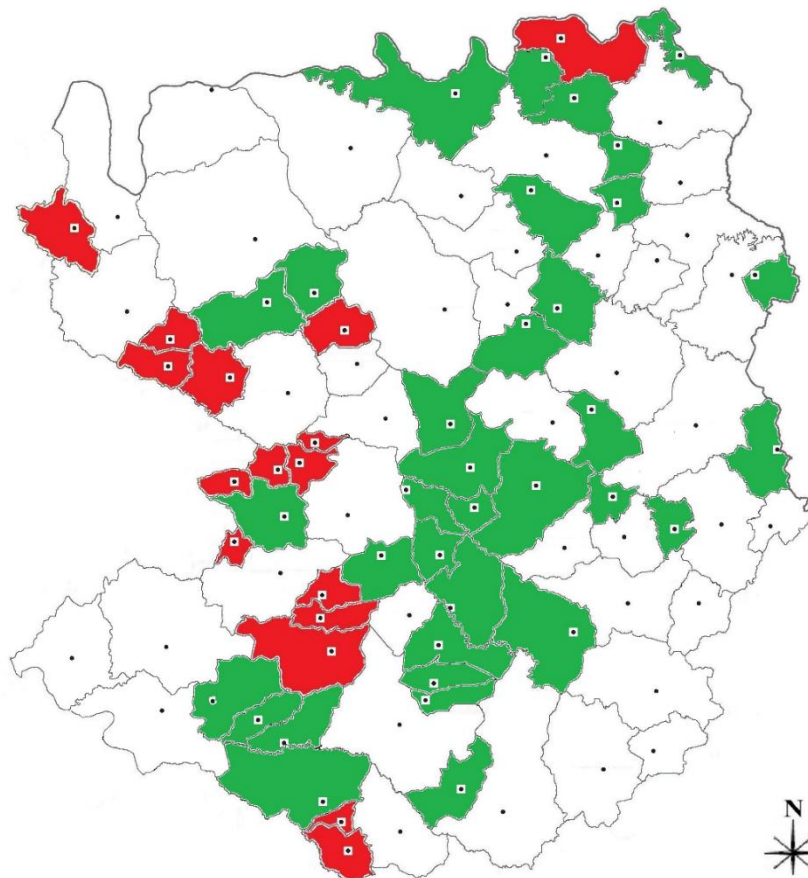


Figura 04: Municípios da região investigada que utilizam exclusivamente manancial subterrâneo para o abastecimento; em vermelho estão indicados os municípios com maiores escores em CP1 conforme Figura 02A.

A interpretação dessa distribuição não é trivial, uma vez que a qualidade final da água subterrânea para consumo humano é resultado (i) da qualidade do manancial antes da captação para o abastecimento que depende, por sua vez, de suas características naturais de interação com o solo (como concentrações de íons, pH e condutividade), (ii) do processo de captação (por exemplo, poços mais profundos são menos vulneráveis à contaminações), e (iii) do tratamento da água captada visando torná-la potável (desinfecção). Porém, padrões desorganizados de ocupação urbana podem comprometer a qualidade dos mananciais, e esses padrões são fortemente influenciados por fatores sociais e econômicos que podem, inclusive, afetar a qualidade dos poços construídos (VARNIER *et al.*, 2010). Tendo isso



em mente, introduziu-se no modelo descritivo ACP, exibido na Figura 02, algumas variáveis demográficas que pudessem impactar a qualidade da água fornecida à população: nº de habitantes, IDHM e PIB pc. Por outro lado, introduziu-se outra variável que pudesse ser resultado da qualidade da água fornecida: o número de internações por 1.000 habitantes para tratamento médico devido a “diarreia e gastroenterite de origem infecciosa presumível”. Os resultados da ACP estão exibidos na Figura 05.

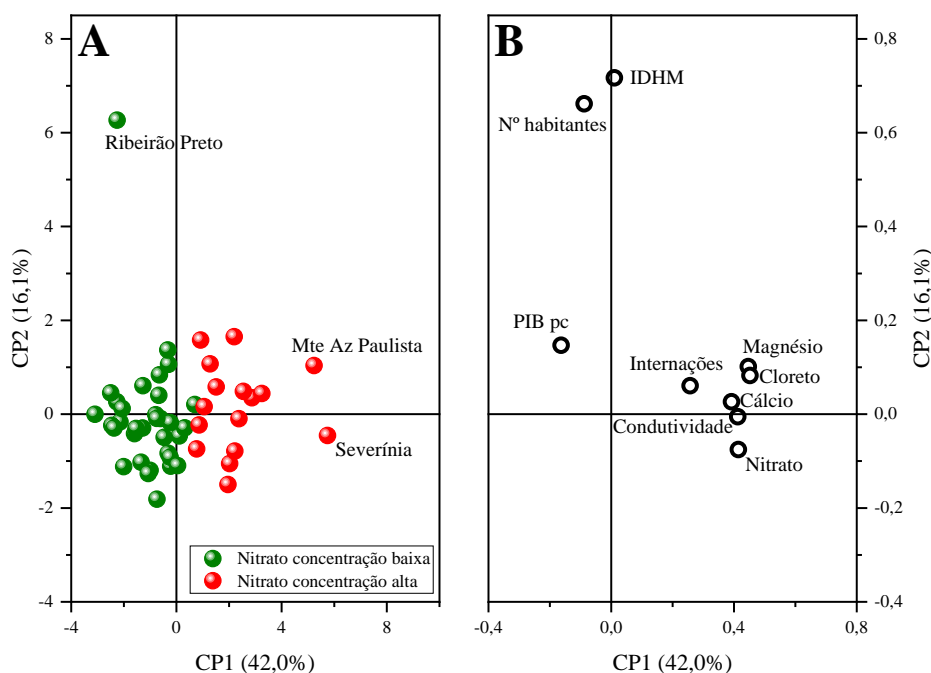


Figura 05: ACP envolvendo 50 municípios e 9 variáveis (população, IDHM, PIB pc, número de internações por diarreia / 1.000 habitantes, condutividade e concentrações de cálcio, magnésio, cloreto e nitrate). A) Gráfico de escores; B) Gráfico de pesos.

Com a introdução das variáveis demográficas, a distribuição dos municípios no gráfico de escores (Figura 05A) é semelhante à distribuição envolvendo apenas variáveis físico-químicas da Figura 02A, com exceção da posição do município de Ribeirão Preto que se destaca dos demais devido ao maior nº de habitantes e ao maior valor de IDHM, conforme indica a direção de CP2 da Figura 05B. Porém, é importante notar que na direção de CP1 (que carrega a maior parte da informação) essas duas variáveis tem os menores pesos, enquanto o nº de internações por 1.000 habitantes está se relacionando positivamente

com as variáveis físico-químicas definindo a qualidade da água contaminada por nitrato, e o PIB pc está se relacionando negativamente com as mesmas variáveis. Tal distribuição dessas duas últimas variáveis pode ser interpretada considerando que municípios com menores recursos financeiros apresentam dificuldade em explorar adequadamente manancial subterrâneo, construindo poços sem critérios técnicos rigorosos e sem proteções sanitárias adequadas, contribuindo a uma maior vulnerabilidade à ação antropogênica deletéria e impactando negativamente a saúde da população.

CONCLUSÕES

Esse trabalho mostra que a contaminação de nitrato de águas subterrâneas pode ser descrita realizando análise univariada (considerando apenas a concentração de nitrato) ou análise multivariada de diversas variáveis físico-químicas, mas que essa última traz informações mais completas e precisas sobre situações de risco e situações potenciais de risco. Outrossim, quando variáveis sociais e econômicas são também consideradas, a análise multivariada pode auxiliar na interpretação da dinâmica da ação antropogênica sobre os mananciais subterrâneos e do impacto dessa ação sobre a saúde humana.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22nd ed. Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012.

BRASIL. **Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Coordenação Geral de Vigilância em Saúde. Programa Nacional de Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada à Qualidade da Água Para Consumo Humano**. Brasília - DF: Editora do Ministério da Saúde, 2005. 106 p.



CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo 2016-2018, p. 291, 2019.

DAEE. Portaria DAEE-860, de 27/03/2017. Prorroga por mais dois anos os efeitos da Portaria DAEE-1066, de 27/03/2015, que prorrogou por dois anos a Portaria DAEE-965, de 27/03/2013 reti-ratificada em 13/04/2013, delimitando uma área de restrição e controle temporário para os usos ou interferências em recursos hídricos subterrâneos no município de Monte Azul Paulista. *Diário Oficial do Estado de São Paulo*; 28 mar, 2017.

DOVIDAUSKAS, S.; OKADA, I. A.; IHA, M. H.; CAVALLINI, Á. G. *et al.* Unusual physico-chemical parameters in the public water supply of a town in the northeast of the São Paulo State (Brazil). **Vigil. sanit. debate**, 5, n. 1, p. 106-115, 2017.

DOVIDAUSKAS, S.; OKADA, I. A.; IHA, M. H.; CAVALLINI, Á. G. *et al.* Abordagem na detecção de situação de risco potencial à saúde, relacionada à qualidade da água: um exemplo. **Tchê Quím**, 15, n. 29, p. 123-135, 2018.

DOVIDAUSKAS, S.; OKADA, I. A.; SOUZA, J. A. d.; NOVAS, M. A. d. J. H. *et al.* A interação entre Vigilância Sanitária e Laboratório de Saúde Pública na detecção de contaminação por nitrato em água subterrânea. **Vigil. sanit. debate**, 3, n. 1, p. 97-104, 2015.

SCHAIDER, L. A.; SWETSCHINSKI, L.; CAMPBELL, C.; RUDEL, R. A. Environmental justice and drinking water quality: are there socioeconomic disparities in nitrate levels in U.S. drinking water? **Environ Health**, 18, n. 3, p. 1-15, 2019.

VALENTIM, L. S. O.; ELMEC, A. M.; JUNIOR, R. J. M.; BATAIERO, M. O. Novos cenários de produção e de vigilância da qualidade da água para consumo humano - 20 anos de Proágua no Estado de São Paulo - Parte I. **Bol Epidemiol Paul**, 9, n. 100, p. 29-39, 2012.

VARNIER, C. **Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual**. São Paulo: SIMA / IG, 2019. 129 p. 978-85-87235-25-1.

VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M.; ODA, G. H. *et al.* Nitrato nas Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, Área Urbana do Município de Marília (SP). **Rev Inst Geológico**, 31, n. 1-2, p. 1-21, 2010.

VICENTE, G. Z.; LIMA, C. G. R.; MARQUES, S. M. Variabilidade espacial e temporal do Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru, estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, 32, n. 3, p. 295-306, 2018.

WHO. **World Health Organization. Guidelines for drinking water quality, fourth edition incorporating the first addendum**. 4th ed. Geneva: WHO, 2017. 631 p.