

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

REPRESENTATIVIDADE DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA EM RESERVATÓRIOS (IQAR): ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO VOSSOROCA, PR

Ana Carolina Canossa Becker¹; Marianne Schaefer França Sieciechowicz² &
Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes¹

RESUMO

Índices de qualidade da água são amplamente utilizados para o diagnóstico de corpos d'água. Para a avaliação de ambientes lênticos, o IAP (Instituto Ambiental do Paraná) criou o IQAR (Índice de Qualidade de Água em Reservatórios) em 2004. O índice foi aplicado para o reservatório Vossoroca, no Paraná, como estudo de caso. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade. Os resultados indicaram que o reservatório estudado se classifica entre “moderadamente degradado” e “criticamente degradado ou poluído”, sendo que as variáveis que mais contribuíram para o resultado do índice foram: déficit de oxigênio dissolvido, clorofila-a, DQO e tempo de residência. Este artigo apresenta uma reflexão sobre a representatividade do IQAR, considerando o aspecto conceitual de que essa classificação pode não ser condizente com a realidade do reservatório, como o estudo de caso aqui apresentado, que se localiza em região de mata nativa preservada e suas principais contribuições são de origem autóctone.

ABSTRACT

Water quality indexes are widely used for waterbodies diagnosis. In 2004, the IAP (Instituto Ambiental do Paraná) created the IQAR (Water Quality Index for Reservoirs) in order to evaluate lentic environment. The index was applied for the Vossoroca reservoir, in Brazil, as a case study. Furthermore, a sensibility analysis was made. The results indicated that the reservoir was classified between “moderately degraded” and “critically degraded or polluted” and the variables that contributed the most for the index result were: dissolved oxygen deficit, chlorophyll-a, chemical oxygen demand and residence time. This paper discusses the IQAR representativeness, considering the conceptual aspect that its classification results may not be consistent with the reservoir reality, as the case study presented, which is located in a preserved native forest region and their main contributions are from autochthonous sources.

Palavras-Chave – índices; análise de sensibilidade; representatividade.

INTRODUÇÃO

Traduzir a grande variedade de dados de qualidade da água em índices é uma importante ferramenta didática com potencial uso para a gestão sócio-ambiental, pois indica de forma simples e objetiva como a qualidade da água varia geograficamente e temporalmente. Nesse contexto, o IAP (Instituto Ambiental do Paraná), no ano de 2004, desenvolveu o IQAR com os objetivos de informar as autoridades, organizações governamentais e instituições públicas e privadas sobre a situação da

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA). Universidade Federal do Paraná, Campus Centro Politécnico, Curitiba -PR. anabecker@ufpr.br cris.dhs@ufpr.br

2) Lactec. Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR), Curitiba -PR. marianne.franca@lactec.org.br

qualidade das águas dos reservatórios; fornecer ao poder público estadual e municipal informações relevantes para subsidiar a tomada de decisões na alocação de recursos visando a conservação e/ou recuperação ambiental; promover a participação pública no monitoramento e conservação da qualidade das águas dos reservatórios (IAP, 2017). Uma desvantagem é a possível perda de informações individuais das variáveis de qualidade da água e consequente desconhecimento dos processos físicos, químicos e biológicos.

A popularidade do uso de índices no país e no mundo, levou ao questionamento: os resultados desses índices são condizentes com a realidade do reservatório? No intuito de se responder essa pergunta, foi realizado uma avaliação do IQAR tendo-se como estudo de caso o reservatório Vossoroca, localizado no estado do Paraná.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Abbasi e Abbasi (2012) afirmam que a utilização de índices de qualidade da água facilita e elucida a compreensão do público, resumindo uma grande variedade de dados de qualidade em apenas um índice. Os autores apontam que o uso de índices para o monitoramento da qualidade da água facilita a alocação de recursos pelos órgãos gestores de recursos hídricos. Além disso, explicam que por meio de índices é possível comparar geograficamente e temporalmente a variação da qualidade. Eles também citam que os índices podem auxiliar na pesquisa científica, pois indicam como o corpo hídrico se comporta diante de medidas estratégicas para melhora da água.

A construção de índices pode acarretar algumas dificuldades, entre elas os efeitos de ambiguidade, eclipse, compensação e rigidez, conforme explicado por Abbasi e Abbasi (2012). A ambiguidade ocorre quando o indicador excede o nível crítico sem nenhuma das variáveis ter atingido seu limite máximo. A eclipse, pelo contrário, é quando o valor crítico não é excedido apesar de uma ou mais variáveis resultarem acima do permitido. A compensação evita que o resultado seja excessivamente tendencioso quando ocorrem valores extremos. Esta propriedade deve ser adequadamente equilibrada com a ambiguidade e a eclipse, para que o índice não seja tão sensível a valores extremos, mas também não os oculte. Por fim, os autores relatam que a rigidez é a inflexibilidade do índice à necessidade de adição de novas variáveis conforme a demanda dos usuários. A inclusão de novos parâmetros causa a diminuição do valor global e acentua o efeito de ambiguidade. A proposição de indicadores exige uma ponderação adequada de todos os aspectos citados. Caso contrário, seu uso pode provocar a perda de informações.

Construção de índices de qualidade da água

A compreensão do processo de construção de índices de qualidade da água é essencial para o estudo de sua representatividade. A criação dos índices passa por quatro fases: seleção das variáveis,

transformação da escala, atribuição de pesos e agregação de subíndices (ABBASI; ABBASI, 2012), conforme detalhado a seguir.

1) Seleção das variáveis: a escolha das variáveis mais representativas da qualidade da água é necessária para que o processo de análise seja menos custoso. No entanto, a determinação dos parâmetros apresenta alguns desafios de natureza subjetiva. Segundo Abbasi e Abbasi (2012), a estatística envolvida na escolha de variáveis pode não ser adequada dependendo do propósito para qual o índice foi determinado. Além disso, os autores destacam que as definições e graus de aceitabilidade podem ser vagos. A significância dos resultados pode ser interpretada de formas diferentes em razão dos níveis socioeconômicos e origens culturais de cada povo. Portanto, nenhum índice é utilizado em escala global.

2) Transformação da escala: devido à diferença de unidades e faixas de valores aceitáveis, são criados subíndices que variam de 0 a 1 ou 0 a 100, para que todas as unidades fiquem na mesma escala. Esta transformação ocorre por meio de uma função, que pode ser linear, não linear, segmentada, exponencial, em degraus ou parabólica.

3) Atribuição de pesos: mesmo após a identificação dos parâmetros mais importantes, ainda é necessário identificar quais, entre as variáveis selecionadas, devem receber maior peso. Existem diversas formas de realizar esta atribuição, sendo a principal delas a Análise Estatística Multivariada.

4) Agregação de subíndices: a última fase consiste na agregação dos subíndices para formar um resultado final. Isso pode ser feito por métodos aditivos, multiplicativos, lógicos (mínimo e máximo) ou pela combinação de operações diversas (ABBASI; ABBASI, 2012). Cada um desses processos de agregação promove vantagens e desvantagens na construção do índice. Os autores explicam que o método aditivo sem pesos promove a ambiguidade, enquanto o aditivo com pesos reduz a ambiguidade, mas aumenta a eclipse. Já o método multiplicativo reduz a ambiguidade e a eclipse, por exemplo. Por sua vez, os operadores máximo e mínimo são utilizados para indicar se alguma das variáveis está acima dos limites aceitáveis para escalas crescentes e decrescentes, respectivamente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

Em 1949, na cidade de Tijucas do Sul, na região metropolitana de Curitiba-PR, o rio São João foi represado para a formação do reservatório Vossoroca. Este tem a função de regularização de vazões para o reservatório Salto do Meio, responsável pelo abastecimento da usina hidrelétrica de Chaminé. A área do reservatório é de aproximadamente 5,1 km² (nível normal), a profundidade média é de 7,1 m e o tempo de residência é de 121 dias (COPEL, 2009).

O reservatório situa-se na Área de Proteção Ambiental Estadual de Guaratuba, na bacia litorânea e a mata nativa de suas margens é preservada. Portanto, o reservatório caracteriza-se pela matéria orgânica de origem autóctone (MÄNNICH, 2013).

Base de Dados

Entre os anos de 2005 e 2017, foram realizadas 47 campanhas de monitoramento pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia). A cada ano, foram realizadas 4 campanhas com intervalos trimestrais, de modo que cada uma coincide com uma estação do ano.

As amostras de água são coletadas em profundidades específicas de acordo com IAP (2009), calculadas conforme as equações 1, 2 e 3, onde Z_s representa a profundidade Secchi, $Z_{máx}$ retrata a profundidade da estação no dia da coleta, e Z_i e Z_f , correspondem ao início da zona anóxica e ao final da zona anóxica, respectivamente. Vale salientar que a profundidade III é coletada apenas quando há anóxia na coluna d'água, portanto estes dados não são utilizados para o cálculo do IQAR.

$$\text{Profundidade I} = Z_s \times 0,54 \quad (1)$$

$$\text{Profundidade II} = \frac{Z_{máx} + 3Z_s}{2} \quad (2)$$

$$\text{Profundidade III} = \frac{Z_i + Z_f}{2} \quad (3)$$

Índice de Qualidade de Água em Reservatórios (IQAR)

O IQAR é amplamente utilizado no diagnóstico da qualidade da água de corpos d'água lênticos. Como resultado, o reservatório é classificado como “não impactado a muito pouco degradado” (Classe I), “pouco degradado” (Classe II), “moderadamente degradado” (Classe III), “criticamente degradado ou poluído” (Classe IV), “muito poluído” (Classe V) ou “extremamente poluído” (Classe VI).

Cada resultado obtido experimentalmente no reservatório possibilita a atribuição de uma classe para cada variável, de acordo com a Tabela 1. Os limites entre as classes foram obtidos por meio do cálculo dos percentis de 10, 25, 50, 75 e 90% de cada uma das variáveis selecionadas em um banco de dados com 22 reservatórios paranaenses de diferentes características tróficas, morfométricas e hidrológicas (IAP, 2004).

Levando em consideração os pesos (W_i) e a classe atribuída a cada variável (q_i), é possível calcular o IQAR para cada campanha utilizando o método aditivo com pesos descrito pela Equação 4, que terá como resultado um número de 1 a 6. O resultado nunca ultrapassará estes limites como consequência do uso de uma função degrau formada pelos percentis descritos na Tabela 1 para a transformação da escala. Ressalta-se que quanto mais alto o resultado do índice, pior é a qualidade da água.

$$\text{IQAR} = \frac{\sum(W_i q_i)}{\sum W_i} \quad (4)$$

Tabela 1 - Pesos e classes para cada variável. Fonte: Adaptado de IAP (2009)

Variáveis	Pesos	Classe					
		I	II	III	IV	V	VI
Média déficit de oxigênio (%)	17	≤ 5	06-20	21-35	36-50	51-70	> 70
Fósforo total (mg/l)	12	≤ 0,01	0,011-0,025	0,026-0,040	0,041-0,085	0,086-0,210	> 0,21
Nitrogênio inorgânico (mg/l)	8	≤ 0,15	0,16-0,25	0,26-0,60	0,61-2,00	2,00-5,00	> 5
Clorofila-a (µg/L)	15	≤ 1,5	1,5-3,0	3,1-5,0	5,1-10,0	11,0-32,0	> 32
Profundidade Secchi (m)	12	≥ 3	3,0-2,3	2,2-1,2	1,1-0,6	0,5-0,3	< 0,3
Demanda Química de Oxigênio (mg/l)	12	≤ 3	03-05	06-08	09-14	15-30	> 30
Tempo de residência (dias)	10	≤ 10	11-40	41-120	121-365	366-550	> 550
Profundidade média (m)	6	≥ 35	34-15	14-07	6-3,1	3-1,1	< 1
Cianobactérias (nº de células/ml)	8	≤ 1.000	1.001-5.000	5.001-20.000	20.001-50.000	50.001-100.000	> 100.000

Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade verifica como o resultado final do índice se altera ao se realizar determinadas alterações em cada variável formadora do índice. Neste trabalho, optou-se por utilizar um método simplificado, assumindo independência entre as variáveis. Portanto, foram atribuídos valores diferentes a apenas uma variável enquanto as outras foram mantidas constantes. Cada variável presente no cálculo do IQAR foi isoladamente multiplicada por nove fatores, sendo eles: “1/5”, “1/4”, “1/3”, “1/2”, “1”, “2”, “3”, “4” e “5”. Cada série de resultados para determinado fator foi expressa graficamente por meio do *box plot*. Nesta pesquisa, foi desenvolvido um algoritmo em software R para a obtenção dos resultados e subsidiar as considerações estabelecidas nos objetivos do artigo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante todo o período estudado, o IQAR resultou entre 2,5 e 4,5 (Figura 1). Estes valores designam as classes III e IV, “moderadamente degradado” e “criticamente degradado ou poluído”, respectivamente. Em 66% do período avaliado, o IQAR resultou na classe III e no restante do período na classe IV. Estudou-se também a variabilidade sazonal do IQAR. No verão e primavera, quando ocorre a estratificação, a mediana dos índices aumentou, indicando maior degradação do reservatório.

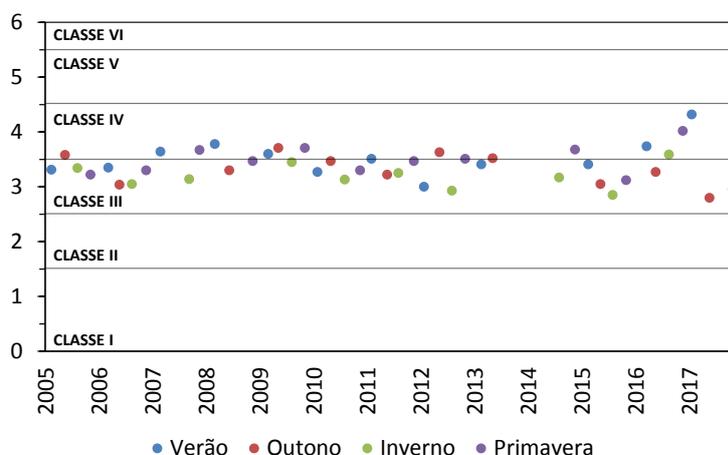


Figura 1 - Série histórica do IQAR para o reservatório Vossoroca

Foram investigadas as variáveis que mais contribuíram para os valores mais altos do IQAR. O gráfico de frequência (Figura 2) indica quantas vezes a variável resultou em determinado subíndice.

A linha tracejada mostra a média geral do índice, de 3,38. Com isso, foi possível observar que as variáveis que mais contribuíram para o aumento do IQAR foram: déficit de oxigênio dissolvido, clorofila-a, DQO e tempo de residência, por terem a maior parte de seus resultados acima da média. O principal responsável pela ocorrência do subíndice 6 (o pior) foi o déficit de oxigênio dissolvido. A clorofila-a também contribuiu fortemente para a elevação do índice, pois a maior parte de suas observações resultou no subíndice 4.

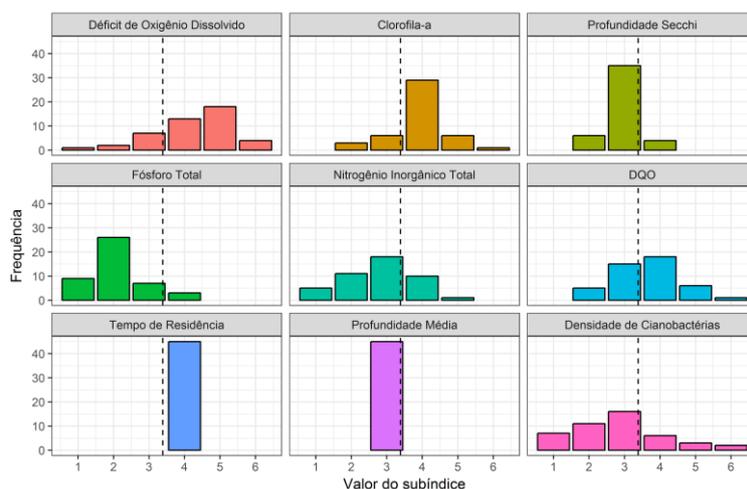


Figura 2 – Frequência de ocorrência de cada subíndice

O tempo de residência e a profundidade média, por simplificação do método, foram mantidos constantes como 121 dias e 7,1 metros, respectivamente. Portanto, seus subíndices são fixos e não contribuem para as comparações do índice ao longo do tempo.

Para verificar como ocorre a influência de cada variável em cada situação do reservatório, os dados foram divididos por estação do ano (Figura 3). Assim, foi constatado que no verão e na primavera os subíndices referentes ao oxigênio dissolvido sofrem elevações devido à estratificação do reservatório e influenciam negativamente no índice. O subíndice da clorofila-a eleva o índice em todas as estações do ano. Os valores da profundidade Secchi, fósforo total e nitrogênio inorgânico, em geral, não influenciam negativamente o índice independentemente da época observada. A DQO contribuiu ligeiramente para o aumento do índice no verão e no outono, porém manteve a neutralidade nas outras estações. A densidade de cianobactérias, por ser um parâmetro biológico e apresentar alto coeficiente de variação, apresentou resultados de subíndice bastante diversificados.

Por meio da análise de sensibilidade, foi possível perceber quais parâmetros exercem maior influência na avaliação da qualidade da água pelo IQAR e como isso ocorre.

Foram gerados 81 *box plots* (Figura 4), pois cada uma das nove variáveis foi isoladamente multiplicada pelos nove fatores. Os *box plots* de fator “1” representam a série real de IQARs para o reservatório Vossoroca. Os demais fatores mostram os resultados do índice caso os valores de determinada variável sejam aumentados ou reduzidos, mantendo as outras com o valor original.

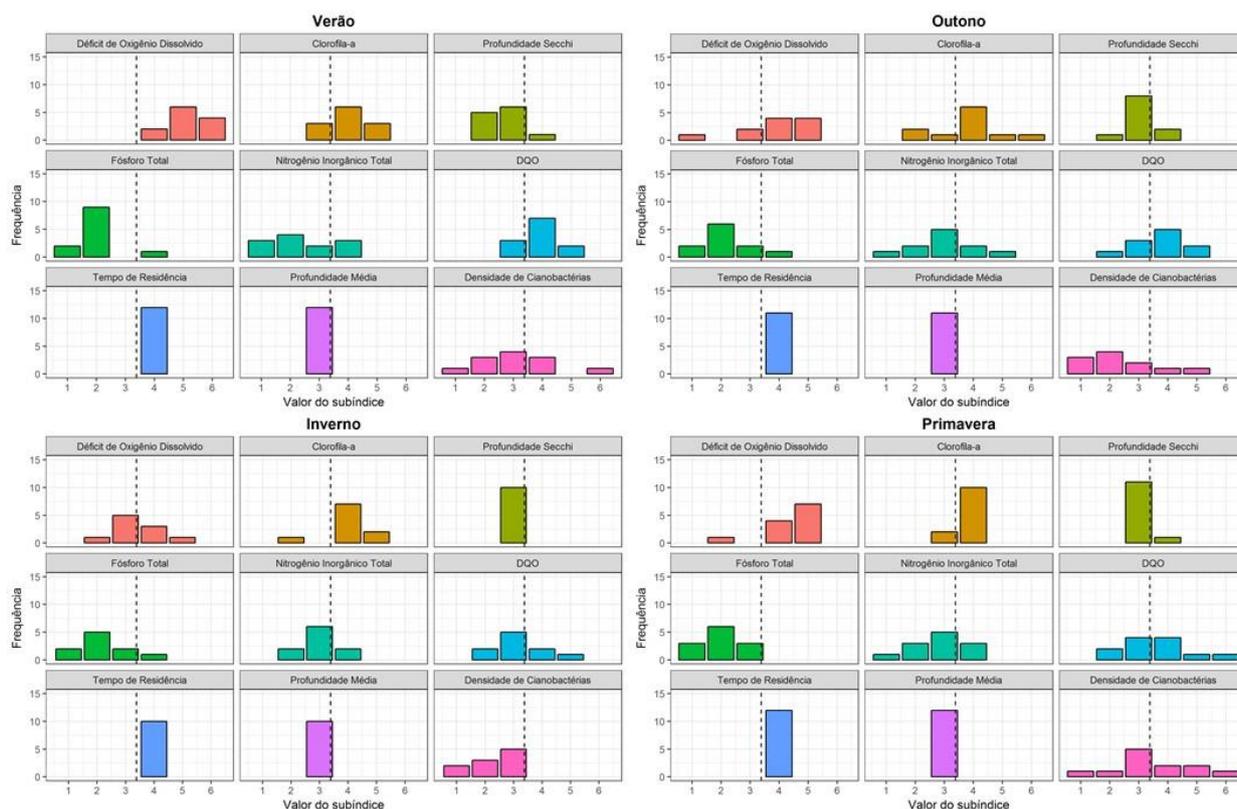


Figura 3 – Frequência de ocorrência de cada subíndice por estação

Ao analisar os gráficos da Figura 4, foi possível perceber que mesmo quintuplicando ou reduzindo em 5 vezes os resultados obtidos na série histórica, a maior parte dos *box plots* permanece nas faixas de valores de 2,5-3,5 e 3,5-4,5, que compreendem, respectivamente, as classes III (moderadamente degradado) e IV (criticamente degradado ou poluído). Os limites entre as classes foram representados pelas linhas tracejadas.

Ao se dobrar o déficit de oxigênio dissolvido, a mediana do índice se altera de modo a ultrapassar o limite para a classe IV. Esta variável é a mais sensível entre as nove, pois foi a que recebeu maior peso (0,17). Já a clorofila-a, quando triplicada, faz com que a mediana do índice atinja a faixa de valores da classe IV. Esta possui o segundo maior peso (0,15).

A profundidade Secchi precisa ser reduzida em um terço para que sua mediana vá para a classe mais poluída. No caso do fósforo total, que recebeu o mesmo peso (0,12), a mediana atinge a classe IV quando a concentração de fósforo é triplicada. Para a DQO, que também possui o mesmo peso, basta ter seus valores duplicados para que a mediana se eleve para a classe IV. Para o tempo de residência, de peso 0,10, a análise de sensibilidade apontou que a mediana estará na classe IV apenas quando o fator multiplicativo chegar a 5. O nitrogênio inorgânico total, se triplicado, quadruplicado ou quintuplicado apresenta distribuições de mesma mediana, que se situa exatamente no limite entre as classes III e IV. A densidade de cianobactérias, mesmo com seus valores quintuplicados, não faz a mediana do índice atingir a classe IV. O nitrogênio inorgânico total, assim como a densidade de

cianobactérias, possui peso 0,08, o que justifica que esses parâmetros tenham menor sensibilidade. A alteração de profundidade média, que não fez a mediana do índice aumentar para a classe IV, também influencia de modo menos significativo no índice devido a seu peso de 0,06.

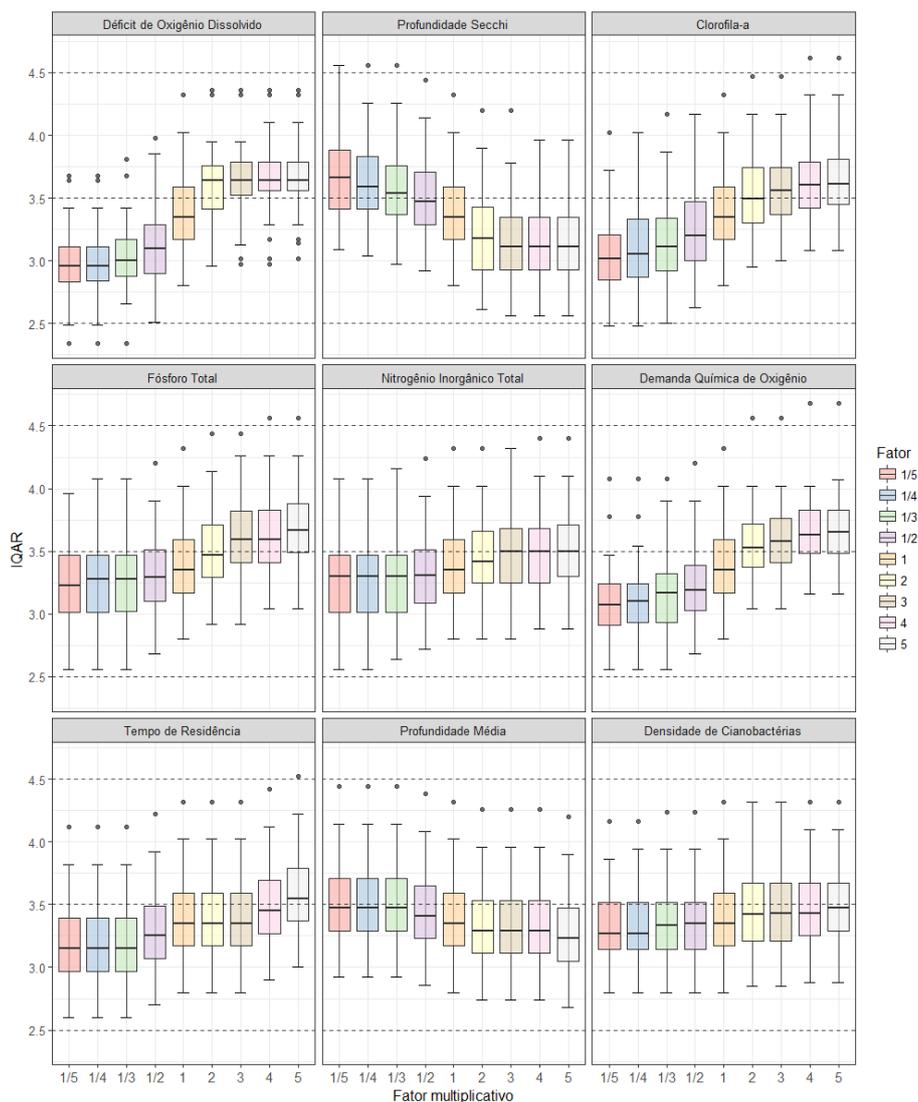


Figura 4 – Análise de sensibilidade

Se compararmos no mesmo gráfico apenas as medianas (Figura 5), percebe-se mais claramente quais variáveis sofreram maior influência dos fatores estabelecidos. A profundidade Secchi e o déficit de oxigênio dissolvido têm maior influência no IQAR do que a densidade de cianobactérias e a profundidade média, por exemplo.

Além disso, é possível perceber que o IQAR foi mais sensível à alteração de variáveis individuais na faixa entre os fatores “1/2” a “2”, enquanto a multiplicação por fatores mais extremos tende a estabilizar o índice.

A tendência à estabilização com valores extremos, assim como a permanência do índice nas mesmas classes apesar de fortes alterações nos parâmetros de qualidade da água demonstram que as propriedades compensatórias do índice são bem estabelecidas para evitar que valores extremos influenciem demasiadamente no resultado. No entanto, esta característica pode promover a eclipse,

ou seja, pode ocultar do índice eventuais problemas que possam ocorrer no reservatório, conforme previsto por Abbasi e Abbasi (2012) para índices com método de agregação aditivo com pesos. Adicionalmente, foi possível perceber que a transformação da escala por meio de uma função degrau intensifica essa tendência.

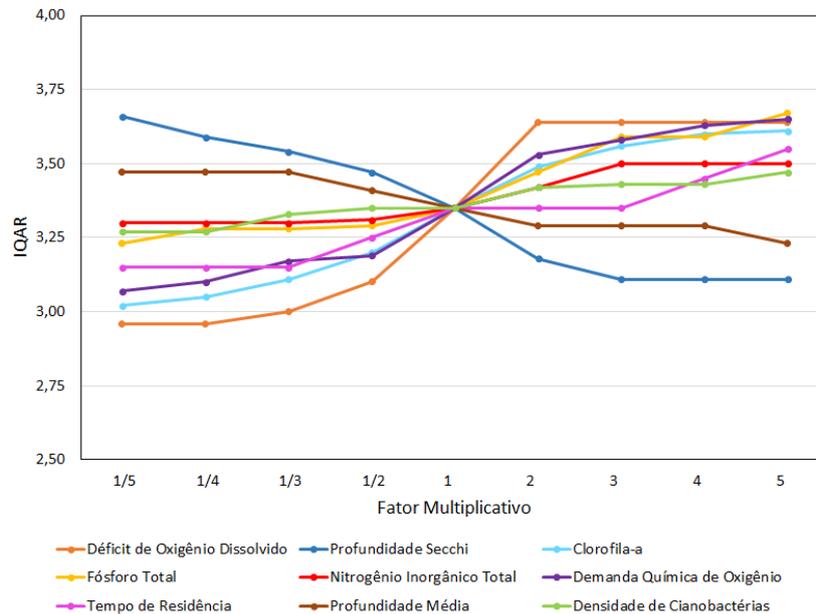


Figura 5 – Medianas – análise de sensibilidade

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O reservatório Vossoroca caracteriza-se pela boa qualidade da água, de modo a apresentar compatibilidade com seu entorno preservado. A série de dados avaliada por Becker (2018) indicou a natureza autóctone do reservatório, que sofreu poucas interferências antrópicas. Portanto, rotular o reservatório Vossoroca como degradado ou poluído pode levar a considerações errôneas em relação à sua situação, caso o resultado do índice seja avaliado sem considerar o contexto social e ambiental do reservatório. O índice, nesse caso, não retratou o reservatório de modo condizente com a realidade.

Além disso, um índice deve ser sensível a alterações ecológicas e proporcionar a distinção entre os fatores pouco relevantes e casos de grandes alterações no ecossistema. A análise de sensibilidade demonstrou que o índice apresenta sensibilidade especialmente às alterações de parâmetros de maior peso. Entretanto, as propriedades compensatórias do IQAR podem ocultar a ocorrência de alterações extremas em variáveis individuais, o que caracteriza o efeito de eclipse. Portanto, o uso do índice não isenta o avaliador de observar individualmente cada variável, concomitantemente à sua série histórica.

Adicionalmente, deve ser considerado que um reservatório limpo, apenas por apresentar elevado tempo de residência e profundidade média menor, pode acabar diagnosticado como mais degradado do que um reservatório que tenha tempo de residência mais curto e profundidade maior, mas que tenha alta densidade de cianobactérias, por exemplo. Ressalta-se também que para a

construção do índice foram avaliados reservatórios paranaenses, o que poderia trazer problemas de representatividade caso seja aplicado em reservatórios de outras regiões do Brasil ou do mundo.

O estudo da relevância conceitual do índice para cada caso de aplicação, portanto, se revelou necessário, pois seu resultado deveria explicitar informações pertinentes à sociedade em relação ao estado do reservatório, mas nem sempre isso ocorre. Uma importante contribuição da metodologia simplificada de análise de sensibilidade é a possibilidade de comparação, em estudos futuros, com diversos índices que foram ou poderão ser criados para localidades específicas.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Water Quality Indices. Elsevier, 2012.
- BECKER, A.C.C.; Análise da qualidade da água em reservatórios e avaliação da representatividade do IQAR: estudo de caso do reservatório Vossoroca, PR. 2018. 105 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2018.
- COPEL. Relatório Ambiental - Usina Hidrelétrica Chaminé. 1999.
- INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). Monitoramento da Qualidade das Águas dos Reservatórios do Estado do Paraná, no período de 1999 a 2004. Curitiba, 2004.
- INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). Monitoramento da Qualidade das Águas dos Reservatórios do Estado do Paraná, no período de 2005 e 2008. Curitiba, 2009.
- INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). Monitoramento da Qualidade das Águas dos Reservatórios do Estado do Paraná. Curitiba, 2017.
- LOBATO, T. C.; HAUSER-DAVIS, R. A.; OLIVEIRA, T. F.; et al. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*, v. 522, p. 674–683, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021>>.
- MÄNNICH, M. Estimativa de emissões de gases de efeito estufa em reservatórios e lagos – contribuições para o monitoramento e modelagem 1D – vertical. 2013. 303 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- RODRIGUES, L.; THOMAZ, S. M.; AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C. Biocenoses em reservatórios: padrões espaciais e temporais. São Carlos: Rima, 2005.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. Rio de Janeiro: Oficina de textos, 2008.