

IV-188 - AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DOS PRINCIPAIS MANANCIAIS SUPERFICIAIS UTILIZADOS PELA CESAN

Mariângela Dutra de Oliveira⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Marcelo Libânio

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Pós-Doutor pela Universidade de Alberta.

Caroline Ornélas Pereira

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental no Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes).

Juliana Freitas Ramos da Fonseca

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental no Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes).

Endereço⁽¹⁾: Av. Vitória, 1.776 - Vitória - ES - CEP: 29040-780 - Brasil - Tel.: (27) 3331-2237 - e-mail: mariangeladutra@ifes.edu.br

RESUMO

A água é um recurso natural fundamental e indispensável em diversas práticas, entretanto em decorrências das atividades antrópicas, a preocupação com a conservação de sua qualidade tornou-se imperativa. Para tal tem-se utilizado os índices de qualidade das águas que retratam a sua condição ambiental de forma acessível a toda a população. Com foco na tratabilidade dessas águas foram desenvolvidos índices de qualidade da água bruta e o presente trabalho objetivou aplicar e comparar estes índices aplicando-os em 26 mananciais de abastecimento do Estado do Espírito Santo utilizados pela Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN). Nenhum manancial estudado foi classificado com a condição “ótima” para tratabilidade. Dos 26 mananciais estudados, 22 foram classificados na condição “Boa” indicando a necessidade de ações de preservação a médio e longo prazo, e 4 localizados no sul do estado, apresentaram condição “regular” para tratabilidade indicando a necessidade de implantação de ações de preservação a curto prazo, evitando custos adicionais ao tratamento. A resposta produzida pelos Índice de Qualidade de Água Bruta (IQAB) e Índice de Qualidade de Água Bruta Fuzzy (IQABF), são significativamente diferentes entretanto apresentam a mesma tendência. O IQABF apresenta uma resposta mais restritiva que o IQAB, tornando-se portanto a melhor ferramenta para a gestão com indicativos quanto a proteção de mananciais minimizando os custos de potabilização da água.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade da Água Bruta, Índices, Lógica Fuzzy.

INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade e quantidade dos recursos naturais e com a proteção da saúde humana tem papel central em todas as discussões. Com efeito, a sociedade vem direcionando suas atenções para os impactos ambientais negativos provenientes de suas atividades, produtos ou serviços, já que a qualidade de vida depende diretamente do equilíbrio ambiental (MOURA; BRITO; SILVA, 2013).

O acelerado processo de degradação dos mananciais deve-se principalmente à falta de controle das ações antrópicas nas bacias hidrográficas (OLIVEIRA, 2014). É evidente citar que tais problemas podem estar associados à ocupação irregular e ao aumento exacerbado da população, que por sua vez, ocasionam a degradação das áreas, enchentes, redução da biodiversidade, poluição das águas por esgotos e pela disposição inadequada dos resíduos sólidos, entre outros.

De certo que o conhecimento sobre a qualidade dos recursos hídricos de uma bacia consiste, portanto, em uma ferramenta de suma importância, uma vez que a partir dessas informações é factível inferir sobre as condições da bacia hidrográfica como um todo, pois é nela que se encontram as informações físicas, biológicas, socioeconômicas e, inclusive, culturais da população ali residente (QUEIROZ et al., 2010).

Visando determinar o uso múltiplo dos recursos hídricos, uma importante medida ambiental para diagnosticar um corpo hídrico é o uso de indicadores físicos, químicos e biológicos (FREIRE et al., 2013). Mais restritivamente, índices de qualidade, que condicionam a avaliação ambiental do corpo d'água.

Nesse aspecto, o presente estudo tem como objetivo principal aplicar os recém desenvolvidos Índices de Qualidade da Água Bruta (IQAB) e Índice de Qualidade da Água Bruta Fuzzy (IQABF) em 26 mananciais de abastecimento do Estado do Espírito Santo utilizados pela Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) como forma de hierarquiza-los quanto as ações de preservação, além de correlaciona-los a qualidade da água tratada, o consumo de coagulante e período hidrológico.

Toda essa análise deve ser pautada nas informações de uso e ocupação do solo e no índice de precipitação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados secundários nos quais a pesquisa se fundamentará advém de 26 mananciais superficiais que fornecem vazão total da ordem de 4,5 m³/s, respondendo pelo abastecimento de aproximadamente 40% da população do Estado. De acordo com censo 2010, o Espírito Santo apresenta uma população na ordem de 3,5 milhões de habitantes (IBGE, 2014). Tais mananciais, na sua maioria dotados de estruturas de captação direta, operam 24 horas diárias e concentram-se nas regiões norte e sul do Estado, conforme denota a Figura 1.

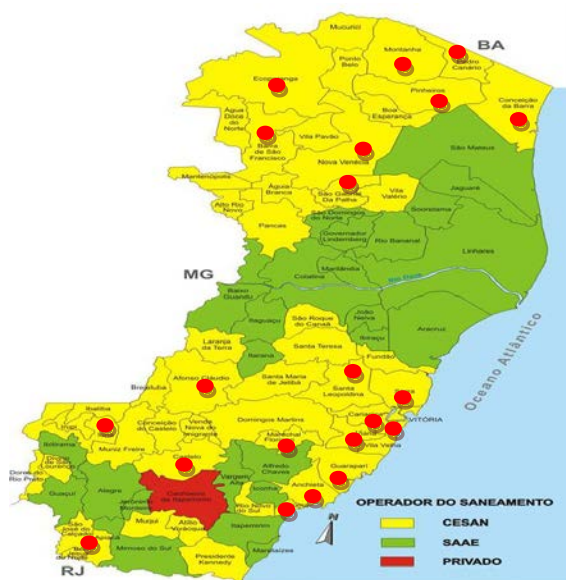


Figura 1: Localização dos mananciais inseridos no universo amostral da pesquisa.

Os mananciais elencados se vinculam a 22 sistemas de abastecimento dos 53 municípios do Estado operados pela CESAN, sendo que as vazões médias captadas variam de 7 L/s a 2757 L/s.

Os dados utilizados se referem ao período de 2006 a 2014, contemplando as características da água bruta; vazões afluentes. Os dados referentes ao sistema de tratamento se referem ao período de 2009 a 2014.

Os parâmetros de qualidade de água bruta utilizados são: *E.Coli*, Cianobactérias, *Clorofila-a*, Turbidez, Cor Verdadeira e Cor Aparente, pH, Ferro e Manganês.

Conforme a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005), coliformes termotolerantes eram utilizados como indicador de qualidade microbiológica, entretanto, como a mesma permite a substituição do mesmo ela *Echerichia coli* a CESAN passou a adotar tal parâmetro a partir de 2012.

CETESB, 2008 indica, que caso seja necessária alguma conversão para comparativo histórico, deve-se utilizar a relação *E.Coli*/Coliformes termotolerantes aproximadamente igual a 80%.

Os dados utilizados na pesquisa foram submetidos a tratamento estatístico com identificação da sua distribuição, de dados censurados e atípicos.

Como já comprovado por diversos autores, dados ambientais apresentam distribuição não normal e assimetria positiva o que dificulta a aplicação de métodos paramétricos. Desta forma, será verificada a normalidade dos dados da água bruta por meio do teste “Normal Probability Plot”, associado ao teste Shapiro-Wilk para nível de significância de 5% utilizando o software Statistica 7 (STATSOFT, 2007).

Em dados de monitoramento ambiental é comum a ocorrência de valores censurados. Quando esta ocorrência for inferior a 15% da amostra pode-se empregar a substituição do dado censurado pela metade do limite de detecção (LD/2) (USEPA, 2006). As observações atípicas foram consideradas *outliers* ou dados inconsistentes. Estes dados podem indicar características reais da população ou erros de medição ou registro, que podem distorcer seriamente os resultados dos testes estatísticos. Estes erros foram determinados com base nos limites da literatura e NBR 12.216/92 para o parâmetro pH, onde valores fora da faixa de 5 a 9 serão considerados inconsistentes e excluídos da amostra. Os *outliers* serão mantidos no banco de dados, pois podem ocorrer naturalmente.

DETERMINAÇÃO DO IQAB

A partir dos dados operacionais referentes às características da água bruta (Figura 2) foram calculados os valores dos Índices de Qualidade de Água Bruta (IQAB) diários. Para os parâmetros monitorados com maior frequência (pH e turbidez, usualmente aferidos com frequência horária ou a cada duas horas) na maioria das estações amostradas, foram utilizados os valores médios diários para cálculo do IQAB.

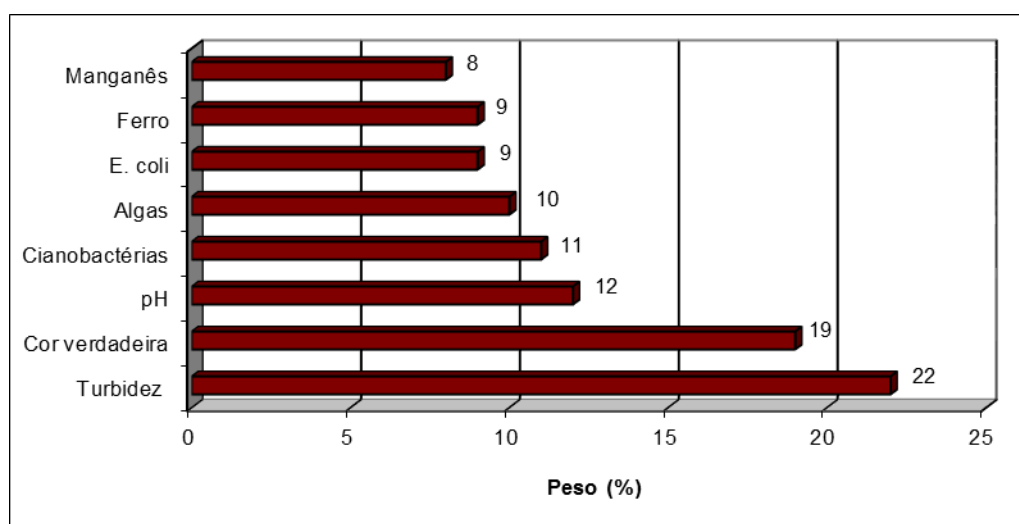


Figura 2: Relação dos parâmetros e respectivos pesos integrantes do IQAB.

A equação 1 será utilizada para cálculo do IQAB diário (SOUZA; LIBÂNIO, 2009).

$$IQAB = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

Equação (1)

Na qual:

- w_i = peso atribuído a cada parâmetro definido na pesquisa de opinião;
- q_i = pontuação atribuída ao parâmetro observada nas curvas de qualidade;
- i = cada parâmetro incluído no índice;
- n = número de parâmetros.

Os dias sem dados de cor verdadeira, pH, turbidez, ferro, e *E. coli* foram excluídos do banco de dados. Por não haver indícios de floração de algas nos mananciais, as informações sobre cianobactérias e *clorofila-a* foram preenchidas com os valores 1 e 0 respectivamente. O manganês também não é identificado na região sendo o as lacunas preenchidas com o valor 0.

DETERMINAÇÃO DO IQABF

A modelagem e o controle Fuzzy são técnicas utilizadas quando é difícil identificar a equação que descreve exatamente um sistema. Exemplificam-se os casos de sistemas complexos que envolvem múltiplas variáveis, como sistemas não lineares ou que variam ao longo do tempo e quando se tem o conhecimento do sistema por especialistas como operadores ou projetistas. Sua aplicação leva a resultados mais acurados, além de apresentar desempenho estável e robusto (ROSS, 2010).

Considerando a Lógica Fuzzy apropriada aos sistemas ambientais uma vez que tem a capacidade de refletir o pensamento humano, lidar com informações não lineares que possui um grau de subjetividade e trabalhar com informações quantitativas e qualitativas (GHARIBI et al., 2012), foi desenvolvido por OLIVEIRA (2014) o Índice de Qualidade de Água Bruta Fuzzy (IQABF).

A estrutura de cálculo do IQABF tem como base o fluxograma apresentado na Figura 3 onde os oito parâmetros de interesse foram divididos em dois grupos para formulação do Índice Biológico Fuzzy (IBF) e do Índice Físico-Químico Fuzzy (IFQF), que por sua vez determinaram o IQABF.

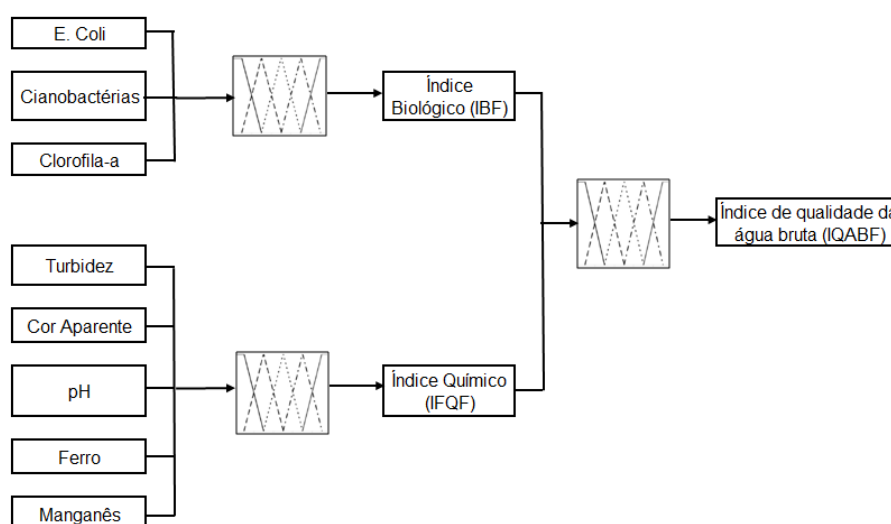


Figura 3: Fluxograma do sistema de inferência Fuzzy utilizado para desenvolvimento do IQABF.

O modelo foi desenvolvido com cor aparente, entretanto, como todos os sistemas só apresentam dados de cor verdadeira haverá uma substituição deste parâmetro neste estudo. Utilizando as funções de entrada e saída para cada parâmetro e as regras, segundo modelo Mandani, já definidas por Oliveira (2014) foram determinados os valores de IQABF classificados segundo Tabela 1.

Tabela 1: Linguagem e faixa utilizada para o IBF, IFQF, e IQABF.

Classe	Intervalo	Representação
Ótimo (OT)	$79 < \text{IQABF} \leq 100$	Verde
Bom (B)	$51 < \text{IQABF} \leq 79$	Azul
Regular (RG)	$36 < \text{IQABF} \leq 51$	Amarelo
Ruim (R)	$19 < \text{IQABF} \leq 36$	Vermelho
Péssimo (P)	$0 < \text{IQABF} \leq 19$	Preto

Segundo Oliveira (2014), a lógica Fuzzy confere ao índice maior flexibilidade, permitindo adaptações às necessidades de cada manancial e sua utilização pelos gestores das concessionárias de abastecimento de água.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para cada índice foram realizados (LEVINE et al., 2008; HAIR et al., 2009):

- Teste de hipótese não-paramétrico de *Kruskal Wallis* seguido do teste de comparações múltiplas, com nível de significância de 5%, para comparação entre os 26 mananciais, hierarquizando as ações de proteção dos mananciais em curto, médio e longo prazo;
- Teste *U de Mann-Whitney*, com nível de significância de 5%, para comparação entre os períodos hidrológicos.

Buscando-se identificar se existe diferença significativa entre os dois índices será aplicado o teste *T de Wilcoxon* para amostras pareadas, com nível de significância de 5%.

Concluindo a análise foi determinada a correlação linear utilizando o coeficiente de correlação de *Spearman* entre: IQAB e IQABF; IQAB, IQABF e a turbidez da água tratada produzida pelo sistema; IQAB, IQABF e o consumo de coagulante.

RESULTADOS

Dentre os 22 sistemas analisados alguns apresentam captação em mais de um manancial, desta forma dentre os dados disponibilizados para os 26 mananciais confirmou-se a existência de dados censurados em % inferior a 15%, o que determinou a substituição dos mesmos pela metade do limite de detecção. Como era de se esperar os dados não apresentaram uma normalidade sendo portanto forma tratados a partir deste momento com estatística não paramétrica.

O banco de dados bruto é composto por 3996 dados referentes ao período de 2006 a 2014. Após análise de inconsistência e exclusão dos dias com dados faltantes de cor verdadeira, pH, turbidez, ferro e *E. coli* o número de dados válidos utilizados na pesquisa foi de 402 dados, aproximadamente (10%) dos dados brutos.

Com base no banco de dados válidos, na equação 1 e formulação Fuzzy foram determinados os Índices IQAB e IQABF como apresentado na Tabela 2. Visualmente pode-se identificar diferenças nas classificações dos mananciais 6, 7, 19, 22 e 25, todos localizados na região sul do estado.

O teste *Kruskal Wallis*, para um nível de significância de 5%, indicou que há diferença significativa entre os valores de tendência central dos mananciais estudados (Figura 4).

Tendo como base o IQABF pode-se observar que os mananciais 6, 7, 19 e 22 estão em condições mais desfavoráveis ($IQABF \leq 51$) indicando a necessidade de ações de preservação dos mananciais a curto prazo. Nenhum manancial apresentou uma condição Ótima para tratabilidade ($IQABF > 79$). Dos 22 mananciais restantes pode-se dizer que 13 mananciais demandariam ações de preservação a médio prazo ($51 > IQABF \geq 65$) e 9 mananciais demandariam ações de preservação a longo prazo ($65 > IQABF \geq 79$). Esta análise será melhor discutida a luz do uso e ocupação do solo e precipitação pluviométrica, etapa ainda em fase de desenvolvimento.

É possível inferir ainda que a região sul do estado do Espírito Santo demanda maior atenção quanto a preservação dos mananciais quando comparado com as regiões centro e norte.

Tabela 2: Mediana dos IQAB e IQABF para os mananciais estudados.

Manancial	Número de Dados	Vazão do Sistema Associado (L/s)	Mediana	
			IQAB	IQABF
1	33	2.988	68	60
2	10	355	71	67
3	14		79	71
4	14		74	64
5	14	44	75	66
6	15		56	40
7	15	37	65	43
8	2	40	64	58
9	14		64	57
10	14	82	60	55
11	12	37	72	65
12	11	40	59	62
13	14	92	63	53
14	13	7	77	73
15	29	192	73	67
16	11	59	77	65
17	12	38	65	52
18	15	76	61	58
19	14	39	66	48
20	13	36	74	64
21	24	125	79	68
22	14	58	63	46
23	12	39	67	60
24	13	40	76	70
25	27	27	82	78
26	23		76	72

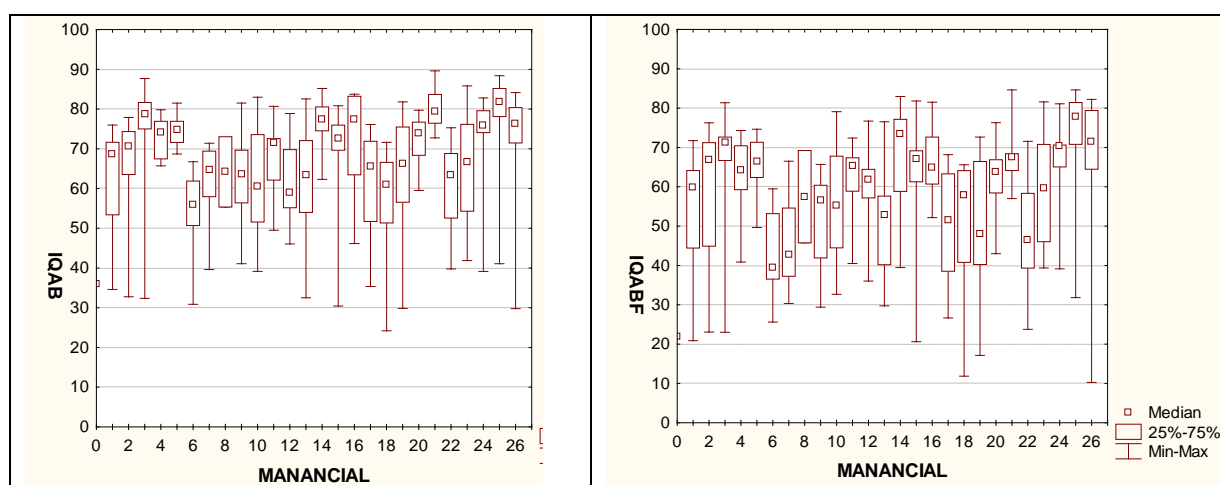


Figura 4: Comparativo entre IQAB e IQABF para todos os mananciais.

Utilizando o teste *T de Wilcoxon* para amostras pareadas, com nível de significância de 5%, constata-se que há diferença significativa entre os índices IQAB e IQABF (Figura 5).

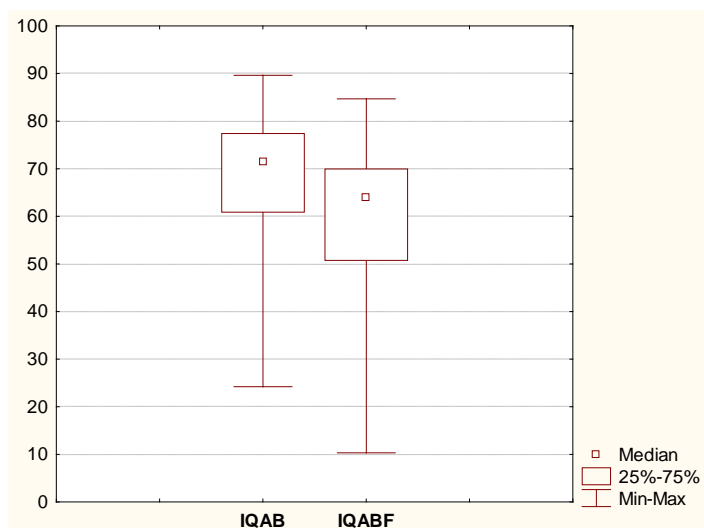


Figura 5: Comparativo entre IQAB e IQABF do conjunto de dados.

Analisando os índices a luz do período hidrológico, conclui-se que os índices do período seco são mais elevados do que os do período chuvoso, por ser este o período em que a qualidade da água bruta apresenta baixa variabilidade e melhor qualidade. O teste *U de Mann-Whitney* indica que há diferença significativa entre os índices do período seco e do período chuvoso para o conjunto de dados (Figura 6).

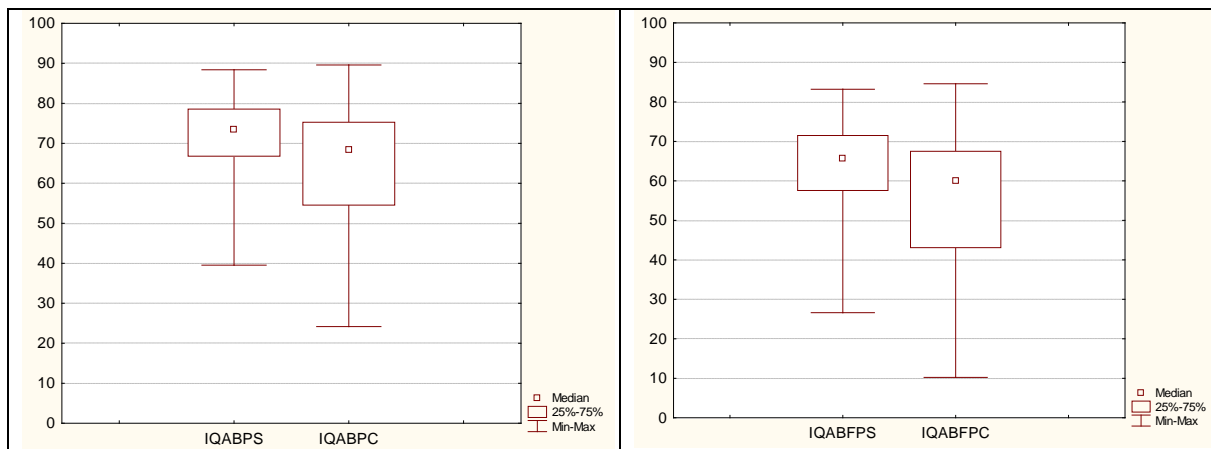


Figura 6: Comparativo entre período seco e período chuvoso para o conjunto de dados.

A correlação de *Spearman* entre os índices IQAB e IQABF é elevada ($\rho \approx 91\%$), indicando que os índices apresentam a mesma tendência de resposta (Figura 7).

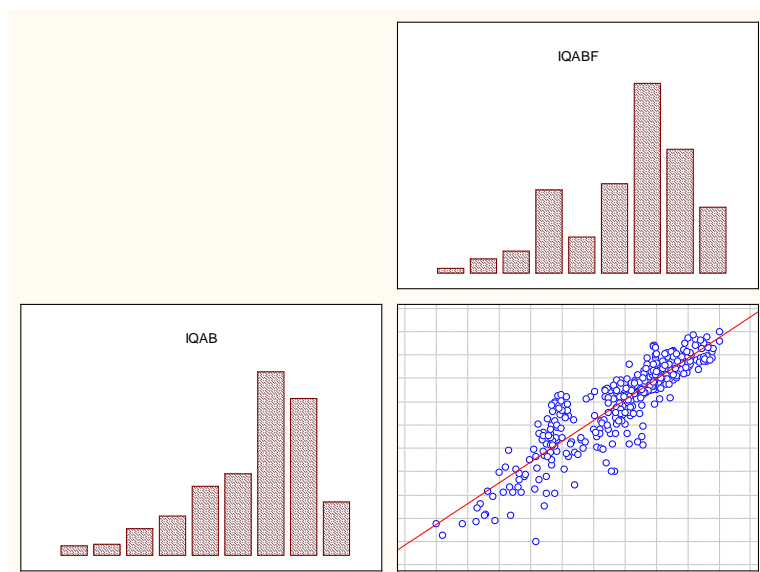


Figura 7: Correlação de Spearman entre IQAB e IQABF.

A Tabela 3 apresenta a correlação de Spearman entre o IQAB e o IQABF e as variáveis turbidez da água tratada e dosagem de coagulante.

Tabela 3: Mediana dos IQAB e IQABF para os mananciais estudados

VARIÁVEIS	Turbidez AT	Dosagem Sulfato Alumínio
IQAB	-0,37	-0,46
IQABF	-0,44	-0,58

O IQABF apresenta correlações negativa com TAT e Dosagem de Coagulante mais expressivas quando comparado com os resultados do IQAB, ou seja, pode ser considerado mais representativo. Mananciais de melhor qualidade apresentam uma tendência a produzir água tratada de melhor qualidade e com menor consumo de produtos químicos (Figura 8).

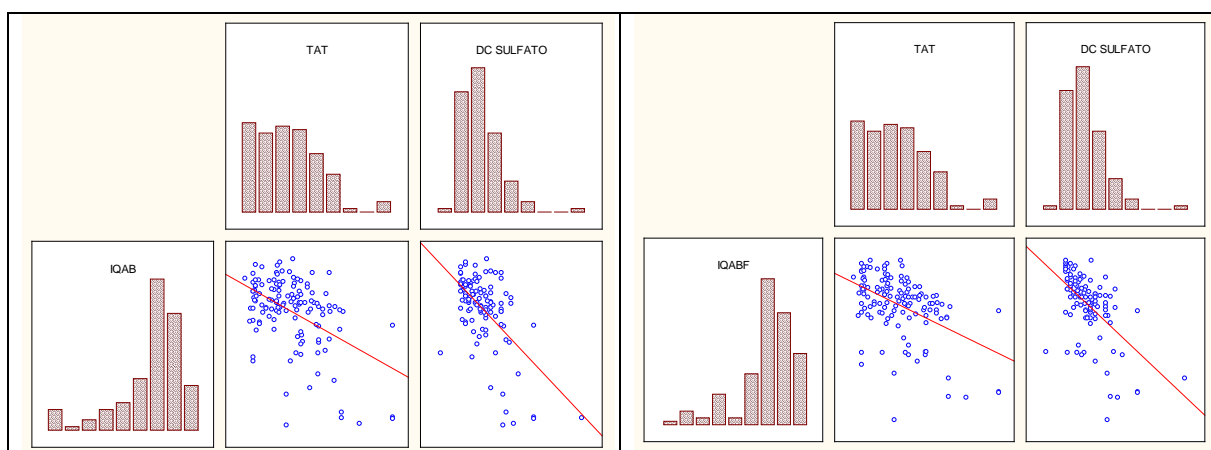


Figura 8: Correlação de Spearman entre IQAB e IQABF e as variáveis TAT e Dosagem de Sulfato de Alumínio.

CONCLUSÕES

A qualidade e quantidade de dados disponíveis e considerados válidos ainda é hoje em dia, um dos grandes fatores que comprometem a aplicação de índices e indicadores na gestão do saneamento e meio ambiente no Brasil e no mundo.

Com base no trabalho realizado até o momento, concluiu-se que o índice de qualidade da água bruta desenvolvido com a lógica Fuzzy é mais restritivo apresentando valores inferiores ao IQAB, condição que indicou a necessidade de ações imediatas de preservação em 4 dos mananciais. Observa-se também que a os demais mananciais encontram-se em uma condição boa para tratabilidade, demandando ações de médio e longo prazo. Pode-se observar ainda que o período chuvoso tende a reduzir significativamente o IQABF. Esta análise ainda em desenvolvimento deverá ser aferida a luz do uso e ocupação do solo e precipitação pluviométrica na bacia.

A correlação encontrada entre os índices IQAB e IQABF foi expressiva indicando que apesar de significativamente diferentes os dois índices apresentam a mesma tendência de respostas.

Quanto a correlação entre os índices e as variáveis turbidez da água bruta e dosagem de coagulante pode-se afirmar que elas são inversamente proporcionais e mais expressivas para o IQABF. Nesta condições é possível inferir que mananciais com melhor qualidade da água bruta tendem a produzir água com valores mais baixos de TAT e com menor consumo de produtos químicos.

O IQABF constitui uma ferramenta de apoio a tomada de decisão que permite aos gestores hierarquizar as ações de proteção dos mananciais a curto, médio e longo prazo, minimizando os custos de potabilização da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da SEAMA/FUNDÁGUA- Convenio SIGA 002/2013 e a CESAN a parceria no desenvolvimento do trabalho, cessão e digitalização dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. 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. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasil, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 02 maio. 2015.
2. CETESB, COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Relatório Técnico de Monitoramento de Escherichia coli e coliformes termotolerantes em pontos da rede de avaliação da qualidade de águas interiores do Estado de São Paulo. São Paulo, 2008. 22 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/publicacoes/relatorios/2008-ecoli.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2014.
3. FREIRE, F. G. C. et al. Indicadores de qualidade da água no rio Jaguaribe em São João do Jaguaribe-CE, Brasil. Irriga, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 700-707, 2013.
4. GHARIBI, H. et al. A novel approach in water quality assessment based on fuzzy logic. Journal of Environmental Management, London, v. 112, p. 87-95, 2012.
5. HAIR, J. F. et al. Análise multivariada de dados. Tradução Adonai S. Sant'Anna e Anselmo Chaves Neto. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.
6. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estados @ - Espírito Santo. 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=es>>. Acesso em: 2 abr. 2015.
7. LEVINE, D. M. et al. Estatística: teoria e aplicações. Tradução Teresa Cristina Padilha de Souza. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 752 p.
8. MOURA, V. M.; BRITO, S. M. O.; SILVA, A. B. Avaliação dos parâmetros indicadores da qualidade da água para verificar o estado de conservação das represas do Rio Ipitanga, Salvador, Bahia, BA, Brasil. Revista Virtual de Química, Rio de Janeiro, v. 5, n. 5, p. 869-890, 2013.

9. NAVARRO, A. L. S.; PIRANHA, J. M.; PACHECO, A. Estudo de indicadores da qualidade da água em manancial superficial de abastecimento público. Revista Ciência em Extensão, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 81-97, 2006.
10. OLIVEIRA, M. D. Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de estações convencionais de tratamento de água. 2014. 205 f. Dissertação (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
11. OLIVEIRA, M. D. et al. Nova abordagem do Índice de Qualidade de Água Bruta utilizando a Lógica Fuzzy. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 361-372, 2014.
12. QUEIROZ, M. M. F. et al. Influência do uso do solo na qualidade da água de uma microbacia hidrográfica rural. Revista Verde, Rio Grande do Norte, v. 5, n. 4, p. 200-210, 2010.
13. ROSS, T.J. Fuzzy Logic with Engineering applications. 2. ed. England: Wiley, 2010. 607 p.
14. SANTI, G. M. et al. Variabilidade espacial de parâmetros e indicadores de qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Iguarapé São Francisco, Rio Branco, Acre, Brasil. Ecología Aplicada, Peru, v. 11, n. 1, p. 22-31, 2012.
15. SOUZA, M. E. T. A.; LIBÂNIO, M. Proposta de índice de qualidade para água bruta afluyente a estações convencionais de tratamento. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.14, n.4, p.471-478, 2009.
16. STATSOFT, INC. Statistica (Data Analysis Software System). Version 7. São Paulo: StatSoft, 2007.
17. USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2003 Drinking water infrastructure needs survey and assessment: Modeling the cost of infrastructure. EUA: Office of Water, 2006. 95 p. Disponível em: <http://www.epa.gov/ogwdw/needssurvey/pdfs/2003/report_needssurvey_2003_costmodeling.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2012.