

948 - ÍNDICE DE QUALIDADE DE EFLUENTE BASEADO EM CONCORDÂNCIA DIFUSA.

Camylla Rachelle Aguiar Araújo⁽¹⁾

Doutora em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental (UFC). Mestra em Energias Renováveis pelo (IFCE/Maracanaú). Engenheira Sanitarista e Ambiental (IFCE/Maracanaú). Especialista em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos (Unilab). Professora Adjunta C do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária (UFC/Crateús).

Dayane de Andrade Lima⁽²⁾

Tecnóloga em Saneamento Ambiental (IFCE). Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental (UEPB). Doutora em Engenharia Civil (UFC). Professora universitária (IFCE).

Vitória Lima Bandeira⁽³⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista (UFMA). Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (UFMA).

Fernando José Araújo da Silva⁽⁴⁾

Doutor em Engenharia Civil (UFC). Mestre em Engenharia Civil (UFPB). Engenheiro Civil (UNIFOR). Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (UFC).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Professora Machadinha Lima, S/N, Príncipe Imperial, Crateús-CE, CEP 63708-825, Brasil. Tel: (85) 98891-8671. E-mail: cammilla.rachelle@crateus.ufc.br

RESUMO

O presente estudo sugere e evidencia a aplicação de uma metodologia para cálculo de Índice de Qualidade de Efluente (IQEf). O método parte da aritmética difusa aplicada ao conceito de garantia. Este considera um conjunto pequeno de informações numéricas em relação a função marginal. Trata-se de abordagem com baixo esforço computacional.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão e monitoramento de ETE, Qualidade de efluente, Número *fuzzy*.

INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos é imperativo ao desenvolvimento humano, pois atua na prevenção de doenças transmitidas pela água e protege o meio ambiente (BEJ *et al.*, 2023). Quanto a isso, o desempenho de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é, em geral, especificado a partir da remoção de matéria orgânica, nutrientes e microrganismos indicadores. Em paralelo, os diferentes arranjos tecnológicos de tratamento apresentam performances variadas em relação aos distintos parâmetros de qualidade do efluente final. A despeito disso, a confiabilidade de um sistema de tratamento de esgotos pode ser medida em termos de garantia e está ligada à sua conformidade com as normas ambientais. Os regulamentos definem padrões e condições para a deposição de efluentes em corpos de água.

Frequentemente, a elaboração e implementação de programas eficazes para a gestão de efluentes enfrentam restrições. Essas são consequência da falta de recursos financeiros, técnicos, capital intelectual e até mesmo logísticos. No Brasil, essa situação se intensifica nas áreas mais carentes. Apesar disso, deve-se levar em conta que a supervisão de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) é um instrumento importante na administração da água e na luta contra a poluição.

É crucial definir critérios e métodos eficazes para avaliar a performance das estações de tratamento. Certamente, isso deve levar em conta as características e habilidades inerentes a cada tecnologia de tratamento de esgotos. Isso se deve ao fato de que cada uma possui seu próprio perfil de desempenho e complexidade, com variações nos níveis de remoção de poluentes. É importante destacar que existem incertezas em relação às informações obtidas durante o monitoramento e estas já estão integradas ao processo de controle.

Sob a ótica normativa, o que se avalia numa ETE, em um intervalo de tempo, é o grau de cumprimento de

critérios de lançamento. Assim, atribui-se falha no tratamento quando os padrões da legislação vigente são excedidos. Concomitantemente, exigem-se programas de monitoramento que refletem o status de desempenho das ETEs. Para tais planos, recursos técnicos, materiais e humanos costumam ser limitados.

É relevante que se disponha de metodologias que avaliem melhor a performance de ETEs. Portanto, há que se destacar a factibilidade de implementação de programas de monitoramento que satisfaçam da melhor forma possível às demandas essenciais.

Uma vez que a disponibilidade de dados de monitoramento de ETEs é bem menor que a de águas de sistemas de abastecimento, de seus mananciais e de corpos aquáticos superficiais em geral, impõe-se atenção sobre o conceito de Índice de Qualidade de Efluente (IQEf). Esse recurso agrupa diferentes parâmetros em um único número, que traduz a qualidade do efluente como um todo. Trata-se de um tipo de IQA (Índice de Qualidade de Água) em que os limites normativos são referências. Tais limites podem, também, ser empregados como metas que refletem a melhoria gradual de sistemas de tratamento de esgotos, conforme mencionam Ayoub e El-Morsy (2021).

O contexto acima é particularmente relevante para o Brasil, pois importa considerar o impacto dos esgotos sanitários - mal ou não tratados – em relação aos valores normativos vigentes. A partir do exposto até aqui, o presente estudo aborda o tema IQEf ante a desafios próprios e em contexto mais próximo da realidade brasileira. Assim, enseja-se considerar os seguintes aspectos principais: seleção de parâmetros, ponderação, limites e método computacional.

METODOLOGIA UTILIZADA

SELEÇÃO E PONDERAÇÃO DE PARÂMETROS

Os parâmetros foram selecionados a partir de um conjunto de dados de esgotos sanitários não tratados. Os dados eram originários do monitoramento de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) em escala real, localizadas nos estados do Rio Grande do Norte (10 ETEs) e Ceará (4 ETEs), Nordeste do Brasil. Os parâmetros analisados nas amostras de esgotos sanitários brutos foram: pH, sólidos suspensos totais (STT), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), coliformes termotolerantes (CTT), nitrogênio amoniacal total (NAM), nitrogênio total (N), fósforo total (P) e condutividade elétrica (CE).

Após compilação e tabulação dos dados foram calculados os valores médios de cada parâmetro em cada nas respectivas ETEs. Essas medidas centrais compuseram um conjunto amostral (14 ao todo) em que foram computados os coeficientes de variação (σ = desvio padrão e μ = média aritmética). A ponderação de cada parâmetro foi determinada conforme a Equação 2.

$$cv_{i,j} = \sigma_{i,j} / \mu_{i,j} \quad (1)$$

$$\omega_{i,j} = cv_{i,j} / \sum_{i=1}^n cv_{i,j} \quad (2)$$

ABORDAGEM EMPREGADA NO CÁLCULO DE IQEf

A ideia de concordância difusa considera a interseção entre números dois números difusos \tilde{A} e \tilde{R} ou entre um difuso e um não difuso \tilde{A} e R (KAUFMANN e GUPTA, 1991). No último caso, o valor número não difuso pode ser contínuo em um intervalo definido à esquerda ou à direita, conforme $x \leq R$ ou $x \geq R$, respectivamente. Na figura abaixo é mostrada a concordância difusa entre um número fuzzy e outro não fuzzy contínuo à esquerda. A representação é própria do caso de limite de despejo, em que R , um número não difuso (ou *crisp value*), é divisor dos graus de concordância de um número difuso \tilde{A} (que varia do Mínimo ao Máximo, com um *Valor Mais Provável* como média). A área em azul é o grau de concordância difusa (polígono a, b, d, e), enquanto a área cinza (polígono c, d, e) é o grau de não concordância. Assim, a solução dada via geometria plana é expressa na Equação 3, de forma que o Índice de Concordância Fuzzy (ICF) será sempre ≤ 1 .



33º CONGRESSO DA ABES
Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

FITABES 2025

Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental

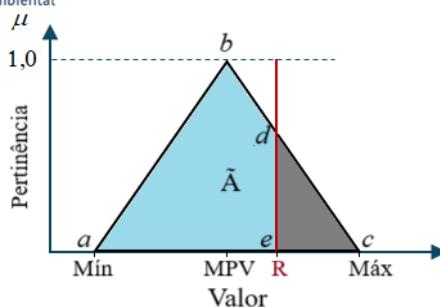


Figura 1: Representação de Índice de Concordância Fuzzy entre \tilde{A} e o valor crisp R.

$$ICF_{i,j} = \text{Área}(a, b, d, e) / \text{Área}(a, b, c) \quad (3)$$

O cálculo do IQEf é do tipo aditivo e bastante empregado (ABBASI e ABBASI, 2012) sendo a média ponderada dos escores alcançados com ICF, conforme mostrado na Equação 4. A classificação final é do tipo crescente (quanto mais alto, melhor) e está contida na Tabela 1.

$$IQEf = 100 \cdot \sum_{i=1}^n \omega_{i,j} \cdot IC F_{i,j} \quad (4)$$

Tabela 1: Classificação do Índice de Qualidade do Efluente baseado em concordância difusa.

IQEf	Classificação	Cor
91 - 100	Excelente	Azul
71 - 90	Bom	Verde
51 - 70	Regular	Amarelo
26 - 50	Ruim	Laranja
0 - 25	Péssimo	Vermelho

Para o cálculo do ICF empregaram-se os seguintes valores de referência (R): SST = 100 mg/L, DBO = 90 mg/L, DQO = 200 mg/L, Log10 CTT = 3,699 (*i.e.* 5E+03 NMP/100mL), NAM = 7,5 mg N/L, P = 3,0 mg P/L e CE = 3000 μ S/cm. Destaca-se que para o CTT, optou-se pela transformação do dado na forma logarítmica de base 10. Em tal caso, é recomendável para o cálculo utilizar a média geométrica ou mediana por serem valores centrais mais robustos. Com os demais parâmetros é possível utilizar a média aritmética. Os valores limites foram baseados na revisão de Morais e Santos (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 contém um resumo estatístico dos parâmetros inicialmente considerados. O ordenamento dos valores do coeficiente de variação de cada parâmetro teve a mesma sequência dos resultados de ponderação. O cômputo dos pesos apresentou a seguinte composição: w_{pH} (0,009) < w_N (0,069) < w_P (0,072) < w_{DQO} (0,073) < w_{DBO} (0,095) < w_{CE} (0,116) < w_{NAM} (0,132) < w_{SST} (0,136) < w_{CTT} (0,298).

Tabela 2: Estatística do esgoto bruto doméstico empregado na ponderação de variáveis do IQEf.

Designação	pH (und)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	CTT (NMP/100 mL)	NAM (mg N/L)	N (mg N/L)	P (mg P/L)	CE (mS/cm)
Média	7,18	241	468	764	7,01E+07	36,9	75,6	6,6	1044
CV	0,023	0,346	0,240	0,185	0,756	0,337	0,174	0,183	0,296
Mínimo	6,88	100	295	448	2,08E+06	14,9	49,1	4,5	702
Mediana	7,15	257	475	780	5,02E+07	38,0	75,9	6,8	998
Máximo	7,43	358	649	952	1,54E+08	57,6	100,7	9,1	1862

A partir do conjunto inicial de variáveis ponderadas foram propostos 6 arranjos (A₁ a A₆) de IQEf, considerados mais factíveis. Os parâmetros SST, CTT e NAM estão presentes em todos os arranjos. Os parâmetros DBO e DQO foram alternados entre arranjos, de maneira que a seleção de um excluía o outro. Por fim, o fósforo total esteve presente nos arranjos mais destacados, enquanto a condutividade elétrica foi considerada relevante no caso de potencial impacto do conteúdo salino do efluente. Os valores dos pesos dos arranjos estão na Tabela 3.

Tabela 3: Ponderação dos parâmetros constituintes do IQEf em diferentes arranjos.

Arranjo	SST	DBO	DQO	CTT	NAM	P	CE
A ₁	0,160	0,111	-	0,350	0,156	0,086	0,137
A ₂	0,165	-	0,088	0,360	0,160	0,087	0,140
A ₃	0,180	-	0,097	0,394	0,175	-	0,154
A ₄	0,175	0,122	-	0,383	0,170	-	0,150
A ₅	0,206	0,143	-	0,451	0,200	-	-
A ₆	0,213	-	0,114	0,466	0,207	-	-

A Tabela 4 contém os números intervalares [Mínimo; Mais Provável; Máximo] dos parâmetros considerados para os arranjos de cálculo do IQEf. Os efluentes são hipotéticos, considerados num intervalo de tempo qualquer, para demonstração de aplicativa do método proposto. A tabela contém ainda os Índices de Concordância Fuzzy para cada número intervalar em seu respectivo parâmetro. A agregação ponderada dos ICFs para cômputo do IQEf tem resultados mostrados no gráfico da Figura 2.

Tabela 4: Valores intervalares e ICF dos parâmetros de efluentes de três ETEs

Parâmetro	ETE1	ICF1	ETE2	ICF2	ETE3	ICF3
SST	[25; 78; 155]	0,698	[45; 80; 110]	0,949	[79; 82; 155]	0,455
DBO	[39; 77; 120]	0,742	[50; 80; 100]	0,900	[82; 97; 125]	0,099
DQO	[93; 168; 252]	0,797	[105; 128; 210]	0,989	[152; 199; 282]	0,377
CTT	[2,69; 4,74; 6,20]	0,141	[2,32; 3,70; 4,20]	0,733	[2,59; 3,20; 4,80]	0,657
NAM	[2,8; 11,0; 15,9]	0,206	[3,8; 5,5; 8,8]	0,898	[3,8; 7,9; 9,1]	0,630
P	[2,1; 4,0; 5,0]	0,147	[2,1; 4,0; 5,0]	0,147	[2,5; 4,8; 5,1]	0,042
CE	[601; 871; 895]	1,000	[519; 1280; 1895]	1,000	[1601; 1890; 3295]	0,963

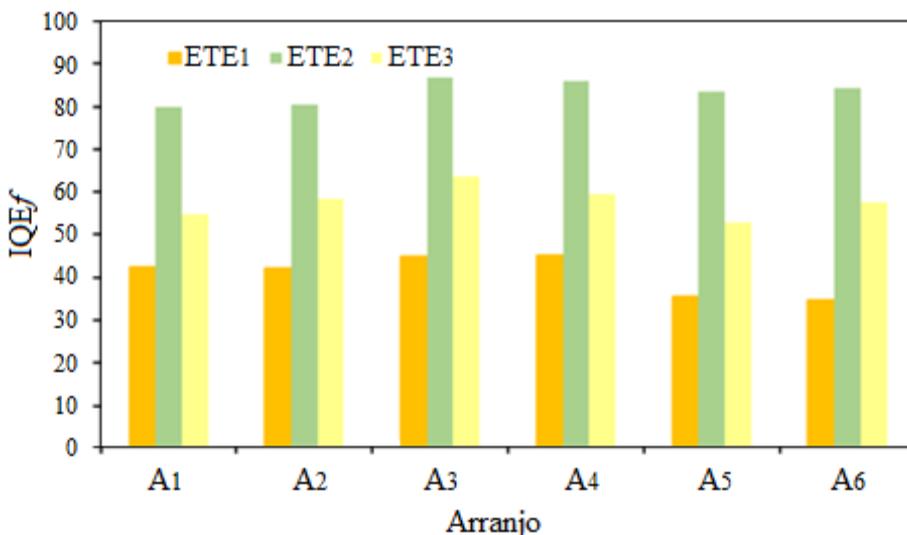


Figura 2: IQEf dos efluentes de ETEs através do Índice de Concordância Fuzzy.

CONCLUSÃO

No presente estudo foi proposto e demonstrada a aplicação de uma metodologia para cálculo de Índice de Qualidade de Efluente (IQEf). O método é simples, com estrutura algorítmica de fácil desenvolvimento. O emprego de número intervalar (número *fuzzy*) permite cálculos com quantidade pequena de amostras (pelo menos duas). Trata-se, portanto, de instrumento promissor para mapear o desempenho de ETEs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Water quality indices. Burlington: Elsevier Science, UK, 2012. 362p.
AYOUB, M.; EL-MORSY, A. Applying the wastewater quality index for assessing the effluent quality of recently upgraded meet Abo El-koum wastewater treatment plant. Journal of Ecological Engineering, v. 22, n. 2, p. 128–133, 2021. <https://doi.org/10.12911/22998993/130893>
BEJ, S.; SWAIN, S.; BISHOYI, A.K.; MANDHATA, C.P.; SAHOO, C.R.; PADHY, R.N. Wastewater-associated infections: a public health concern. Water, Air, & Soil Pollution, v. 234, article 444, 2023. DOI: 10.1007/s11270-023-06431-4
MORAIS, N. W. S.; DOS SANTOS, A. B. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. Revista DAE, n. 215, v. 67, p. 40-55, 2019. DOI: 10.4322/dae.2019.004.