

## I-212 – UTILIZAÇÃO DA LÓGICA FUZZI PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA DO IGARAPÉ TUCUNDUBA

**Elídio Paulo Martins Lopes Junior<sup>(1)</sup>**

Graduando de Engenharia Sanitária e Ambiental. Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (FAESA/ITEC/UFPA).

**Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves<sup>(2)</sup>**

Doutor em Engenharia Ambiental. Professor Associado da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (FAESA/ITEC/UFPA). E-mail: [rmacedo@ufpa.br](mailto:rmacedo@ufpa.br)

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Almirante Barroso; Pass. Getúlio Vargas; Nº 21 CEP: 66613-070-Belém-PA-Brasil

E-mail: [rmacedo@ufpa.br](mailto:rmacedo@ufpa.br)/ [Paulo.martins07@hotmail.com](mailto:Paulo.martins07@hotmail.com)

### RESUMO

A avaliação da qualidade da água pode ser obtida por um Índice de Qualidade da Água (IQA). No entanto, os IQA, são limitados quanto a sua capacidade de interpretação, gerando incertezas. O objetivo deste trabalho é propor a construção de um Sistema de Inferência Fuzzy (SIF), baseado na teoria dos conjuntos fuzzy, concebendo um IQA fuzzy (IQAf). Para tanto, o SIF foi processado pela “fuzzyficação” dos parâmetros físico, químicos e bacteriológicos proposto por Brown et al.,(1970), sendo traduzidos por variáveis linguísticas “baixa” (B), “média” (M) e “alta” (A), lidas por funções de pertinência trapezoidal (FPTr), aferidas por um conjunto de regras (Rn) e operadas através do modelo clássico de inferência fuzzy Mamdani. O IQAf foi obtido por “desfuzzyficação” pelo Método do Centro de Gravidade (MCG). O índice do SIF é validado por uma regressão linear, via  $R^2$ , correlacionando-o com o IQA para épocas de cheia e estiagem. A proposta foi aplicada no igarapé Tucunduba, localizado no município de Belém/PA, para o período de 1999 a 2000. Para 16 amostras sendo divididos os períodos de cheia e estiagem. Como resultado de validação,  $R^2$  igual a 0,61 e 0,54 entre IQAf x IQA, para épocas de cheia e estiagem, respectivamente, ambos por modelos lineares. Os valores médios de qualidade da água em épocas de cheia foi Ótimo (OT) para IQA e Boa (BO) para IQAf; e na estiagem BO para IQA e Aceitável (AC) em IQAf. Por fim, a dispersão dos resultados, apresentou um coeficiente de variação (cv) igual a 21,07% para IQA à 29,23% do IQAf em época de cheia; e na estiagem 20,54% e 10,22% para IQA e IQAf, respectivamente. Por fim, o IQA gerou qualificações da água superior ao IQAf para a maioria das amostras, tanto no período de cheia quanto de estiagem. Assim com a adoção da teoria dos conjuntos fuzzy, o desempenho do SIF construído na avaliação da qualidade da água foi significativo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Índice de Qualidade da Água, Lógica Fuzzy, igarapé Tucunduba

### INTRODUÇÃO

Historicamente o que determina a fixação do homem em qualquer região é a disponibilidade de fontes de energia que esse ambiente tem a oferecer. Dentre essas fontes de energia, a que se mostra como determinante à permanência da sociedade humana em uma região é a oferta de água, ou seja, geralmente o homem forma suas comunidades próximas às fontes deste recurso.

Com o advento das cidades e grandes áreas metropolitanas ao redor dessa fonte de energia o homem se demonstra ineficiente ao consumir tal recurso, pois em decorrência desse consumo resultam subprodutos, como esgoto e resíduos sólidos, que na maioria dos casos, não são despejados ou acondicionados adequadamente no meio ambiente, portanto percebe-se de certa forma, que a sociedade é acomodada quando se fala em tratar de seus rejeitos. E tais produtos do consumo humano geram fontes de poluição e/ou contaminação às fontes de energia. Assim a sociedade passa por estágios de inquietação quando condições de poluição levam as fontes de energia, principalmente à água, estado de impureza, e logo a comunidade se vê obrigada a estabelecer sistemas de controle de poluição, aproveitamento de energia e saneamento.

Neste contexto, para a água, a apresentam-se os sistemas de tratamento e distribuição para abastecimento público, o primeiro refere-se ao controle de qualidade da água, enquanto que o segundo se trata da disseminação deste recurso tratado.

Diante de tal situação, o IQA se mostra como a principal fonte de informações sobre substâncias presentes na água, categorizadas como aspectos físicos, químicos e biológicos. Tal índice pode ser obtido através de cálculos, como o utilizado por Brown et al. (1970), chamado de método aditivo, utilizado pela National Sanitation Foundation-NSF (IQA-NSF) como referência; assim como o índice de Horton, denominado de IQA-Horton, ou índice multiplicativo.

Os Índices de Qualidade da Água (IQA) denotam uma importância vaga pela manipulação de parâmetros ponderados, alguns dos quais apresentam forte correlação e sobreposição, denotando incertezas, posto que os mesmos são determinísticos e conceituais. Determinísticos, porque ignora as propriedades estocásticas inerentes a variância com que as faixas de valores dos parâmetros podem influenciar na interpretação da qualidade da água superficial. E são conceituais, porque busca uma interpretação física para os diversos subprocessos envolvidos na avaliação da qualidade da água para diversos fins, como por exemplo, o abastecimento público de água. Neste sentido, se faz necessário a adoção de um sistema de especialista (SE), fundamentado na teoria dos conjuntos difusos, para tratar as incertezas a partir de um conjunto de regras que se adequem as condições físicas, químicas e bacteriológicas localizadas da água. Deste modo, o SE tem como premissa acurar o IQA, a partir de seus parâmetros, com a proposição de um IQA fuzzy (IQA<sup>f</sup>) através de um modelo de inferência fuzzy, apresentando-se como ferramenta a gestão dos recursos hídricos superficiais.

## ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)

Os Índices de Qualidades da Água (IQA) foram concebidos com a perspectiva de agregar as variáveis inerentes às características químicas, físicas e biológicas da água em um número. Este número visa à possibilidade de analisar a evolução da qualidade da água no tempo e no espaço facilitando a interpretação destas variáveis. A literatura abrange variados modelos de IQA, bem como os seus mais diversos usos e finalidades.

Citam-se pelo menos três tipos básicos de índices: (a) o primeiro, que é elaborado pela opinião de especialistas; (b) o segundo, que se concentra em índices baseados em modelos estocásticos; e (c) o terceiro, índices biológicos, demandam de dados para sua formulação que ainda não são rotineiramente obtidos em programas de monitoramento. Os fins a que se destina o uso de IQA podem abranger desde a ordenação de áreas geográficas (comparação de condições ambientais em diferentes áreas geográficas), até a servir de instrumentos para a gestão dos recursos hídricos. Neste contexto, e para que o IQA possa ser direcionado aos usos múltiplos da água, classificaram-se os índices para uso em geral, específicos e planejamento ambiental. Os índices direcionados ao planejamento ambiental foram propostos para serem utilizados pelos tomadores de decisão como subsídio ao usuário a decidir ou resolver problemas específicos. Destacam-se o índice de Inhaber e Zoeteman. O primeiro incluiu índices de qualidade do ar, água e solo que se coadunam para um *EnvironmentQuality Index* (EQI). Já o segundo é denominado de *Pollution Potencial Index* (PPI), posto que se fundamenta por fatores indiretos relacionados a poluição da água.

Os índices para uso específico e geral podem ser caracterizados pelas peculiaridades do estado, com diversidade de regime hidrológico, bem como da presença em ambientes lóticos e lênticos, incluindo estuários. No IQA, para uso específico, destacam-se aqueles inseridos em ambientes lóticos, que podem ser citados como o índice de Walski e Parker (1994) e O'Connor (1972), entre outros. Portanto, os índices ditos de específicos consideram que o nível de qualidade da água requerido varia de um determinado parâmetro para outro podendo ser indispensáveis para um determinado uso ou ter somente uma importância razoável. No que concernem os índices para uso geral, tem-se aqueles destinados aos ambientes lóticos e lênticos.

No que tange os índices destinados a ambientes lênticos, definiu-se um Índice de Estado Trófico (IET) da água a partir da transformação linear da transparência pelo disco de Secchi. O IET ainda considera concentrações de fósforo e clorofila. Ao considerar o ambiente lêntico destacam-se os índices de Horton (1965), Smith (1987).

Este artigo considerou para o cálculo do IQA determinístico o índice concebido pela *NationalSanitation Foundation* (NSF) proposto por Bown et al., (1970). A proposição original de Brown et al., (1970) contempla duas formas: aditiva e multiplicativa. A forma multiplicativa, visto na equação 1, foi sugerida por Landwehr e Deininger (1976) para evitar eventuais problemas de resultados mascarados, que ocorriam quando um subíndice ( $I_i$ ) apresentava valores extremamente baixos de qualidade de água.

$$IQA = \prod_{i=1}^n l_i^{w_i}$$

Não obstante, o artigo dá ênfase à forma aditiva a qual resulta de uma combinação linear com pesos ( $w_i$ ) dos subíndices ( $l_i$ ) conforme a formulação (2).

$$IQA = \sum_{i=1}^n w_i \cdot l_i$$

Onde IQA é um número que varia de 0 a 100;  $w_i$  é o peso relativo e  $l_i$  é o valor do subíndice relativo ao  $i$ -ésimo parâmetro. Os valores de IQA são classificados de acordo com qualificação da água e as suas respectivas faixas de valores (Tabela 1).

**Tabela 1: Parâmetros ( $l_i$ ) e pesos ( $w_i$ ) para o cálculo de IQA proposto por Brown et al., (1970)**

Parâmetros ( $l_i$ )	Pesos ( $w_i$ )
Oxigênio Dissolvido [OD]	0,17
Coliformes Fecais [CF]	0,15
Potencial de Hidrogênio [pH]	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias [DBO <sub>5</sub> ]	0,10
Nitrato [NO <sub>3</sub> ]	0,10
Fosfato Total [PO <sub>4</sub> ]	0,10
Temperatura [T°C]	0,10
Turbidez [Tu]	0,08
Sólidos Totais [S <sub>t</sub> ]	0,08

Os parâmetros utilizados na composição deste IQA são relacionados às características físicas, químicas e bacteriológicas, cujos valores de  $w_i$  são visualizados pela Tabela 2.

**Tabela 2: Classificação da qualidade da água pelo IQA proposto por Brown et al., (1970)**

Faixa de Valores do IQA	Qualificação da água	Cor
80 – 100	Ótima	Ciano
52 – 79	Boa	Verde
37 – 51	Aceitável	Amarelo
20 – 36	Ruim	Vermelho
0 – 19	Péssima	Preto

Por fim, os índices vistos anteriormente são importantes no acompanhamento da qualidade da água. Não obstante, a interação entre parâmetros ponderados denotam incertezas, alguns dos quais apresentam correlação e sobreposição, posto que os mesmos são determinísticos e conceituais. Determinísticos, porque ignoram as propriedades estocásticas inerentes a variância, com que as faixas de valores destes parâmetros podem influenciar na interpretação da qualidade da água. E são conceituais, porque buscam uma interpretação física, química e bacteriológica para os diversos subprocessos envolvidos na avaliação da qualidade da água. Neste sentido, faz-se necessário a adoção de um Sistema de Especialista (SE), fundamentado na teoria dos conjuntos fuzzy, para tratar as incertezas de um IQA a partir de um conjunto de regras que se adéquem aos parâmetros que compõe a interpretação da qualificação da água.

## METODOLOGIA

A formulação geral e usual para se proceder ao cálculo de um IQA dar-se pelo processamento matemático por meio de uma média ponderada de alguns parâmetros pré-estabelecidos. Tais parâmetros multiplicados aos seus pesos relativos correspondentes e disponíveis em curvas de normalização dão origem a valores de IQA, os quais são normalizados em uma escala entre 0 e 100, e posteriormente, qualificados. No entanto, é presente a carência de técnicas mais adequadas para proceder ao gerenciamento da importância de variáveis de qualidade da água pertinentes ao cálculo de indicadores mais confiáveis. A interpretação dos limites aceitáveis para cada parâmetro e a metodologia utilizada para integrar os mesmos são distintos na avaliação dos processos metodológicos usuais. Por outro lado, tais processos que utilizam a integração das variáveis de qualidade de água em índices específicos estão sendo cada vez mais requisitadas no cenário nacional e internacional.

Neste sentido, algumas metodologias de integração utilizam a inteligência artificial na modelagem de qualidade da água, como a teoria dos conjuntos fuzzy introduzido por Zadeh (1965), e que descreve uma imprecisão ou um estado vago. Tal teoria consiste no uso simultâneo de variáveis quantitativas e qualitativas. Às variáveis quantitativas ou numéricas atribuem-se os parâmetros da qualidade da água que mensure valores numéricos, por exemplo,  $\text{NO}_3$ , pH, e outros; já às qualitativas consiste na atribuição de valores a partir de interpretações não-numéricas, como por exemplo, cor, sabor, entre outros; sendo que este processo caracteriza-se pela “fuzzyficação” de  $x_i$ . Ambas são interpretadas por meio de  $\mu_{\Pi}(x_i)$  traduzidas por  $\mu_{\Pi}(x_i)$  que podem adquirir formas do tipo trapezoidal, triangular ou gaussiana aferidas por um valor binário de 0 a 1, a partir de critérios estabelecidos pela base de conhecimento de especialistas. Tais valores inscritos em uma das formas da  $\mu_{\Pi}(x_i)$  prognosticam o grau de interferência destas variáveis em um sistema que processa  $x_i$  por meio de  $R_n$ . Posterior a este processamento obtém-se  $y$ , calculando um índice fuzzy através de um processo denominado de “desfuzzyficação”. Assim, a “fuzzyficação”, a base do conhecimento e desfuzzyficação caracterizam um SIF.

Contudo, a construção do SIF consiste em  $R_n$  estabelecido através de operações  $\otimes$  e  $\oplus$ . As operações de  $\otimes$  caracterizam-se como Min para um conectivo lógico “E” (operação de Interseção  $\cap$ ), sendo que a construção de sentenças “SE” e “ENTÃO” modelam a aplicação do Min obtendo-se  $y$ . Já as operações  $\oplus$ , isto é, de Máx (operação de União  $\cup$ ) são efetuadas para o cálculo do IQA<sup>(f)</sup>. Para a obtenção deste índice fuzzy é sugerido a “desfuzzyficação” transformando  $\mu_{\Pi}$  de saída em valores numéricos, adotando-se, invariavelmente, o MCG.

O local de aplicação do SIF construído é o igarapé Tucunduba que faz parte da sub-bacia do Tucunduba. A sub-bacia tem uma área de 1.055,00 ha, localizada a sudeste de Belém/PA e tem o corpo hídrico de análise com 3.600,0 m de extensão sendo um afluente do Rio Guamá. Nesta região encontram-se áreas de ocupação desordenada sendo uma dos bairros mais populosos do município. Os dados utilizados serão secundários e extraídos de relatórios, trabalhos acadêmicos entre outros, cujos mesmos serão analisados, o que implica na organização das variáveis de qualidade da água que serão utilizados; e tabulados, a fim de promover o cálculo do IQA.

Para efetuar tal proposta, foi utilizado um IQA cujas variáveis analisadas são: Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Fecais (CF), Potencial Hidrogeniônico (pH), Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias ( $\text{DBO}_5$ ), Nitrato ( $\text{NO}_3$ ), Fosfato Total ( $\text{PO}_4$ ), Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Turbidez (Tu) e Sólidos Totais (St). Tais variáveis são consideradas como  $x_i$ , cuja faixa de valores foi dado pelo limite aceitável da norma vigente para o abastecimento público através de consulta a especialistas. Feito isso se qualificou os domínios destas variáveis em três subdomínios  $x_{\Pi}$ : baixo “B”, média “M” e alta “A”. A tradução de  $\mu_{\Pi}$  para  $x_i$  são lidas por FPT<sub>r</sub>.

## RESULTADOS

A teoria dos conjuntos fuzzy é baseada na lógica booleana onde um elemento pertence ( $\in$ ) ou não pertence ( $\notin$ ) a um determinado conjunto chamado de universo de discurso, possuindo um intervalo de 0 a 1. Tem o grau de pertinência  $\mu(x)$  que quanto mais próximo estiver de 1 mais verdadeiro será. A partir desse conhecimento, montou-se um sistema de regras considerando 9 tipos de parâmetros para qualidade da água classificados em físico, químico e bacteriológico. O valor de cada parâmetro teve como referência os valores da Portaria 518 – MS, a partir daí, deu-se início a montagem do sistema de regras baseado na lógica difusa ou sistema de inferência fuzzy, que, através da média ponderada dos parâmetros, multiplicados pelos seus pesos relativos correspondentes e normalizados em uma escala de 0 a 100 permitem que possa haver a classificação da água no quanto a sua qualidade, neste sentido o seu estado qualitativo pode ser classificado em: péssimo, ruim, aceitável, boa e ótima. Para isso, qualificou-se o domínio de três variáveis classificadas em baixa, média e alta.

1. Com a montagem do sistema de inferência fuzzy evidencia-se a importância da utilização desta lógica pela maior abrangência de estudo e maior acurácia de análise de risco haja vista que os modelos usuais apresentarem incertezas por serem determinísticos e conceituais.

O ponto de aplicação do sistema de inferência fuzzy é o igarapé Tucunduba localizado na parte sudeste de Belém, neste estudo da qualidade da água, serão avaliados os parâmetros OD, CF, pH, DBO<sub>5</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, T°C, Tu e St, que foram devidamente organizados para realização dos cálculos de IQA. O passo seguinte foi a escolha do MCG como desfuzzyficador para a obtenção da classe qualitativa da água.

## CONCLUSÕES

A aplicação do IQA<sup>f</sup> para uma avaliação mais rebuscada a respeito da qualidade da água torna-se tão importante quanto necessária, pois se trata de um mecanismo criado especificamente para diminuir de maneira significativa as incertezas que os mecanismos mais comumente utilizados não conseguem. Em uma comparação de análises de resultados de qualidade de água do sistema usual e o sistema de inferência fuzzy, notou-se que a análise feita com a utilização do sistema fuzzy tem uma precisão qualitativa bem maior, por se tratar de ser um mecanismo mais confiável e seguro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COSTA, E. R. H. Estudo de Polímeros Naturais como Auxiliares de Floculação com Base no Diagrama de Coagulação do Sulfato de Alumínio. São Carlos. 1992. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo 1992.
2. COSTA, E. R. H. Metodologia para o uso combinado de polímeros naturais como auxiliares de coagulação. XVII CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA. 1993. Anais. Natal RN, 1993.
3. COSTA, E. R. H. Aumento da capacidade de estações de tratamento de água através da seleção de coagulantes e auxiliares de floculação especiais, XVIII CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 1995. Anais. Salvador BA, 1995.
4. DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água - V. I e II. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 1993.
5. DI BERNARDO, L. Comparação da Eficiência da Coagulação com Sulfato de Alumínio e com Cloreto Férrico - Estudo de Caso - VI SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 1994. Anais. Florianópolis, 1994.
6. DI BERNARDO, L. Comunicação pessoal sobre Técnicas de Tratabilidade, 1993/1995.