

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA: PROPOSTA DE NOVO ÍNDICE ALICERÇADO NA LÓGICA FUZZY

EVALUATION OF WATER QUALITY: PROPOSAL FOR A NEW INDEX FOUNDED ON THE FUZZY LOGIC

Aécio Alves PEREIRA¹, Sérgio Andrés Conde OCAZIONEZ², Carlos TOMAZ³

1. Doutor em Ciências da Saúde – Universidade de Brasília, Diretor Geral do Athenas Grupo Educacional, Ji-paraná, RO, Brasil. direcao@athenaseducacional.com.br; 2. Mestre em Engenharia Elétrica, Laboratório de Neurociências e Comportamento, Instituto de Biologia, Universidade de Brasília, sconde@unb.br; 3.PhD, Professor Titular, Laboratório de Neurociências e Comportamento, Instituto de Biologia, Universidade de Brasília, ctomaz@unb.br

RESUMO: Índices de Qualidade das Águas – IQA's são operadores matemáticos que processam um conjunto de indicadores analíticos, produzindo um resultado numérico indexado, capaz de expressar a qualidade da água. O IQA mais difundido e aceito mundialmente é o proposto pela *National Sanitation Foudantion - NSF*, estando fundamentado na lógica clássica. No presente artigo, apresenta-se um novo IQA, alicerçado na lógica *fuzzy*, cujos conjuntos não têm fronteiras rigidamente definidas e incluem variáveis linguísticas em sua matriz de decisão, produzindo estimativas de um sistema não linear complexo, sem recorrer a modelos matemáticos. Para validá-lo, compararam-se seus resultados com os obtidos pela aplicação do IQA da *NSF* durante 24 meses, fazendo uso das amostras de água do Rio Pimenta Bueno (Rondônia, Brasil). As comparações realizadas indicam que o IQA *fuzzy* é mais sensível do que o IQA da *NSF* às variações dos valores dos parâmetros que os compõem. O IQA *fuzzy* configurado por meio do *software* MATLAB®, com as funções de agregação gaussianas, mostrou-se viável, seguro e mais flexível para avaliação da qualidade da água, podendo, portanto, ser considerado válido para classificação da qualidade da água de outros mananciais hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Recursos hídricos. IQA. Lógica nebulosa.

INTRODUÇÃO

O propósito primário para exigência de qualidade da água é a proteção à saúde pública. Os critérios adotados para assegurar essa qualidade têm por objetivo fornecer uma base para o desenvolvimento de ações que, se propriamente implementadas, garantirão a segurança do fornecimento de água através da eliminação ou redução da concentração aceitável de constituintes na água, conhecidos por serem perigosos à saúde (D'ÁGUILA, 2000).

De 1990 a 2010, mais de 2 bilhões de pessoas passaram a ter acesso a fontes de água de melhor qualidade, com abastecimento canalizado e poços protegidos. No fim de 2010, 89% da população mundial, o equivalente a 6,1 bilhões de pessoas, usou fontes melhoradas de água potável. Porém, 11% da população mundial, o equivalente a 783 milhões de pessoas, ainda continua a não ter acesso à água potável. As redes de esgoto não servem 1,1 bilhão de pessoas. Cerca de 4 mil crianças morrem diariamente por doenças diarreicas associadas à falta de qualidade da água (WHO/UNICEF, 2012).

No Brasil, os padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano são estabelecidos pela portaria MS n. 518/2004 (BRASIL, 2004).

Índices de Qualidade das Águas – IQA's

A aceitabilidade da qualidade da água é uma função direta de seu uso pretendido e depende da magnitude destes indicadores, que são regidos por normas e resoluções oficiais (OCAMPO-DUQUE et al., 2006; LERMONTOV et al., 2009; SILVA et al., 2006).

Um IQA deve sintetizar os dados como resultados analíticos por meio de um vetor de qualidade simples. Isso faz com que as informações sejam mais rápidas e facilmente interpretadas (STAMBUK-GILJANOVCI, 1999), auxiliando no processo decisório, facilitando a deliberação e julgamento com base em resultados, permitindo que os gestores e os usuários não-especialistas envolvidos possam compreender os resultados (SONG; KIM, 2009), sendo, portanto, uma ferramenta de transmissão de informações (STAMBUK-GILJANOVCI, 1999), comunicando a qualidade de um determinado corpo hídrico aos atores institucionais envolvidos (SILVA et al., 2006). Para Stambuk-Giljanovci (1999), o IQA é um instrumento matemático capaz de transformar grandes quantidades de dados em um único número que representa o nível de qualidade da água, enquanto elimina a avaliação subjetiva e os desvios individuais.

Relatórios tradicionais sobre a qualidade da

água são normalmente escritos por especialistas e tendem a ser demasiadamente técnicos e detalhados (OCAMPO-DUQUE et al., 2006), enfatizando os parâmetros individuais, sem fornecer uma visão de conjunto para interpretação da qualidade da água (LERMONTOV et al., 2009).

Métodos de avaliação com limites rígidos para as classes apresentam ambiguidades, pois o fato de o valor de um parâmetro estar perto ou longe do limite tem igual importância para avaliação da concentração. Suas limitações e complexidades motivaram o desenvolvimento de métodos mais avançados, capazes de integrar e contabilizar o impreciso, o vago, o qualitativo, o difuso (LERMONTOV et al., 2009).

IQA_{NSF}

O Índice mais largamente utilizado em diversos países do mundo para avaliar a qualidade dos corpos d'água é o IQA desenvolvido pela *National Sanitation Foundation, NSF*, dos Estados Unidos (OCAMPO-DUQUE et al., 2006; LERMONTOV et al., 2009; SILVA et al., 2006; STAMBUK-GILJANOVCI, 1999; SONG; KIM, 2009; ICAGÁ, 2007; BRASIL, 2005; LERMONTOV et al., 2008), tendo como característica principal o poder de refletir a situação ambiental dos corpos hídricos de maneira acessível aos não técnicos.

É obtido por meio da indexação das informações dos parâmetros: Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Termotolerantes (CT) e Potencial Hidrogeniônico (pH), com peso 0,17; 0,15 e 0,12,

respectivamente. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrato (NO_3), Fosfato Total (PO_4) e Variação de Temperatura (ΔT) com pesos iguais a 0,10 cada um. A Turbidez (Tu) e os Sólidos Totais (ST) têm pesos iguais a 0,08 cada. O somatório dos pesos totaliza o valor 1.

O propósito da atribuição de pesos para as variáveis de qualidade da água é denotar a importância de cada variável. Na atribuição do peso, o maior desafio é o fato de que pessoas diferentes têm opiniões diferentes sobre o peso de uma mesma variável. Assim, um IQA deve ser concebido combinando os pareceres de um grupo de peritos (LERMONTOV, 2009). O IQA_{NSF} é o produtório ponderado dos nove parâmetros de qualidade com seus respectivos pesos. A fórmula para seu cálculo é:

$$IQA = \prod_{i=1}^9 q_i^{w_i} \quad (1)$$

Em que: Π = Produtório; q_i = qualidade do parâmetro i obtido através da curva média específica de qualidade e, w_i = peso atribuído ao parâmetro.

A aplicação dessa equação produz um número racional entre 0 e 100. Tal valor estará em um dos intervalos estabelecidos na tabela 1, e a qualidade da água será a variável linguística correspondente ao intervalo em que se encontrar o valor numérico. Essa classificação seguirá um padrão rígido, ou seja, de acordo com o resultado obtido, enquadra-se a água em uma das classes, obedecendo à lógica clássica de pertinência.

Tabela 1. Intervalos de qualidade da água, estabelecidos pela *NSF*

Classes	Intervalos
Excelente (1)	$90 < IQA \leq 100$
Bom (2)	$70 < IQA \leq 90$
Médio (3)	$50 < IQA \leq 70$
Ruim (4)	$25 < IQA \leq 50$
Muito ruim (5)	$00 < IQA \leq 25$

Fonte: Brasil (2005).

Lógica Fuzzy

Na lógica convencional (binária), inicialmente desenvolvida pelo filósofo grego Aristóteles (384 – 322 a.C.), uma proposição ou é completamente verdadeira ou é completamente falsa. Essa lógica assume que o estado natural dos eventos seja totalmente definido (SOUTO-MAIOR et al., 2006). A lógica *fuzzy* é uma generalização da teoria dos conjuntos tradicionais para resolver os paradoxos gerados a partir da classificação “verdadeiro ou falso” da lógica convencional. Na lógica *fuzzy*, uma premissa varia em grau de verdade

entre 0 e 1 inclusive, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência, e o grau de pertinência pode ser considerado como uma medida que expressa a possibilidade de que um dado elemento seja membro de um conjunto *fuzzy* (ORTEGA, 2001).

Lógica Clássica versus Lógica Fuzzy

A abordagem *fuzzy* apresenta as seguintes vantagens em relação à abordagem clássica: a naturalidade de sua abordagem a torna

conceitualmente fácil de entender; sua flexibilidade; sua tolerância com dados imprecisos; a possibilidade de modelar as funções não-lineares (VIEIRA; LING, 2006), codificam conhecimentos inexatos, numa forma que se aproxima muito dos processos de decisão humanos, tornando o processo de aquisição do conhecimento mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados (KUO et al., 2009).

A maior diferença entre os modelos clássicos e *fuzzy* é o fato de que o primeiro explora todas as maneiras de se realizar uma tarefa, enquanto o segundo procura a melhor maneira de se realizar a mesma tarefa (ZARGHAMI; SZIDAROVSKY, 2009). Para Massad et al (2003) e Thé (2001), a força da lógica *fuzzy* deriva da sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas, incertas, com muitos dados e variáveis e qualitativamente incompletas e imprecisas.

Utilização da Lógica *Fuzzy* para Avaliação da Qualidade da Água

A deficiência mais crítica dos índices convencionais de qualidade da água é a incapacidade de lidar com a incerteza e a subjetividade presente no complexo problema ambiental. A necessidade de técnicas mais apropriadas para gerenciar a importância das variáveis de qualidade da água, a interpretação de limites aceitáveis para cada parâmetro e o método utilizado para integrar diferentes parâmetros envolvidos na avaliação do processo é claramente reconhecida. Nesse sentido, algumas metodologias alternativas, principalmente a lógica *fuzzy* e conjuntos *fuzzy*, estão sendo testados com problemas ambientais reais.

Muitas abordagens alternativas para controlar o padrão da qualidade das águas superficiais têm sido apresentadas e as que se apóiam na aplicação da lógica *fuzzy*, melhoraram o tratamento de incertezas (LI, 2009, SINGH et al., 2007). Kahraman e Kaya (2009) consideram-na útil para monitorar a concentração de poluentes na água, permitindo que não especialistas possam interpretar os resultados. A lógica *fuzzy* facilita a análise de sistemas com incertezas provenientes da indefinição de seus componentes (QIN et al., 2007).

A qualidade da água está relacionada a muitos fatores tecnológicos, sócio-econômicos e ambientais. Num sistema tão complexo, a não-linearidade, as inter-relações e as incertezas diversas, expressas em intervalos com fronteiras *fuzzy* devem ser consideradas (ZHU et al., 2009). Chen et al. (2005) e Karmakar e Mujumdar (2007)

corroboram que a lógica *fuzzy* é eficaz para o tratamento e análise dos recursos ambientais em função da multiplicidade, complexidade e não exatidão das variáveis que compõem o sistema.

As metodologias de avaliação baseadas na lógica *fuzzy*, que utilizam expressões linguísticas de incerteza, em vez de incluir critérios estatísticos probabilísticos, são ferramentas úteis para a tomada de decisão (ICAGÁ, 2007; ALTUNKAYNAK et al., 2005 e KARMAKAR; MUJUMDAR, 2006). Ocampo-Duque et al., (2006), recomenda a lógica *fuzzy* para o desenvolvimento de índices ambientais em que informações altamente subjetivas devem ser correlacionadas.

Lu et al. (1999) concluíram que a avaliação *fuzzy* é mais sensível a uma variação na qualidade da água do que o índice tradicionalmente utilizado para este fim. Lee e Wen (1997) aplicaram-na para encontrar a capacidade assimilativa máxima e o custo mínimo de tratamento da água de um manancial. Sârbu e Pop (2005) utilizaram-na para avaliar um conjunto de dados de qualidade da água do rio Danúbio, por um período de 11 anos consecutivos, concluindo que o método que incluía a lógica *fuzzy* obteve melhores resultados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletadas 48 amostras, durante um período de 24 meses (ago. 2007 a set. 2009). Esse número é representativo para o caso deste estudo em que o objetivo não é monitorar o padrão de potabilidade da água do Rio Pimenta Bueno, e sim, propor um novo índice de qualidade da água, sendo, para tanto, necessário dispor dos 9 (nove) parâmetros que compõe este IQA.

A coleta das amostras foi realizada pelo próprio pesquisador, por volta das sete horas, na primeira e terceira segunda-feira de cada mês, num único ponto (coordenadas S 11° 40' 23'' e 061° 11' 18''), nas proximidades do limite urbano de Pimenta Bueno (Brasil), a 100 metros abaixo do ponto de captação de água da Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia – CAERD.

Calculou-se média aritmética simples dos valores quinzenais de cada um dos parâmetros, ou seja, trabalhou-se com 24 valores diferentes, obtidos de 48 observações quinzenais. Entre a coleta e a entrega das amostras para análise, transcorreu um tempo máximo de 2 horas.

As amostras foram estocadas em frascos de plástico resistentes e autoclaváveis com capacidade de 2.500 ml cada um, que foram submetidos ao processo de autoclave, a 121° C, com 1 atm, durante 30 minutos. O frasco e a tampa eram do mesmo

material e foram preenchidos em sua totalidade. As análises das amostras foram realizadas por profissional cujo laboratório está registrado em órgão oficial de controle.

Para a elaboração do IQA_{fuzzy} foram utilizadas as mesmas informações coletadas para o IQA_{NSF} . Sua implementação foi realizada por meio da caixa de ferramentas *fuzzy* do MATLAB[®], versão 7.6.0. O tratamento estatístico dos dados foi efetuado utilizando-se a planilha eletrônica Microsoft[®] Excel[®] e o *software* estatístico MINITAB[®].

IQA_{fuzzy}

A classificação da água pelo IQA_{NSF} , promove uma mudança abrupta de uma classe para outra, por estar pautada na lógica clássica. Por sua vez, o sistema de inferência do IQA_{fuzzy} garante a flexibilização, aceitando uma pertinência relativa de um elemento a um conjunto, promovendo a inclusão de um mesmo resultado do IQA em várias categorias (excelente, bom, médio, ruim e muito ruim), simultaneamente.

Para testar e validar a funcionalidade do IQA_{fuzzy} , foram feitas simulações, alterando-se os dados de entrada e observando o comportamento dos dados de saída, verificando se ele garantia resultados diferentes dos obtidos pelo IQA_{NSF} , que foi entendido como IQA de referência (grupo controle), tendo ainda como referência as curvas de cada parâmetro estabelecidas pela NSF (BRASIL, 2005).

Na concepção do sistema de inferência *fuzzy*, dividiu-se o grupo de 9 parâmetros em três subgrupos. O critério de divisão foi o peso de cada parâmetro, definido pela NSF. Os parâmetros que compõem o subgrupo de alto peso são: Oxigênio Dissolvido, Coliformes Totais e Potencial Hidrogeniônico. O subgrupo dos parâmetros de médio peso é composto pela Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitratos Totais, Fosfatos Totais e Variação de Temperatura. A Turbidez e os Sólidos totais são os parâmetros constituintes do subgrupo de baixo peso. A definição destes subgrupos que, na verdade são subsistemas processadores das informações, se fez necessária, em função do grande número de regras (aproximadamente 2 milhões de regras), caso todas as informações fossem tratadas por um único motor de inferência, o que inviabilizaria o processamento computacional da informação, impedindo a realização de simulações rápidas.

Esses três grupos recebem entradas *crisp*¹, que são processadas pelo motor de inferência *fuzzy*, produzindo três saídas. Estas por sua vez, são reprocessadas por um novo motor de inferência *fuzzy*, que recebe as três saídas dos primeiros motores. O sistema construído utiliza como regra de inferência o método de Mamdani. Para defuzzificação foi utilizado o método do centróide. A base de regras do primeiro nível de processamento, ou seja, dos três primeiros motores, que são independentes entre si, é composta por 775 regras diferentes, distribuídas entre Alto Peso: 125 regras (5^3); Médio Peso: 625 regras (5^4) e Baixo Peso: 25 regras (5^2). A base de regras do segundo motor é composta por 125 regras de agregação (5^3). Depois da última inferência, ocorre o processo de defuzzificação que produz e entrega uma saída *crisp*, que é o resultado do IQA_{fuzzy} , compreensível para os usuários do sistema.

Esse sistema foi construído de forma a permitir dois tipos de avaliações simultâneas, sendo possível, a partir das mesmas entradas *crisp*'s produzir dois resultados diferentes. O primeiro a partir da implementação das equações preconizadas pela NSF, ou seja, é o IQA tradicional, mundialmente utilizado. O segundo resultado deriva da inferência *fuzzy*. A figura 1 mostra a configuração do sistema de inferência *fuzzy* concebido:

¹ Subconjunto de um conjunto universo convencional; sua tradução significa puro, decidido.

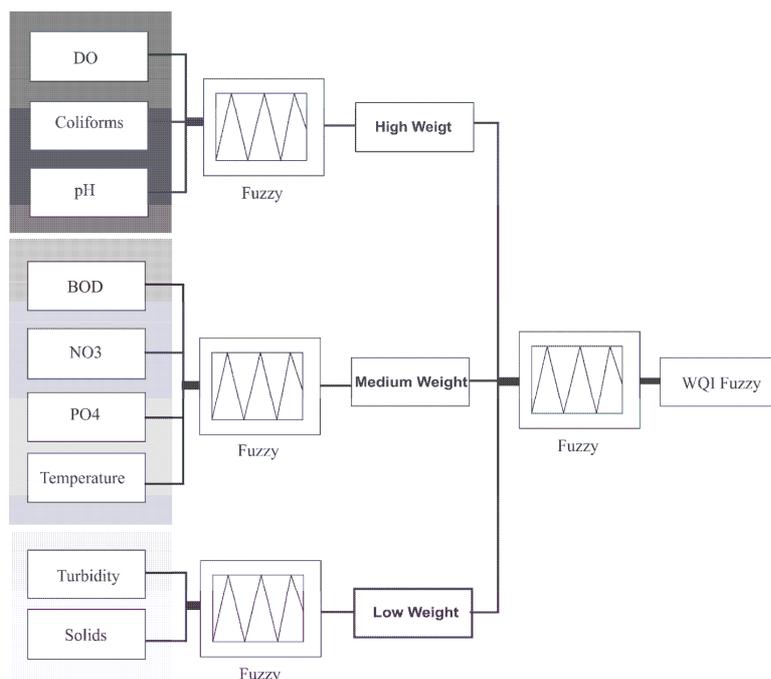


Figura 1. Fluxograma do sistema de inferência *fuzzy* utilizado.

Os resultados do IQA_{fuzzy} foram utilizados para fazer uma nova classificação da qualidade das mesmas amostras de água do Rio Pimenta Bueno, de acordo com a mesma tabela de classificação da NSF (tabela 1), no entanto, sob a ótica de um novo modelo, baseado na lógica que considera os graus de pertinência de um determinado elemento a um conjunto, rompendo-se com a lógica clássica, utilizada na classificação da qualidade da água.

No módulo de saída desse sistema, foram utilizadas as funções de pertinência gaussianas, que

tem um declínio suave e valores diferentes de zero para todo seu domínio, sendo caracterizadas pela sua média (μ) e seu desvio padrão (σ).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises das amostras de água bruta coletada, de acordo com o que foi descrito no plano de amostragem, encontram-se organizados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros da água do Rio Pimenta Bueno, observados no período de agosto de 2007 a setembro de 2009.

Parâmetro	Unidade	Média 2007	Média 2008	Média 2009	Média Final
O. Dissolvido	mg/l	70,63	76,71	73,38	73,57
Coliformes Totais	NMP/100ml	562,5	319,17	525	468,89
pH	--	6,88	6,86	6,97	6,90
DBO	mg/l	11,51	8,73	8,04	9,43
Nitratos	mg/l	7,04	5,56	5,23	5,94
Fosfatos	mg/l	1,04	1,24	1,31	1,20
Variação de Temperatura	°C	24,00	23,29	22,63	23,31
Turbidez	NTU	60,50	51,50	40,00	50,67
Sólidos Totais	mg/l	288,88	254,04	228,88	257,26

Na região do estudo, há um regime de chuvas com elevado índice pluviométrico, entre os meses de novembro a março, e um período de

intensa estiagem de maio a agosto. Os meses de abril, setembro e outubro fazem a transição entre os períodos. Tal regime climático é razoavelmente

rígido. O índice pluviométrico tem relação direta com a qualidade da água analisada, em decorrência do volume de solo e outros poluentes que são arrastados para o manancial.

Em razão de o estudo ser realizado no Brasil, país situado na zona inter-tropical, os valores da variação de temperatura não são significativos para composição do IQA, sendo considerados sua variação zero e sua medida absoluta um valor constante e igual a 25 °C, no entanto, seus valores quinzenais foram medidos e registrados. A temperatura foi verificada no manancial, sempre nas primeiras horas da manhã, o que justifica a obtenção

de valores médios abaixo de 25°, a despeito das baixas latitudes do local de estudo.

Cálculo do IQA_{NSF} e do IQA_{fuzzy}

Os valores obtidos para cada um dos parâmetros foram inseridos no sistema construído. Decorre daí, a geração de 24 relatórios diferentes, correspondentes ao IQA de 24 meses, que estão apresentados na tabela 3 seguinte. Para cada conjunto de 9 parâmetros de um mês, encontraram-se dois diferentes valores de IQA's, cada um deles obtidos a partir de uma função geradora diferente.

Tabela 3. Valores mensais dos IQA's *Fuzzy* e *NSF*

Ano	2007						2008					
Meses	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
IQA_{NSF}	55,07	52,99	47,38	45,3	48,59	52,67	56,28	57,34	57,75	53,94	51,51	59,04
IQA_{fuzzy}	47,08	55,1	46,91	45,33	47,62	46,19	34,42	46,78	65,11	45,36	50,47	63,84
Ano	2008						2009					
Meses	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
IQA_{NSF}	55,66	55,63	55,03	54,39	55,15	52,77	54,44	56,01	51,2	52,68	54,81	58,52
IQA_{fuzzy}	47,72	61,95	53,87	54,55	67,03	54,44	60,54	53,01	46,76	49,12	61,95	70,34

O valor médio do IQA_{NSF} para o período observado foi de 53,92, enquanto o valor médio do IQA_{fuzzy} foi de 53,15, numa escala que varia de 0 a 100.

Como o IQA_{NSF} é resultado de um produtório dos parâmetros ponderados pelos seus respectivos pesos, seu comportamento apresenta o inconveniente de que nas situações em que todos os parâmetros apresentam valores satisfatórios, exceto um deles, o resultado final é pouco influenciado negativamente. Nesse modelo de avaliação, um parâmetro com valor totalmente fora do padrão desejado, combinado com valores de outros parâmetros que sejam satisfatórios, pode gerar um IQA que classifique a água como excelente. Isso se explica pelas próprias características das operações matemáticas baseadas em produtórios, em que multiplicações potencializam positivamente o resultado, desconsiderando ou neutralizando um único valor pequeno.

O IQA_{fuzzy} apresenta, além de estabilidade, uma sensibilidade maior às mudanças nos valores individuais dos parâmetros do que o IQA_{NSF} . O resultado da avaliação do IQA baseado nesta função é mais rigoroso em sua avaliação, ou seja, para um mesmo conjunto de valores o resultado do IQA_{fuzzy} é normalmente um valor menor que os demais, com a vantagem de, quando o valor de um único parâmetro

é desfavorável, é difícil obter um IQA favorável, haja vista, que o padrão de julgamento é baseado nas funções gaussianas. Em suma: quando o IQA_{fuzzy} é favorável, significa dizer que todos os valores dos parâmetros também o são, em medida superior e, portanto, mais seguro do que o IQA_{NSF} com o qual foi comparado.

Pertinência do IQA_{fuzzy} às Classes de Qualidade da Água

A pertinência dos resultados obtidos com a aplicação do sistema *fuzzy*, a uma certa categoria, deverá ser entendida como o grau de pertencimento de um determinado valor às inúmeras categorias possíveis de classificação da água.

Ao se aplicar o padrão de avaliação baseado na lógica *fuzzy* admite-se, de antemão, que um mesmo valor pertencerá a mais de um conjunto simultaneamente e, essa condição, que é inerente à essa lógica, permite que o resultado final do IQA, pertença a mais de uma categoria da tabela de classificação da qualidade da água da *NSF*. Os resultados mensais obtidos com a aplicação do IQA_{fuzzy} foram compilados na Tabela 4, permitindo observar qual é o grau percentual de pertinência do IQA a cada uma das categorias, simultaneamente.

Tabela 4. Percentual de pertinência do IQA_{fuzzy} mensal às categorias da tabela da *NSF*

Ano	2007												2008											
Meses	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago												
Excelente	0,2	1,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,0	0,2	6,8	0,1	0,4	5,4												
Bom	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	52,6	0,0	0,2	39,3												
Médio	70,7	86,7	70,7	54,6	76,4	62,7	1,4	68,7	8,9	54,6	96,5	14,5												
Ruim	23,6	4,2	23,6	30,6	21,3	26,9	90,8	24,4	0,2	30,6	12,5	0,3												
Muito ruim	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0												

Ano	2008												2009												
Meses	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Média												
Excelente	0,2	4,0	0,9	1,0	8,9	1,0	3,2	0,2	0,2	0,3	4,0	14,3	2,22												
Bom	0,0	24,9	1,0	1,5	70,7	1,4	16,5	0,0	0,0	0,1	24,9	96,5	13,82												
Médio	78,3	24,9	95,6	91,0	4,4	92,3	35,8	68,7	68,7	89,7	24,9	0,9	55,9												
Ruim	20,5	0,6	5,9	4,9	0,1	5,1	0,9	24,4	24,4	15,8	0,6	0,0	16,33												
Muito ruim	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,01												

O resultado médio do IQA_{fuzzy} tem um grau médio de pertinência a todas as categorias da tabela da *NSF* simultaneamente, na ordem de 2,22% de pertinência à categoria “Excelente”; 13,82% à categoria “Bom”; 55,90% para “Bom”; 16,33% de pertinência a categoria “Ruim” e apenas 0,01% de pertinência à categoria “Muito Ruim”. A soma das pertinências não é igual a 100, pois se trabalhou com a lógica *fuzzy* e com funções gaussianas de agregação.

Ao criar um sistema em que um mesmo resultado *fuzzy* está incluído em mais de uma, das categorias da tabela de classificação da qualidade da água, preconizada pela *NSF*, chegou-se a essência do que se buscou apresentar como caráter inovador

neste estudo. Fez-se com isso uma contraposição à lógica tradicional, que só permite duas possibilidades de pertinência de um elemento a um conjunto (pertencer ou não) e transcendeu-se para uma abordagem sob a perspectiva *fuzzy*, em que um mesmo resultado tem diferentes níveis de pertinência aos diferentes conjuntos, conforme pode ser verificado na tabela 4. Atenção especial deve ser dada ao fato de que o grau de pertinência deve ser entendido como sendo um mesmo resultado (no caso da tabela 4, a média de todos os valores do IQA_{fuzzy}) pertencendo a todas as classes, e não como uma parcela de resultados que pertencem a uma classe isoladamente.

Tabela 5. Grau médio de pertencimento do IQA_{fuzzy} aos intervalos de qualidade da água, estabelecidos pela *NSF*

Classes	Intervalos	Pertinência % média do IQA_{fuzzy} às classes
Excelente (1)	$90 < IQA \leq 100$	2,22
Bom (2)	$70 < IQA \leq 90$	13,82
Médio (3)	$50 < IQA \leq 70$	55,9
Ruim (4)	$25 < IQA \leq 50$	16,33
Muito ruim (5)	$00 < IQA \leq 25$	0,01

Avaliação Estatística dos Resultados dos IQA 's

Para validar o IQA_{fuzzy} , efetuou-se os seguintes testes estatísticos comparando-os com o IQA_{NSF} :

Gráficos de Controle dos IQA 's.

Os gráficos de controle são medidas estatísticas utilizadas para o monitoramento da

qualidade de um processo ao longo do tempo. Os limites superiores e inferiores de controle foram obtidos a partir da soma e subtração da média, com um, dois ou três desvios padrão, da distribuição, ou seja, $\mu \pm 1S$, $\mu \pm 2S$ $\mu \pm 3S$.

Conforme Larson e Faber (2007), os três sinais de advertência que devem ser considerados para decidir se um processo está fora de controle são:

- Um ponto está além de três desvios padrão

da média;

- b. Há nove pontos consecutivos que estão de um lado da média;
- c. Pelo menos dois, entre três pontos consecutivos, estão a mais de dois desvios padrão da média.

Ao se fazer o monitoramento do comportamento dos resultados obtidos, por meio dos gráficos de controle, levando-se em consideração esses três sinais de advertência, o IQA_{NSF} e o IQA_{fuzzy} , estiveram durante todo o processo, dentro dos limites de controle estatístico estabelecidos.

Coefficiente de Correlação Linear entre os IQA's

O coeficiente de correlação linear entre os dois IQA's é $r_{NSF \times Gauss} = 0,47$, caracterizando uma correlação linear positiva fraca.

Testes de Hipóteses

Para testar as hipóteses, que consistem, neste caso, em verificar se existe diferença significativa entre as médias dos valores dos IQA's, foram realizados dois testes estatísticos distintos. Para os dois testes, o nível de significância utilizado foi $\alpha=0,05$.

As hipóteses testadas foram:

$H_0: \mu IQA_{NSF} = \mu IQA_{fuzzy}$ (não existe diferença significativa entre as médias dos IQA's).

$H_1: \mu IQA_{NSF} \neq \mu IQA_{fuzzy}$ (existe diferença significativa entre as médias dos IQA's).

Análise de Variância

Para a análise de variância, realizou-se o cálculo da Anova, fator único, o que resultou num $f_{observado} (0,1679) < f_{crítico} (4,0517)$, o que permite aceitar H_0 . Ainda também, como o *valor p* $0,6839 > \alpha$ adotado (0,05), então H_0 deve ser aceita. Conclui-se daí, que não existe diferença significativa entre as médias do $IQA_{NSF} \times IQA_{fuzzy}$, aceitando-se H_0 .

Teste - T: Duas Amostras Presumindo Variâncias Diferentes

Para tirar conclusões a partir do teste - t para duas amostras, presumindo variâncias diferentes, comparou-se o valor de p com o nível de significância α adotado. Se este for maior que o valor de α então, aceita-se H_0 , pois a diferença de médias não é significativa. Como valor de p $(0,6849) > \alpha (0,05)$, então aceita-se H_0 para este conjunto de pares amostrais e, conclui-se que não existe diferença significativa entre as médias dos dois IQA's.

CONCLUSÕES

A água do Rio Pimenta Bueno, quando submetida ao padrão de julgamento do IQA_{NSF} ofereceu como resultado uma classificação que a enquadra na categoria "média", em 21 dos 24 meses observados, ou seja, em 87,5% dos casos. Nos outros três meses, a água foi enquadrada na categoria "ruim".

O modelo de julgamento convencional classifica os resultados obtidos como pertencente a uma única categoria de classificação da água, enquanto o modelo de julgamento da lógica *fuzzy*, permitiu o enquadramento de um mesmo resultado em mais de uma das categorias de classificação da qualidade da água, simultaneamente. O IQA_{fuzzy} retornou como resposta aos diversos valores dos parâmetros coletados, a pertinência a inúmeras categorias ao mesmo tempo, com predominância de maior pertinência percentual à categoria "Médio".

A lógica *fuzzy* mostrou-se adequada para elaboração do índice de qualidade de água - IQA, nela fundamentado. O IQA_{fuzzy} proposto demonstrou-se como ferramenta funcional e eficaz para interpretar e integrar os diversos parâmetros que compõem um índice de qualidade da água.

As comparações realizadas entre os resultados obtidos pelo julgamento do IQA_{NSF} e do IQA_{fuzzy} permitem as seguintes afirmações:

a. O IQA_{fuzzy} é mais sensível do que o IQA_{NSF} às variações dos valores dos parâmetros que o compõe, resultando em variações do IQA fortemente influenciadas pelas variações dos parâmetros.

b. Não existe diferença significativa entre as médias dos IQA's.

c. Quando submetidos ao gráfico de controle, ambos os IQA's mantiveram-se dentro dos controles estatísticos, durante todo o processo de avaliação, ou seja, quando monitorados ao longo do tempo, mantiveram-se estáveis do ponto de vista estatístico, não infringindo as regras de controle previamente estabelecidas, o que significa dizer que ambos os IQA's são estáveis em seu funcionamento.

O cálculo do IQA_{NSF} foi realizado para servir de referencial de comparação para validação do IQA_{fuzzy} proposto. O IQA_{fuzzy} foi capaz de gerar resultados próximos do IQA_{NSF} , contudo, utilizando um padrão de julgamento que permite o pertencimento dos resultados a inúmeras categorias da *NSF* simultaneamente.

O IQA_{fuzzy} proposto poderá ser considerado para avaliar a qualidade de água de outros mananciais hídricos, tendo se apresentado como alternativa viável, segura e mais flexível para avaliação da qualidade da água do Rio Pimenta Bueno.

ABSTRACT: Water Quality Indexes (IQA) are mathematical operators that process a set of analytical indicators, producing a indexed numeric result, able to express the water quality. The IQA most world widely used and accepted is proposed by the *National Sanitation Foundation - NSF* and is based on classical logic. This work presents a new IQA based on *fuzzy* logic, whose boundaries are not rigidly defined and include linguistic variables in its decision matrix, producing estimates of a complex nonlinear system, without resorting to mathematical models. In order to validate it, the results were compared with those obtained using the IQA of *NSF* for 24 months, using water samples from the Pimenta Bueno River (Rondônia, Brazil). The comparisons realized indicates that the *fuzzy* IQA is more sensitive than the *NSF* IQA to variations of parameter values that compose them. The *fuzzy* IQA set by the MATLAB® software, with Gaussians aggregations functions, revealed viable, safe and more flexible to evaluate water's quality, therefore it can be considered valid valid to classify the water's quality from other water's sources.

KEYWORDS: Water resources. IQA. *Fuzzy* logic.

REFERÊNCIAS

- ALTUNKAYNAK, A.; ÖZGER, M.; ÇAKMAKCI, M. Water Consumption Prediction of Istanbul City by Using Fuzzy Logic Approach. **Water Resources Management**, Turquia, v. 19, n. 5, p. 641-654, out. 2005.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Cálculo da Qualidade da Água: Estabelecimento das Equações do Índice de Qualidade das Águas (IQA)**. Relatório I. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de MG: Jun. 2005. Acesso em: 12 de 2006. Disponível em: http://www.aguas.igam.mg.gov.br/aguas/downloads/SCQA_final.pdf.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n. 518 de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial da União de 25 de mar. 2004.
- CHEN, H.; CHANG, N.; SHAW, D. Valuation of in-stream water quality improvement via fuzzy contingent valuation method. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Taiwan, v. 19, n. 2, p. 158-171, mai. 2005.
- D'ÁGUILA, O. S. Avaliação da qualidade de água para o abastecimento público do Município de Nova Iguaçu. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 3, p. 791-798, set. 2000.
- ICAGÁ, Y. Fuzzy evaluation of water quality classification. **Ecological Indicators**, Turquia, v. 7, n. 3, p. 710-718, jul. 2007.
- KAHRAMAN, C.; KAYA, I. Fuzzy process capability indices for quality control of irrigation water. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Turquia, v. 23, n. 04, p. 451-462, mai. 2009.
- KARMAKAR, S.; MUJUMDAR, P. P. A two-phase grey fuzzy optimization approach for water quality management of a river system. **Advances in Water Resource**, India, v. 30, n. 5, p. 1218-1235, mai. 2007.
- KARMAKAR, S.; MUJUMDAR, P. P. Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system. **Advances in Water Resources**, India, v. 29, n. 7, p.1088-1105, jul. 2006.
- KUO, T.; WU, H.; SHIEH, J. Integration of environmental considerations in quality function deployment by using fuzzy logic. **Expert systems with applications**, Taiwan, v. 36, n. 3, p. 7148-7156, abr. 2009.
- LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. 476 p.
- LEE, C. S.; WEN, C. G.; Fuzzy goal programming approach for water quality management in a river basin. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 89, n. 2, p. 181-192, jul. 1997.

- LERMONTOV, A.; YOKOYAMA, L.; LERMONTOV, M.; MACHADO, M. A. S. Aplicação da Lógica Nebulosa na Parametrização de um novo índice qualidade de Água. **Engevista**, Brasil, v. 10, n. 2, p.106-125, dez. 2008.
- LERMONTOV, A.; YOKOYAMA, L.; LERMONTOV, M.; MACHADO, M. A. S. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. **Ecological Indicators**. Brasil, v. 9, n. 6, p.1188-1197, nov. 2009.
- LI, Y. P.; HUANG, G. H.; HUANG, Y. F.; ZHOU, H. D. A multistage fuzzy-stochastic programming model for supporting sustainable water-resources allocation and management. **Environmental Modelling & Software**, China, v. 24, n. 27, p. 786-797, jul. 2009.
- LU, R. S.; LO, S. L.; HU, J. Y. Analysis of reservoir water quality using fuzzy synthetic evaluation. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Taiwan, v. 13, n. 5, p. 327-336, out. 1999.
- MASSAD, E; ORTEGA, N. R. S.; STRUCHINER, C. J.; BURATTINI, M. N. Fuzzy Epidemics. **Artificial Intelligence in Medicine**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 241-259, jul. 2003.
- OCAMPO-DUQUE, W.; FERRÉ-HUGUET, N.; DOMINGO, J. L.; SCHUHMACHER, M. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. **Environment International**, Espanha, v. 6, n. 32, p. 733-742, mai. 2006.
- ORTEGA, Neli Regina Siqueira. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**. 2001. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- QIN, X. S.; HUANG, G. H.; ZENG, G. M.; CHAKMA, A.; HUANG, Y. F. An interval-parameter fuzzy nonlinear optimization model for stream water quality management under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, China, v. 180, n. 3, p.1331-1357, ago. 2007.
- SÂRBU, C.; POP, H. F. Principal component analysis versus fuzzy principal component analysis a case study: the quality of Danube water (1985-1996). **Talanta**, Romênia, v. 65, n. 5, p.1215-1220, mar. 2005.
- SILVA, G. S.; JARDIM, W. F. Um novo índice de qualidade das águas para proteção da vida aquática aplicada ao rio Atibaia, Região de Campinas/Paulínia – SP. **Química Nova**, São Paulo, v. 4, n. 29, p. 689-694, ago. 2006.
- SINGH, A. P.; GHOSH, S. K.; SHARMA, P. Water quality management of a stretch of river Yamuna: An interactive fuzzy multi-objective approach. **Water Resources Management**, India, v. 21, n. 2, p. 515-532, fev. 2007.
- STAMBUK-GILJANOVCI, N. Water Quality Evaluation by Index in Dalmatia. **Water Research**, Croácia, v.33, n.16, p. 3423-3440, nov. 1999.
- SONG, T; KIM, K. Development of a water quality loading index based on water quality modeling. **Journal of Environmental Management**, Coréia do Sul, v. 90, n. 3, p. 1534-1543, mar. 2009.
- SOUTO-MAIOR, C. D.; MURCIA, F. D.; BORBA, J. A.; COSTA JR., N. C. A. O Índice IBOVESPA e a Lógica Fuzzy: Uma Nova Estratégia de Investimento. In: CONGRESSO VIRTUAL BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO, 3., 2006. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <http://www.convibra.com.br/2006>. Acesso em: 20 abr. 2012. 24 a 26 de novembro de 2006.
- THÉ, Maria Alice Lagos. **Raciocínio baseado em casos: uma abordagem fuzzy para diagnóstico nutricional**. 2001. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

VIEIRA, F. H. T.; LING, L. L. Modelagem fuzzy utilizando funções de base ortonormais aplicada à predição adaptativa de tráfego de redes. **Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN)**, Brasil, v. 4, n. 2, p. 93-111, 2006.

WHO/UNICEF - World Health Organization. Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation. **Progress on Drinking Water and Sanitation**. Relatório. mar. 2012. Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/publications. Acesso em: 12 mai. 2012.

ZARGHAMI, M.; SZIDAROVSKY, F. Stochastic-fuzzy multi criteria decision making for robust water resources management. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, EUA., v. 23, n. 3, p. 329-339, abr. 2009.

ZHU, H; HUANG, G. H; GUO, P.; QIN, X. S. A Fuzzy Robust Nonlinear Programming Model for Stream Water Quality Management. **Water Resources Management**, China, v. 23, n. 14, p. 2913-2940, nov. 2009.