

Utilizando Lógica Fuzzy para Modelagem Computacional de Qualidade da Água do Rio Cachoeira, Região Sul da Bahia

Valdex de J. Santos, Francisco B. S. Oliveira, and Eduardo S. Palmeira

Universidade Estadual de Santa Cruz,
45662-900 - Rodovia Ilhéus/Itabuna, Km 16, BA, Brasil
valdexsantos@ifba.edu.br, fbsoliveira@uesc.br, espalmeira@uesc.br
<http://www.uesc.br>

Resumo Índices de qualidade da água - IQA's são bastante difundidos e utilizados como forma de avaliar ambientes aquáticos, possibilitando tomadas de decisão mais fundamentadas. Neste trabalho, apresenta-se novas propostas de IQA's, alicerçados na lógica fuzzy, cujos conjuntos não tem fronteiras rigidamente definidas e incluem variáveis linguísticas em sua matriz de decisão. Nosso ambiente de estudo é o rio Cachoeira que banha as cidades mais importantes na Região Sul da Bahia e, juntamente com outros rios, forma a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, a maior das bacias da região Leste da Bahia. São propostos dois IQA's Fuzzy do rio Cachoeira: um baseado em funções de pertinência triangulares e trapezoidais (Sistema TriTrap) e outro com funções de agregação gaussianas (Sistema gaussiano). O Matlab foi utilizado para simular os índices cujos resultados são analisados para classificação da qualidade da água do rio Cachoeira sob a ótica da lógica clássica e da lógica fuzzy.

Keywords: Lógica Fuzzy, Qualidade da Água, Rio Cachoeira

1 Introdução

Água é um bem inestimável, essencial para a sobrevivência da humanidade, sendo um dos recursos naturais mais utilizados. Por ser fundamental para a existência e manutenção da vida, deve estar presente não só em quantidade, mas também com qualidade apropriada. Nesse sentido, seu monitoramento, assim como estudos que possibilitem diagnosticar seu estado atual, são essenciais para fornecer parâmetros que visem impulsionar políticas públicas de preservação e contenção de elementos causadores de poluição.

O rio Cachoeira, ao cortar vários municípios da região sul da Bahia, entre eles Ilhéus e Itabuna, que abrigam o maior contingente populacional e possuem a maior economia da região, exerce grande influência nas condições de vida dos cidadãos da região. Muitos dependem dele para a própria subsistência, ora pelo consumo da água, ora pela produção de peixes que alimenta suas famílias. Dessa forma, é necessário um acompanhamento constante das condições do rio, visto

que a má qualidade de sua água trará consequências negativas para a saúde dos cidadãos e para a economia dos municípios que estão ao longo do seu curso.

Segundo [1] a Bacia do Rio Cachoeira constitui um sistema socioecológico da maior importância para o Sul da Bahia, agrupa os principais municípios dessa região e apresenta marcante diversidade de áreas agrícolas que se distinguem por diferentes características naturais e sistemas de ocupação antrópica. No entanto, constata-se ainda uma carência de estudos detalhados deste sistema que possibilitem uma melhor definição de estratégias para um manejo sustentável dos diferentes ambientes desta bacia hidrográfica.

Alguns estudos avaliaram a qualidade da água do rio Cachoeira por meio da análise físico-química de amostras de água [2]-[3], assim como análise histopatológica e ultraestrutural do fígado de peixes, tais como *Tilapia rendalli* [4] e *Poecilia vivipara* [5].

Outros autores fizeram análises de metais (tais como Zn, Pb, Ni, Cu, Mn e Fe) em partes do curso do rio Cachoeira englobando o perímetro urbano e rural da cidade de Itabuna e chegando até as proximidades do perímetro urbano da cidade de Ilhéus [6] e também analisaram nutrientes inorgânicos dissolvidos, nitrogênio total e fósforo total [7]. Os resultados obtidos mostraram que as concentrações mais elevadas de Zn, Pb e Cu foram detectadas nos sedimentos oriundos de áreas que sofrem influência das atividades industriais e urbanas. A presença desses metais pode ser indicativo de poluição provocada pelo deflúvio urbano e pela drenagem de efluentes industriais, provenientes de atividades agrícolas. Níveis acima do permitido pode ser extremamente prejudicial à saúde populacional.

Até o presente momento, várias metodologias têm sido propostas para avaliar a qualidade da água do rio Cachoeira, a exemplo das apresentadas nos trabalhos anteriormente citados. As metodologias tradicionais, entretanto, não têm se mostrado eficientes para representar o conhecimento de natureza mais subjetiva sobre as variáveis usadas para avaliar a qualidade dos ambientes aquáticos [8]. Assim, é preciso pensar em metodologias diferenciadas que estudem a qualidade da água de mananciais sobre diferentes pontos de vista.

Nesse sentido, este trabalho traz uma abordagem diferenciada e inovadora para o ambiente em questão, baseada na lógica fuzzy, a tempo que procura também suprir um pouco da carência de estudos relacionados a qualidade das águas desse rio.

Através dos índices de qualidade da água é possível avaliar os pontos mais críticos na bacia de um manancial, assim como detectar problemas na localização das estações e avaliar as áreas que necessitam de um monitoramento mais intensivo.

Não obstante, a aplicação do Índice de Qualidade da Água - IQA classifica drasticamente a água pertencendo a uma das categorias ótima, boa, regular, ruim ou péssima. Pequenas variações no valor do IQA podem fazer com que a classificação da água em determinado ponto mude abruptamente. Entende-se, dessa forma, que essa mudança abrupta de uma classe para outra é uma forma inadequada de classificação.

A lógica fuzzy pode ser uma alternativa para modelagem de índices de qualidade da água, pois fornece outra abordagem para lidar com questões em que os objetivos não estão bem definidos e as informações não são precisas [9]. Um sistema baseado na lógica fuzzy permite a mudança de uma classe para outra de forma suave e gradual, atribuindo o grau de pertinência dos corpos analisados em uma classe e outra. Assim, um mesmo resultado permitirá, por exemplo, uma classificação de alta pertinência a categoria ruim e baixa pertinência a categoria regular, ou seja, uma relativização do resultado do IQA, renegando uma forma de julgamento absoluta.

Uma das principais vantagens da lógica fuzzy em relação a outras abordagens matemáticas é a facilidade de compreensão por parte de profissionais cuja formação não é necessariamente na área de exatas. A possibilidade de trabalhar com variáveis linguísticas aproxima a linguagem do modelo com a linguagem natural utilizada por esses profissionais, o que faz com que eles se sintam a vontade para expressar o seu conhecimento. Estas características da lógica fuzzy viabilizam a interdisciplinaridade nesse tipo de modelagem.

2 Metodologia

A base metodológica consiste em simulações feitas com parâmetros físico-químicos e bacteriológicos provenientes de coletas em três pontos do rio Cachoeira entre os anos de 2010 e 2013 (não obtivemos dados mais recentes). Os dados foram obtidos junto INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos), órgão responsável por monitorar a qualidade da água dos rios e praias da região.

Foram propostos dois índices fuzzy de qualidade da água para o rio Cachoeira, um baseado em funções triangulares e trapezoidais e, outro com funções de agregação gaussianas. Os resultados obtidos com a simulação desses índices aos valores dos parâmetros provenientes das coletas realizadas foram comparados com a aplicação do IQA clássico.

O IQA clássico é calculado por meio do produtório ponderado de nove parâmetros, de acordo com a seguinte fórmula:

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

Onde: IQA é o índice de qualidade da água, variando de 0 a 100; q_i representa a qualidade do i -ésimo parâmetro (entre 0 e 100), obtido da sua respectiva “curva média de variação de qualidade” em função de sua concentração ou medida, conforme pode ser consultado em [10]; w_i é o peso correspondente ao i -ésimo parâmetro (entre 0 e 1), atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade (conforme Tabela 1), sendo que soma dos pesos dos nove parâmetros igual a 1.

Para o desenvolvimento do Índice de Qualidade da Água Fuzzy do Rio Cachoeira (IQAFRC) foram utilizados os mesmos nove parâmetros que compõem o IQA clássico, constantes na Tabela 1, os quais foram considerados como variáveis linguísticas de entrada para o sistema e a cada uma delas atribuídos cinco

Tabela 1. Pesos atribuídos aos parâmetros componentes do IQA.

Parâmetro	Unidade	peso (w_i)
Oxigênio Dissolvido	%	0,17
Coliformes Termotolerantes	(NMP/100 mL)	0,15
pH	-	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mgL^{-1}	0,10
Nitrogênio Total	mgL^{-1}	0,10
Fósforo Total	mgL^{-1}	0,10
Variação de Temperatura	$^{\circ}C$	0,10
Turbidez	UNT	0,08
Sólidos Totais	mgL^{-1}	0,08

termos linguísticos, a saber: Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M), Alto (A) e Muito Alto (MA).

Num sistema fuzzy o número de regras linguísticas cresce exponencialmente. Considerando as nove variáveis e os cinco termos linguísticos referidos, ter-se-ia $5^9 = 1.953.125$ regras linguísticas o que, além de exigir muito tempo do pesquisador e especialistas envolvidos, gera um grande esforço computacional. Para contornar essa limitação optou-se por dividir as variáveis de entrada em sistemas fuzzy intermediários e usar a saída desses sistemas como entrada para o sistema final. Assim, conseguiu-se reduzir substancialmente o número de regras linguísticas em cada etapa do processo de modelagem.

Dessa forma, as nove variáveis foram divididas em três grupos de acordo com o peso do IQA, Figura 1. No grupo 1, denominado peso alto, estão os três parâmetros com maior peso no IQA: Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Termotolerantes (CT) e Potencial de Hidrogênio (pH). No segundo grupo, o qual foi chamado de peso médio, estão as quatro variáveis que têm peso intermediário e iguais no IQA: Temperatura, Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (FT) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Já no grupo 3 estão as duas variáveis com menor peso: Turbidez (Tu) e Sólidos Totais (ST). Esses três grupos são usados novamente no sistema realimentando-o para gerar o índice final de qualidade da água do rio Cachoeira.

A primeira etapa consistiu na divisão das nove variáveis em três grupos, conforme explicado acima. A segunda etapa foi a de definição das funções de pertinência para cada uma das variáveis, associando-as aos termos linguísticos Péssimo (PE), Ruim (RU), Regular (RE), Bom (BO) e Excelente (EX) que representam a influência do parâmetro correspondente no índice final de qualidade da água do rio Cachoeira num universo de discurso de 0 a 100, onde 0 representa a pior qualidade e 100 a melhor. A quantidade de termos linguísticos escolhidos está associada aos níveis de classificação de qualidade da água adotados segundo a metodologia clássica de acordo com a Tabela 2.

A terceira etapa do processo de modelagem fuzzy foi a composição das regras linguísticas que teve como premissa para sua definição os pesos de cada um dos parâmetros na Tabela 1, as curvas de variação média do IQA clássico e os conhecimentos práticos de três especialistas.

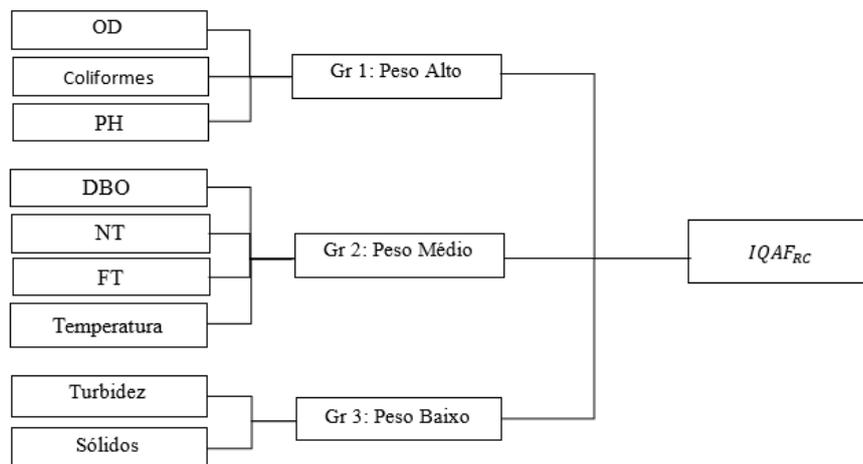


Figura 1. Esquema do sistema de inferência fuzzy

Tabela 2. Classificação do IQA.

Intervalo	Classificação
$79 < IQA \leq 100$	ÓTIMA
$51 < IQA \leq 79$	BOA
$36 < IQA \leq 51$	REGULAR
$19 < IQA \leq 36$	RUIM
$IQA \leq 19$	PÉSSIMO

Utilizou-se o método de Mandami para inferência e o método da centroide para defuzificação. As simulações foram feitas no Matlab (versão R2013a), que é tanto uma linguagem de programação quanto um ambiente de computação técnica e científica. O MatLab dispõe de vários Toolboxes, cada um constando de uma coleção de arquivos destinados a tratar certas classes de problemas científicos. Dentre estes, destaca-se o Fuzzy Logical Toolbox, que é de interesse desse estudo e onde estão disponibilizados arquivos e funções destinadas ao uso da teoria de conjuntos fuzzy.

3 Resultados

A Tabela 3 e os gráficos da Figura 2 permitem comparar os três IQA's (IQA clássico, IQA fuzzy baseado em funções triangulares e trapezoidais e o IQA com funções gaussianas), cujos valores não se distanciam substancialmente. Observando os resultados do IQA clássico e considerando a Tabela 2, constata-se que na maioria das coletas a água ficou classificada como boa, classificação esta predominante nos pontos de coleta 1 e 3. No ponto 2, a classificação da água ficou

Tabela 3. Valores dos IQA's do rio Cachoeira no período de 2010 a 2013.

		IQA Clássico	IQA TripTrap	IQA Gauss
Ponto 1	2010 Campanha 1	64,70	68,02	61,95
	2010 Campanha 2	64,68	67,95	70,24
	2011 Campanha 1	52,17	52,91	52,86
	2011 Campanha 2	56,87	60,00	58,75
	2012 Campanha 1	66,51	62,05	68,94
	2012 Campanha 2	59,31	55,53	44,68
2013	Campanha 1	62,26	66,18	58,30
	Campanha 2	65,48	66,56	64,26
Ponto 2	2010 Campanha 1	35,51	28,06	31,37
	2010 Campanha 2	28,52	28,60	27,44
	2011 Campanha 1	50,80	58,19	48,46
	2011 Campanha 2	49,47	49,13	48,40
	2012 Campanha 1	29,75	30,00	27,61
	2012 Campanha 2	36,60	36,58	28,45
2013	Campanha 1	42,70	40,05	42,34
	Campanha 2	58,04	64,11	62,21
Ponto 3	2010 Campanha 1	62,68	63,49	56,01
	2010 Campanha 2	63,03	61,39	62,76
	2011 Campanha 1	68,59	74,32	73,69
	2011 Campanha 2	64,91	63,16	59,52
	2012 Campanha 1	62,99	64,66	58,65
	2012 Campanha 2	63,15	61,25	56,27
2013	Campanha 1	63,38	63,97	61,47
	Campanha 2	73,19	74,17	70,83
IQA médio		56,05	56,68	53,98

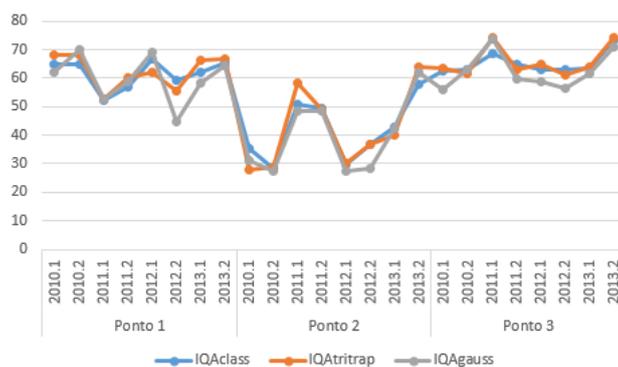


Figura 2. Comparação dos valores dos IQA's ao longo do período de estudo.

entre regular e ruim, sendo classificada como boa apenas na última coleta de 2013.

Os resultados dos novos IQA's fuzzy propostos foram utilizados para fazer novas classificações da qualidade da água das mesmas amostras aplicadas ao IQA clássico, no entanto, sob a ótica de um novo modelo baseado na lógica fuzzy, que rompe com o princípio da dualidade da lógica clássica utilizada na classificação da qualidade da água.

Ao se utilizar a lógica fuzzy como estratégia de modelagem tem-se em mente que um mesmo elemento pode pertencer a mais de um conjunto simultaneamente. Essa característica inerente a lógica fuzzy permite que o resultado do IQA pertença a mais de uma das classes de classificação.

As Figuras 3, 4 e 5 exibem a representação do grau de pertinência do IQA fuzzy baseado em funções triangulares e trapezoidais a cada categoria de classificação (ótima, boa, regular, ruim e péssima) para cada um dos pontos de coleta.

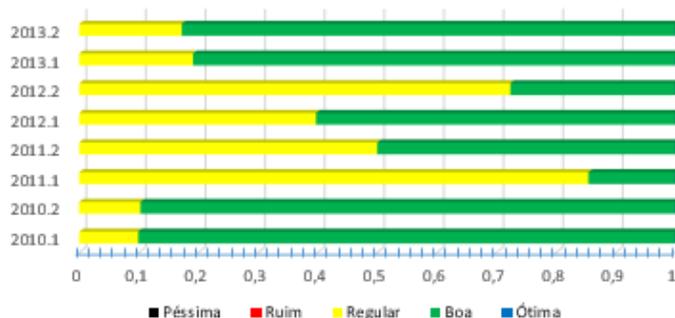


Figura 3. Pertinência do IQA fuzzy do ponto 1 a cada classe de classificação - Sistema Tritrap.

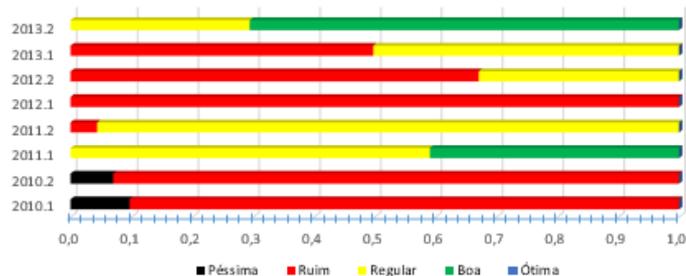


Figura 4. Pertinência do IQA fuzzy do ponto 2 a cada classe de classificação - Sistema Tritrap.

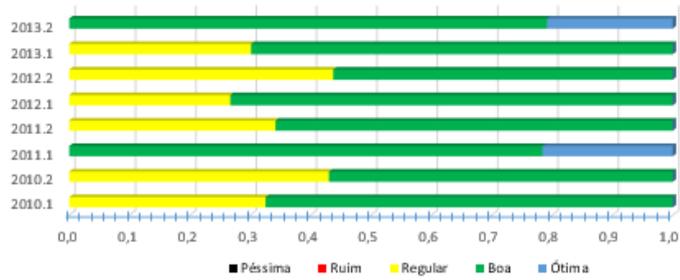


Figura 5. Pertinência do IQA fuzzy do ponto 3 a cada classe de classificação - Sistema Tritrap.

No ponto 1 a classificação da água ficou entre as categorias boa e regular, tendo grau de pertinência maior na categoria boa (em cinco das oito coletas). As três coletas em que o maior grau de pertinência é na categoria regular são também os que apresentaram os valores do IQA clássico mais baixos.

No ponto 2, em apenas duas coletas a água ficou classificada como boa e regular. Nas demais foi classificada em ruim e regular, ruim e péssima, com maior grau de pertinência a categoria ruim. Já no ponto 3, a classificação da água ficou entre boa e regular, boa e ótima (em duas coletas).

As Figuras 6, 7 e 8 mostram a representação gráfica para o IQA fuzzy baseado em funções gaussianas. Nesse caso, em que o resultado do IQA pertence simultaneamente a todas as classificações com diferentes graus de pertinência, no ponto 1 a maior pertinência do IQA se deu as categorias boa e regular, sendo esta última predominante em cinco coletas.

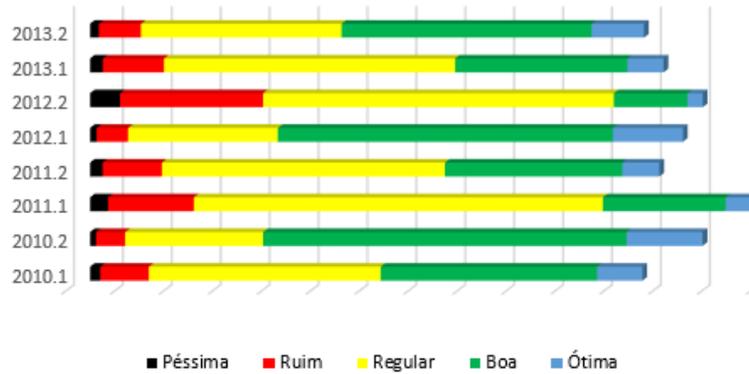


Figura 6. Pertinência do IQA fuzzy do ponto 1 a cada classe de classificação - Sistema Gaussiano.

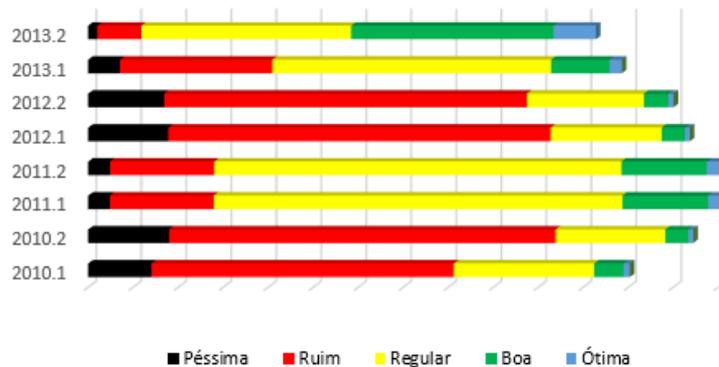


Figura 7. Pertinência do IQA fuzzy do ponto 2 a cada classe de classificação - Sistema Gaussiano.

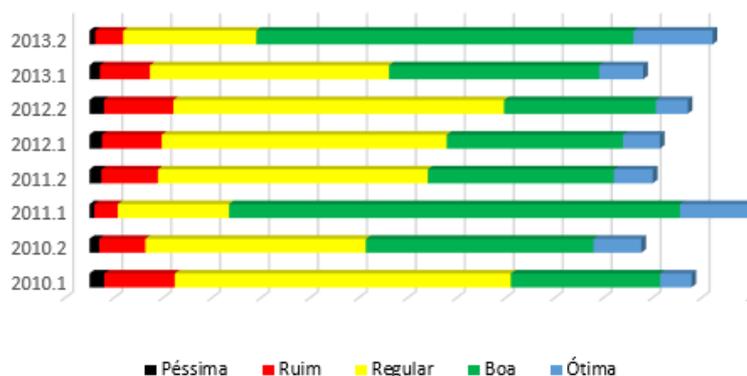


Figura 8. Pertinência do IQA fuzzy do ponto 3 a cada classe de classificação - Sistema Gaussiano.

Na região do ponto 2, a água é classificada predominantemente como ruim em quatro coletas e regular nas outras quatro. Assim como no ponto 1, o ponto 3 tem classificação da água com maior grau de pertinência as classificações boa e regular, conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras 6-8. Analisando esses resultados, percebe-se claramente que no ponto de coleta 2 a água se apresentou mais ambientalmente degradada e, conseqüentemente, merece maior atenção dos programas de monitoramento.

4 Conclusões

A bacia hidrográfica do rio Cachoeira vem sofrendo degradação visível em função das atividades humanas desenvolvidas na região e, em particular, o próprio rio Cachoeira sofre com os efeitos nocivos da poluição, o que prejudica a fauna, a

flora e a própria população. Nesse sentido, este estudo traz uma nova metodologia para análise da qualidade da água desse manancial, apontando o(s) ponto(s) mais críticos de acordo com as coletas realizadas pelo órgão ambiental da região.

Foram feitas simulações de índices de qualidade da água de acordo com a metodologia clássica, com base nas equações desenvolvidas pela NSF, e aplicação da lógica fuzzy. No caso da modelagem fuzzy foram desenvolvidos dois índices de qualidade da água, um com funções triangulares e trapezoidais, outro com funções gaussianas. A criação das funções de pertinência e regras linguísticas levou em consideração a opinião de especialistas e pode ser adaptado a diferentes realidades.

Os resultados dos três índices de qualidade da água se apresentaram não muito distantes, sendo os índices fuzzy mais confiáveis para classificação da qualidade da água, conseguindo distribuir melhor a influência dos parâmetros para obter um IQA mais coerente com o conjunto de parâmetros e não com seus valores individuais. Nesse sentido, o IQA gaussiano é mais criterioso e pouco influenciado negativamente se apenas um valor de parâmetro estiver muito discrepante em relação aos demais. Para que esse IQA seja muito alto ou muito baixo é preciso que todos os parâmetros tenham seus valores próximos do ideal ou muito discrepantes.

Com os dados simulados, observou-se que o ponto 2 apresenta os piores índices, tanto do ponto de vista da metodologia tradicional quanto da abordagem fuzzy. Esse ponto está localizado na zona urbana de Itabuna e recebe grandes quantidades de despejos orgânicos, apresentando concentrações de oxigênio dissolvido e coliformes termotolerantes fora dos padrões em quase todas as coletas, o que justifica os resultados. Nesse ponto a qualidade da água, na maioria das coletas, foi classificada como ruim, de acordo com os resultados do IQA clássico.

No caso da modelagem com funções triangulares e trapezoidais, o IQA pertenceu mais a classe ruim (em cinco das oito coletas), chegando a pertencer também a classe péssima em duas delas, conforme pode ser observado na Figura 4. No caso da modelagem com funções gaussianas, apesar do IQA pertencer a todas as categorias com diferentes graus de pertinência, o maior percentual de pertencimento na maioria das coletas também ficou na classe ruim, evidenciado na Figura 7.

Os pontos 1 e 3 apresentaram os melhores resultados em termos de qualidade da água. Nestes a classificação foi predominantemente boa segundo a metodologia clássica e, na abordagem fuzzy ficou com maior grau de pertinência entre as categorias regular e boa.

Investimento em projetos de pesquisa que visem a recuperação do rio Cachoeira, principalmente nos lugares mais afetados pela poluição, torna-se imprescindível de forma a garantir a manutenção da biodiversidade aquática, assim como manter a qualidade da água a ser utilizada pela população.

Acredita-se que este trabalho traga contribuições importantes e possa agregar conhecimentos na área de modelagem de qualidade da água utilizando estratégias baseadas em lógica fuzzy, sinalizando uma alternativa interessante com a qual outros estudos em qualidade de recursos hídricos das bacias da região poderão

ser desenvolvidos, considerando os aspectos subjetivos tão comuns nessa área. Além disso traz uma nova abordagem sobre o estudo da qualidade da água do rio Cachoeira, uma vez que não existem estudos com metodologia fuzzy na avaliação de qualidade da água dos mananciais da região.

Referências

1. Nacif, P.G.S., Costa, L.M., Saadi, A., Fernandes Filho, E.I., Ker, J.C., Costa, O.V., Moreau, M.S: Ambientes naturais da bacia hidrográfica do rio Cachoeira. Cruz das Almas, Brasil (2003).
2. Pinho, A. G: Estudo da qualidade das águas do rio Cachoeira - região sul da Bahia. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Brasil (2001).
3. Lucio, M. Z. T. P. Q. L: Hydrochemistry of Cachoeira River (Bahia State, Brazil). *Acta Limnologica Brasiliensia*, vol. 24, n. 2, pp. 181–192 (2012).
4. Correia, M. A.: Análise histológica e ultraestrutural em *Tilapia Rendalli* como instrumento de avaliação ambiental do rio Cachoeira, Bahia. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Brasil (2013).
5. Paulo, D. V.; Fontes, F. M.; Lopes, F. F.: Histopathological alterations observed in the liver of *Poecilia Vivipara* (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) as a tool for the environmental quality assessment of the Cachoeira River, BA. *Braz. J. Biol.*, vol. 72, n. 1, pp. 131–140 (2012).
6. Santos, J. S.; Souza, F. M.; Santos, M. L. P.: Distribuição de Zn, Pb, Ni, Cu, Mn e Fe nas Frações do Sedimento Superficial do Rio Cachoeira na Região Sul da Bahia, Brasil. *Química Nova*, vol. 36, n. 2, pp. 230–236 (2013).
7. Souza, M. F. L.; Eça, G. F.; Silva, M. A. M.; Amorim, F. A. C.; Lobo, I. P.: Distribuição de Nutrientes Dissolvidos e Clorofila-a no Estuário do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil. *Atlântica*, vol. 31, n. 1, pp. 107–121 (2009).
8. Lermontov, A., Yokoyama, L.; Lermontov, M.; Machado, M. A. S.: Aplicação da lógica nebulosa na parametrização de um novo Índice de qualidade das Águas. *Engvista*. 2, 106-125 (2008).
9. Chau, K: A review on the integration of artificial intelligence into coastal modeling. *Journal of Environmental Management*. 80, 47-57 (2006).
10. CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, 2004. Índice de Qualidade das Águas. Disponível em: < [http : //www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br) >. Acesso em: 15 de abril de 2016.