

**IX-004 - GARANTIA *FUZZY* DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA
DESTINADA À IRRIGAÇÃO NA BACIA DO ARARIPE,
NORDESTE DO BRASIL**

Osmar Luiz Moreira Pereira Fonseca de Menezes⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC) - *Campus* Cariri. Mestrando em Engenharia Civil - Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Claire Anne Viana de Sousa

Geóloga pela UFC. Mestre em Desenvolvimento e Meio-Ambiente pela UFC. Analista em Gestão de Recursos Hídricos da COGERH - Sub-bacia do Salgado.

Fernando José Araújo da Silva

Engenheiro Civil pela Universidade de Fortaleza (UNIFOR). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - *Campus* II. Doutor em Engenharia Civil - Saneamento Ambiental pela UFC. Professor Adjunto da UFC e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pós-DEHA/UFC.

Endereço⁽¹⁾: Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Centro de Tecnologia e Geociências (CTG - UFPE) - Bloco de Hidráulica e Saneamento - Cidade Universitária - Recife - PE - CEP: 50.740-530 - Brasil - Tel: +55(81)21268229 - Fax: +55(81)21268219 - e-mail: osmarluizmpfm@hotmail.com

RESUMO

O objetivo deste estudo foi calcular a garantia da água subterrânea para irrigação na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil, em relação aos valores normativos. Uma alternativa de cálculo é a aritmética *fuzzy*. A metodologia leva em conta as incertezas do sistema e opera mesmo com base de dados limitada. Foram selecionados quatro poços que fornecem água para irrigação: dois em Missão Velha (CE) e dois em Juazeiro do Norte (CE). Calculou-se a garantia em relação aos limites normativos para este uso e em relação aos padrões de consumo humano, a fim de se comparar. Com pequena adequação de manganês, um dos poços necessita de correção na concentração deste metal para evitar danos à tubulação. Quanto ao consumo humano, características do solo e poluição antrópica conferiram altos riscos a outro poço. O mesmo poço, entretanto, apresenta garantia máxima para irrigação, uso ao qual é destinado. A lógica *fuzzy* foi capaz de fornecer quantitativamente a adequação às normas ambientais, com identificação dos parâmetros em maior desacordo. Os resultados tornam possível definir as medidas prioritárias.

PALAVRAS-CHAVE: Água subterrânea, Aritmética *fuzzy*, Índice de qualidade, Irrigação.

INTRODUÇÃO

A Bacia do Araripe, região semiárida do sul Cearense, se caracteriza por baixa pluviosidade e evapotranspiração elevada. Contudo, é a maior reserva de água subterrânea do estado do Ceará e uma das principais do Nordeste brasileiro (COGERH, 2009). Além de suprir o consumo humano, esta reserva é fonte para o desenvolvimento das atividades agropecuárias, principalmente irrigação.

A qualidade da água pode ser afetada por fatores antrópicos ou ter características naturais que restrinjam seu emprego. A CONAMA 396/08 regulamenta os usos para águas subterrâneas com diferentes características físico-químicas e biológicas através dos valores máximos permitidos para os parâmetros. Complementarmente, a Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde define as concentrações para o consumo humano.

Para fins de irrigação, quando uma água está em discordância com os padrões normativos, optar pelo tratamento é uma decisão de cunho econômico e deve estar pautada nos seguintes questionamentos:

- a) Quais os impactos do parâmetro em concentração inadequada no desempenho da cultura irrigada, no sistema de irrigação, no solo e na saúde do consumidor?
- b) Existem outras fontes disponíveis?
- c) Existe acesso a um tratamento capaz de remover o parâmetro em concentração arriscada?
- d) Tal processo gera resíduos indesejados?

- e) Quais os custos de implantação e manutenção do tratamento?
- f) O retorno é maior que o investimento total?

Na destinação para consumo humano, o caráter social da discussão se sobrepõe ao econômico. Neste caso, vale lembrar que, mesmo quando não é necessário um tratamento parcial ou completo, a desinfecção é indispensável (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Como subsídio para tomada de decisão, os resultados das análises são obtidos através de poucas campanhas de monitoramento. Grandes bases de dados provêm de um dispêndio pouco viável de capital e tempo. Quanto à qualidade da água subterrânea, os recursos são limitados e esperam-se resultados rápidos, com fins na aplicação de medidas corretivas.

A garantia da qualidade da água mede o atendimento aos limites estabelecidos por uma norma ambiental para um uso específico. Uma alternativa de cálculo é através de aritmética *fuzzy*, também denominada nebulosa ou difusa. Trata-se de uma ferramenta de fácil aplicação e capaz de oferecer resultados consistentes mesmo com poucos dados.

A lógica *fuzzy* apresenta-se mais eficaz que a Teoria das Probabilidades na representação de incertezas. Enquanto os conjuntos tradicionais impõem pertinências igual a 0 (não pertence) ou 1 (pertence), a teoria dos conjuntos *fuzzy* trabalha com limites mais vagos. Nesta abordagem, a pertinência de um número varia continuamente de 0 a 1 em função de sua representatividade no conjunto (BOGARDI; DUCKSTEIN, 2002).

Como representações simplificadas, os números *fuzzy* triangulares (NFTs) são definidos por três valores: o mínimo, o mais provável e o máximo. Na Figura 1, observa-se que a pertinência μ parte de 0 no valor mínimo (a), chega a 1 no mais provável (b) e decresce até 0 no valor máximo (c). O índice de concordância *fuzzy* (I_{CF}) de um NFT e um número não difuso contínuo à esquerda, com $x \leq H$, ou à direita, com $x \geq H$, é a razão entre a área de interseção desses números e a área do NFT, como na Equação 1 (KAUFMANN; GUPTA, 1991).

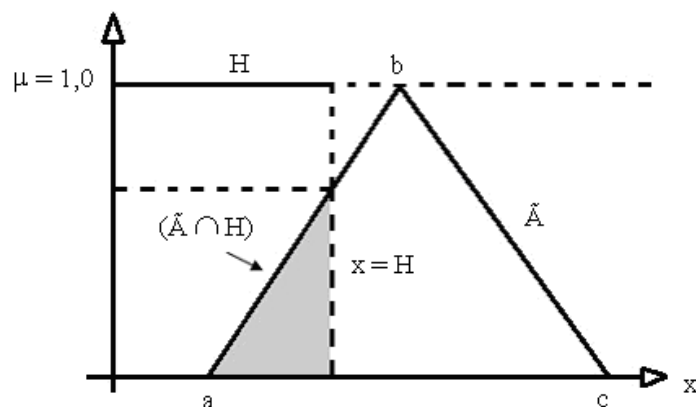


Figura 1: Interseção entre um número *fuzzy* triangular (\tilde{A}) e um não difuso (H)

Fonte: Kaufmann e Gupta, 1991

$$I_{CF} = \frac{\text{Área } (\tilde{A} \cap H)}{\text{Área } \tilde{A}} \in [0,1] \quad \text{equação (1)}$$

O presente trabalho teve como escopo o cálculo da garantia da água subterrânea empregada na irrigação na Bacia do Araripe em relação aos valores normativos. Cotejada com esta situação estão os riscos de que os mesmos poços supririam o consumo humano. Propõe-se ainda uma discussão acerca das consequências de determinados poluentes acima do valor recomendado e soluções para essas águas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os parâmetros deste estudo e as concentrações limites estão definidas em CONAMA (2008) e BRASIL (2011), de acordo com os quadros 1 e 2. Nos casos em que os parâmetros tinham valor máximo permitido variável para um mesmo uso, adotaram-se os mais restritivos.

A garantia *fuzzy* foi expressa pelo Índice de concordância *fuzzy*. Realizou-se seu cômputo em planilha eletrônica. Definiu-se I_{CF} no intervalo de 0 a 1. Quanto maior a interseção (i. e. concordância) entre a concentração observada e os valores recomendados em norma, maior o valor de I_{CF} . 0 representa falha total do sistema, ao passo que 1 é o valor de garantia máxima.

Tabela 1: Valores máximos permitidos para os parâmetros especificados na resolução CONAMA 396/2008

Parâmetro	Valor máximo permitido (µg/L)	
	Irrigação	Consumo humano
Sólidos Totais Dissolvidos	-	1.000.000
Dureza	-	500.000
Sódio	-	200.000
Cloreto	100.000 a 700.000	250.000
Sulfato	-	250.000
Nitrito	3.300	3.300
Nitrato	-	45.000
Coliformes termotolerantes	-	Ausência
Alumínio	5.000	200
Antimônio	-	5
Arsênio	-	10
Bário	-	700
Berílio	100	4
Boro	500	500
Cádmio	10	5
Chumbo	5.000	10
Cianeto	-	70
Cobalto	50	-
Cobre	200	2.000
Cromo	100	50
Ferro	5.000	300
Fluoreto	5.000	300
Lítio	2.500	-
Manganês	200	100
Mercúrio	2	1
Níquel	200	20
Prata	-	100
Selênio	20	10
Urânio	10	15
Vanádio	100	50
Zinco	2.000	5.000

Tabela 2: Valores máximos permitidos para os demais parâmetros especificados para consumo humano na Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde

Parâmetro	Valor máximo permitido
pH	6 a 9,5
Turbidez (uT)	5
Cor (uH)	15
Coliformes termotolerantes	Ausência

A concentração de dado parâmetro no intervalo de monitoramento foi representada por um NFT. A Figura 2 mostra diferentes situações de interseção entre o NFT e o limite ambiental. Os parâmetros pH para consumo humano e cloreto para irrigação devem ter suas concentrações restritas à um intervalo. A abordagem (b) define tal situação. Para os demais parâmetros, esperam-se valores abaixo de um limite permitido. Portanto, a interseção é contínua à esquerda, como em (a).

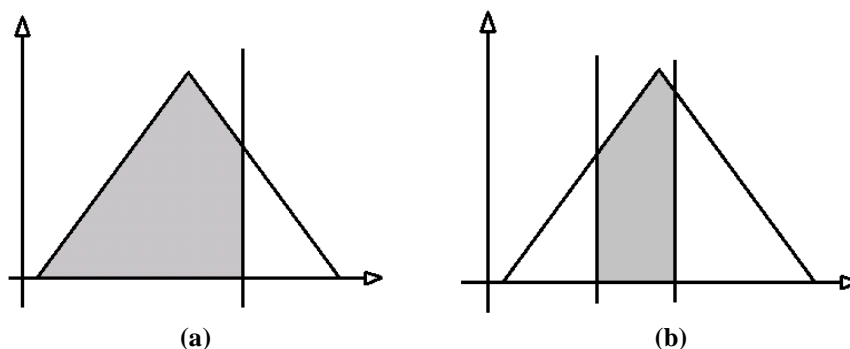


Figura 2: I_{CF} definido pela interseção à esquerda (a) ou pela interseção em intervalo (b)
Fonte: os autores

Na construção dos NFTs, os mínimos e máximos foram os observados nas análises. Adotou-se a mediana como valor mais provável, por ser um descritor menos sensível a valores extremos.

Os poços selecionados forneciam água para irrigação na região da Bacia do Araripe, Ceará. Suas informações estão no Quadro 3.

Os dados de qualidade analisados tiveram origem em quatro campanhas realizadas em janeiro, abril, julho e outubro de 2011 pela Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos - COGERH. Foram, portanto, quatro valores de concentração para cada parâmetro. A campanha de janeiro de 2011 não incluiu análise de metais-traço no poço JN₂. Com apenas três dados, optou-se por não calcular a garantia *fuzzy* de tais poluentes neste poço. Os resultados das análises e o resumo estatístico se encontram em COGERH (2011).

Tabela 3: Poços em estudo

Poço	Local	Coord. geográficas		Prof. (m)	NE (m)	ND (m)	Vazão (m ³ /h)
		Lat.	Lon.				
JN ₁	Fazenda Boca das Cobras, Juazeiro do Norte	7°10'42" s	39°16'23" o	110	17,7	20,1	5,3
JN ₂	Verdureiro/Malvas, Juazeiro do Norte	7°12'4" s	39°18'2" o	8	0,7	-	-
MV ₁	Sítio Barreiras, Missão Velha	7°21'27" s	39°13'4" o	-	28	36,8	27,5
MV ₂	Projeto Fruticultura, Missão Velha	7°15'13" s	39°9'48" o	180	-	-	45

Fonte: adaptado de COGERH (2011)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de concordância *fuzzy* para os limites normativos de irrigação está no Quadro 4. A garantia nula de cloreto nos poços JN₁, MV₁ e MV₂ se deve apenas à baixa concentração desta substância, com valores inferiores a 100 mg/L. Para irrigação, cloreto é recomendado entre 100 e 700 mg/L. Há que se considerar, entretanto, o tipo de cultura desenvolvida e o possível e raro impacto da baixa concentração de cloreto nesta cultura.

Tabela 4: I_{CF} nos poços a partir dos limites normativos determinados para irrigação

Parâmetros*	Poços			
	JN ₁	JN ₂	MV ₁	MV ₂
Cloreto	0,00	1,00	0,00	0,00
Manganês	-	1,00	1,00	0,53

* Demais parâmetros apresentaram I_{CF} igual a 1,00 nos poços em que se aplicaram.

Fonte: os autores

A única situação que requereria correção foi a concentração de manganês em MV₂. Sua garantia foi apenas um pouco superior a 50%. O manganês em excesso pode precipitar nas tubulações, diminuindo a área de escoamento. A perda de carga aumenta, a pressão diminui e, em alguns casos, pode ocorrer entupimento dos tubos. Tradicionalmente, remove-se manganês através de oxidação por aeração com posterior sedimentação e filtração. Existe ainda a opção do emprego de compostos como agentes oxidantes (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A garantia dos mesmos poços que analisa a possibilidade da água ser empregada no consumo humano está no Quadro 5. O poço com pior desempenho foi o JN₂. Foram observadas altas concentrações de nitrato, bário, ferro e alterações no pH. Nitrato em desacordo com o limite normativo pode ter causas antrópicas e é responsável pela doença do bebê azul. VARNIER *et al.* (2010) afirma que a principal fonte deste poluente em áreas habitadas são fossas sépticas, sumidouros ou sistema de coleta em mau funcionamento.

Tabela 5: I_{CF} nos poços a partir dos limites normativos determinados para consumo humano

Parâmetros*	Poços			
	JN ₁	JN ₂	MV ₁	MV ₂
pH	1,00	0,27	1,00	1,00
Cor	0,97	0,87	1,00	0,97
Nitrato	1,00	0,00	1,00	1,00
Coliformes termotolerantes	0,00	0,00	0,00	0,00
Bário	-	0,04	1,00	1,00
Ferro	-	0,54	1,00	1,00
Manganês	-	1,00	1,00	0,00

* Demais parâmetros apresentaram I_{CF} igual a 1,00 nos poços em que se aplicaram

Fonte: os autores

Ainda em JN₂, os metais em desacordo foram o ferro e o bário. Ambos são de origem natural do solo e, acima do valor permitido, se tornam nocivos ao organismo. Contudo, verifica-se desempenho máximo do poço JN₂ na irrigação, uso para o qual é destinado.

Quanto ao MV₂, o problema estava novamente na concentração de manganês. Com limite mais restritivo neste caso, a garantia observada foi mínima (i. e. risco máximo).

Coliformes termotolerantes não são aceitáveis pela portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde e tiveram garantia nula. De qualquer maneira, o abastecimento humano exige desinfecção, capaz de eliminar os indicadores de patógenos. Na desinfecção por cloração, o cuidado deve estar voltado à presença de matéria orgânica e a formação dos organoclorados, substâncias carcinogênicas.

Dentre todos os poços e nas condições de operações verificadas, apenas o MV_1 poderia ser aproveitado para consumo humano com garantia máxima.

CONCLUSÕES

A lógica *fuzzy* mostra-se capaz de fornecer quantitativamente a adequação dos poços aos padrões de norma ambiental, mesmo com pequena base de dados. As variações temporais e incertezas das análises estão embutidas no método. Com valores de garantia em mãos, é possível identificar os parâmetros em maior desacordo e priorizar as soluções.

A qualidade para irrigação dos poços analisados sugere correção apenas na concentração de manganês do poço MV_2 . O tratamento é necessário à manutenção dos tubos.

Características do solo e más condições de operação tornam o JN_2 inviável para consumo humano. No entanto, o poço permanece com concentrações dentro do padrão de irrigação. O MV_1 é o único capaz de atender a uma possível demanda de abastecimento humano com garantia máxima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BOGARDI, I.; DUCKSTEIN, L. The Fuzzy Logic paradigm of risk analysis. In: Risk Based Decision making in water Resources X. Ed. Y. Y. Haimes, D. A. Moser and E. Z. Stakhiv. ASCE: New York, 2002.
2. BRASIL. Portaria número 2914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da Saúde. Diário Oficial da União: Brasília, 2011.
3. COGERH. Estudo da qualidade das águas subterrâneas da Bacia do Araripe, Ceará. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos: Fortaleza, 2011.
4. COGERH. Plano de monitoramento e gestão dos aquíferos da Bacia do Araripe, Estado do Ceará. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos: Fortaleza, 2009.
5. CONAMA. Resolução número 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 2008.
6. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. Métodos e técnicas para tratamento de água. 2. ed. v. 2. RIMA: São Carlos, 2005.
7. KAUFMANN, A.; GUPTA, M. M. Introduction of fuzzy arithmetic: theory and applications. Van Nostrand Reinhold: New York, 1991.
8. VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M. ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R. Nitrato nas águas subterrâneas do sistema aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP). Revista do instituto geológico, v. 31, n. 1-2, p. 1-21, 2010.