

APLICAÇÃO DA TEORIA FUZZY NOS MODELOS DE DBO-OD PARA CALCULAR O RISCO DE CONTAMINAÇÃO NO RIO POTENGI, NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

Patrícia Freire Chagas¹; Carla Freitas de Andrade² & Raimundo Oliveira de Souza³

RESUMO - Este trabalho trata da aplicação da teoria *fuzzy* em modelos de transporte de poluente, para estudar o risco de degradação ambiental no rio Potengi, nas proximidades da cidade de Natal, no estado do Rio Grande do Norte. Assim, o modelo de DBO-OD é transformado em um novo modelo *fuzzy*, que uma vez resolvido, permite determinar a distribuição da concentração de OD, ao longo do rio em estudo. É importante citar que, neste caso, esta distribuição de concentração é calculada em forma de funções de pertinências, de tal modo que seja possível determinar o cálculo do risco ambiental em toda e extensão do rio. Os resultados mostraram que rios como o Potengi tem sua capacidade de autodepuração variável sazonalmente em função das condições hidrológicas da sua bacia hidrográfica, e que a teoria *fuzzy* pode se tornar uma importante ferramenta na determinação do risco ambiental em corpos d'água.

ABSTRACT – This research concerns of the application of the fuzzy theory in the pollutant transport models of pollutant, to study the risk of environmental degradation in the Potengi river, near to the city of Natal, in the state of Rio Grande do Norte. In such away, the DBO-OD model is transformed in a new one, with characteristic of fuzzy model, that once resolved, it allows to determine the distribution of the concentration of OD, along the river in study. It is important to mention that, in this case, this concentration distribution is calculated in form of membership functions, so that it is possible to determine the calculation of the environmental risk in all extension of the river. The results showed that rivers as Potengi, has its capacity of auto depuration that depends on the period of the year, in function of the hydrological conditions of its watershed, and that the fuzzy theory can become an important tool in the determination of the environmental risk in bodies of water.

Palavras-chaves: Teoria Fuzzy; modelos de qualidade de água; risco ambiental.

1 - INTRODUÇÃO

1) Doutora em Recursos Hídricos – Instituto de Gestão de Água do Rio Grande do Norte – IGARN - Rua São João 1233 – apto 1901 – Bl A – Lagoa Seca – Natal –RN. Fone: (84) 3213-4870 **Email:** pfchagas@yahoo.com

2) Doutora em Recursos Hídricos - Depto de Engenharia Hidráulica e Ambiental - UFC – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 3366.9771, (85) 32625464.– e-mail: engenheiracarla@yahoo.com Professora da Faculdade Christus.

3) Professor PHD - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 3366.9771. Fax: (85) 3366.9627 – e-mail: rsouza@ufc.br

O estudo de qualidade de água, através de modelagem matemática, tem se tornado uma boa metodologia para avaliar e prognosticar o estado ambiental dos corpos d'água. Neste contexto, os rios e canais têm sido estudados com mais frequência do que os outros corpos d'água, provavelmente refletindo o fato da maioria das pessoas viverem próximas ou interagindo com estes corpos hídricos. Muitos já são os rios que estão com suas águas completamente poluídas, fruto do lançamento de despejos originários de esgotos de grandes cidades e de áreas irrigadas. Além disso, como os rios são exemplos de ecossistemas bastante ricos e diversificados, em qualquer análise da qualidade de água, deve-se levar em conta tal fato (THOMANN; MUELLER, 1987).

Durante a modelagem de um rio, também, deve-se ter em mente que a qualidade das águas muda ao longo do ano, em função de fatores meteorológicos, da eventual sazonalidade de lançamentos de poluentes e das vazões. Daí a importância de se conhecer o comportamento fluvial de um rio, como primeiro passo no processo da modelagem de qualidade de água.

O conceito de poluição hídrica está associado aos usos da água e aos danos que ela pode causar ao homem, ou outras formas de vida. As principais fontes de poluição das águas superficiais são esgotos domésticos, esgotos industriais, detergentes, resíduos sólidos, pesticidas e fertilizantes provenientes das atividades agrícolas, e águas pluviais.

Esses efluentes podem conter substâncias que alteram as características da água tais como, compostos orgânicos, microrganismos patogênicos, metais pesados, entre outros. As águas residuárias domésticas, e grande parte dos resíduos industriais apresentam uma considerável parcela de compostos orgânicos, isto é, moléculas de alta estrutura e elevado potencial energético.

Os esgotos domésticos também podem ser ricos em microrganismos patogênicos. Esses microrganismos são introduzidos na água juntamente com as fezes humanas. Para determinar a presença, ou não, desses microrganismos, utiliza-se um indicador que são as bactérias do grupo coliformes.

Deste modo, quando se deseja estudar a capacidade de autodepuração de recursos hídricos, dois parâmetros, pelo menos, devem ser considerados: o Oxigênio Dissolvido (OD), indicador dos processos bioquímicos de estabilização da matéria orgânica, estando, portanto, relacionado com as variações da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e o índice de coliformes, o qual está associado à depuração, do ponto de vista bacteriológico (CHAGAS,2005).

Por outro lado, tendo em vista às incertezas encontradas nos bancos de dados, associados aos erros de aproximação nos métodos de solução das equações diferenciais, presente nos modelos, muitos dos resultados encontrados nestas simulações, nem sempre estão compatíveis com a realizada. Há, nestes casos, a necessidade de se dar um tratamento estatístico aos modelos de modo

que incertezas, presentes nos processos de solução, possam ser avaliadas. Dentre as maneiras de se avaliar e quantificar incerteza, destaca-se a teoria *fuzzy*, uma metodologia baseada nos conjuntos dos números nebulosos e que tem se mostrado como uma boa ferramenta na avaliação do risco ambiental em corpos d'água.

Este trabalho aplicou um modelo matemático, com base na teoria fuzzy, no rio Potengi, situado nas proximidades da cidade de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, para estudar o comportamento do risco de degradação ambiental naquele rio, tomando como base à distribuição de oxigênio dissolvido, a partir de lançamentos de efluentes domésticos provenientes da cidade em questão.

Os resultados mostraram que esta metodologia tem excelentes perspectivas para se tornar um método efetivo para o cálculo do risco de contaminação de corpos d'água, sujeitos a lançamentos de efluentes de qualquer natureza.

2 - MODELOS DE DBO E OD

O modelo que está sendo usado nesta pesquisa refere-se à Equação Diferencial da Difusão Advectiva, em uma dimensão, tendo como substâncias analisadas a Demanda Bioquímica de Oxigênio e o Oxigênio Dissolvido, normalmente conhecido como Modelo de DBO-OD. Neste caso, a referida equação, em sua forma *fuzzy*, é usada no Rio Potengi, para avaliar a distribuição da Concentração do Oxigênio Dissolvido, em forma de funções de pertinências. Assim, as equações para a Demanda Bioquímica de Oxigênio e para o Oxigênio Dissolvido foram definidas através das equações abaixo, (JAMES, 1994).

- Equação de DBO:

$$\frac{\partial L}{\partial t} + u \frac{\partial L}{\partial x} + L \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AE \frac{\partial L}{\partial x}) - K_R L + S_D \quad (1)$$

- Equação de OD:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + C \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AE \frac{\partial C}{\partial x}) - K_R L + K_A (C_S - C) \quad (2)$$

L é a concentração da DBO, em mg/l;

u é a velocidade longitudinal do escoamento em m/s;

E é o coeficiente de dispersão longitudinal, em m²/s;

K_r é o coeficiente de desoxigenação, em T^{-1} ;

S_d taxa de lançamento difuso, se houver, em mg/l por segundo;

K_a é a coeficiente de reaeração, em T^{-1} ;

C é a concentração de OD, em mg/l;

C_s é a concentração de saturação do Oxigênio Saturado; e

A é a área da seção transversal do rio considerado, em m^2 .

A concentração de saturação do Oxigênio Dissolvido pode ser calculada através da expressão, Thomann (1986):

$$C_s = \exp(z) \quad (3)$$

onde z é definido por,

$$z = -139,34411 + \frac{1,575701 * 10^5}{T} - \frac{6,642308 * 10^7}{T^2} + \frac{1,2438 * 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 * 10^{11}}{T^4} \quad (4)$$

com T sendo a temperatura da água, em graus Kelvin.

Aplicando, a este conjunto de equações, a teoria *fuzzy*, onde os parâmetros passam a ser considerados como números *fuzzy*, as novas equações se transformam em, (CHAGAS,2007),

- Para a DBO

$$\frac{\partial \tilde{L}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{L}}{\partial x} + \tilde{L} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{A} \tilde{E} \frac{\partial \tilde{L}}{\partial x}) - \tilde{K}_R \tilde{L} + \tilde{S}_D \quad (5)$$

- Para o OD

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + \tilde{C} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{A} \tilde{E} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x}) - \tilde{K}_R \tilde{C} + \tilde{K}_A (\tilde{C}_s - \tilde{C}) \quad (6)$$

onde \tilde{f} representa funções de pertinências.

Neste conjunto de equações os parâmetros são definidos em forma de funções pertinências e as concentrações de DBO e de OD são calculadas, também, como funções de pertinências.

Com relação ao cálculo do risco foi usada uma formulação proposta por Ganoulis (1994). Assim, seja \tilde{R} a função de pertinência de resistência representando os limites máximos de concentrações permitidos para determinados usos, em um sistema hídrico qualquer. Seja \tilde{C} uma função de pertinência de concentração calculada através do modelo matemático proposto neste estudo, e que representa a resposta do sistema receptor ao lançamento de determinadas substâncias.

A margem de segurança, \tilde{M} , deste corpo hídrico, pode ser representada pela diferença entre a função de pertinência da resistência \tilde{R} , e a função de pertinência da concentração calculada \tilde{C} que representa a resposta aos possíveis lançamentos de cargas poluentes neste corpo hídrico.

O índice de *fuzzy* é então definido como sendo:

$$R_f = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (7)$$

Enquanto que o índice de confiabilidade é definido por:

$$R_c = \frac{\int_0^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (8)$$

É importante observar que tanto R_f como R_c são funções reais definidas no intervalo de $[0,1]$ e dependem, fundamentalmente, dos parâmetros hidráulicos/hidrológicos, da natureza, da capacidade de escoamento do canal e do tempo.

Para a aplicação do modelo foram utilizados os dados do rio Potengi, situado no Estado do Rio Grande do Norte. Desaguando junto à cidade de Natal, o rio Potengi forma uma planície flúvio-marinha que, para montante, transforma-se em planície fluvial, ambas pertencentes à unidade geomorfológica da Faixa Litorânea e envolvidas por relevos tabulares dos Tabuleiros Costeiros, predominantes na porção sul da bacia. Do ponto de vista de uso, é importante dizer que o rio Potengi, por estar escoando por uma região de alta densidade populacional, permite o desenvolvimento de atividades nos mais diversos setores da sociedade. Desta forma, seus dados

foram usados no modelo matemático para avaliar a capacidade de depuração do mesmo, após o recebimento de esgotos domésticos. Os parâmetros de qualidade de água utilizados nas simulações foram:

- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)
- Oxigênio Dissolvido (OD)

A vazão de lançamento é estimada em um ponto onde a influência das marés pode ser desprezada. Isto ocorre em um ponto distante 9km da foz do rio e seu valor é de $0,887 \text{ m}^3/\text{s}$.

Normalmente, os componentes de esgotos domésticos, usados neste trabalho, sem qualquer tratamento, possuem as seguintes concentrações:

- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): $300 \text{ mg} / \text{l}$.
- Oxigênio Dissolvido (OD): zero

As simulações foram realizadas para as situações mais favoráveis e mais desfavoráveis dos rios. Na situação mais favorável foi considerada uma vazão de $14,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Já para a situação mais desfavorável foi considerada uma vazão de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na solução do problema, através do modelo matemático, foram considerados, para as condições de iniciais, os seguintes parâmetros:

- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) - 2 mg/l
- Oxigênio Dissolvido de Saturação - 8 mg/l

As características hidráulicas da calha do rio Potengi foram consideradas com os seguintes valores:

- Forma da Seção: Retangular
- Largura do canal: 37m
- Declividade longitudinal: $0,00004$
- Coeficiente de Manning: $0,01$

Para as características de Autodepuração do rio foram considerados os valores, para K_r , $0,23 \text{ d}^{-1}$. O Coeficiente de decaimento bacteriano assumido para a simulação dos coliformes foi de $1,5 \text{ d}^{-1}$. O Coeficiente de reaeração foi estimado em $0,46 \text{ d}^{-1}$.

3 – RESULTADOS

A função de pertinência de resistência utilizada nas simulações de OD é [4, 6, 7]. As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados obtidos para as funções de pertinência do oxigênio dissolvido para um tempo de 8 horas, em uma seção a 4,5km do ponto de lançamento e para os cenários de escoamentos anteriores. Verifica-se que para os vários lançamentos de DBO a variação das funções de pertinência é mais latente no cenário de baixa vazão. Neste caso, quando o lançamento varia de 50 mg/l para 200mg/l, a concentração com maior grau de pertinência varia de 6mg/l para 7 mg/l. Já para o cenário de estação chuvosa, a concentração com maior grau de pertinência fica em torno de 7,2 mg/l.

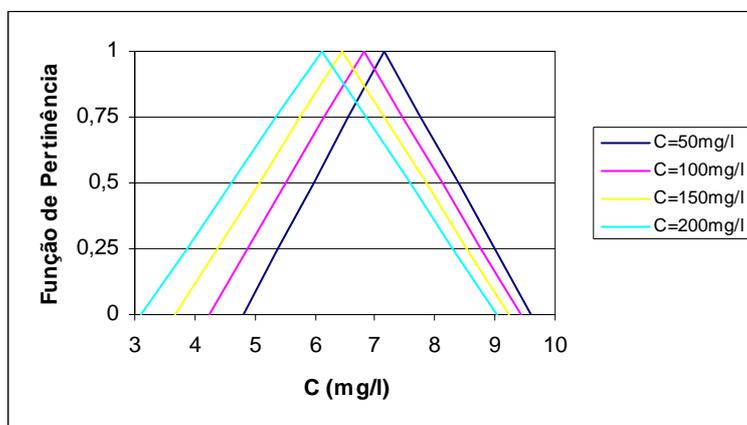


Figura 1 – Representação *fuzzy* da concentração final de OD no rio Potengi, em x=4,5km e t=8h, com $Q=2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ para 4 lançamentos distintos.

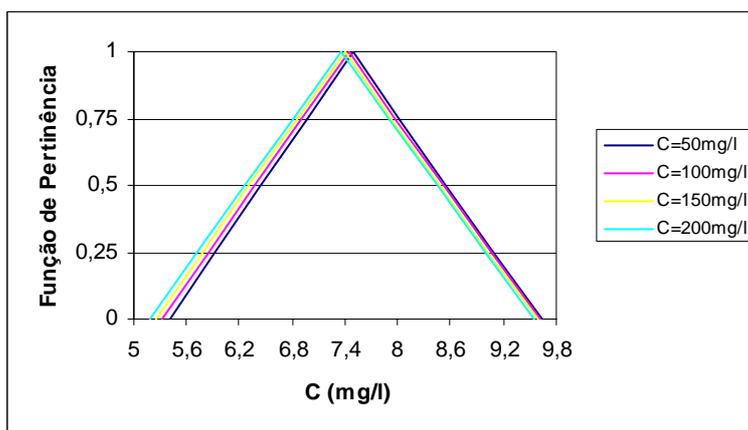


Figura 2 – Representação *fuzzy* da concentração final de OD no rio Potengi, em x=4,5km e t=8h, com $Q=14,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para 4 lançamentos distintos.

Estes resultados são determinantes no cálculo das funções de pertinência para as concentrações marginais de segurança do sistema em estudo. Assim, as figuras 3 e 4 mostram estas funções para os dois cenários e com os mesmos valores de lançamentos da DBO anteriores. Observa-se que, como na análise das concentrações de coliformes, as baixas vazões provocam um deslocamento nas funções marginais de segurança para a esquerda, aumentando assim o risco de falha do sistema.

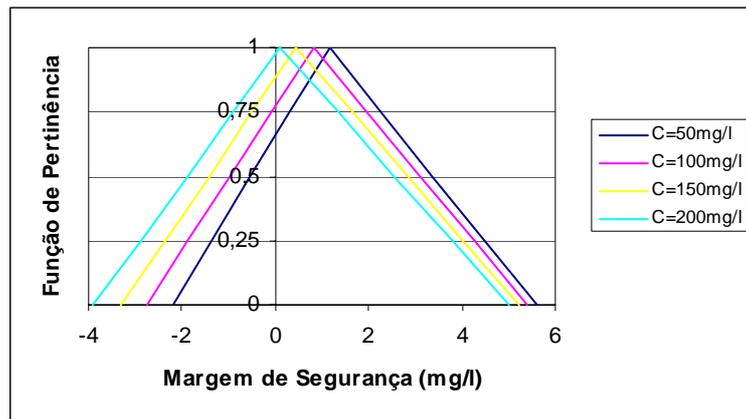


Figura 3 – Representação *fuzzy* da Margem de segurança para OD, em $x=4,5\text{km}$ e $t=8\text{h}$, com uma vazão de $2,6\text{m}^3/\text{s}$ para 4 lançamentos distintos.

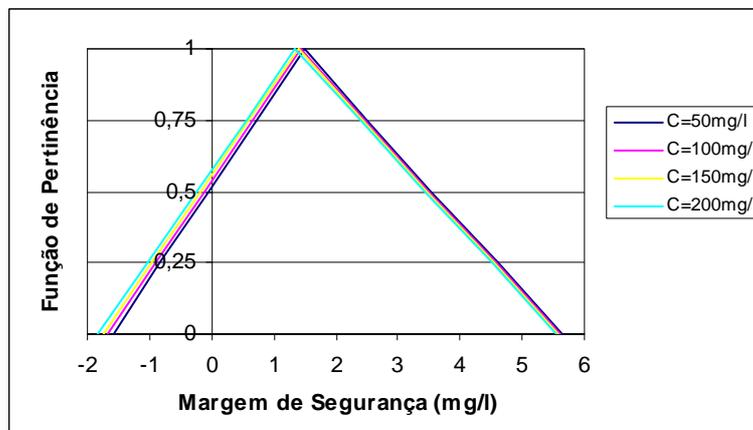


Figura 4 – Representação *fuzzy* da Margem de segurança para OD, em $x=4,5\text{km}$ e $t=8\text{h}$, com uma vazão de $14,5\text{m}^3/\text{s}$ para 4 lançamentos distintos.

Analisando as figuras 5 e 6 pode-se concluir que para maiores lançamentos, mantidas as vazões do rio, o risco de falha aumenta. Este resultado está de acordo com as observações de campo, o que garante boas perspectivas para o uso da teoria *fuzzy* na análise dos problemas de qualidade de água.

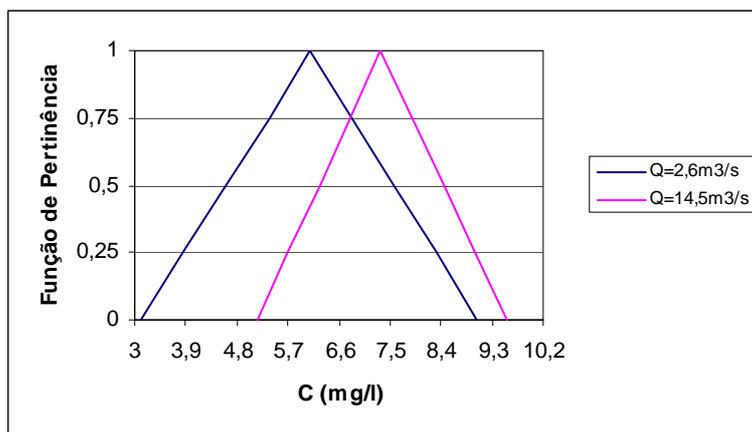


Figura 5 – Comparação entre as concentrações finais de OD, para duas vazões 2,6 e 14,5 m³/s, em x=4,5km e t=8h, para um lançamento inicial de 200 mg/l.

É importante atestar que para as concentrações da função de pertinência calculada, a influência da vazão é exatamente contrária à sua influência para as concentrações marginais de segurança. Observa-se que quanto maior é a vazão maior é o deslocamento para a direita das funções de pertinência para a concentração. Este deslocamento para a direita favorece a garantia e reduz o risco de falha.

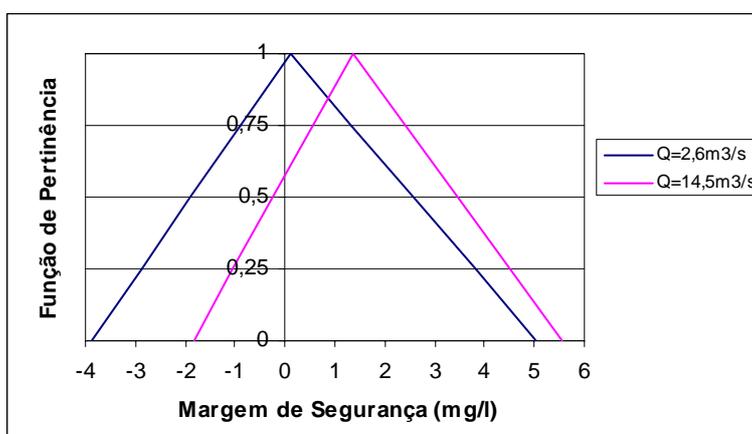


Figura 6 – Comparação entre as margens de segurança do sistema, para duas vazões 2,6 e 14,5 m³/s, em x=4,5km e t=8h, para um lançamento inicial de 200 mg/l.

A Figura 7 mostra o comportamento da função risco em um tempo de 8 h, com uma vazão de 2,6 m³/s e para os quatro lançamentos considerados. Através da figura percebe-se que a função risco segue o mesmo comportamento da distribuição da concentração de OD ao longo do rio, tendo uma zona de crescimento e uma zona de redução que correspondem, exatamente, à lei de distribuição da concentração. Entretanto, para esses níveis de lançamentos percebe-se que o risco de

falha tem um valor máximo próximo de 50%, o que não caracteriza um estado crítico para o sistema.

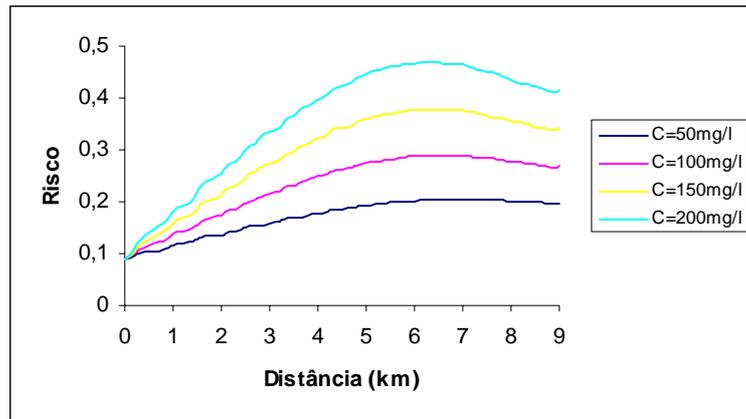


Figura 7 – Comportamento do risco para OD, para $t = 8h$, com uma vazão de $2,6 \text{ m}^3/s$ e para 4 lançamentos distintos.

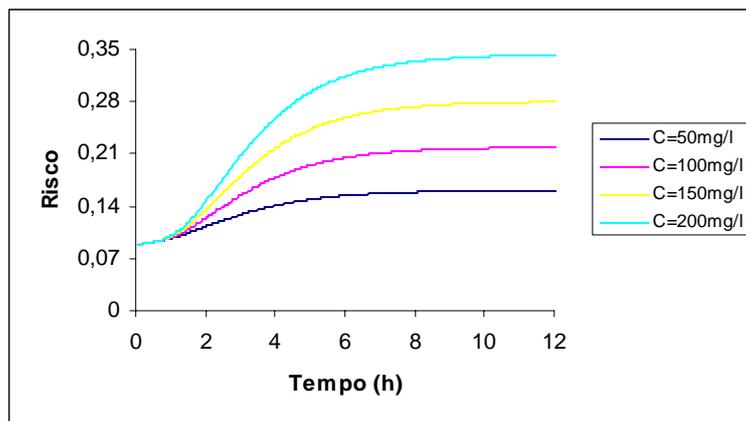


Figura 8 – Comportamento do risco, no ponto $x=3,0\text{km}$, ao longo do tempo para uma vazão de $2,6\text{m}^3/s$.

A Figura 8 apresenta o comportamento temporal do risco para o mesmo cenário anterior, considerando a análise numa seção a 3km do ponto de lançamento. Verifica-se que a função risco cresce à medida que a nuvem poluente passa pela seção mostrando assim, o grau de dependência do risco com o comportamento da concentração. Isto faz com que o risco possa ser considerado, do ponto de vista matemático, como um funcional.

A Figura 9 mostra que o comportamento da função confiabilidade está de acordo com o comportamento da função risco, podendo-se verificar a capacidade da modelagem usada.

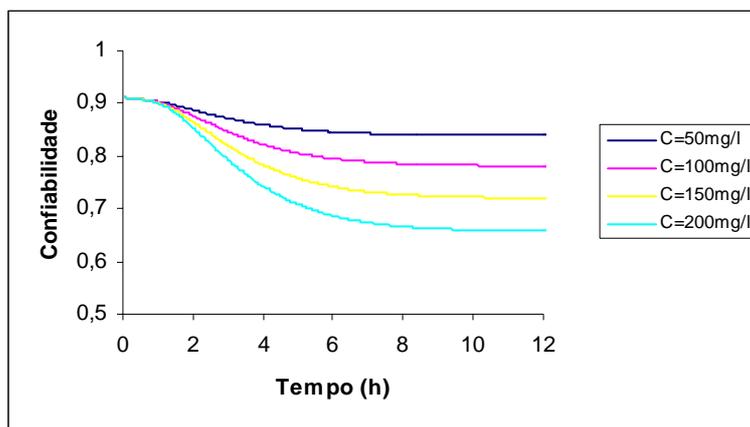


Figura 9 – Comportamento da confiabilidade, no ponto $x=3,0\text{km}$, ao longo do tempo para uma vazão de $2,6\text{m}^3/\text{s}$.

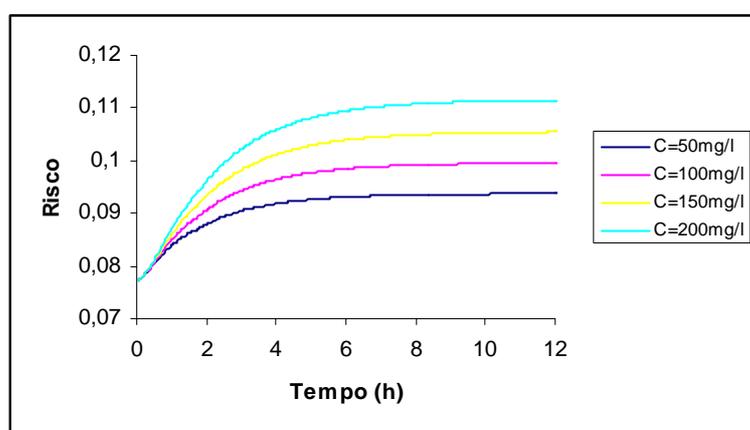


Figura 10 – Comportamento do risco, no ponto $x=3,0\text{km}$, ao longo do tempo para uma vazão de $14,5\text{m}^3/\text{s}$.

As Figuras 10 e 11 apresentam o comportamento temporal do risco e da garantia, para a vazão de $14,5\text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, percebe-se que o risco máximo cai para 11% e a garantia mínima sobe para 88%, o que mostra que para um cenário de período chuvoso o risco diminui bastante. Isto permite concluir que o rio Potengi tem uma boa capacidade de diluição apenas nas estações chuvosas.

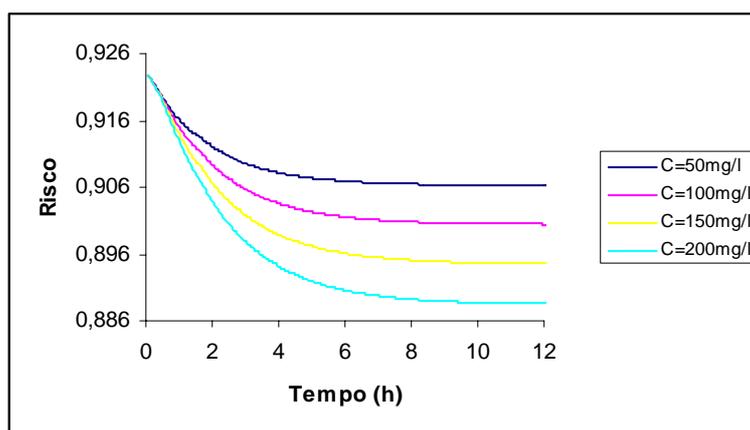


Figura 11 – Comportamento da confiabilidade, no ponto $x=3,0\text{km}$, ao longo do tempo para uma vazão de $14,5\text{m}^3/\text{s}$.

Após uma análise global dos resultados encontrados para os dois cenários de simulação e para os quatro níveis de lançamentos, pode-se dizer que, no que diz respeito à metodologia proposta nesta pesquisa, a mesma correspondeu plenamente às suas solicitações. Todos os resultados calculados apresentaram coerência, em seus comportamentos, com as observações de campo.

Isto permite dizer que a teoria *fuzzy* tem grandes perspectivas nos processos de avaliação hidroambiental. Sua grande vantagem está em sua capacidade de predizer, mesmo com um escasso banco de dados. Com relação ao rio Potengi, as análises mostraram que o mesmo, tendo uma variação de vazão entre $2\text{ m}^3/\text{s}$ e $15\text{ m}^3/\text{s}$, tem uma capacidade de diluição bastante variável. Com isso, o risco de falha pode se tornar crítico e aumentar a vulnerabilidade do rio ficar poluído. Assim, para uma maior cautela é recomendável que, para uma cidade como Natal, seus afluentes passem por um rigoroso processo de tratamento, antes dos seus lançamentos naquele rio.

4 - CONCLUSÕES

Os resultados permitiram concluir que o risco de degradação, com relação ao Oxigênio Dissolvido, tem um comportamento que acompanha a distribuição da Concentração desta substância. Ou seja, o Déficit de Oxigênio Dissolvido, causado pela presença física de uma carga de DBO, se apresenta como uma importante variável de controle no campo de risco. Neste caso, os resultados mostraram que, no trecho do rio onde o déficit é maior, o campo de risco tem sua maior intensidade.

Outra importante verificação foi feita com respeito à temperatura e sua influência no comportamento do risco para o Oxigênio Dissolvido. Os resultados mostraram que o campo de

risco aumenta, sistematicamente, com o aumento da temperatura, permitindo concluir que em regiões com maiores variabilidades climáticas, o campo de risco pode sofrer consideráveis variações. Isto implica dizer que, para rios nessas regiões, o controle ambiental requer uma maior atenção.

As análises mostraram que a capacidade de diluição do rio Potengi sofre uma variação significativa quando há mudanças bruscas na vazão. Para o período de seca verificou-se que o rio fica bastante vulnerável a lançamentos com concentrações de coliformes e DBO, com as características dos esgotos domésticos. Neste caso, os resultados mostraram que o risco de falha neste rio é muito alto. Esta análise permite concluir que para os períodos de seca há a necessidade de um rigoroso controle nos lançamentos dos esgotos domésticos, de modo a reduzir as chances de contaminação daquele corpo hídrico.

Finalmente, uma análise global da metodologia apresentada permite verificar a grande versatilidade da teoria *fuzzy*, não somente na avaliação de risco como também no cálculo de campo de concentrações provenientes de modelos matemáticos *fuzzy*. A pesquisa mostrou que é possível fazer uma análise de risco com um restrito banco de dados, com a mesma eficiência de outras técnicas que demandam grandes quantidades de dados.

5 - BIBLIOGRAFIA

BOGARDI, I., DUCKSTEIN, L. The Fuzzy Logic paradigm of Risk Analysis. In: RISK-BASED DECISIONMAKING IN WATER RESOURCES X. Santa Barbara, California. **Proceedings...**New York, NY.: ASCE, p. 12-22, 2002.

CHAGAS, P. F., PERSPECTIVAS DA APLICAÇÃO DA TEORIA *FUZZY* PARA CÁLCULO DE RISCO EM SISTEMAS HIDRODINÂMICOS, Tese defendida, no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutora em Recursos Hídricos, 2005.

CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling**. New York: McGraw-Hill, 1997, 844p.

DOU, C.; WOLDT, W.; BOGARDI, I.; DAHAB, M. Numerical Solute Transport Simulation using Fuzzy Sets Approach. **Journal of Contaminant Hydrology**, n. 27, p. 107-126, 1997.

GAHOULIS, J.; DUCKSTEIN, L.; BOGARDI, I. Risk Analysis of Water Quantity and Quality Problems: The Engineering Approach. In: Ganoulis (Ed.), **Water Resources Engineering Risk Assessment**, Nato ASI Series, Serie G: Ecological Sciences, v. 29, 1991.

GAHOULIS, J. G (Ed.). **Water Resources Engineering Risk Assessment**, Nato ASI Series , Serie G: Ecological Sciences, v. 29, 1991.

GAHOULIS, J. G. **Engineering Risk Analysis of Water Pollution: Probabilities and Fuzzy sets**. VCH publishers Inc. – Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: 1994.

GAHOULIS, J., BIMBAS, I., DUCKSTEIN, L., BOGARDI, I. Fuzzy Arithmetic for Ecological Risk Management. In: RISK-BASED DECISIONMAKING IN WATER RESOURCES VII, Santa Barbara, California. **Proceedings...**New York, NY.: ASCE, 1995, p. 12-22.

JAMES, A. **An Introduction to WATER QUALITY MODELLING**. 2nd Edition. By John Wiley & Sons Ltd, 1993, 311p.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of Surface Water Quality Modelling and Control**. Harper & Row, Publishers, New York, 1987.