

Análise de risco em rios, sujeito a lançamento de efluentes, através da aplicação da Teoria *Fuzzy*

Patrícia Freire Chagas, Raquel Jucá de Moraes Sales,
Vanessa Ueta Gomes, Arthur Mattos, Raimundo Oliveira de Souza

RESUMO: Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia que combina a Teoria *Fuzzy* com os processos de transporte de poluente, com o objetivo de avaliar o risco de um rio sofrer processo de degradação ambiental. A metodologia emprega fundamentos da Teoria *Fuzzy* para avaliar a solução da equação da difusão advectiva em uma estrutura *fuzzy* e, assim, transformar um campo de concentração, variável no tempo e espaço, em um campo de funções de pertinências, também variáveis no tempo e no espaço. Ao longo do estudo, foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem FORTRAN, que permitiu a realização de um conjunto de simulações para os mais presentes cenários encontrados nas relações entre o homem e o recurso hídrico. A partir dos resultados, fez-se algumas análises do comportamento do risco nas mais diversas situações propostas. De acordo com os resultados, conclui-se que a aplicação da Teoria *Fuzzy*, nos sistemas dinâmicos, para avaliar risco de degradação ambiental, tem grandes perspectivas para se tornar uma nova alternativa na busca de uma melhor análise para os programas de Gestão dos Recursos Hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade Receptora dos Rios; Análise de Risco; Poluição Hídrica.

ABSTRACT: In this work, it was developed a methodology that combines the *Fuzzy* Theory with the transport processes of pollutant, with the objective of evaluating the risk of a river to suffer a process of environmental degradation. The methodology uses the *Fuzzy* Theory to get the solution of the diffusion and advective equation, in a *fuzzy* structure and, in such way, to transform a concentration field, variable in the time and space, in a field of membership functions, also variables in time and in space. Along the study, there was the need of the development of a computational program, in FORTRAN language, that allowed the accomplishment of a group of simulations for the more presents sceneries found in the relationships between man and Natural River. The results allowed establishing some interesting analyses with regard to the behavior of a risk field for several proposed situations. The results allowed concluding that the application of the *Fuzzy* Theory, in the hydrodynamic systems, to evaluate risk of environmental degradation, in the water systems, has great perspectives to turn, in a close future, in an important alternative in the search of a better analysis for the programs concern with Water Resources Management

KEYWORDS: Risk Analysis, River Water Quality, Fuzzy Set Theory

INTRODUÇÃO

Através dos estudos de qualidade de água é possível avaliar o comportamento de um campo de concentração em um sistema hídrico, após o lançamento de uma carga poluente. Para tal, devem-se entender os fenômenos físicos, químicos e biológicos responsáveis pelo movimento e dispersão dos contaminantes nesse sistema. Os fenômenos físicos, relacionados a hidrologia, são regidos por leis fundamentais da física, tais como: conservação de massa, leis da dinâmica newtoniana, e leis da termodinâmica. Essas leis, quando aplicadas a meios contínuos, são representadas por equações diferenciais parciais que assumem diferentes formas, de acordo com o fenômeno a ser estudado (DIAS, 2003).

Muitas técnicas têm sido desenvolvidas com o objetivo de se quantificar riscos nos mais diversos problemas hídricos. Dentre as importantes teorias disponíveis no trato deste problema, podem-se destacar a teoria probabilística e a Teoria *Fuzzy*. A primeira, bastante utilizada em diversos campos da ciência, baseia-se nos princípios dos métodos probabilísticos, quea quantifica o risco através da avaliação das incertezas. E a segunda, Teoria *Fuzzy*, exige o desenvolvimento de funções especiais, com propriedades peculiares, de modo que o risco possa ser avaliado (CHAGAS, 2005).

O estudo das incertezas é a etapa fundamental para o gerenciamento dos riscos no que diz respeito a qualidade de água. Neste sentido, esta pesquisa aplica

a Teoria *Fuzzy* em modelos advectivo-difusivo para avaliar o risco dos sistemas hídricos não apresentarem os padrões de qualidade compatíveis com os usos desejados, quando sujeito a lançamentos de substâncias poluidoras. Deseja-se, portanto, fornecer subsídios que auxiliem na tomadas de decisões nos mais diversos Programas de Conservação de Mananciais.

METODOLOGIA

Este estudo parte da combinação de dois princípios básicos, o Princípio do Transporte de Massas e a Lei de Fick. Com isto, pode-se determinar o comportamento da concentração em rios sujeitos a diferentes cenários de lançamentos de efluentes. A concentração é obtida a partir da solução da equação diferencial da difusão advectiva, de maneira que seja possível avaliar o risco de contaminação de corpos hídricos através da aplicação da Teoria *Fuzzy*. A seguir serão apresentadas as formulações pertinentes ao modelo.

Modelo de Transporte de Poluentes

O campo de concentração é calculado mediante da equação da difusão advectiva, Eq. 1, definida por (JAMES, 1993):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC + S_D \quad (1)$$

Onde, C é a concentração da substância ao longo do canal, em kg/m^3 ; u é a velocidade ao longo do canal, em m/s ; A é a área da seção transversal do canal, em m^2 ; E é o coeficiente de dispersão longitudinal; K é o coeficiente de decaimento da substância, em T^{-1} ; S_D representa o lançamento distribuído ao longo do canal.

Desenvolvendo a equação da difusão advectiva se tem a Eq. 2:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \left[AE \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial E}{\partial x} \right] - KC + S_D \quad (2)$$

Rearranjando, a Eq. 2 passa a ser, Eq. 3:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \psi \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC + S_D \quad (3)$$

Onde .

$$\psi = \left[u - \frac{E}{A} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial E}{\partial x} \right]$$

Análise do Risco

Nas questões de qualidade de água, o comportamento das concentrações em um corpo hídrico, que recebe determinada carga poluente, pode ser representado por funções determinísticas, estocásticas ou funções de pertinência. No primeiro caso, busca-se uma equação que é capaz de avaliar o valor da concentração no espaço (x, y, z) e no tempo (t). Este resultado depende, principalmente, das condições de lançamento e das condições hidráulicas, hidrológicas e hidrodinâmicas do sistema hídrico. Neste caso, considerando que os parâmetros estatísticos foram eliminados da análise, não há como se avaliar as incertezas contidas no processo físico e, em consequência, não há como se fazer uma análise do risco ambiental para este sistema hídrico.

Caso o campo de concentração e a capacidade de assimilação do corpo hídrico forem representados por distribuições de probabilidade, com parâmetros físicos bem definidos, as incertezas presentes no processo físico poderão ser analisadas. Essa é metodologia estocástica adotada com maior frequência para avaliar as variabilidades das características estudadas e o risco ambiental, para qualquer sistema hídrico.

Entretanto, como já dito anteriormente, os modelos estocásticos exigem uma grande quantidade de dados para que se determe as funções densidades de probabilidades, para cada variável. Para contornar este inconveniente, neste estudo utilizou-se uma metodologia baseada na Teoria *Fuzzy*.

Modelagem Fuzzy para Cálculo do Risco

A formulação *fuzzy* desenvolvida para esta pesquisa utiliza a concentração lançada e a capacidade de assimilação do corpo hídrico como números *fuzzy*, representados por funções de pertinência, com valores definidos no intervalo $[0, 1]$.

A função de pertinência representa o nível de pertinência dos parâmetros em um processo físico bem definido. Sendo assim, quanto maior for o grau de pertinência da variável analisada, maior será o valor da função. É importante lembrar que a imagem da função é o intervalo fechado de números reais $[0, 1]$.

Para expressar as variáveis na forma *fuzzy* é necessário colocar o sinal “~” sobre as mesmas. Desta maneira, têm-se as seguintes formulações:

Equação do transporte de massa

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{E} \tilde{A} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) \pm \tilde{K} \tilde{C} + \tilde{S}_D \quad (4)$$

Onde \tilde{C} é a função de pertinência da concentração; \tilde{u} é a função de pertinência do campo de velocidade longitudinal; \tilde{E} é a função de pertinência do coeficiente de dispersão longitudinal; \tilde{K} é a função de pertinência do decaimento; \tilde{S}_D é a função de pertinência do lançamento difuso.

A solução desta equação permite determinar as variáveis dependentes na forma de funções de pertinências. Essas funções são calculadas ao longo de trechos do rio para diferentes tempos. A partir daí, o cálculo do campo de concentração ao longo do rio, para diferentes tempos de exposição a um lançamento, é efetuado. É importante notar que a solução da equação de transporte (6) produz as funções de pertinência de concentração, no tempo e no espaço. Em outras palavras, é dada uma função de pertinência para a concentração, em cada seção do rio, e em função do tempo. Isto implica dizer que o modelo permite o acompanhamento da evolução do comportamento de uma nuvem poluente ao longo do rio, para diferentes instantes.

As concentrações são calculadas a partir do lançamento de massas poluentes no corpo hídrico, de forma pontual ou difusa, sob as condições hidráulicas e hidrológicas do mesmo. É evidente, portanto, que este campo de concentração representa a resposta do sistema hídrico para aquele lançamento. Esta resposta é a capacidade de um corpo hídrico receber cargas poluentes e de se autodepurar ou não. Sendo assim, este campo de concentração, obtido através da solução da equação de transporte de poluentes, desempenha um importante papel no cálculo e avaliação do risco.

Outra função de pertinência, também necessária para se avaliar o risco de contaminação de um sistema hídrico, é aquela que representa os níveis máximos de concentrações permitidos no corpo hídrico. Esta função de pertinência representa, em suas características *fuzzy*, os limites máximos para as principais substâncias presentes nas diversas modalidades de lançamentos de esgotos, ou em um processo de drenagem de bacias com alto nível de atividades agrícolas. Esta função de pertinência é chamada resistência e, uma vez definida, permite que o risco seja calculado.

Assim, \tilde{R} é a função de pertinência de resistência que representa os limites máximos de concentrações permitidos para determinados usos, em um sistema hídrico qualquer. \tilde{C} é a função de pertinência da concentração, calculada através do modelo matemático proposto, e representa a resposta do sistema receptor ao lançamento de poluentes. E a função marginal de segurança, \tilde{M} , é representada pela diferença entre a função de pertinência da resistência \tilde{R} , e a função de pertinência da concentração calculada \tilde{C} .

Sendo assim, o índice de falha é definido como (GANOULIS, 1994):

$$R_f = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (5)$$

Enquanto que o índice de confiabilidade é definido por:

$$R_c = \frac{\int_0^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (5)$$

É importante observar que tanto R_f como R_c são funções reais definidas no intervalo de [0,1] e dependem, fundamentalmente, dos parâmetros hidráulico/hidrológicos do rio.

Composição das Funções de Pertinências

A composição das funções de pertinência foi feita através da distribuição *fuzzy* triangular, a partir da arbitragem dos valores mínimo, médio e máximo para as variáveis consideradas. Esses números *fuzzy* triangulares foram determinados de acordo com a faixa de variação mais encontrada na literatura, para rios naturais. Entretanto, esses limites foram arbitrados de acordo com os objetivos das simulações.

$$\mu_s = \frac{S - S_L}{S_m - S_L}, \text{ para } S_L \leq S \leq S_m \quad (7)$$

$$\mu_s = \frac{S - S_u}{S_m - S_u}, \text{ para } S_m \leq S \leq S_u \quad (8)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo de simulação, através do programa computacional desenvolvido, foi realizado com o objetivo de calcular o risco de contaminação de um corpo hídrico, sob a ação de agentes poluentes, considerando-se os cenários mais comuns para rios naturais.

Para avaliar a eficiência do programa computacional, com relação ao comportamento da concentração, comparou-se a solução numérica obtida pelo modelo desenvolvido com a solução analítica proposta por Chapra (1997). Essa simulação foi feita considerando um rio urbano com 2.000 m de comprimento; 5 m de largura do canal; 0,0005 m/m de declividade de fundo; e cujo decoeficiente de rugosidade de Manning é 0,0138. A malha x-t foi dividida em 30 trechos de 100 m de comprimento, na direção x da corrente; e em 32 intervalos de tempo de 1,5 min, totalizando um tempo máximo de 0,8 h.

Verifica-se, pela Figura 1, que os valores encontrados, através da modelagem matemática proposta, ilustram excelente concordância com a solução analítica apresentada por Chapra (1997).

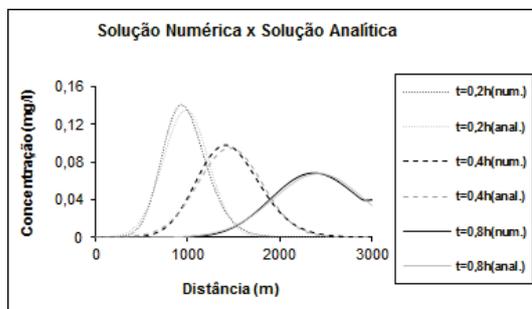


Figura 1. Comparação da distribuição da concentração pela solução numérica, obtida pelo modelo desenvolvido, com a solução analítica proposta por Chapra (1997).

Diante da concordância apresentada pela Figura 1, iniciou-se a fase de simulações para o estudo da concentração ao longo do rio.

Vários cenários foram definidos. Dentre os principais destacam-se o lançamento de uma carga puntiforme instantânea para uma substância conservativa; a propagação de uma onda despoluída que chega num rio poluído; a verificação do decaimento de uma substância não conservativa e do lançamento de uma carga puntiforme; e, por último, a análise de um cenário com uma carga difusa para substâncias com e sem decaimento.

Nas simulações seguintes, considerou-se um canal retangular com comprimento de 50.000 m, que foi discretizado em 50 trechos de 1.000 m de comprimento cada, na direção longitudinal do rio. Com relação ao tempo foram definidos 500 intervalos de 150 s, perfazendo um tempo máximo de, aproximadamente, 21 h. A vazão inicial do rio é de 50 m³/s. Os valores da declividade do canal, da rugosidade e da vazão inicial são definidos de acordo com a simulação desejada.

Para testar a capacidade do modelo numérico *fuzzy*, simulou-se um exemplo simples de transporte de poluentes proposto por Dou et al. (1997). Nesta simulação, considerou-se uma condição de contorno para concentração de 100 mg/l e o comprimento do canal de 1.525 m. Na discretização, o canal é dividido em 100 trechos de 15,25 m de comprimento cada, com 1.000 intervalos de tempo de 1 dia. Ainda, como dados de entrada, foram utilizadas funções *fuzzy* triangulares para os parâmetros velocidade (V), fator de ponderação para a dispersão (α) e coeficiente de dispersão (E_L), onde V é [1,8; 2,4; 3,1] m/s, α é [9,2; 15,3; 19,8] m e E_L é [16,56; 36,72; 61,38] m²/dia. Verifica-se que as funções de pertinência triangulares são usadas para caracterizar os valores das entradas *fuzzy* nas simulações.

Definidos os números *fuzzy* triangulares, foi possível gerar, a partir do programa desenvolvido, novos valores para as funções de pertinência, com cinco níveis diferentes 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1, totalizando

TABELA 1
Função de Pertinência de C/C0 para t = 400 e 800 dias.

	0	0,25	0,50	0,75	1	0,75	0,5	0,25	0
T=400d	0	0,001	0,006	0,026	0,076	0,174	0,313	0,477	0,649
T=800d	0,816	0,925	0,975	0,993	0,999	1	1	1	1

9 valores de concentração. As concentrações foram calculadas a uma distância de 1.220 m da sessão de origem. A Tabela 1 apresenta os valores das concentrações para cada nível de pertinência, nos tempos de 400 e 800 dias.

A Figura 2 ilustra a comparação entre as funções de pertinência da concentração, obtidas através do modelo desenvolvido, com as funções obtidas da solução numérica do modelo de Dou et al. (1997). Verifica-se que os valores do modelo desenvolvido coincidem, quase que integralmente, com os resultados de Dou et al. (1997), evidenciando a eficiência do modelo.

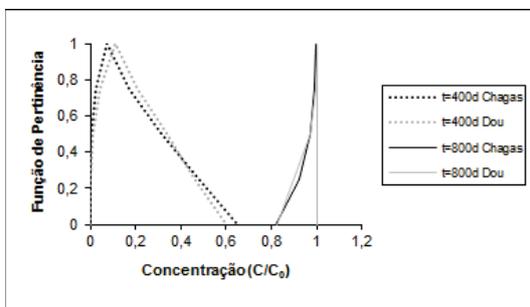


Figura 2. Comparação das funções de pertinência do modelo desenvolvido com o modelo de Dou et al. (1997), para os tempos de 400 e 800 dias.

Comprovada a eficiência do modelo avaliou-se, através do mesmo, o comportamento do risco de contaminação ambiental em um sistema fluvial. Nesta fase, foram feitas várias simulações mantendo as mesmas condições hidráulicas e hidrológicas anteriores para determinar a função risco no tempo e no espaço, após o lançamento de poluentes.

Nas simulações seguintes, considerou-se um canal retangular com comprimento de 50.000 m e vazão do rio de 50 m³/s. O estudo foi feito para lançamentos pontuais e difusos, para substâncias conservativas e não conservativas. Como o objetivo é calcular o risco ambiental, foram utilizados, como dados *fuzzy* de entrada, funções de pertinência triangulares. Sendo assim, para cada parâmetro adotado no modelo, foi estabelecida uma função de pertinência, de maneira que os intervalos de base de cada função são determinados por um desvio padrão de 25%. Com isto, a função é dada como [0,75 multiplicado pelo valor médio; valor médio; 1,25 multiplicado pelo valor mé-

dio]. De acordo com as simulações foram considerados também, como parâmetros *fuzzy*, a entrada da onda dinâmica, as entradas laterais, o decaimento, e outros.

Para a declividade do canal a função de pertinência adotada foi $A = [0,00006; 0,00008; 0,0001]$ m/m; e para a rugosidade do canal a função de pertinência foi $A = [0,0375; 0,05; 0,0625]$. Na Figura 3 se pode ver as simulações em que foi considerado o lançamento de substâncias conservativas.

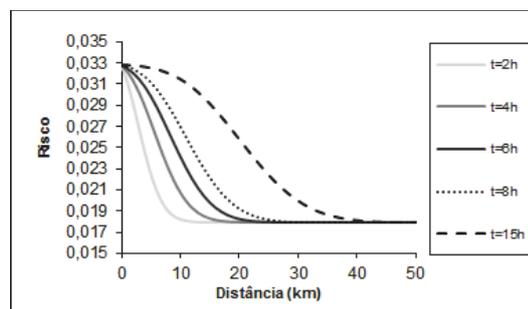


Figura 3. Comportamento da função risco para um lançamento na origem, com uma função de pertinência de resistência $A = [0,20,100]$.

A Figura 3 ilustra os resultados obtidos pela simulação cujo lançamento é contínuo, com concentração igual a 100 mg/l, na seção de origem estudada. A concentração inicial do rio é 5mg/l, a função de pertinência para a resistência é definida por $A = [0,20,100]$ mg/l, sendo $\mu_A(0) = 0$, $\mu_A(20) = 1$ e $\mu_A(100) = 0$. Verifica-se, pela figura, que a função risco, no tempo e no espaço, tem comportamento semelhante ao da concentração. Ou seja, na medida em que o tempo passa, a função risco se desenvolve acompanhando a propagação da nuvem poluente, oriunda do lançamento contínuo na entrada do canal. O risco máximo ocorre na entrada do canal, local onde a substância é lançada, com valor de 3,2%.

Na Figura 4 se pode observar o comportamento da função risco após o lançamento instantâneo de uma massa poluente, na seção a 5 km do ponto de referência. O valor dessa concentração é 200 mg/l, ou seja, 20 vezes maior do que as condições iniciais de concentração do rio, que é 10 mg/l. Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os comportamentos do risco para um lançamento instantâneo a 5 km do trecho inicial, para diferentes tempos, e diferentes valores de

resistência respectivamente. Os valores das diferentes funções de pertinência para a variável de controle Resistência são $A = [0,20,100]$ mg/l, $\mu_A(20) = 1$; $A = [0,50,100]$ mg/l, com $\mu_A(50) = 1$; $A = [0,80,100]$ mg/l, com $\mu_A(80) = 1$.

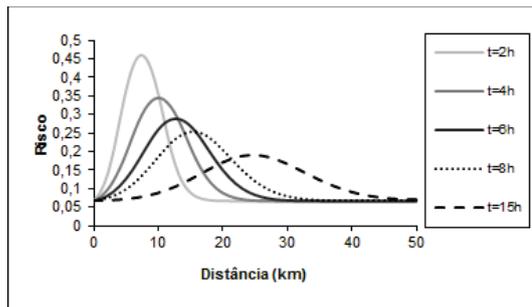


Figura 4. Comportamento do risco para um lançamento instantâneo a 5 km, com uma função de pertinência de resistência $A=[0,20,100]$ mg/l.

Na Figura 4 se vê que o perfil de concentração da função risco tem pico maior nas primeiras horas, sofrendo reduções nos tempos subsequentes de observação. O pico do risco chega a 46%, em t igual a 2 horas, diminuindo para 19% em 15 horas. Nota-se também que a função risco sofre um processo advectivo, ou seja, a função é deslocada de acordo com a posição da nuvem poluente.

Já nas Figuras 5 e 6 observa-se que o risco máximo varia de acordo com a função de resistência estabelecida. Por exemplo, para a função de pertinência de resistência, com valor central igual a 20 mg/l, o risco máximo, para um tempo igual a 2 horas, é de 45% enquanto que, para um tempo igual a 15 horas, o risco diminui para 20%. Para uma função de pertinência de resistência, com valor central igual a 80 mg/l, o pico do risco, para 2 horas, é 15% e para 15 horas, é 3%.

Nas duas simulações anteriores, também se verifica que a determinação do padrão de qualidade de qualquer corpo hídrico desempenha um papel fundamental no processo de avaliação do risco de falha do sistema, para um mesmo tipo de lançamento.

A Figura 7 ilustra o comportamento temporal da função risco, em uma seção fixa do canal, a 10 km da seção de origem do rio. É importante observar que o comportamento desta função segue a mesma

tendência de crescimento da nuvem poluente, observando que o pico máximo do risco chega a 20%, para t igual a 2 horas e 30 minutos. Depois dessa fase, a

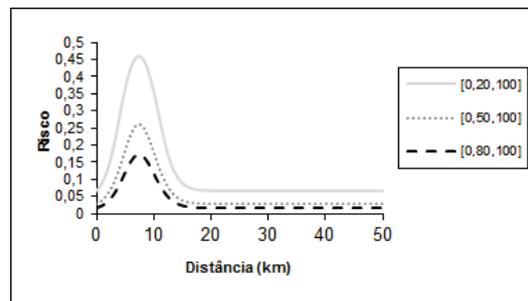


Figura 5. Comportamento do risco para um lançamento instantâneo a 5 km, para um tempo de 2 horas.

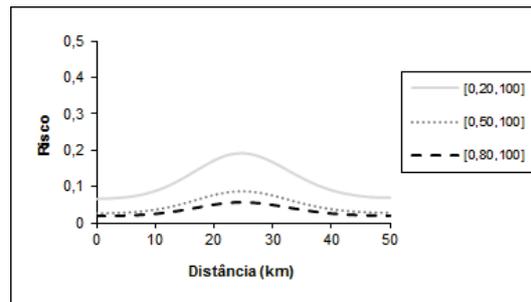


Figura 6. Comportamento do risco para um lançamento instantâneo a 5 km, para um tempo de 15 horas.

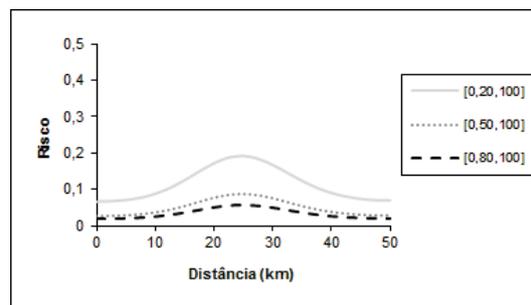


Figura 7. Comportamento da função risco em uma seção fixa do canal, a 10 km da origem, com uma função de pertinência de resistência $A=[0,50,100]$ mg/l.

função risco decresce suavemente até atingir o valor correspondente às condições iniciais.

Pelos resultados se pode ver que a função risco é dependente das variáveis de controle do escoamento, das condições de lançamento, e também das condições difusivas no processo de transporte.

CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, obtidos através da aplicação do programa computacional, algumas conclusões, relacionadas as teorias usadas no estudo, puderam ser formuladas. Várias simulações foram realizadas, para os mais diferentes cenários de rios naturais, considerando o lançamento de cargas poluentes. Com isso, foi possível analisar os resultados para cada cenário simulado.

Com relação aos resultados pertinentes à Teoria de Risco se pode concluir que, o campo de risco, ao longo de um rio natural, tem uma estrutura de distribuição semelhante ao comportamento da concentração. Este fato permite concluir que o risco

é um funcional e tem como variáveis de controle funções relacionadas com a hidrodinâmica e com os processos de transporte.

Na aplicação do modelo, considerando lançamentos em rios, cujos parâmetros são conhecidos, os resultados permitem chegar a algumas conclusões importantes. Pode-se ver que, por exemplo, rios com maiores vazões produzem campos de risco menores, enquanto que, para alguns rios estudados, cujo lançamento é o mesmo, e que tem valores menores de vazão, o campo de risco chegou próximo ao seu estado de saturação. Entende-se, portanto, que nas questões de controle da conservação hidroambiental, os aspectos hidráulicos e hidrológicos desempenham papéis fundamentais.

Finalmente, uma análise global da metodologia apresentada permite verificar a grande versatilidade da Teoria *Fuzzy*, não somente na avaliação de risco mas também no cálculo de campo de concentrações provenientes de modelos matemáticos *fuzzy*. E, por fim, é possível fazer uma análise de risco com um restrito banco de dados, já que a eficiência desta técnica é tão boa quanto a de outras técnicas que demandam grandes quantidades de dados.

Referências

- CHAGAS, P. F. **Perspectivas da Aplicação da Teoria Fuzzy para o 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 obtenção do título de doutor em recursos hídricos, 2005.
- CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling**. New York: McGraw-Hill, 1997, 844p.
- DIAS, N. L. Obtenção de uma Solução Analítica da Equação de Difusão-Advecção com decaimento de 1ª ordem pelo Método da Transformação de Similaridade Generalizada. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n.1, p. 181-188, 2003.
- 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.
- GANOULIS, J. G. **Engineering Risk Analysis of Water Pollution: Probabilities and Fuzzy sets**. VCH publishers Inc. – Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: 1994.
- JAMES, A. **An Introduction to WATER QUALITY MODELLING**. 2nd Edition. By John Wiley & Sons Ltd, 1993, 311p.

Patrícia Freire Chagas Doutora em Engenharia Civil - Recursos Hídricos - Universidade Federal do Ceará. Pesquisadora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: pfchagas@yahoo.com.

Raquel Jucá de Moraes Sales Doutoranda em Engenharia Civil - Recursos Hídricos - Universidade Federal do Ceará. E-mail: raqueljuca@gmail.com.

Vanessa Ueta Gomes Doutora em Engenharia Civil - Recursos Hídricos - Universidade Federal do Ceará. E-mail: vanessa.ueta@yahoo.com.br.

Arthur Mattos Doutor em Engenharia Civil – Universidade de São Paulo. Professor Titular da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: armattos@ufrn.br.

Raimundo Oliveira de Souza Doutor em Engenharia Civil - Universidade de São Paulo. Professor Titular da Universidade Federal do Ceará. E-mail: rsouza@ufc.br.