

ANÁLISE DO RISCO AMBIENTAL EM RIOS MEDIANTE APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL DIFUSO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ONDA CINEMÁTICA

Juliana Alencar Firmo de Araújo¹; Raquel Jucá de Moraes Sales²; Patrícia Freire Chagas³; Maria Patrícia Sales de Castro⁴; Sílvia Helena Lima dos Santos⁵; Rejane Félix Pereira⁶; Juliana Sales Frota⁷ & Raimundo Oliveira de Souza⁸

Resumo – Este trabalho tem como objetivo analisar as relações entre campos de concentração de um poluente e escoamento transiente composto do modelo da onda cinemática, em rios naturais, mediante a aplicação de um modelo bidimensional de transporte de massa, na sua forma *fuzzy*. Para atingir os objetivos, as equações diferenciais de transporte de massa, bem como as equações da hidrodinâmica, foram tratadas nas suas formas *fuzzy* e solucionadas mediante a aplicação do método das diferenças finitas. Os resultados foram obtidos com o uso de um programa computacional, em linguagem FORTRAN, que permitiu a realização de várias simulações para diferentes cenários. Os resultados mostraram que a presença da onda cinemática nos modelos de transporte tem um comportamento significativo em suas análises.

Palavras-Chave – Análise de risco *fuzzy*. Mecânica fluvial. Modelagem de qualidade de água.

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL RISK IN RIVERS THROUGH APPLICATION OF A BIDIMENSIONAL DIFFUSE MATHEMATICAL MODEL CONSIDERING THE INFLUENCE OF THE CINEMATIC WAVE

Abstract – This work aims to analyze the relations between concentration fields of a pollutant and transient flow composed of the kinematic wave model, in natural rivers, through the application of a bidimensional model of mass transport in its *fuzzy* form. In order to reach the goals, the differential equations of mass transport, as well as the hydrodynamic equations, were treated in their *fuzzy* forms and solved by applying the finite difference method. The results were obtained with the use of a computer program, FORTRAN, which allowed the execution of several simulations for different scenarios. The results showed that the presence of the kinematic wave in the transport models has a significant behavior in its analysis.

Keywords – *Fuzzy* risk analysis. Fluvial mechanics. Water quality modeling.

¹ Professora Doutora do Centro Universitário Christus e da Universidade de Fortaleza. E-mail: [judiaraujo@yahoo.com.br](mailto:juliaraujo@yahoo.com.br);

² Professora Doutora da Universidade de Fortaleza. E-mail: raqueljuca@gmail.com;

³ Pesquisadora Doutora da Companhia de Saneamento do Rio Grande do Norte. E-mail: pfchagas@yahoo.com;

⁴ Doutoranda da Universidade Federal do Ceará. E-mail: patricia.sales@gmail.com;

⁵ Professora Doutora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. E-mail: silvia.santos@unilab.edu.br;

⁶ Professora Doutora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. E-mail: rejanefp@gmail.com;

⁷ Graduanda do Centro Universitário Unichristus. E-mail: juliana.sales.frota@gmail.com;

⁸ Professor Doutor titular da Universidade Federal do Ceará. E-mail: rsouza@ufc.br.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de modelos matemáticos para avaliar as questões de lançamento e assimilação de poluente em um corpo d'água é uma ferramenta de suma importância, em virtude da complexidade dos processos determinantes nas questões da qualidade de água (CHAPRA, 1997).

A formulação de um modelo matemático para descrever as interações físicas químicas e biológicas em um sistema aquático vem sendo realizada com mais frequência após o desenvolvimento de sistemas computacionais, considerando esta complexidade citada anteriormente.

Quando se estuda qualidade de água mediante a aplicação de modelos matemáticos, dois tipos de modelos podem ser considerados. O primeiro, conhecido como modelo determinístico, trata da solução de problemas onde não há necessidade de análise de incertezas. Neste caso, estudo de risco não pode ser considerado com esta classe de modelos. O outro tipo de modelo, chamado de modelo estocástico, trata de problemas onde análise de incerteza precisa ser realizada. Os modelos estocásticos, no entanto, necessitam de um banco de dados consistente para sua aplicação.

Atualmente, para contornar estas dificuldades de bancos de dados, surgiu uma teoria que permite que análise de incertezas possa ser realizada com a necessidade de bancos de dados tão consistentes. Esta teoria, chamada de teoria *fuzzy*, tem se tornado uma ferramenta consistente na análise de problemas de qualidade de água.

A teoria de sistemas difusos adicionado a um modelo dinâmico tem como principal benefício aproximar o comportamento do sistema, onde não existem funções analíticas ou numéricas, ou seja, sistemas complexos. Alternativamente, a teoria dos conjuntos difusos pode ser utilizada na avaliação de sistemas mais convencionais, menos complexos. Para alguns problemas, soluções exatas nem sempre são necessárias, assim, uma solução aproximada, porém rápida, pode ser útil numa tomada de decisão preliminar, ou como estimativa inicial em uma técnica numérica para poupar custos computacionais, ou em inúmeras situações onde os valores de entrada para o sistema são vagos, ambíguos ou desconhecidos.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia que permite o cálculo do risco e confiabilidade *fuzzy* em rios. A metodologia consistiu na aplicação de um modelo bidimensional de transporte de massa na sua forma *fuzzy* na presença da onda cinemática.

2. METODOLOGIA

A formulação do modelo matemático que compõe o estudo consiste da equação da onda cinemática, na sua forma *fuzzy* juntamente com a equação da onda da difusão advectiva em duas dimensões. A substância usada foi considerada conservativa proveniente de um derramamento instantâneo.

2.1. Modelo da onda cinemática

Simplificando a equação de Saint Venant, pode-se obter o modelo da onda cinemática na forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q^{1-\beta}}{\alpha \cdot \beta} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

Onde:

$Q \rightarrow$ Vazão do corpo hídrico [L^3T^{-1}];

$\alpha \rightarrow$ Parâmetro da onda cinemática que depende do número de Manning [-];

$\beta \rightarrow$ Parâmetro da onda cinemática que depende da declividade de fundo[-];

$x \rightarrow$ Distância longitudinal [L];

$t \rightarrow$ Tempo [T];

2.2. Modelo de transporte

Foi utilizado o modelo de transporte em duas dimensões definido por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2)$$

Onde:

$C \rightarrow$ Média temporal da concentração da substância poluente [ML^{-3}];

$t \rightarrow$ Tempo [T];

$u \rightarrow$ Velocidade na direção longitudinal [LT^{-1}];

$x \rightarrow$ Distância longitudinal [L];

$y \rightarrow$ Distância transversal ao longo da largura do canal [L];

$E_x, E_y \rightarrow$ Coeficientes de dispersão nas direções longitudinal e transversal, respectivamente.

2.3. Teoria fuzzy

A teoria dos conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965; ZIMMERMANN, 1985) é um método matemático usado para caracterizar e quantificar a incerteza e imprecisão nos dados e relações funcionais. Conjuntos difusos são especialmente úteis quando o número de dados não é suficiente para caracterizar a incerteza por meio de medidas padrão da estatística envolvendo a estimativa de frequências.

A ideia proposta por Lotfi Zadeh sugere que definir a função de pertinência é a chave para a tomada de decisão quando há incerteza. De acordo com Ganoulis (1994) o conceito central da teoria dos conjuntos difusos é a função de pertinência que representa numericamente o grau em que um elemento pertence a um conjunto. Se um elemento pertence a um conjunto difuso em algum grau, o valor da sua função de pertinência pode ser qualquer número entre 0 e 1. Quando a função de pertinência de um elemento pode ter apenas os valores 0 ou 1, a teoria dos conjuntos se reduz à teoria clássica dos conjuntos.

Um conjunto difuso consiste em um conjunto de pares ordenados que contém o elemento (ω) e seu valor de pertinência $\mu_{\tilde{F}}(\omega)$. Formalmente, um conjunto \tilde{F} é chamado *fuzzy* em um universo Ω , se ela consiste de pares ordenados tais que:

$$\tilde{F} = \{(\omega, \mu_{\tilde{F}}(\omega)) : \omega \in \Omega; \mu_{\tilde{F}}(\omega) \in [0,1]\} \quad (3)$$

2.4. Equação do transporte de poluentes *fuzzificada*

Aplicando a teoria dos conjuntos difusos nas equações (1) e (2), e admitindo a média temporal da concentração e da velocidade da substância poluente, temos:

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{E}_x \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tilde{E}_y \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Onde:

\tilde{C} → Função de pertinência para a concentração;

\tilde{u} → Função de pertinência para o campo de velocidade longitudinal;

\tilde{E}_x → Função de pertinência para o coeficiente de dispersão longitudinal;

\tilde{E}_y → Função de pertinência para o coeficiente de dispersão transversal.

2.5. Modelo de onda cinemática *fuzzificada*

Aplicando a teoria dos conjuntos difusos na equação (3) temos:

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \tilde{K}(Q) \cdot \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Onde:

\tilde{Q} → Função de pertinência para a vazão;

$\tilde{K}(Q)$ → Função de pertinência para a celeridade.

2.6. Análise de risco

O risco é um assunto relativamente novo no campo dos recursos hídricos e da engenharia ambiental. Apesar de muitos desenvolvimentos teóricos terem sido alcançados ao longo dos últimos anos, o progresso tanto no entendimento quanto na aplicação da análise de risco continua lento.

Segundo Chagas (2005), o risco é inerente às atividades humanas e às decisões que são tomadas no cotidiano. O conjunto de ações no presente, associado ao desenvolvimento tecnológico e científico tem produzido um aumento significativo no aumento do risco a que as pessoas se expõem. Dentro dos vários tipos de risco podem-se citar os riscos causados por exposição a ambiente com baixa qualidade ambiental, o risco das empresas de seguros, o risco de contaminação de alimentos por uma aplicação inadequada de pesticidas, até os riscos de mau desempenho profissional, tanto do ponto de vista moral como espiritual.

Para o cálculo do risco, a metodologia *fuzzy* prevê uma relação entre a carga poluente e uma resistência que nada mais é do que os limites estabelecidos em norma (resolução CONAMA nº 430, 2011). Esses limites normalmente estabelecem as condições de qualidade do corpo hídrico. É importante observar que esta comparação é feita na teoria *fuzzy* em forma de funções de pertinência.

No presente estudo, a carga poluente representa as concentrações calculadas ao longo do rio, a partir de um lançamento instantâneo. Já a resistência representa a concentração limite de uma substância pelo qual o corpo hídrico é considerado poluído definido por norma.

Para o cálculo do risco, há a necessidade que tanto a concentração como a resistência sejam expressos na forma *fuzzy*. Neste caso, o programa computacional calcula as concentrações ao longo do rio em forma de funções de pertinência. Por outro lado, a resistência é transformada em função de pertinência mediante a aplicação de um fator nas concentrações que definem o limite das concentrações aceitáveis por norma.

Para este trabalho foi considerado um desvio padrão de 25% da média. Assim, temos duas categorias de funções de pertinência definidos por:

$$\tilde{L} = [L_L, L_M, L_U] \quad \tilde{R} = [R_L, R_M, R_U] \quad (6)$$

Onde:

- \tilde{L} → Função de pertinência para a carga de concentração medida;
- L_L → Limite inferior da carga com grau de pertinência 0 (zero);
- L_M → Valor da carga com grau de pertinência 1 (um);
- L_U → Limite superior da carga com grau de pertinência 0 (zero);
- \tilde{R} → Função de pertinência para a resistência estabelecida por norma;
- R_L → Limite inferior da resistência com grau de pertinência 0 (zero);
- R_M → Valor da resistência com grau de pertinência 1 (um);
- R_U → Limite superior da resistência com grau de pertinência 0 (zero).

Uma vez calculadas essas duas funções de pertinência, define-se a função marginal de segurança (\tilde{M}) como:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (7)$$

Como deve ser observado, \tilde{M} é resultado de uma operação entre funções de pertinência também é uma função de pertinência.

É importante notar que:

- Se $\tilde{M} \geq 0 \rightarrow RF = 0$ e $GF = 1$;
- Se $\tilde{M} < 0 \rightarrow RF = 1$ e $GF = 0$.

Onde:

- RF → Risco *fuzzy* que representa a possibilidade de falha do sistema;
- GF → Garantia *fuzzy* que representa a segurança do sistema não falhar.

De acordo com a teoria *fuzzy*, o risco e a garantia são definidos por:

$$RF = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad GF = \frac{\int_0^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (8)$$

Onde:

- \tilde{M} → Função marginal de segurança;
- m → Números *fuzzy* da função marginal de segurança.

Este conjunto de procedimentos caracteriza uma metodologia para a determinação do índice de risco *fuzzy* e do índice de confiabilidade *fuzzy*, o qual será empregado neste trabalho para a determinação do risco de contaminação de um rio sujeito ao recebimento de uma carga poluente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após uma série de simulações realizadas a partir do uso do programa computacional desenvolvido para esta pesquisa, foi possível apresentar resultados considerando diferentes cenários. Esses resultados mostram o comportamento de uma nuvem poluente, proveniente de um lançamento instantâneo no centro do rio, de uma massa de 900 kg conservativa. Nesta pesquisa não há qualquer necessidade de se definir a natureza da substância, considerando que esta investigação focou somente no comportamento dinâmico e de transporte da massa poluente, sob a presença de uma onda de cheia.

A figura 1 mostra a distribuição da concentração com maior grau de pertinência para diferentes tempos calculados a partir do programa computacional. Isto quer dizer que, dentro da hipótese de possibilidades difusas, estes valores são os mais prováveis de ocorrência. A nuvem poluente tende a se espalhar ao longo do rio com o decorrer do tempo, sob a ação da dispersão longitudinal, fazendo com que o pico de concentração caia significativamente.

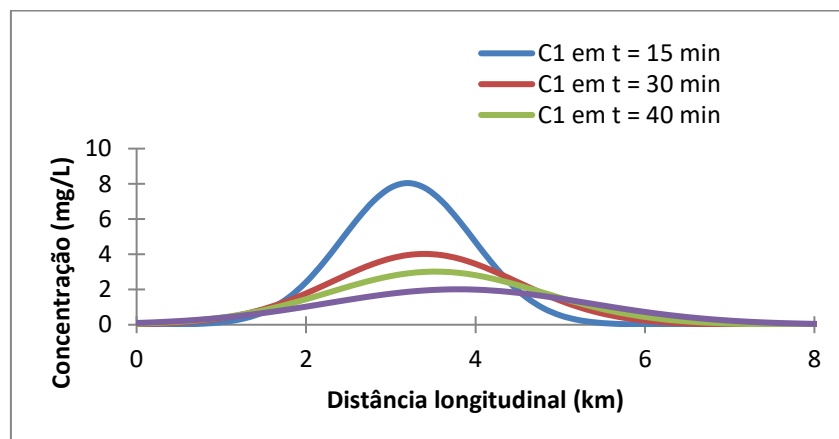


Figura 1 - Concentrações com maior grau de pertinência na seção longitudinal em diferentes tempos, sem ondas.

Deve ficar claro que, para o caso desta substância conservativa, a conservação de massa tem que ser respeitada. Por outro lado, os gráficos da figura mostram o efeito da advecção na carga poluente. Como pode ser observado, o centro de massa da nuvem se desloca rio abaixo devido à presença da velocidade do mesmo.

A figura 2 mostra os perfis do risco para o trecho do rio estudado. O risco tende a diminuir à medida que ocorre a diluição da massa poluente. Isto é esperado tendo em vista que a função risco depende literalmente da intensidade da concentração ao longo do rio. É possível verificar que em 15 minutos há uma região do rio, entre 2 e 4 km, em que o risco é significativo, tendo em vista que, neste local, as concentrações do poluente são maiores. Entretanto, após 40 minutos, após uma forte diluição ter acontecido, o risco tende a ser menor e menor em todas as seções do rio.

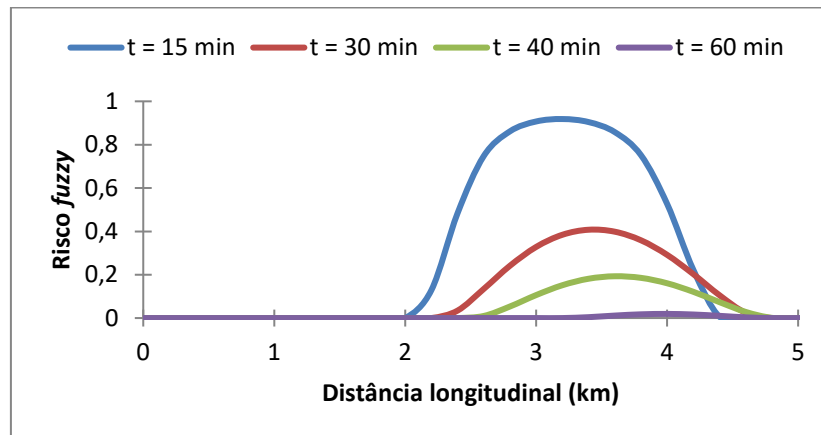


Figura 2 – Risco na seção longitudinal em diferentes tempos, sem efeito de ondas.

Este resultado mostra que nem sempre é possível afirmar que para um lançamento de um poluente em um rio qualquer, a poluição será uma constante, e o risco será sempre alto. Este resultado comprova exatamente o contrário. Um lançamento pode causar riscos consideráveis durante um intervalo de tempo, mas a capacidade de autodepuração do rio vai se encarregar de neutralizar seus efeitos. Neste contexto, a metodologia proposta tem possibilidade de vir a ser uma ferramenta poderosa na análise de concessão de outorga de lançamentos de efluentes em rios do nordeste brasileiro.

A figura 3 mostra os perfis de risco para este cenário. Fica claro que onda cinemática reduz o risco de falha do sistema de forma significativa. Para um tempo de 15 minutos, o risco tem um pico de 0,9, enquanto que para 30 minutos o pico do risco cai para perto de 0,35, e para 40 minutos este pico cai ainda mais para menos de 0,2. Esses valores são menores do que aqueles observados para um escoamento permanente e uniforme.

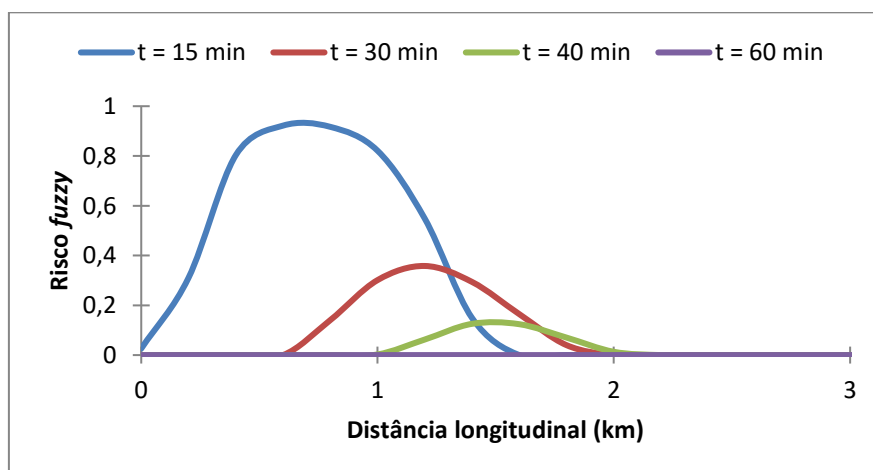


Figura 3 – Risco na seção longitudinal para diferentes tempos, sob a influência da onda cinemática.

4. CONCLUSÕES

Após análise dos resultados obtidos de uma série de simulações para diferentes cenários, foi possível chegar a algumas conclusões pertinentes ao estudo em questão.

Os resultados mostram que a metodologia proposta tem potencial para tratar de gestão de recursos hídricos, notadamente relacionada com os problemas de qualidade de água em rios que recebem cargas poluentes de natureza, principalmente, de derramamento por acidentes de substâncias poluidoras em rios de dimensões médias e grandes. Neste caso, os resultados mostraram que esta metodologia pode ser aperfeiçoada e produzir subsídios consistentes para o cálculo de campos de risco e confiabilidade do ambiente aquático.

O risco e a confiabilidade dependem do comportamento das concentrações dos poluentes no rio. É bom lembrar de que as concentrações que são usadas para determinar o risco e a confiabilidade são concentrações oriundas da resposta do rio ao lançamento de uma carga poluente. Assim, de acordo com este lançamento, de acordo com a capacidade de diluição do rio, o comportamento do risco e da confiabilidade poderá ser determinado.

Com relação às relações entre a hidrodinâmica e a o transporte de poluente, os estudos mostram que a presença de uma onda de cheia altera significativamente o comportamento das concentrações de poluentes. Foi verificado que uma nuvem poluente sofre influência da onda de cheia tanto nas questões de dispersão dos poluentes, quanto nas questões de alteração dos processos advectivos, fazendo com que a nuvem se desloque mais ou menos rápido ao longo do rio. Este resultado mostra que a presença de uma onda de cheia aumenta o potencial de diluição do rio, fazendo com que o mesmo se auto depure mais rapidamente.

Finalmente, os resultados mostram que esta metodologia envolvendo a teoria *fuzzy* nos problemas de transporte de poluente pode se tornar uma importante técnica na análise de problemas qualidade de água em rios, proveniente da concessão de lançamentos efluentes em rios com baixa capacidade de autodepuração, permitindo assim, que melhores análises possam ser desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

CHAGAS, P. F. Perspectivas da Aplicação da Teoria Fuzzy para Cálculo de Risco em Sistemas Hidrodinâmicos. *Tese de Doutorado em Engenharia Civil* – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

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

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em 13/01/2016.

GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution: probabilities and fuzzy sets**. New York: VCH Publishers Inc., 1994.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets**. *Information and control*. vol.8, p. 338-353, 1965.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Set Theory and its Application**. Martinus Nijhoff, Dordrecht, p.363, 1985.