

TEORIA FUZZY EM MODELO DE TRANSPORTE DE POLUENTE PARA OUTORGA DE LANÇAMENTOS DE EFLUENTES

SÍLVIA HELENA LIMA DOS SANTOS¹; FRANCISCA VALDENUZA ALMEIDA SILVA²; LEILA IVETE TEIXEIRA MONTEIRO³; RAQUEL JUCÁ SALES DE MORAES⁴ & JULIANA ALENCAR FIRMO DE ANDRADE⁵

¹Professora., UNILAB, Acarape, CE, e-mail: silvia.santos@unilab.edu.br. ²Graduanda, UNILAB, Acarape, CE, e-mail: valdenuzaalmeida@yahoo.com.br. ³Graduanda, UNILAB, Acarape, CE, e-mail: monteiro.leila01@gmail.com. ⁴Professora, UNIFOR, Fortaleza - CE, e-mail: raqueljuca@gmail.com. ⁵Professora, UNICHRISTUS, Fortaleza - CE, e-mail: judicaju@gmail.com.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2017
8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil

RESUMO: Este trabalho utilizou a teoria fuzzy, em modelos de transporte de poluentes, na avaliação de concessão de outorga de lançamento de efluentes para a variável demanda bioquímica de oxigênio. Para isso, as equações diferenciais do modelo de transporte são transformadas em equações diferenciais *fuzzys*, de modo que o campo de concentrações representado pelo modelo matemático seja transformado em campos de funções de pertinências de concentrações. O estudo se utiliza de parâmetros definidos na lei para estabelecer a classe do rio e, assim, calcula, para cada tipo de lançamento, o risco de contaminação e a capacidade de assimilação do mesmo. Para a realização das simulações foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem FORTRAN que deu suporte na obtenção dos resultados. Os resultados indicam a teoria *fuzzy* como uma excelente ferramenta no auxílio do controle de poluição dos rios em geral, fornecendo, assim, fundamentos para a gestão dos recursos hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: outorga de lançamento de efluentes; transporte de massa; risco fuzzy.

EVALUATION OF OUTLINES OF EFFLUENT LAUNCHES, BY THE APPLICATION OF THE FUZZY THEORY IN A MODEL OF TRANSPORTATION OF POLLUTANT

ABSTRACT: This study used the fuzzy theory in pollutant transport models, the launch of a concession evaluation of effluents to the biochemical oxygen demand variable. For this, the differential transport model equations are transformed into differential fuzzy equations, so that the concentration field, represented by the mathematical model is transformed into membership functions concentration fields. The study uses parameters defined in law to establish the river class and thus calculate, for each type of release, the risk of contamination and the assimilative capacity of the same. To perform the simulations was developed a computer program in FORTRAN language that has supported in obtaining results. The results indicate the fuzzy theory as an excellent tool in aid of the pollution control of rivers in general, thus providing grounds for the management of water resources.

KEY WORDS: Discharge of effluents; Mass transport; Fuzzy risk

INTRODUÇÃO

Como todo sistema natural, os sistemas hídricos são bastante complexos e envolvem a interação entre diversos ramos da ciência, tais como hidrologia, hidráulica e transporte de massa. Deste modo, a modelagem de um processo físico, presente em um sistema hídrico qualquer não se constitui uma tarefa simples.

Dentre as importantes teorias disponíveis para se quantificar riscos destaca-se a teoria fuzzy. Esta teoria, desenvolvida nos anos 60, vem se tornando uma ferramenta útil para a análise desta classe de problema, por não depender de um banco de dados tão completo. A grande dificuldade, com relação à aplicação da Teoria *Fuzzy* nos problemas ambientais reside no fato de que as Equações Diferenciais que governam os processos de transporte da massa poluente precisam ser “*fuzzificadas*”. Isto quer dizer, em outras palavras, que essas equações diferenciais têm que ser transformadas em novas equações diferenciais com características “*fuzzy*”. Evidentemente que esta transformação ainda se encontra em fase de desenvolvimento em sua estrutura matemática.

MATERIAIS E MÉTODOS

A outorga é concedida após avaliações quanto à compatibilidade entre demandas hídricas e a disponibilidade hídrica do corpo de água, assim como pelas finalidades do uso e os impactos causados nos recursos hídricos.

Tomando como base um volume de controle, e fazendo a combinação das teorias da Lei de Fick com a teoria de conservação das massas, é possível chegar à equação geral da difusão advectiva, definida pela equação diferencial abaixo.

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

C : representa a concentração média em cada seção: $[ML^{-3}]$; U : representa a velocidade média em cada seção do rio: $[LT^{-1}]$; A : representa a área da seção transversal: $[L^2]$; E : representa a coeficiente de dispersão longitudinal: $[L^2T^{-1}]$; K : representa o coeficiente de decaimento da substância, em $[T^{-1}]$; S_D : representa o lançamento de cargas difusas ao longo do canal: $[ML^{-3}/L]$.

Do ponto de vista matemático, em um conjunto fuzzy \tilde{X} , a cada elemento x , pertencente ao conjunto, existe uma função de pertinência associada:

$$\tilde{X} = \{(x, \mu_{\tilde{X}}(x)) / x \in X\} \quad (2)$$

$\mu_{\tilde{X}}(x)$ é chamada função de pertinência ou grau de pertinência, h , de x em \tilde{X} .

Matematicamente falando, um conjunto difuso \tilde{A} pode ser definido como sendo

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) : x \in X; \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0, 1]\} \quad (3)$$

\tilde{A} é o conjunto difuso; x é o elemento do conjunto difuso; e $\mu_{\tilde{A}}$ é conhecida como função de pertinência.

De acordo com Ganoulis (1994), se um evento, ou realização de um risco, é descrito por meio da lógica fuzzy, então a confiabilidade deste evento pode ser calculada como um número fuzzy. Considera-se que o sistema tem uma resistência \tilde{R} e uma carga \tilde{L} , ambas representadas por números fuzzy. Uma medida de confiabilidade, ou uma margem de segurança que também caracteriza o desempenho do sistema, pode ser definida pela diferença entre a carga e a resistência. Esta diferença também é um número fuzzy, dado por:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (4)$$

Tem-se para cada função um intervalo de nível h :

$$\tilde{M}(h) = \tilde{R}(h) - \tilde{L}(h) \quad (5)$$

$$\tilde{R}(h) = [\tilde{R}_1(h), \tilde{R}_2(h)] \quad (6)$$

$$\tilde{L}(h) = [\tilde{L}_1(h), \tilde{L}_2(h)] \quad (7)$$

A medida marginal de segurança \tilde{M} tem as condições possíveis:

Falha: $\tilde{M}(h) < 0$

Confiabilidade: $\tilde{M}(h) \geq 0$

Neste trabalho isto será alcançado mediante a “fuzzificação” da equação diferencial de transporte difusivo advectivo. Deste modo, o que se buscará neste trabalho é desenvolver um estudo que permita conhecer melhor as equações diferenciais fuzzy, notadamente a Equação da Difusão Advectiva “fuzzificada”, definida pela equação (10).

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{E} \tilde{A} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) \pm \tilde{K} \tilde{C} + \tilde{S}_D \quad (10)$$

\tilde{A} : função de pertinência para a área transversal; \tilde{C} : função de pertinência para a concentração; \tilde{u} : função de pertinência para o campo de velocidade longitudinal; \tilde{E} : é a função de pertinência para o coeficiente de dispersão longitudinal; \tilde{K} : função de pertinência para o decaimento; \tilde{S}_D : função de pertinência para o lançamento difuso.

Para a solução desta equação foi usado o Método das Diferenças Finitas, notadamente, o Esquema de Crank-Nicholson no qual a equação 9 é transformada na equação matricial fuzzy definida abaixo.

$$\tilde{A}(\alpha) \tilde{C}_{i-1}^{j+1}(\alpha) + \tilde{B}(\alpha) \tilde{C}_i^{j+1}(\alpha) + \tilde{D}(\alpha) \tilde{C}_{i+1}^{j+1}(\alpha) = \tilde{F}_i^j(\alpha) \quad (11)$$

A, B, D são os coeficientes “fuzzys” da matriz [M], \tilde{F}_i^j é o vetor com todas as informações conhecidas, e $\tilde{C}(\alpha)$ é o vetor solução do modelo para cada ponto do domínio e para cada tempo considerado.

De forma mais compacta tem-se:

$$[\tilde{\varphi}(\alpha)] [\tilde{C}(\alpha)] = [\tilde{F}(\alpha)] \quad (12)$$

α é o nível de pertinência considerado.

A solução da equação matricial fuzzy (12) fornece os valores das concentrações em forma de funções de pertinência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 a 4 mostram os resultados de uma simulação para um lançamento de efluente, em que a concentração de DBO é de 200 mg/L, em um rio de declividade 0,00005 e um coeficiente de rugosidade de 0,01. A largura do canal principal é de 20m e sua vazão é de 20m³/s. O coeficiente de decaimento em sua forma fuzzy é dado por [0, 00000434; 0,00000578; 0,00000723], expressos em s⁻¹. Para a resistência foi considerado o limite imposto pela legislação brasileira para um rio de classe 2 que tem valor igual a 5mg/L conforme resolução CONAMA 357-2005.

A Figura 1 mostra o resultado de uma simulação considerando os dados anteriores para diferentes vazões, em que o risco é calculado para um tempo de 20 horas após o lançamento. Analisando os resultados é possível perceber que, para uma concentração de 200mg/L de DBO, o risco é muito alto para vazões de 15m³/s. Neste caso, os resultados mostram que o risco mínimo para esta vazão está acima de 70% o que é considerado muito alto para os padrões ambientais normais. Por outro lado, para vazões de 25m³/s e 30m³/s o risco encontra-se dentro de uma faixa aceitável. Este resultado permite concluir que para as concentrações de lançamento apresentadas, a concessão de outorga para rios de baixa vazão merece uma análise mais criteriosa.

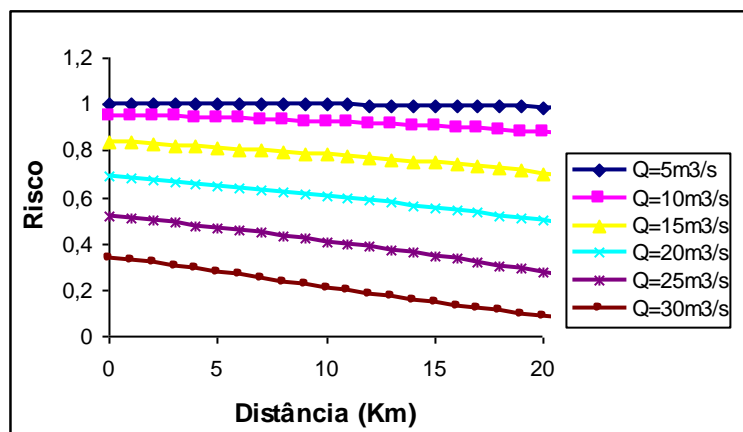


Figura 1 – Comportamento da Função Risco para diferentes vazões, em 20 horas

A Figura 2 mostra a evolução do risco de contaminação de um rio natural para diferentes concentrações outorgadas. Observa-se que para efluentes tratados com vazões de até 100 mg/L e para uma vazão de 20m³/s o risco é aceitável. Por outro lado, a partir de 150 mg/L, o risco começa a ficar crítico nas proximidades do ponto de lançamento que, para uma concentração de 150mg/L, o risco varia de 45% até 15% . Estes resultados mostram a eficiência da metodologia proposta no cálculo do risco fuzzy.

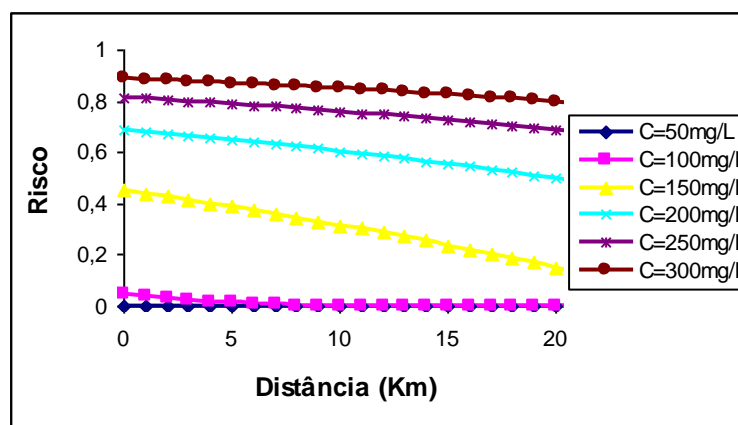


Figura 2 – Comportamento do Risco, para diferentes concentrações, em t=20 horas

A Figura 3 mostra o comportamento do risco e da garantia para diferentes vazões em um seção a 10km do ponto de lançamento. Através da figura pode-se observar que o risco diminui significativamente com o aumento da vazão fazendo com que a garantia cresça na mesma proporção. Este resultado mostra mais uma vez a eficiência da metodologia proposta no calculo do risco e da garantia na concessão de outorga de lançamento de efluentes.

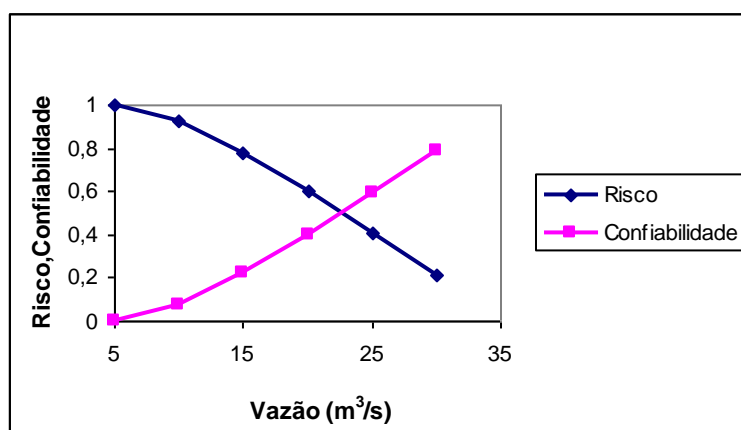


Figura 3 – Comportamento do risco e da garantia para diferentes vazões a 10km do ponto de lançamento para $t = 20h$

Desta forma, os resultados mostram que a concessão de um sistema de outorga para um lançamento com uma concentração de 300 mg/L de DBO precisa de uma melhor análise, tendo em vista que o risco é muito alto para um rio de classe 2.

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que rios com baixa vazão, têm suas capacidades vulneráveis para receber lançamentos de efluentes, sem comprometer a qualidade de suas águas. Neste caso, foram verificados que rios com vazão menores do que 20 m³/s e com baixa capacidade de diluição, não devem receber efluentes sem um tratamento prévio.

Outro aspecto que foi observado nos resultados, diz respeito ao comportamento do risco para diferentes valores de concentrações de lançamento. Os resultados mostraram que quanto maior for a concentração do efluente, maior será o risco e menor será a confiabilidade do sistema permanecer dentro dos padrões determinados pela legislação. Este resultado, comprovado das experiências e observações, mostra a importância desta metodologia nas questões pertinentes à quantificação dos riscos para concessão de outorga de lançamento.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L. De; VERAS Jr., M. S.; PORTO, M. F. do A.; NUCCI, N. L. R.; JULIANO, N. M. de A.; EIGER, S. *Introdução à engenharia ambiental*. 2ª. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004, 305 p
- CHAGAS (2005). 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.
- FISCHER, H. B. *Mixing in Inland and Coastal Water*, Academic Press, Inc, 1979.
- GANOULIS, J. G. *Engineering Risk Analysis of Water Pollution: Probabilities and Fuzzy sets*. VCH publishers Inc. – Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: 1994.
- LANNA, Antônio Eduardo. A gestão dos Recursos Hídricos no contexto das políticas ambientais. In: MUÑOZ, Héctor Raúl (Coord.). *Interfaces da Gestão dos Recursos Hídricos: desafios da Lei de Águas*. 2ª. ed. Brasília:MMA/SRH, 2000.p.75-109.
- OLIVEIRA JR., H. A., *Lógica Difusa: Aspectos Práticos e Aplicações*, Interciência, 1999.