Aplicação da teoria fuzzy em modelos de transporte de massa para o cálculo do risco na concessão de outorga para lançamento de efluentes em rios naturais

Application of fuzzy theory in mass transport models to calculate the risk in allocation of grant for dispersal of effluents in natural rivers

Sílvia Helena Lima dos Santos (*)

Licenciada em Matemática. Mestre em Recursos Hídricos pela UFC. Doutoranda em Recursos Hídricos na Universidade Federal do Ceará. Bolsista CAPES.

Raimundo Oliveira de Souza

Engenheiro Civil. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professor Titular do departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará.

Endereço para correspondência (*):

Rua Campo Amor Rocha, 71 apt°1501, Bairro de Fátima – Fortaleza (CE), CEP: 60415-080 e-mail: silviahlsantos@hotmail.com

Data de Entrada: 19/05/2011 **Data de Aprovação:** 08/09/2011

RESUMO

Este trabalho desenvolveu uma metodologia, com base na aplicação da Teoria Fuzzy, em Modelos de Transporte de Poluentes, para estudar o Risco Fuzzy de contaminação, na concessão de outorga de lançamentos de efluentes em rios. 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 se transforma em campos de funções de pertinências. O estudo se utiliza de parâmetros definidos na lei para estabelecer a classe do rio e, assim, calcular, para cada tipo de lançamento, o risco de contaminação e a capacidade de assimilação do mesmo. Os resultados mostraram que a Teoria Fuzzy pode se tornar uma alternativa segura no auxílio do controle de poluição dos rios em geral, fornecendo, assim, fundamentos para a Gestão dos Recursos Hídricos.

ABSTRACT

This research developed a methodology, based on application of Fuzzy Theory in the Pollutant Transport Models, to study the fuzzy risk of contamination, in awarding grants for discharge of effluents into rivers. In such way, the differential equations of the transport model are transformed into fuzzy differential equations, so that, the field of concentrations, represented by the mathematical model is transformed into fields of membership functions. The study makes use of parameters defined in the law to establish the class of the river and thus calculate, for each type of release, the risk and its assimilative capacity to receive effluents. The results have shown that the Fuzzy Theory can become a safe alternative to help control pollution of rivers in general, providing, in such way, subsidies for Water Resources Management.

Palavras-chave: concessão de outorga; modelagem de qualidade de água; risco fuzzy.

Key words: allocation of grant; water quality modeling; fuzzy risk.

INTRODUÇÃO

A poluição dos corpos hídricos é um problema mundial e o seu controle representa um desafio para os gestores de recursos hídricos, não só no Brasil, mas também no mundo. Este problema se intensifica ainda mais em áreas urbanas, tendo em vista que a demanda por água potável é maior e que os lançamentos de poluentes são mais frequentes.

Para regulamentar o uso destes mananciais, principalmente no que diz respeito à assimilação de efluentes, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída no Brasil pela Lei Federal 9.433, de 08 de janeiro de 1997, é uma importante ferramenta legal. Sua aplicação no gerenciamento do uso da água visa assegurar medidas para evitar a poluição dos corpos aquáticos e garantir disponibilidade hídrica para os usuários, com padrões de qualidade para seus respectivos usos.

Um dos principais instrumentos de gestão para redução e controle da poluição desses recursos é a outorga para lançamentos de efluentes que, apesar de estar legalmente instituída, ainda não foi devidamente implantada em nível nacional. Para isso, é necessário definir critérios de outorga, organizar e manter uma base de dados de qualidade da água e desenvolver ferramentas adequadas para análise integrada dos aspectos de quantidade e qualidade da água (NAHON, 2006).

Como todo sistema natural, os corpos hídricos são complexos e seu estudo envolve a interação entre diversos ramos da ciência, tais como hidrologia, hidráulica e transporte de massa. Com isso, a modelagem matemática de um processo, que se estabelece nesses corpos de água, não se constitui uma tarefa simples. Sua representação matemática acaba por produzir equações diferenciais parciais de difícil solução.

Outro fator que deve ser levado em conta na modelagem de qualquer processo de engenharia está relacionado com a existência de incertezas que têm suas origens relacionadas com os dados do problema, as medições dos parâmetros, os métodos de análise e até mesmo com as aproximações das soluções. Deste modo, a análise de incertezas tem um papel fundamental na gestão de Recursos Hídricos e a técnica apropriada para lidar com este problema constitui-se nos fundamentos da análise de risco (VIEIRA, 2005).

Dentre as importantes teorias disponíveis para se quantificar riscos podem-se destacar a Teoria Probabilística e a Teoria Fuzzy. A primeira trata da aplicação da Teoria das Probabilidades nos modelos determinísticos. Esta metodologia, bem desenvolvida nos dias presentes, necessita, para um completo sucesso de sua aplicação, de um banco de dados consistente. Com isso, em regiões em que não há uma tradição em bancos de dados

históricos, o sucesso desta metodologia fica comprometido (GANOULIS, 1994).

Uma teoria que está começando a ser usada nos estudos das incertezas, e na Análise de Risco, é 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 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 de 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 (CHAGAS, 2005).

O presente artigo desenvolveu uma metodologia que combinou a Teoria Fuzzy com os Processos de Transporte de Poluentes em rios e a Legislação Brasileira, para estudar o Risco Fuzzy de contaminação de rios na concessão de outorga para lançamentos de efluentes.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Outorga para Lançamento de Efluentes

Com a Lei Federal n. 9.433 de oito de janeiro de 1997 foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos, onde foram definidos instrumentos para a gestão das águas, utilizando como unidade de planejamento a bacia hidrográfica. A outorga de direito de uso de recursos hídricos é contemplada como um dos instrumentos desta lei. Este instrumento serve para que o poder público faça a repartição dos recursos hídricos aos diversos usuários requerentes, de acordo com as prioridades estabelecidas nos planos diretores da bacia hidrográfica. Segundo esta política, a outorga de direito de uso da água é o ato governamental que autoriza ou concede determinado volume a ser derivado ou usado, de manancial superficial ou subterrâneo, para uma ou diversas finalidades, com o objetivo de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.

Tratando-se especificamente da outorga, há diversos usos dos recursos hídricos nos quais os usuários são sujeitos a requerer outorga do Poder Público, como derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água; extração de água de aquífero subterrâneo; lançamentos em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final; aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; e outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo hídrico.

A outorga para lançamento de efluentes, conforme consta na Lei Federal N° 9.433/97, baseia-se no princípio de permitir uma descarga em um curso de água com uma carga máxima de poluentes de maneira que, após sua diluição na vazão mínima fixada como referência, a qualidade da água no corpo receptor permaneça satisfatória, conforme seus objetivos de qualidade estabelecidos pela classe de uso (CRUZ, 2001).

A outorga, por ser um instrumento que envolve direitos de uso, é um dos documentos exigidos no processo de licenciamento ambiental. Portanto, os órgãos gestores de meio ambiente e de recursos hídricos deverão trabalhar de forma plenamente articulada, haja vista que a decisão a ser tomada é totalmente

interdependente, ou seja: as eficiências de tratamento de efluentes definidas na licença de instalação ambiental e as correspondentes cargas poluidoras remanescentes, deverão estar em perfeita consonância com as vazões que poderão ser alocadas para a diluição desses poluentes, e vice-versa.

Como todas as atividades e usos numa bacia hidrográfica estão diretamente ligados à qualidade de água e em função dos usos múltiplos é de grande valia conhecer antecipadamente os tipos e magnitudes de danos que podem ocorrer em determinados locais, em virtude do despejo de cargas poluidoras nestes ecossistemas aquáticos.

Apesar de reconhecido como um dos principais instrumentos para redução e controle da poluição de recursos hídricos, no Brasil há poucas experiências relacionadas à implantação da outorga para tal finalidade (ROQUES, 2006). A ausência de um dispositivo legal que estabeleça, claramente, os critérios de outorga para fins de lançamentos de efluentes é uma realidade mesmo dentre os estados que já a emitem. Em alguns casos, os requerimentos de outorga para lançamentos de efluentes são avaliados pelo órgão de meio ambiente, enquanto as solicitações de outorga para outras finalidades são diretamente avaliados pela autoridade outorgante. Nesse caso, há um sério risco de se ignorar a primeira diretriz de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos: a gestão sistemática, sem dissociação dos aspectos de qualidade e quantidade.

Teoria do Transporte de Massa

O fenômeno conhecido como transporte de massa é conceituado como a tendência que um constituinte de uma mistura possui de passar de uma região de alta concentração para outra de baixa concentração. Este processo, de extrema importância nas questões da engenharia ambiental, representa um importante fenômeno, tendo em vista que toda a questão de autodepuração e recuperação dos corpos hídricos se pauta no processo de dispersão de poluentes.

Segundo FISHER (1979), a teoria do transporte de poluentes tem como base fundamental a combinação da Lei de Fick com a teoria de conservação das massas. Através desta combinação é possível fazer uma análise do comportamento de uma massa poluente em um campo de escoamento mono, bi ou tridimensional, e também de avaliar os principais processos pertinentes ao movimento da massa poluente no corpo hídrico. Desses processos os mais significativos para o estudo de qualidade de água em rios são os processos advectivos, onde a massa poluente é transportada pelo movimento do fluido, e o processo de difusão turbulenta, onde a energia turbulenta, presente nos campos de velocidade, desempenha importante papel no processo de espalhamento da massa poluente. Neste caso, quanto maior a turbulência, maior será o espalhamento (CHAGAS, 2005).

Tomando como base um volume de controle, e fazendo a combinação das teorias acima citadas, é possível chegar à equação geral da difusão advectiva, definida pela equação diferencial abaixo:

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

Onde:

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: [L²];
 E : representa a coeficiente de dispersão longitudinal: [L²T⁻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].

Teoria Fuzzy

De acordo com SAAVEDRA (2003), a lógica convencional trata as informações de modo binário, classificando-as, por exemplo, como verdadeiras ou falsas. Talvez a definição desses dois estados da informação, em alguns casos, seja suficiente, porém, muitas experiências humanas necessitam de uma manipulação mais abrangente do que o simples tratamento de falso ou verdadeiro, sim ou não, certo ou errado.

Foi em 1965, pensando em atribuir significados a termos linguísticos de cunho qualitativo, subjetivo, como “perto”, “longe”, “alto”, “aproximadamente”, que o matemático Lofti Zadeh, introduziu o conceito de conjuntos fuzzy (difusos). Através de tais conjuntos, seria possível armazenar dados não precisos em computadores, gerar respostas baseadas em informações vagas ou ambíguas, em processos análogos ao do raciocínio humano. Nesta lógica, são utilizados modelos matemáticos para mapear variáveis subjetivas, como frio, agradável e quente, para valores concretos que podem ser manipulados matematicamente. (SANTOS, 2008).

É neste contexto que a lógica fuzzy se torna uma ferramenta apropriada para tratar informações vagas e incertas, em geral descritas em uma linguagem natural (LIMA, 2002).

A palavra inglesa fuzzy tem como tradução alguns sinônimos: nebuloso, vago, incerto. Estes conceitos, particularmente, sempre incomodaram o ser humano. Problemas como: “Um homem tem a cabeça repleta de cabelos e, a partir de certo momento, começa-se a extração de fios, um a um, e a cada fio retirado pergunta-se se ele está calvo. Em que momento exatamente este homem ficará calvo?”. Se repetirmos indefinidamente este processo, ele ficará calvo e até careca. Mas será que podemos definir a partir de qual fio de cabelo ele se tornará calvo?

Podemos modelar, com a teoria fuzzy, diversas situações em que os dados envolvidos têm certo “grau” de incerteza ou imprecisão, ou a classificação de seus atributos não se resume em sim ou não, mas existe a possibilidade de: mais ou menos; talvez; um pouco mais; um pouco menos.

O fato de a teoria fuzzy possibilitar esta flexibilidade na modelagem permite ao homem desenvolver algoritmos semelhantes ao pensamento humano. Um fator eminente dessa teoria é a sua capacidade de capturar conceitos intuitivos, além de considerar aspectos psicológicos utilizados pelos seres humanos em seu raciocínio usual, evitando que sua representação seja engessada por modelos tradicionais (OLIVEIRA e HIME, 1999).

O conceito central da teoria fuzzy é a definição das funções de pertinência, que representam numericamente o grau no

qual um elemento pertence a um conjunto. No caso da teoria dos conjuntos clássicos, o valor da função de pertinência de cada elemento, em um conjunto clássico, é 1 para membros (aqueles que certamente pertencem) ou 0 para não membros (aqueles que não pertencem). Já na teoria fuzzy, verifica-se que com o aumento do grau de pertinência de um elemento em um conjunto, o valor da função de pertinência para esse elemento também aumenta dentro do intervalo [0,1] (BOGARDI e DUCKSTEIN, 2002).

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

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

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

FIGURA 1 – Representação de um número fuzzy triangular, onde “ X é maior que a_1 , menor que a_3 , em torno de a_2 ”.
 Fonte: (SANTOS, 2008).

Risco Fuzzy e Confiabilidade

De acordo com GANOULIS (1994), se um evento, ou realização de um processo, 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:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad \text{Equação (3)}$$

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

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

Onde:

$$\tilde{R}(h) = [\tilde{R}_1(h), \tilde{R}_2(h)] \quad \text{Equação (5)}$$

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

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

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

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

Para CHAGAS (2005), os índices fuzzy de confiabilidade e de falha são funcionais e dependem de várias funções como variáveis independentes que podem ser definidas como da seguinte forma:

➤ Índice de confiabilidade, ou garantia fuzzy:

$$R_c = \frac{\int_{Z>0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad \text{Equação (7)}$$

➤ Índice de falha, ou risco fuzzy:

$$R_f = \frac{\int_{Z<0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

$\mu_{\tilde{M}}$: representa a função de pertinência;

m: representa um número real associado à função de pertinência marginal de segurança.

METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste em aplicar, adequadamente, a teoria fuzzy na equação de transporte de massa e resolver a equação diferencial fuzzy, resultado desta aplicação. Com isso, o risco de falha e a confiabilidade na concessão de outorga de lançamento de efluentes podem ser determinados em toda extensão do rio.

Aplicando a Teoria Fuzzy na equação 1, a mesma pode ser “fuzzificada” e transformada na seguinte formulação:

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{E} \tilde{A} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) \pm \tilde{K} \tilde{C} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$\tilde{A}$: é a função de pertinência para a área transversal;

$\tilde{C}$: é a função de pertinência para a concentração;

$\tilde{U}$: é a função de pertinência para o campo de velocidade longitudinal;

$\tilde{K}$: é a função de pertinência para o coeficiente de dispersão longitudinal;

$\tilde{E}$: é a função de pertinência para o decaimento;

Os parâmetros fuzzificados nesta equação são: a velocidade, o coeficiente de dispersão longitudinal e o coeficiente de decaimento. Neste caso, a fuzzificação destes parâmetros obedece à formulação proposta por CHAGAS (2005), conforme as equações abaixo:

$$\mu_k = \frac{k - k_L}{k_m - k_L}, \text{ para } k_L \leq k \leq k_m \quad \text{Equação (10)}$$

$$\mu_k = \frac{k - k_u}{k_m - k_u}, \text{ para } k_m \leq k \leq k_u \quad \text{Equação (11)}$$

Onde: $k_L = 0,75k_m$ e $k_u = 1,25k_m$

Para a solução desta equação foi usado o Método das Diferenças Finitas, notadamente, o Esquema de Crank-Nicholson, onde a equação 9 é transformada na equação matricial fuzzy abaixo:

$$\tilde{A}(\alpha) \tilde{C}_{i-1}^{j+1}(\alpha) + \tilde{B}(\alpha) \tilde{C}_i^{j+1}(\alpha) + \tilde{D}(\alpha) \tilde{C}_{i+1}^{j+1}(\alpha) = \tilde{F}_i^j(\alpha) \quad \text{Equação (12)}$$

Onde: 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:

$$[\tilde{\varphi}(\alpha)] [\tilde{C}(\alpha)] = [\tilde{F}(\alpha)] \quad \text{Equação (13)}$$

Onde: α é o nível de pertinência considerado.

A solução da equação matricial fuzzy (equação 13) fornece os valores das concentrações em forma de funções de pertinência. Com a solução do modelo proposto, pode-se determinar o risco de falha e a confiabilidade através das equações 7 e 8, tomando para a resistência os valores de concentrações definidos pela resolução CONAMA 357/2005, conforme a tabela abaixo:

Tabela 1: Parâmetros DBO e OD permissíveis segundo a Resolução CONAMA 357/2005.

Parâmetro	Doce				Salinas				Salobras				
	Esp.	1	2	3	4	Esp.	1	2	3	Esp.	1	2	3
DBO ₅ (mg O ₂ / L)	-	< 3	< 5	< 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OD (mg O ₂ / L)	-	> 6	> 5	> 4	> 2	-	> 6	> 5	> 4	-	> 5	> 4	> 3

RESULTADOS

A metodologia proposta foi aplicada em um rio, sujeito a lançamentos de efluentes, de modo que alguns cenários pudessem ser simulados. As análises foram realizadas com base nas questões que norteiam a concessão de outorga de lançamentos de efluentes, de modo que o risco fuzzy do corpo hídrico se contaminar pudesse ser avaliado.

A Figura 2 representa o resultado de uma simulação para um lançamento de efluente, onde a concentração de DBO₅ é de 200 mg/L de O₂, em um rio de declividade 0,00005 m/m e

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 (CHAGAS 2005). Para a resistência foi considerado o limite imposto pela legislação brasileira para um rio de classe 2 que tem valor igual a 5mg/L. De acordo com a figura são apresentados os gráficos do risco fuzzy para diferentes tempos de lançamentos. Como esperado o risco segue um padrão semelhante ao comportamento da nuvem poluente, onde seus valores nos primeiros tempos caem rapidamente para zero, num trecho do rio onde a nuvem poluente ainda não se propagou. À medida que o tempo passa e o processo advectivo desloca a nuvem rio abaixo, o risco aumenta de acordo com esta propagação.

FIGURA 2 – Comportamento da Função Risco, em diferentes tempos.

A Figura 3 mostra o resultado de uma simulação considerando os dados anteriores para diferentes vazões, onde o risco é calculado para um tempo de 20 horas após o lançamento. Analisando os resultados é possível perceber que, em um lançamento para uma concentração de DBO₅ é de 200mg/L de O₂, o risco de contaminação, para este rio com vazões de até 15m³/s, é muito alto. Neste caso, os resultados mostram que o risco mínimo para esta vazão está acima de 70% o que é considerado excessivo para os padrões ambientais normais (VIEIRA, 2005). Por outro lado, para vazões de 25m³/s e 30m³/s o risco encontra-se dentro de uma faixa aceitável.

FIGURA 3 – Comportamento da Função Risco para diferentes vazões, em 20 horas.

A Figura 4 mostra o comportamento do risco a 10 km do ponto de lançamento para diferentes vazões. Como se pode observar, o risco, que nos primeiros instantes é zero, cresce rapidamente à medida que decorre o tempo necessário para que a nuvem poluente chegue à seção observada. É importante observar que, de acordo com a figura, o risco atinge um estado de equilíbrio por volta de 9 horas, permanecendo assim durante todo o tempo de observação. Por exemplo, para uma vazão de 30m³/s, o risco tem seu estado estacionário em 20%, enquanto que para uma vazão de 25m³/s, o risco é praticamente de 40%.

FIGURA 4 – Comportamento do Risco, com o tempo, para diferentes vazões.

A Figura 5 mostra a evolução do risco de contaminação de um rio para diferentes concentrações outorgadas. Observa-se que para efluentes tratados com concentrações de DBO₅ de até 100 mg/L de O₂ e para uma vazão de 20m³/s o risco é aceitável. Por outro lado, para concentrações de DBO₅ a partir de 150 mg/L de O₂, o risco começa a ficar significativo nas proximidades do ponto de lançamento que, para uma concentração de DBO₅ de 150mg/L de O₂, varia de 45% até 15%.

FIGURA 5 – Comportamento do Risco, para diferentes concentrações, em t=20 horas.

A Figura 6 mostra o comportamento do risco em uma seção a 10 km do ponto de lançamento para diferentes lançamentos de concentração. Os resultados mostram que para cada tipo de lançamento há um risco estabilizado após 9 horas

de observação. Este resultado é esperado tendo em vista a natureza do lançamento. Neste caso, como o lançamento do efluente é contínuo, há uma tendência de que, em uma dada seção, as concentrações médias se estabeleçam, fazendo com que o risco fique praticamente constante.

FIGURA 6 – Comportamento do Risco com o tempo, para diferentes concentrações.

A Figura 7 mostra o comportamento do risco e da confiabilidade para diferentes vazões, em uma 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 confiabilidade cresça na mesma proporção.

FIGURA 7 – Comportamento do risco e da confiabilidade para diferentes vazões a 10km do ponto de lançamento, para $t = 20h$.

Finalmente, a Figura 8 mostra o comportamento do risco e da confiabilidade para diferentes concentrações na mesma seção anteriormente analisada. Como se pode observar, o risco cresce à medida que crescem as concentrações outorgadas. Da mesma forma, a garantia diminui na mesma proporção. Este resultado permite concluir que, para concessão de outorga de lançamento em um rio, há a necessidade de uma análise criteriosa das condições hidrológicas do rio, das condições de lançamento, incluindo a vazão de lançamento, e da capacidade de dispersão do corpo hídrico. Sem esta análise o risco de se cometer erro de avaliação nessas concessões pode tornar-se considerável.

FIGURA 8 – Comportamento do risco e da confiabilidade para diferentes valores de concentração em 10 km do ponto de lançamento, para $t = 20h$.

CONCLUSÕES

Após análise dos resultados, verificou-se que a aplicação da Teoria Fuzzy em Modelos de Transporte de Poluentes, constitui-se em uma alternativa para avaliar o Risco, ou a Confiabilidade, na concessão de outorga por parte do Poder Público. Os resultados mostraram que rios com baixa vazão, como é o caso dos rios da Região Nordeste em períodos de estiagem, 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 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ e com baixa capacidade de diluição, não devem receber efluentes sem um tratamento prévio. Para esses casos, o risco encontrado foi superior aos valores, normalmente, encontrados na literatura, para obras de engenharia.

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 através de estudos anteriores (CHAGAS 2005), mostra a importância desta metodologia nas questões pertinentes à quantificação dos riscos para concessão de outorga de lançamento. Neste caso, os resultados confirmam a necessidade de uma análise criteriosa na concessão destes benefícios. Como se pode observar, a Teoria Fuzzy, devidamente aplicada, pode ser uma importante ferramenta nas questões relacionadas com os Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos, notadamente, naqueles que tratam das questões da qualidade da água em rios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenadoria de Capacitação de Recursos Humanos Programa de Demanda Social- CAPES, pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGARDI, I e DUCKSTEIN, L. The Fuzzy Logic paradigm of risk analysis. In: Risk Based Decision making in water Resources X. Santa Barbara, California. New York, ASCE, 2002.

BRASIL. Resolução CONAMA n 357, de 17 de março de 2005. Brasília, 2005.

CHAGAS, P. F. Perspectivas da aplicação da teoria fuzzy para o cálculo de risco em sistemas hidrodinâmicos. 2005. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

CRUZ, J. C. Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. 2001. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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, set, VCH Publishers Inc, Weinheim, New York; Basel, Cambridge, Tokyo, 1994.

LIMA, O. S. J. Análise de pontos por função fuzzy. 2002. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Software) – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2002.

NAHON, I. M. Sistema de apoio a análise de outorga de lançamento de efluentes para a variável Demanda Bioquímica de Oxigênio: Estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. 2006. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

OLIVEIRA, J e HIME, A. Lógica Difusa: Aspectos práticos e aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 1999.

ROQUES, T. V. P. Aplicação de modelos computacionais na análise de outorga para diluição de efluentes em

corpos de água – fontes pontuais e difusas. 2006. 201f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2006.

SAAVEDRA, O. R. Introdução aos conjuntos difusos – Notas de aula – Inteligência Artificial, Universidade Federal do Maranhão, 2003.

SANTOS, S. H. L. Aplicação da teoria dos números difusos em um modelo de operação de reservatório, para estudar o comportamento da vazão regularizada e do rendimento. 2008. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

VIEIRA, V. P. P. B. Análise de risco em recursos hídricos: fundamentos e aplicações. Porto Alegre: ABRH, 2005.