



## **RISCO DE FALHA AMBIENTAL EM UM RIO SUJEITO À CONCESSÃO DE OUTORGA DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES, MEDIANTE APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE STREETER-PHELPS FUZZIFICADA.**

**Karla de Carvalho Vasconcellos<sup>1</sup>**

**Juliana Alencar Firmo de Araújo<sup>2</sup>**

**Raquel Jucá de Moraes Sales<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

Este trabalho propõe uma metodologia para estudar o comportamento das concentrações da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e do oxigênio dissolvido (OD) em um rio sujeito a lançamentos de efluentes. Este estudo é baseado na transformação do modelo matemático de Streeter-Phelps em um modelo de natureza *fuzzy*, onde as concentrações de DBO e de OD são calculadas na forma de funções de pertinência. Desta forma, é possível incorporar incertezas no modelo, o que permite desenvolver uma metodologia para a determinação do risco de um corpo hídrico não atender as condições de uso previsto por norma quando recebe uma carga poluente proveniente de uma concessão de outorga de lançamento de efluentes. A pesquisa usa um programa computacional desenvolvido para calcular a partir das equações do modelo, as concentrações de DBO e de OD nas suas formas *fuzzy*. Também foi desenvolvida uma sub-rotina que permite que seja calculado o risco para o rio em questão que venha a receber lançamentos de efluentes. Os resultados mostraram que esta metodologia *fuzzy* é uma alternativa para ser considerada em questões pertinentes à gestão integrada dos recursos hídricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concessão de Outorga. Modelo Fuzzy de Streeter-Phelps. Poluição Hídrica.

## **ENVIRONMENTAL RISK ANALYSIS IN RIVER WATER QUALITY SUBJECT TO THE CONCESSION OF GRANTS**

---

<sup>1</sup>Mestre em Recursos Hídricos pela UFC. E-mail: [karla\\_vasconcellos@hotmail.com](mailto:karla_vasconcellos@hotmail.com).

<sup>2</sup>Doutoranda em Recursos Hídricos pela UFC, bolsista CAPES. E-mail: [judiaraujo@yahoo.com.br](mailto:juliaraujo@yahoo.com.br).

<sup>3</sup>Doutora em Recursos Hídricos pela UFC, pesquisadora PNPd. E-mail: [raqueljuca@gmail.com](mailto:raqueljuca@gmail.com).



## **FOR EFFLUENTS DISCHARGES APPLYING STREETER-PHELPS EQUATION FUZZIFIED**

### **ABSTRACT**

*This research proposes a methodology to study the behavior of the biochemical oxygen demand (BOD) and of the dissolved oxygen (DO) concentrations in a river subject to effluent discharges. This study is based on the transformation of the Streeter-Phelps mathematical model to a Streeter-Phelps fuzzy model, where the concentrations of BOD and of DO are calculated as membership functions. In such way, it is possible to incorporate uncertainties in the model, so that, it allows developing a methodology to determine if the risk of a body of water do not assist the use conditions established by the norm, when it receives a load pollutant, originating from a concession of grants of effluent discharges. The research uses a computational program, developed for this study, to make calculations, starting from the model equations, the BOD and the DO concentrations, in the membership functions. Also, a subroutine was developed that allows that the risk could be calculated for the river subject that receives effluents discharges. The results showed that this fuzzy methodology is an alternative to be considered in the matters related to Integrated Water Resources Management.*

**KEY-WORDS:** Concession of Grants. Streeter-Phelps Fuzzy Model. Water Pollution.

## **ANÁLISIS DE RIESGO AMBIENTAL EN LA CALIDAD DE AGUA DE RÍO PARA OTORGAR LA AUTORIZACIÓN PARA LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES, EN APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE STREETER-PHELPS FUZZIFICADA.**

### **RESUMEN**

*Esta investigación propone una metodología para estudiar el comportamiento de las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y de oxígeno disuelto (OD) en un río sujeto a las descargas de efluentes. Este estudio se basa en la transformación del modelo matemático del modelo Streeter-Phelps en una naturaleza difusa, donde las concentraciones de DBO y OD se calculan en forma de funciones de pertenencia. De este modo, es posible incorporar la incertidumbre en el modelo, lo que permite desarrollar una metodología para determinar si los riesgos de un cuerpo de agua no cumplen con las condiciones de uso establecidas en la norma, al recibir una carga contaminante proveniente de una concesión de la subvención de lanzamiento efluentes. El estudio utiliza un programa informático desarrollado para esta investigación calculando, a partir de las ecuaciones del modelo, las concentraciones de DBO y OD en sus formas difusas. También se desarrolló una subrutina que permite que el riesgo y la fiabilidad sean calculados, mientras el río en cuestión sea sujeto a descargas de efluentes. Los resultados muestran que esta metodología difusa es una alternativa a ser considerada en cuestiones relacionados al manejo integrado de recursos hídricos.*

**PALABRAS-CLAVE:** Concesión de subvención. Modelo difuso de Streeter-Phelps. Contaminación del Agua.



## 1. INTRODUÇÃO

A demanda por água de qualidade tornou-se um problema para engenheiros, cientistas e autoridades de governo devido ao desequilíbrio crescente entre essa demanda e a disponibilidade hídrica de cada região. Nesse contexto, a procura por sistemas que tenham condições de receber lançamentos de efluentes domésticos e industriais provenientes de grandes centros urbanos passou a ser um fator preocupante nos dias presentes. Esses efluentes tendem a ser lançados em rios e córregos que se encontram nos arredores das grandes cidades, causando prejuízos para a qualidade de suas águas, bem como para a vida aquática dos corpos hídricos.

Com o intuito de tratar dos problemas referentes à qualidade de água foram desenvolvidas várias metodologias que permitissem contribuir para um melhor entendimento desse processo. Atualmente, problemas de eutrofização, contaminação de mananciais, autodepuração dos rios e canais são tratados de forma eficiente através de modelagem matemática, pesquisa de campo e análises laboratoriais.

Este artigo propõe uma metodologia onde o modelo matemático de Streeter-Phelps é transformado em um modelo *fuzzy* de Streeter-Phelps para estudar o risco de contaminação em rios naturais, sujeitos a lançamentos de efluentes provenientes de concessão de outorgas. A pesquisa usa um programa computacional, desenvolvido para este trabalho, para calcular a partir das equações do modelo, na sua forma *fuzzy*, funções de pertinências da concentração de oxigênio dissolvido (OD), do déficit do OD e da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), em cada seção do rio. Finalmente, de posse desses resultados, o risco do sistema pode ser determinado para todos os cenários de lançamentos.

## 2. DADOS E MÉTODOS

### 2.1 Outorga pelo uso da água

A outorga de direito de uso de recursos hídricos é um dos seis instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecidos no inciso III, do art. 5º da Lei



Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Esse instrumento tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos.

De acordo com o inciso IV, do art. 4º da Lei Federal nº 9.984, de 17 de junho de 2000, compete à Agência Nacional de Águas – ANA outorgar, por intermédio de autorização, o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, bem como emitir outorga preventiva e a emissão da reserva de disponibilidade hídrica para fins de aproveitamentos hidrelétricos e sua consequente conversão em outorga de direito de uso de recursos hídricos.

Em cumprimento ao art. 8º da Lei 9.984/00, a ANA dá publicidade aos pedidos de outorga de direito de uso de recursos hídricos e às respectivas autorizações, mediante publicação sistemática das solicitações e dos extratos das Resoluções de Outorga (autorizações) nos Diários Oficiais da União e do respectivo Estado.

## 2.2 Modelo matemático de Streeter-Phelps

O modelo de Streeter-Phelps representa um modelo de fluxo tubular ideal ou fluxo em pistão. Seu comportamento é muito próximo ao comportamento do fluxo em rios e canais, o que justifica a escolha para esta pesquisa. Dessa forma, tem-se para o balanço de DBO no rio a seguinte equação, Sanders (2009):

$$U \frac{\partial L}{\partial x} = -K_d L \quad (1)$$

Onde:  $U$  – Velocidade média na seção [L/T];  $L$  – Concentração de DBO no rio [M/L<sup>3</sup>];  $K_d$  – Coeficiente de desoxigenação [T<sup>-1</sup>].

A condição de contorno que será usada nesta pesquisa considera que em  $x = 0$  a concentração de DBO seja  $L_0$ , onde  $L_0$  é dado por:

$$L_0 = \frac{(Q_r L_r + Q_w L_w)}{(Q_r + Q_w)} \quad (2)$$



Onde:  $Q_r$  – Vazão do rio em questão [ $L^3/T$ ];  $L_r$  – Concentração de DBO no rio [ $M/L^3$ ];  $Q_w$  – Vazão do efluente [ $M/L^3$ ];  $L_w$  – Concentração de DBO no efluente [ $M/L^3$ ].

Aplicando novamente o balanço de massa para o OD em um rio, é possível chegar à equação:

$$U \frac{dC}{dt} = +K_a(C_s - C) - K_r L \quad (3)$$

Onde:  $C$  – Concentração de OD no rio em estudo [ $M/L^3$ ];  $C_s$  – Concentração de OD saturado no rio [ $M/L^3$ ];  $K_a$  – Coeficiente de reaeração [ $T^{-1}$ ].

Como anteriormente, a condição de contorno para o OD é definido em  $x = 0$ ,  $C = C_0$ , onde:

$$C_0 = \frac{(Q_r C_r + Q_w C_w)}{(Q_r + Q_w)} \quad (4)$$

Onde:  $C_w$  – Concentração de OD no efluente [ $M/L^3$ ];  $C_0$  – Concentração de OD no rio, antes do lançamento [ $M/L^3$ ].

Para a solução da equação (3), define-se o déficit de OD no rio como sendo:

$$D = C_s - C \quad (5)$$

Onde:  $D$  – Déficit de OD no rio [ $M/L^3$ ].

Desta forma, as equações diferenciais (1) e (3) podem ser resolvidas, tendo como resultado o modelo de Streeter-Phelps definido pelo par de equações:

- Demanda Bioquímica de Oxigênio

$$L = L_0 e^{(-\frac{K_r x}{U})} \quad (6)$$

- Déficit de Oxigênio Dissolvido

$$D = D_0 e^{(-\frac{K_a x}{U})} + \frac{K_d L_0}{K_a - K_r} (e^{(-\frac{K_r x}{U})} - e^{(-\frac{K_a x}{U})}) \quad (7)$$

Sendo  $K_r = K_d + K_s$ , onde:  $K_s$  – Coeficiente de sedimentação;  $D_0$  – Déficit inicial no ponto de lançamento.



O modelo formado pelas equações conhecido como modelo matemático de Streeter-Phelps foi proposto em 1925 para estudar a qualidade das águas do Rio Ohio, nos Estados Unidos. Com esse modelo estava inaugurada a metodologia para se estudar a qualidade de água em rios através de modelagem matemática. Com o desenvolvimento dos programas computacionais, essa prática é um sucesso global.

### 2.3 Modelo matemático *fuzzy* de Streeter-Phelps.

Para este estudo, as equações (6) e (7) não são adequadas, tendo em vista que as mesmas não estão levando em conta as incertezas presentes nos vários processos que envolvem os modelos de qualidade de água. Em outras palavras, como a análise de risco é um processo que mede a incerteza, não é possível o uso destas equações. Para resolver esse problema, o uso da teoria *fuzzy* se torna fundamental. Isso é feito transformando o par de equações descritos em novas equações com natureza *fuzzy*.

Para transformar as equações de Streeter-Phelps em equações *fuzzy* basta transformar todos os parâmetros presentes nas equações (1) e (3) em parâmetros *fuzzy's*, o que corresponde em transformar os vários parâmetros em funções de pertinência. Dessa forma, as equações diferenciais que compõem o modelo se transformam em:

- Equação diferencial *fuzzy* para a DBO:

$$\tilde{C} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = -\tilde{a} \tilde{C} \quad (8)$$

Com solução analítica expressa por:

$$\tilde{C} = \tilde{C}_0 e^{-\tilde{a}x} \quad (9)$$

- Equação diferencial *fuzzy* para OD:

$$\tilde{C} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} = -\tilde{a} \tilde{C} - \tilde{r} \tilde{C} \quad (10)$$

Com solução analítica expressa por:





$$\tilde{L} = \tilde{L}_0 - \tilde{K}_1 \left( \frac{\tilde{L}_0}{\tilde{L}_a} \right) \left( 1 - e^{-\tilde{D}_0 t} \right) \quad (11)$$

Onde:  $\tilde{C}$  – Função de pertinência para a concentração;  $\tilde{U}$  – Função de pertinência para o campo velocidade longitudinal;  $\tilde{L}$  – Função de pertinência para a concentração de DBO;  $\tilde{L}_0$  – Função de pertinência para a concentração inicial de DBO;  $\tilde{K}_1$  – Função de pertinência para os diferentes parâmetros de decaimento;  $\tilde{D}_0$  – Função de pertinência para o déficit de oxigênio inicial;  $\tilde{D}$  – Função de pertinência para o déficit de oxigênio no tempo t.

## 2.4 Cálculo do risco e confiabilidade fuzzy

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. Essa diferença também é um número *fuzzy*. Deve ficar claro que, neste caso, a carga usada não é a concentração lançada, mas o resultado da concentração obtido com a solução computacional do modelo. Essa concentração é que deve ser usada para o cálculo da função marginal de segurança. Assim, segundo Ganoulis (1994):

$$\tilde{M} = \tilde{L} - \tilde{R} \quad (12)$$

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

$$\tilde{M}_{(h)} = [\tilde{L}_{(h)} - \tilde{R}_{(h)}] \quad (13)$$

Onde:

$$\tilde{L}_{(h)} = \lfloor \tilde{L}_{(h)} \rfloor \quad (14)$$

$$\tilde{R}_{(h)} = \lfloor \tilde{R}_{(h)} \rfloor \quad (15)$$



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

- Falha:  $\tilde{\lambda}_{\text{falha}}$
- Confiabilidade:  $\tilde{\lambda}_{\text{confiabilidade}}$

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*:

$$R_c = \frac{\int_{Z>0} \mu_{\tilde{\lambda}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{\lambda}}(m) dm} \quad (16)$$

- Índice de falha, ou risco *fuzzy*:

$$R_f = \frac{\int_{Z<0} \mu_{\tilde{\lambda}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{\lambda}}(m) dm} \quad (17)$$

Onde:  $\mu_{\tilde{M}}$  – Função de pertinência;  $m$  – Número real associado à função marginal de segurança.

Os parâmetros *fuzzificados* nesta equação são a velocidade e coeficientes de decaimento, *fuzzificados* através da formulação proposta Chagas (2005), onde a função de pertinência é calculada levando-se em consideração a forma triangular onde os extremos com grau de pertinência zero é encontrado pela multiplicação do valor central por um desvio padrão. Como valores limites para a distribuição triangular estão sendo usados os coeficientes 0,75 e 1,25.

Com a solução do modelo proposto, pode-se determinar o risco de falha e a confiabilidade através das equações (16) e (17), 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 – Resolução CONAMA 357/2005**

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

Fonte: SANTOS, 2011.

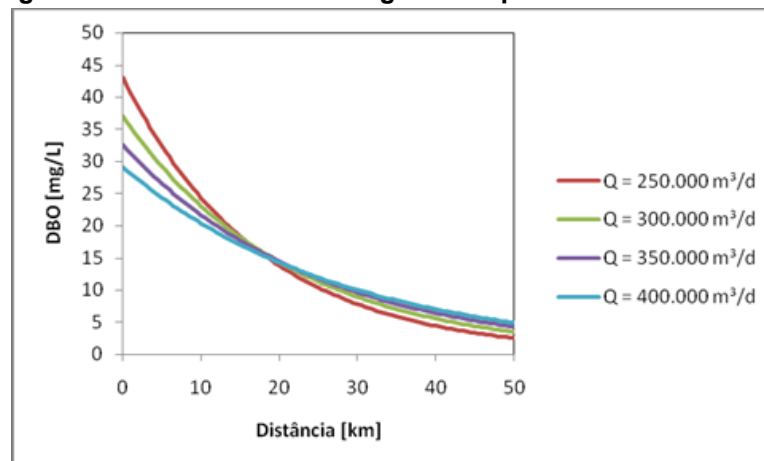
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia desenvolvida permitiu que fossem determinados os perfis de concentração da DBO, do OD e do déficit de OD ao longo de um rio com dimensões definidas por uma área de seção transversal de 16 m<sup>2</sup> com vazões variando inicialmente de 250.000 a 400.000 m<sup>3</sup>/d. Esses dados foram colocados em um programa computacional desenvolvido para esta pesquisa, permitindo assim que um conjunto de simulações fosse realizado.

Primeiramente, foi feita uma simulação para testar o programa, tomando como base o modelo na forma determinística, onde o modelo de Streeter-Phelps foi considerado como um modelo composto por variáveis determinísticas na entrada e na saída. Os valores considerados para os decaimentos foram  $K_r = 0,89 d^{-1}$ ,  $K_d = 0,6 d^{-1}$  e  $K_r = 0,89 d^{-1}$  e  $K_d = 2,1 d^{-1}$ . A concentração de DBO no efluente lançado é de 300 mg/L; a concentração de DBO no rio antes do lançamento é de 2 mg/L; a temperatura foi considerada igual a 27°C; a vazão de lançamento é de 40.000 m<sup>3</sup>/d e a concentração de OD no efluente foi considerada igual a 2 mg/L. Os resultados desta simulação são mostrados nas figuras abaixo.

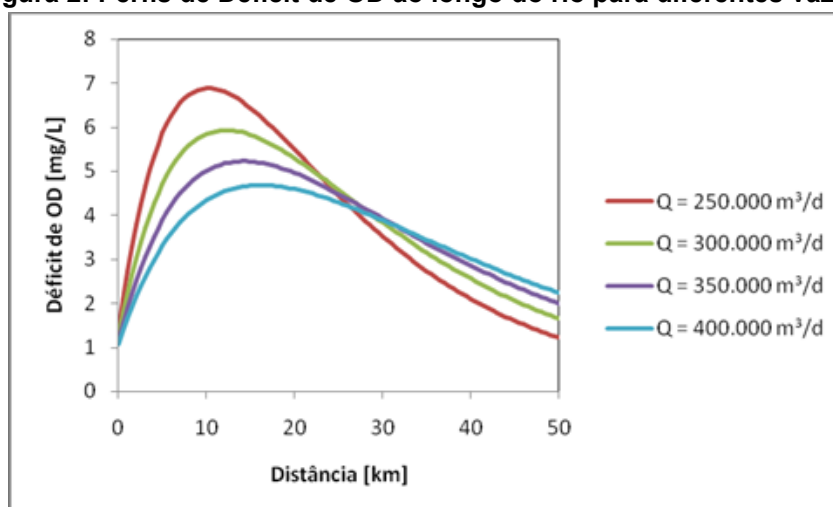


Figura 1: Perfis de DBO ao longo do rio para diferentes vazões.



A figura 1 mostra os perfis de DBO ao longo do rio para diferentes vazões. Neste caso foram consideradas vazões variando entre 250.000 m<sup>3</sup>/d até 400.000 m<sup>3</sup>. Os resultados mostram que a concentração de DBO depende da vazão de diluição disponível no rio. Por exemplo, quando a vazão é de 250.000 m<sup>3</sup>/d a concentração inicial é de 43 mg/L, enquanto que quando a vazão é de 400.000 m<sup>3</sup>/d, a concentração inicial é de 28 mg/L. Esse resultado é importante nos processos de concessão de outorga, tendo em vista que rios com baixas vazões precisam de um controle mais rígido neste tipo de concessão.

Figura 2: Perfis de Déficit de OD ao longo do rio para diferentes vazões

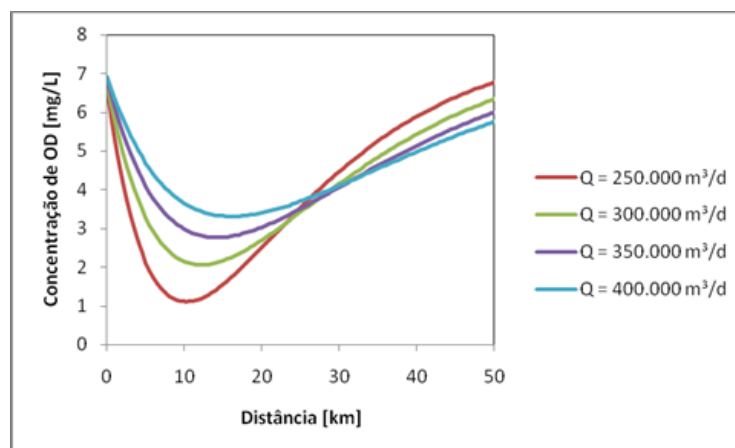




A figura 2 mostra os perfis do déficit de OD resultantes do lançamento do efluente no rio. É possível verificar que o déficit tem um ponto crítico que varia com a vazão do rio. Como pode ser visto, o pico de déficit é uma função da vazão, variando para as condições da simulação entre 7 mg/L para a vazão de 250.000 m<sup>3</sup>/d até 4,5 mg/L para uma vazão de 400.000 m<sup>3</sup>/d. Isso era de se esperar considerando que quanto maior for a vazão maior será o poder de diluição do corpo hídrico.

Um fato interessante diz respeito ao comportamento do déficit nas seções a partir de 25 km do ponto de lançamento. Neste caso, o déficit correspondente à maior vazão, é menor do que o déficit correspondente à menor vazão. Este comportamento era esperado, considerando o comportamento dos perfis da DBO, onde a declividade da curva de DBO aumenta com a distância de forma não linear.

**Figura 3: Perfis de OD ao longo do rio para diferentes vazões.**

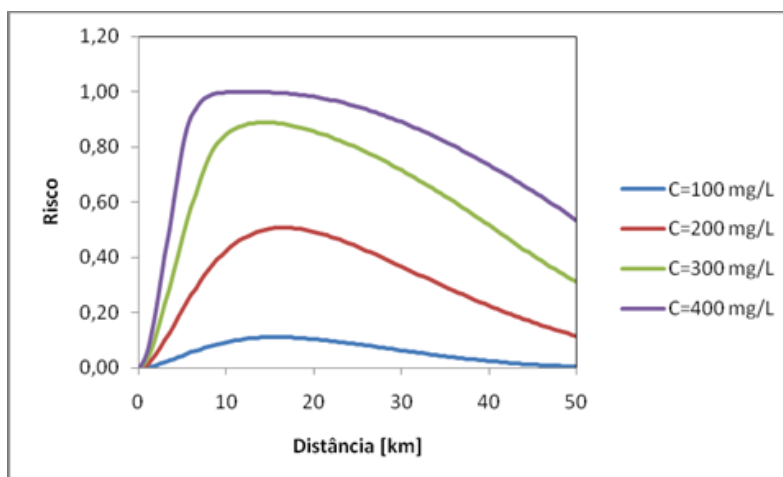


A figura 3 mostra os perfis de OD para diferentes vazões ao longo do rio. Como esperado, esses perfis dependem essencialmente da vazão, pois dependem da DBO e do déficit de OD. Porém, algo interessante é percebido nessa figura: para uma vazão de 250.000 m<sup>3</sup>/d, a concentração de OD se aproxima do valor zero, no seu ponto crítico. Ou seja, para um lançamento de 300 mg/L, valor muito comum para efluentes domésticos, sem tratamento, a vazão não poderá ser de 250.000 m<sup>3</sup>/d. Nesse caso, as águas de qualquer rio, no ponto de ocorrência da concentração



crítica, são consideradas poluídas para qualquer tipo de uso. Esse resultado mostra que esta metodologia permite que um programa de controle de concessão de outorga possa ser feito com eficiência.

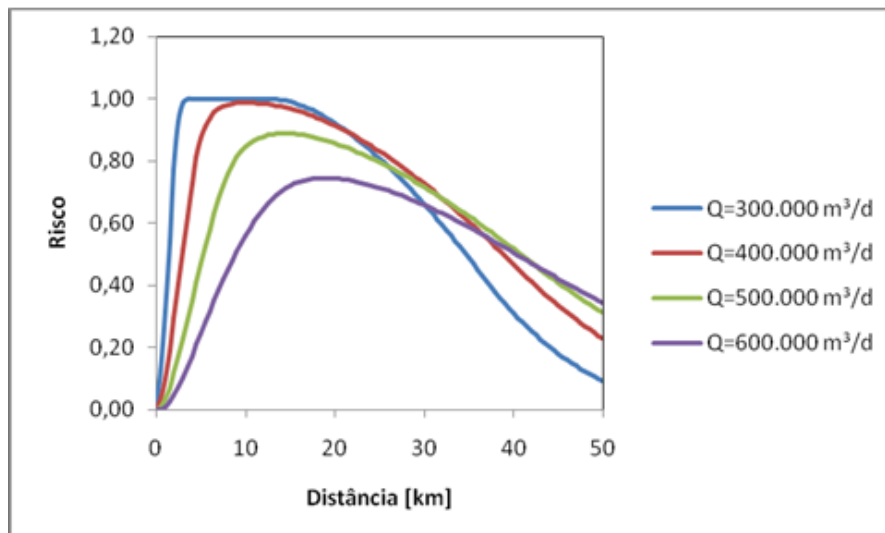
**Figura 4: Perfis da função risco para diferentes lançamentos.**



A figura 4 mostra os perfis do comportamento do risco para diferentes lançamentos. Neste caso, a vazão do rio foi considerada como sendo de 500.000 m<sup>3</sup>/d. Os lançamentos variaram de 100 mg/L até 400 mg/L. Através dos resultados pode-se ver que para lançamentos acima de 300 mg/L, e uma vazão como a usada nessa simulação, a situação chega a ficar crítica em algumas seções do rio. Por exemplo, para um lançamento de 400 mg/L, a situação fica crítica por alguns quilômetros, o que corresponde a um sério problema ambiental tendo em vista que nesse trecho do rio há um considerável risco de degradação ambiental.



**Figura 5: Perfis do Comportamento do Risco para diferentes vazões.**



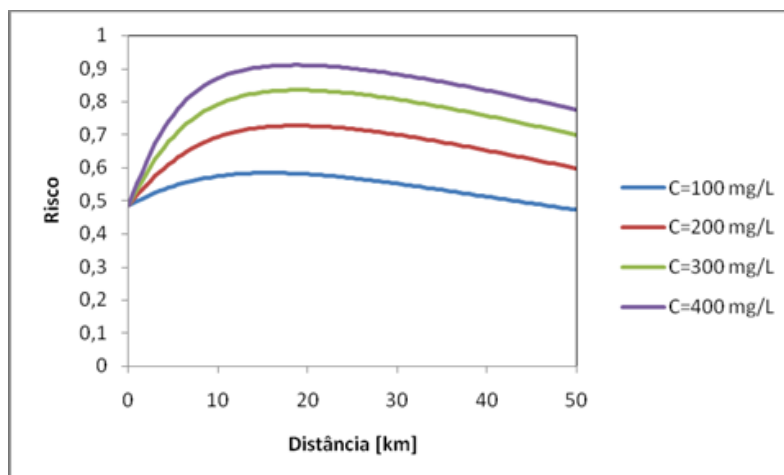
A figura 5 mostra os perfis do risco para diferentes vazões. Esse é um cenário típico de várias estações ao longo de um ano. Através dessa simulação, pode-se ver que é possível conceder outorga para lançamentos em períodos de ano e condicionar essas concessões para períodos de seca. Por exemplo, para um lançamento de um efluente com concentração de DBO igual a 300 mg/L e uma vazão de 600.000 m<sup>3</sup>/d, as funções do risco se comportam dentro de um padrão confiável. Veja que, nesse caso, o risco máximo chega a ser próximo de 80%, mas somente em um pequeno trecho do rio. O que ocorre é que uma concentração de DBO de 300 mg/L é muito alta para um rio com 600.000 m<sup>3</sup>/d. Para rios com essa vazão, é necessário que se cobre um tratamento primário para os efluentes que neles possam ser lançados.

A figura 6 mostra os perfis do risco para diferentes lançamentos resultantes de uma simulação realizada com dados reais do rio Potengi, no estado do Rio Grande do Norte. Para esta simulação foi considerada uma vazão de 1.261.440 m<sup>3</sup>/d.

O rio Potengi suporta bem lançamentos de até 100 mg/L sem oferecer riscos significativos para as condições de critério de avaliação ambiental. Quando a concentração de DBO ultrapassa os 200 mg/L, os resultados mostram que o risco já possui resultados próximos a 70%, o que é um resultado mais significativo para uma avaliação ambiental séria.



Figura 6: Perfis da função risco para diferentes lançamentos em um cenário chuvoso.



É importante dizer que, de acordo com os resultados desta pesquisa, os modelos *fuzzy's* com base nas equações de Streeter-Phelps atenderam plenamente as expectativas, onde perfis de campos de risco puderam ser calculados e mostrados em forma de gráficos, permitindo assim que análises mais criteriosas pudessem ser feitas nos processos de concessão de outorga de lançamentos de efluentes.

#### 4. CONCLUSÕES

Após a realização de um conjunto de simulações para diferentes cenários, e após o desenvolvimento da análise dos resultados obtidos através do programa computacional, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- O modelo *fuzzificado* de Streeter-Phelps permite que se calculem campos de concentração para DBO, OD e déficit de OD ao longo do rio na forma de funções de pertinência, onde incertezas podem ser avaliadas;
- O modelo de Streeter-Phelps modificado para um modelo *fuzzificado* de Streeter-Phelps permite que sejam calculados campos de risco *fuzzy* para diferentes cenários de escoamentos sujeitos a lançamentos de efluentes outorgados;





- Para rios com baixa vazão, como é o caso de rios localizados no Nordeste Brasileiro, há a necessidade de se estabelecer rigoroso controle nos lançamentos de efluentes, considerando que os resultados mostraram que, para baixa vazão, o risco de contaminação do sistema se torna muito alto para os padrões de segurança em engenharia ambiental;
- Os campos de risco e de confiabilidade seguem o padrão de comportamento das concentrações consideradas. Por exemplo, os resultados mostraram que quando se toma como referência o OD, o funcional do risco segue a forma que se distribui esta concentração, enquanto que o funcional da confiabilidade segue a distribuição do Déficit de OD, ao longo do canal em estudo;
- Como ficou claro, a metodologia permite que seja avaliado o risco em função da vazão do rio, bem como da concentração do efluente outorgado. Os resultados mostraram que quanto maior for a vazão de diluição, menor será o risco. Estes resultados estão de acordo com as observações de campo;
- A metodologia aplicada para o rio Potengi, no estado do Rio Grande do Norte, mostrou que se deve ter um importante controle na concessão de outorga para lançamento de efluentes. Neste caso, recomenda-se que seja feito um pré-tratamento nestes efluentes, de modo que suas concentrações sejam reduzidas. Os resultados mostraram que mesmo com uma concentração de DBO, para o efluente, de 100 mg/L, o risco nas proximidades do ponto de lançamento é de 60% em média. Ainda, os resultados mostram que mesmo a 30 km do ponto de lançamento, para estas concentrações, o risco ainda é de 55%, o que é muito alto para os padrões da engenharia ambiental;
- Finalmente, os resultados permitiram concluir que a teoria *fuzzy* pode se transformar em uma importante ferramenta nas questões do controle ambiental, fornecendo subsídios para melhorar programas de gestão dos recursos hídricos em regiões com baixa capacidade hídrica.



## REFERÊNCIAS

CHAGAS, P. F.; *Perspectivas da aplicação da teoria Fuzzy para cálculo de risco em sistemas hidrodinâmicos. Tese de Doutorado* em Engenharia Civil Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução N° 357, de 17 de março de 2005. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama>.

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

SANDERS, A. A. Desenvolvimento de uma metodologia, com base na teoria Fuzzy, aplicada a modelos da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD), para calcular o risco de degradação ambiental em rios naturais, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, 2009.

SANTOS, S. H. L., 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. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, 2012.