

## ESTUDO DA ANÁLISE DE RISCO EM RIOS SUJEITOS A LANÇAMENTOS DE EFLUENTES EM FUNÇÃO DA VAZÃO DO RIO E DA CARGA LANÇADA

*Sílvia Helena Lima dos Santos<sup>1</sup>; Patrícia Freire Chagas<sup>2</sup>; Raquel Jucá de Moraes Sales<sup>3</sup>; Juliana Alencar Firmo de Araújo<sup>4</sup>; Rejane Félix Pereira<sup>5</sup>; Maria Patrícia Sales Castro<sup>6</sup>; Francisca Valdenúza Almeida Silva<sup>7</sup>; Leila Ivete Teixeira Monteiro<sup>8</sup>; Tomás Adão Gonçalves<sup>9</sup> & Gabriel Yves de Melo Raulino<sup>10</sup>*

**Resumo** – Este trabalho desenvolveu uma formulação, com base na teoria *fuzzy*, conjuntamente com modelos de transporte de poluentes, para estudar o risco *fuzzy* de contaminação em função da vazão do rio e das concentrações de efluentes. 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. Para a realização das simulações foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem FORTRAN que deu suporte na obtenção dos resultados para os mais diversos cenários propostos. 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.

**Palavras-Chave** – Risco fuzzy; Transporte de poluentes; Gestão de recursos hídricos.

<sup>1</sup> Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora adjunta da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). E-mail: silvia.santos@unilab.edu.br

<sup>2</sup> Doutora, pesquisadora do Departamento de Saneamento da Companhia de Saneamento do Rio Grande do Norte. E-mail: pfchagas@yahoo.com

<sup>3</sup> Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora auxiliar da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). E-mail: raqueljuca@gmail.

<sup>4</sup> Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora do Centro Universitário UNICHRISTUS. E-mail: judiaraujo@yahoo.com.br

<sup>5</sup> Engenheira Civil, Doutora em Eng. Civil - Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professor Adjunto, IEDS, UNILAB. Campus dos Palmares, +55(85)3373-1593. CEP: 62785-000. Acarape – Ceará, E-mail: rejanefp@gmail.com

<sup>6</sup> Doutoranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) – UFC – E-mail: patricia.sales@gmail.com

<sup>7</sup> Graduanda, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: valdenuzaalmeida@yahoo.com.br

<sup>8</sup> Graduanda, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: monteiro.leila01@gmail.com

<sup>9</sup> Graduando, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: zebex13@gmail.com

<sup>10</sup> Graduando, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: gabrielyves@hotmail.com

## STUDYING OF THE RISK ANALYSES IN RIVERS SUBJECT TO EFFLUENTS RELEASES AS FUNCTION OF THE RIVER FLOW AND THE CONCENTRATIONS LOAD

**Abstract** – This work developed a formulation based on fuzzy theory, together with pollutant transport models, to study the fuzzy contamination risk as a function of river flow and effluent concentrations. The study uses parameters defined in the law to establish the class of the river and thus calculate, for each type of launch, the risk of contamination and the assimilation capacity of the river. For the accomplishment of the simulations a computational program was developed, in FORTRAN language that gave support in obtaining the results for the most diverse scenarios proposed. The results showed that the fuzzy theory can become a safe alternative to the control of pollution of rivers in general, thus providing a basis for the management of water resources.

**Keywords** – Fuzzy risk; Pollutant transport; Management of water resources.

### INTRODUÇÃO

A poluição dos corpos hídricos é um problema mundial e o seu controle representa um grande desafio para os gestores de recursos dos recursos hídricos, não só no Brasil, mas também no mundo. Principalmente em áreas urbanizadas, onde há uma maior demanda por água potável e os lançamentos de poluentes são mais frequentes e concentrados, este problema se agrava.

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.

Um aspecto que deve ser levado em conta na modelagem de qualidade de água são as incertezas inerentes em cada cenário. Estas estão relacionadas com os dados, com as medições dos parâmetros, com os métodos de análises e até mesmo com as aproximações das soluções. Desta forma, a análise de incertezas tem um papel fundamental na gestão de Recursos Hídricos bem como a técnica apropriada para lidar com o problema constitui-se nos fundamentos da análise de risco.

Neste trabalho, a metodologia que foi 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. Entretanto, deve ficar claro que a aplicação desta teoria nos recursos hídricos, para estudar a análise de risco, ainda se encontra em um estágio bastante embrionário. Há muito que se avançar neste campo para que se tenha uma metodologia consolidada. 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.

Este trabalho desenvolveu uma formulação com base na Teoria *Fuzzy* e nos Processos de Transporte de Poluente em um rio natural, para estudar o comportamento do risco e da garantia para diferentes vazões e para diferentes cargas de lançamentos de efluentes.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Formulação do Modelo Matemático

A solução do modelo matemático proposto, em uma forma *fuzzy*, representa um grande desafio. Como se sabe, a equação da difusão advectiva é uma equação diferencial parcial, cuja solução analítica só é possível para condições de contorno e condições iniciais simples. Para os casos mais comuns presentes no meio ambiente, há a necessidade de uma solução numérica, nos processos de solução do modelo.

De qualquer maneira, este modelo terá que ser resolvido para que haja sucesso na avaliação do risco e da confiabilidade ambiental neste corpo hídrico.

A formulação do modelo matemático consiste em tomar como base um volume de controle, e combinar as teorias acima citadas, de modo que seja possível se chegar à equação geral da difusão advectiva, definida pela equação diferencial abaixo (JAMES, 1993):

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

Em que os termos são representados por:

$C$  : concentração média em cada seção:  $[ML^{-3}]$ ;

$U$  : velocidade média em cada seção do rio:  $[LT^{-1}]$ ;

$A$  : área da seção transversal:  $[L^2]$ ;

$E$  : coeficiente de dispersão longitudinal:  $[L^2T^{-1}]$ ;

$KC$  : coeficiente de decaimento da substância:  $[T^{-1}]$ ;

$S_D$  : lançamento de cargas difusas ao longo do canal:  $[ML^{-3}/L]$ .

As condições de contorno são:

$$C(0,t)=C(t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(L,t) = 0 \quad (3)$$

As condições iniciais são:

$$C(x,0)=C(x) \quad (4)$$

Esse conjunto de equações precisam ser fuzzificadas. Isto se faz transformando os parâmetros de entrada da equação (1) em funções de pertinências, onde todos os parâmetros se transformam em um conjunto de números com diferentes graus de pertinências.

### Teoria Fuzzy

Segundo Saavedra (2003), a lógica convencional trata as informações de modo binário, classificando-as 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.

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

De acordo com Ganoulis *et al.*, (1994), o conceito central da teoria dos números *fuzzy* baseia-se na existência de uma função de pertinência para representar numericamente o grau através do qual determinado elemento pertence a um conjunto. Assim, conforme Zadeh (1965), um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência que irá mapear os elementos de um determinado domínio para um número real pertencente ao intervalo [0,1].

Normalmente, uma função de pertinência está na forma  $\tilde{A}: X \rightarrow [0,1]$ . Assim sendo, qualquer função assim representada pode ser associada a um conjunto *fuzzy*, dependendo dos conceitos e das propriedades que se deseja representar, considerando-se, ainda, o contexto no qual o conjunto está inserido. Um conjunto *fuzzy* é um conjunto de pares ordenados onde o primeiro elemento é  $x \in X$  e o segundo é a função de pertinência  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  que mapeia  $x$  no intervalo [0,1]. Assim, a representação de um conjunto *fuzzy* é matematicamente definida por:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X; \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]\} \quad (5)$$

Onde:

$\mu_{\tilde{A}}(x)$  é o grau de pertinência de  $x$  no conjunto  $\tilde{A}$

### Risco e Confiabilidade Fuzzy

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:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (6)$$

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

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

Onde:

$$\tilde{R}(h) = [\tilde{R}_1(h), \tilde{R}_2(h)] \quad (8)$$

$$\tilde{L}(h) = [\tilde{L}_1(h), \tilde{L}_2(h)] \quad (9)$$

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

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

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

Segundo 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:

- índice de confiabilidade, ou garantia *fuzzy*:

$$R_c = \frac{\int_{Z>0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (10)$$

➤ índice de falha, ou risco *fuzzy*:

$$R_f = \frac{\int_{Z<0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (11)$$

Onde:

$\mu_{\tilde{M}}$  representa a função de pertinência;  $m$  representa um número real associado à função de pertinência marginal de segurança.

Aplicando a teoria *fuzzy* na Equação (1), a mesma pode ser “fuzzificada” e transformada na seguinte formulação.

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{E} \tilde{A} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) \pm \tilde{K} \tilde{C} + \tilde{S}_D \quad (12)$$

Onde:

$\tilde{A}$ : 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;  $\tilde{E}$ : função de pertinência para o coeficiente de dispersão longitudinal;  $\tilde{K} \tilde{C}$ : função de pertinência para o decaimento;  $\tilde{S}_D$ : função de pertinência para o lançamento difuso.

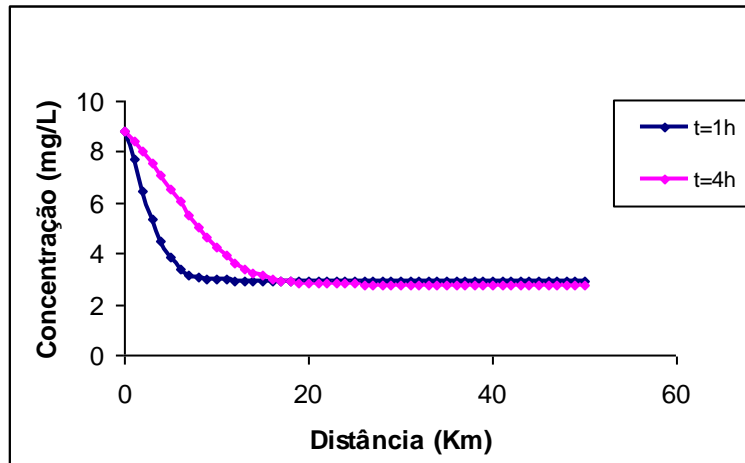
A Equação 12 precisa ser resolvida para se obter o campo de concentração, em sua forma de funções de pertinências que permitiram a determinação do risco e da garantia em todos os pontos do domínio definido no estudo e em todos os intervalos de tempo considerados.

## RESULTADOS

Após uma série de simulações, onde um programa computacional foi utilizado tomando como base dados de um rio natural, foi possível obter-se alguns resultados que serão analisados a partir das figuras abaixo.

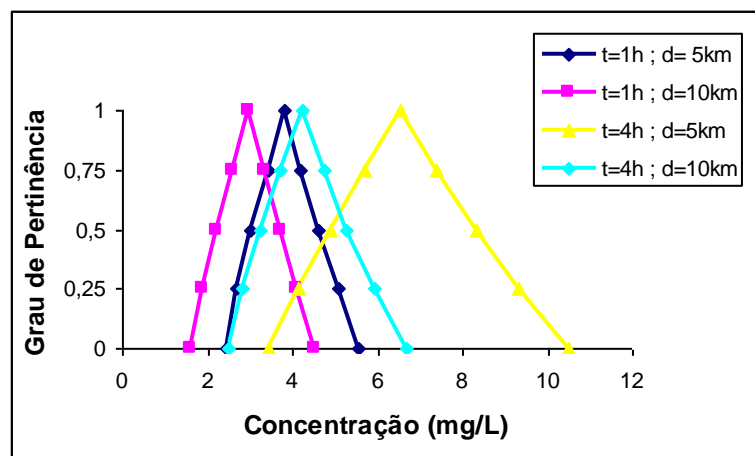
Para essas simulações foram um lançamento de efluentes, onde a concentração de DBO é de 200 mg/L, em um rio de declividade 0,00005 e um coeficiente de rugosidade de 0,01. A largura do canal principal é de 20m e sua vazão é de 20m<sup>3</sup>/s. O coeficiente de decaimento em sua forma *fuzzy* é dado por [0, 00000434;0,00000578;0,00000723], expressos em s<sup>-1</sup>. Para a resistência foi considerado o limite imposto pela legislação brasileira para um rio de classe 2 que tem valor igual a 5mg/L.

A Figura 1 mostra o comportamento do perfil de concentração para diferentes tempos em função da distância. Uma análise da figura permite verificar que os valores de concentração para o grau de pertinência 1, seguem o padrão dos perfis de concentração encontrados na literatura para um lançamento contínuo na origem. O resultado mostra que a nuvem poluente avança rio abaixo deslocado pelo processo advectivo.



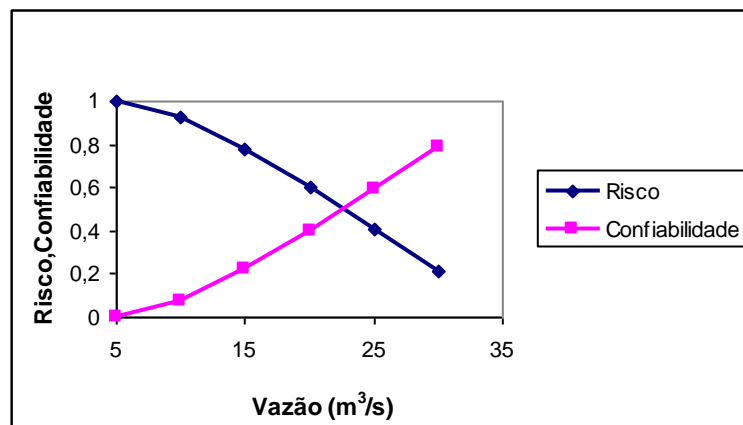
**FIGURA 1** – Comportamento do perfil de concentração para diferentes tempos.

A Figura 2 mostra as funções de pertinência para diferentes seções do rio e intervalos de tempo. O resultado permite avaliar que as bases de números fuzzy para as concentrações variam no tempo e no espaço em função da presença da nuvem poluente nestas seções. Por exemplo, em 1h e a uma distância de 5 km a função de pertinência tem bases fuzzy variando de 2,1 mg/L a 6,5 mg/L. Em  $t = 4h$  a função de pertinência se deslocou para a direita formando uma base fuzzy de 2,2 mg/L a 10,5 mg/L. Isto ocorre porque para  $t = 4h$  a nuvem poluente está chegando a 5km da origem, fazendo com que a concentração aumente e sua função de pertinência se desloque para direita. Este resultado tem consequências significativas na determinação do risco.



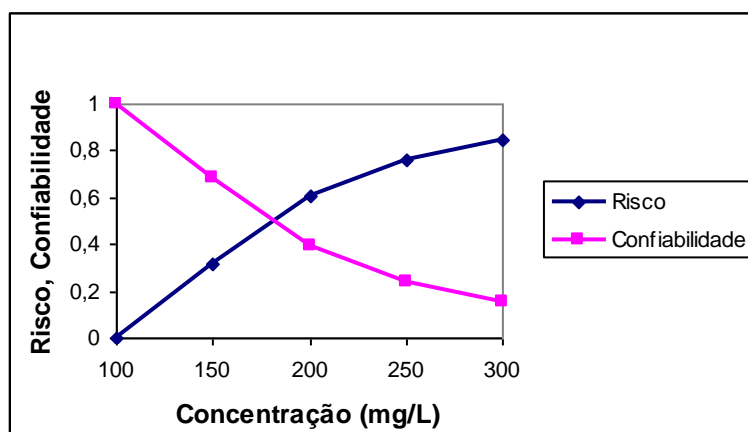
**FIGURA 2** – Função de pertinência da concentração, em diferentes seções e tempo.

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  $t = 20h$ .

Finalmente a Figura 4 mostra o comportamento do risco e da garantia para diferentes concentrações na mesma seção anteriormente analisada. Como pode-se observar o risco cresce à medida que cresce 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 natural, 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 4** – Comportamento do risco e da garantia para diferentes valores de concentração em 10 km do ponto de lançamento para  $t = 20h$ .

## CONCLUSÕES

Após a aplicação do modelo proposto em um rio natural sujeito a lançamentos de efluentes, uma análise foi realizada com vistas à analisar o comportamento do risco e da confiabilidade como função da vazão do rio e da carga de lançamento. A aplicação da formulação fuzzy na Equação de Balanço de Massa mostrou-se eficiente no cálculo do risco e da garantia, os quais representam medidas de controle para o sistema hídrico em questão. Com isso as seguintes conclusões estão sendo tiradas:

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  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  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.

Finalmente conclui-se que a metodologia proposta, mostrou-se capaz de calcular os campos de riscos e de garantia para rios naturais sujeitos a lançamentos de efluentes e, assim, permitir com mais eficiência que se faça um diagnóstico apropriado nos processos de concessão de outorga;

## REFERÊNCIAS

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.

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.

LIMA, O. S. J., Análise de Pontos por Função Fuzzy, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Software, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2002.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. Direito Ambiental brasileiro. 11. ed. São Paulo: Malheiros Editores Ltda., 2003. 1064 p.

PORTO, M.F.A. Sistemas de Gestão da Qualidade das Águas: uma proposta para o caso brasileiro. 2002. Tese ( Livre Docência em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

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 Vazão Regularizada e do Rendimento, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.