



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ANÁLISE DO RISCO DE FALHA NA DISPERSÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS, UTILIZANDO A TEORIA FUZZY

*Heloisa Beatriz Cordeiro Moreira¹
Raimundo de Oliveira Souza²

*RISK ANALYSIS OF THE DISPERSION OF AIR
POLLUTANTS USING FUZZY THEORY*

Recibido el 7 de octubre de 2013; Aceptado el 29 de noviembre de 2013

Abstract

The air pollution problems become more critical, requiring continuous monitoring and controls in order to ensure an appropriate environment for the community. The impact of the sources of air pollution from existing or new sources can be evaluated using air quality models. These tools evaluate the risks of air pollutants to the environment in several variables. In this context, the fuzzy set theory emerged as a viable solution to study the risk of failure of a system of air pollution subject to different releases. This theory, combined with the mass transport principle has allowed that fields of risk are determined and can assess whether the controls adopted are reliable. This paper proposes a methodology, based on a mathematical modeling of the processes of dispersion of air pollutants, where their parameters are membership functions, defined according to the fuzzy theory. The research uses these concepts in the solution of the Fuzzy Dispersion Equation to determine the risk of failure of the release of pollutants at different concentrations for continuous and instantaneous emissions. The results showed that the risk is high for neutral and stable conditions in according to literature, and the results also showed that the better dispersion occurs at the atmosphere unstable conditions.

Key Words: dispersion, fuzzy modeling, air pollution, risk.

¹ Universidade Federal do Ceará. Campos do Pici, Brasil

² Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici, Brasil

*Autor correspondente: Universidade Federal do Ceará. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: heloisacordeiro@yahoo.com.br

Resumo

Os problemas de poluição do ar cada vez se tornam mais críticos, necessitando de controles e monitoramentos contínuos a fim de assegurar um ambiente adequado à comunidade em geral. O impacto das fontes de poluição do ar existente ou de novas fontes pode ser avaliado através de modelos matemáticos ou modelos de qualidade do ar. Esta ferramenta permite avaliar os riscos dos poluentes atmosféricos ao meio ambiente sob diversas variáveis. Neste contexto, a teoria Fuzzy desponta como uma solução viável para estudar o risco de falha de um sistema de poluição do ar a diferentes lançamentos. Esta teoria, combinada com o princípio de transporte de massa tem permitido que campos de risco sejam determinados, podendo avaliar se os controles adotados são confiáveis. Este trabalho propõe uma metodologia, baseado em uma modelagem matemática dos processos de dispersão dos poluentes atmosféricos, onde os seus parâmetros são funções de pertinência, definidas segundo a teoria Fuzzy. A pesquisa utiliza esses conceitos na solução da equação gaussiana fuzzificada, para determinar o risco de falha do lançamento de poluentes atmosféricos a diferentes concentrações para emissões contínuas e instantâneas. Os resultados mostraram que o risco de falha do sistema de dispersão dos poluentes é alto para as condições de estabilidade atmosféricas neutra e estável. A literatura menciona que as melhores condições de dispersão atmosférica é a instável.

Palavras chaves: Dispersão, Teoria fuzzy, poluição do ar, risco.

Introdução

A poluição do ar tornou-se um dos fatores que mais fortemente afetam a qualidade de vida da população, uma vez que ocasiona prejuízos à saúde e ao meio ambiente. Considerando a necessidade do estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) em fontes móveis e estacionárias de poluição, foram estabelecidas legislações pertinentes a esta questão (CONAMA No. 03/90). Considerando o atendimento a estes padrões, é de extrema importância o monitoramento através de análises de emissão atmosféricas.

As atividades de controle se concentram, na maioria dos casos, no tratamento dos problemas mais comuns e abrangentes relacionados com a combustão industrial e veicular e sua respectiva contaminação por SO₂, Materiais Particulados, Hidrocarbonetos (HC), Monóxido de Carbono (CO) e NO_x. Ações de controle específicas sobre os poluentes mais perigosos e de impacto localizado ocorrem ainda de forma incipiente, em que pese sua importância para a proteção da saúde pública.

Como alternativa, surgem os modelos matemáticos para o cálculo da dispersão atmosférica de poluentes. Atualmente, um modelo matemático muito utilizado devido à facilidade de implementação com baixo custo computacional é o gaussiano. Este modelo resulta da solução da equação de conservação da massa de uma espécie química em condições ideais. Muitos esforços estão sendo feitos na intenção de validar o modelo gaussiano para diversas condições de escoamento, como mencionado por Guenther Krieger (2007). Contudo, sua generalização para a resolução de problemas mais complexos não é trivial, devido sua dependência restritiva de muitos parâmetros empíricos.

Segundo Moraes (2004), os modelos gaussianos vêm sendo amplamente utilizados por produzirem resultados compatíveis com os dados experimentais e não apresentarem estrutura matemática complexa.

No contexto de tais preocupações, este trabalho tem como objetivo determinar o risco de falha do processo de dispersão dos poluentes atmosféricos a diferentes condições de estabilidade atmosféricas.

Metodologia

A metodologia proposta para esta pesquisa consiste no desenvolvimento de um modelo de dispersão de poluente na forma fuzzy, de modo que uma análise de risco possa ser desenvolvida. Desta forma, primeiramente foi formulado o modelo de dispersão na forma determinística. Em seguida, esta equação foi transformada em uma equação fuzzy onde a variável de controle foi calculada na forma de função de pertinência.

Modelo de dispersão dos poluentes atmosféricos

Normalmente, os modelos de dispersão de poluente são desenvolvidos a partir do Princípio de Conservação de massa associado à Lei de Fick. Esta combinação permite que se encontre uma equação de difusão Gaussiana para descrever a dispersão atmosférica. Para este trabalho foi considerado, como fonte um lançamento contínuo. Para um modelo simples, assume-se que a pluma dispersa horizontalmente (na direção x) com uma velocidade média u e se dispersa transversalmente na direção y e verticalmente na direção z , de tal forma que a concentração do poluente, em qualquer seção transversal da pluma segue uma Distribuição Gaussiana.

Considerando as hipóteses abaixo:

- Vento tem intensidade, direção e sentido constantes;
- Terreno totalmente plano;
- Carga poluidora é pontual e constante;
- Difusão turbulenta na direção do vento é desprezada em função da maior importância da advecção nessa direção;
- Coeficientes de difusão turbulenta nas outras direções são constantes;
- Não existe perda de material poluidor por qualquer mecanismo físico, químico ou biológico.

Assim, para qualquer ponto (x, y, z) na pluma, a concentração do poluente pode ser avaliada por (Henry, 1989),

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: $C(x, y, z)$ é a concentração do poluente [M/L^3]; u é a velocidade média do vento [L/T];

Q é fluxo de massa lançado pela fonte [M/T]; σ_y e σ_z são os desvios padrões da dispersão nas direções y e z respectivamente [L]; H é a altura do ponto de lançamento [L]; x, y, z são as coordenadas de um ponto [L]. A coordenada x , ela está implícita nos desvios σ_y e σ_z , uma vez que o seu cálculo leva em consideração as interferências relacionadas ao tempo e velocidade do vento na direção x , assim para cada distância x , é calculado o valor do desvio de padrão.

O grau de estabilidade ou instabilidade da atmosfera exprime a tendência da supressão ou da favorabilidade dos movimentos verticais. Ele é função da relação entre o gradiente de temperatura do perfil vertical ambiental e o gradiente adiabático.

A turbulência da atmosfera exerce um papel importante no transporte, na difusão e na conseqüente diluição da poluição do ar. Essa turbulência é determinada pela velocidade do vento e pelo gradiente térmico na vertical.

A altura da mistura é a medida da camada da atmosfera que está num cesso turbulento e, portanto, melhor para a dispersão dos poluentes.

Pasquill (1961) dividiu as condições de estabilidade em seis classes, a saber:

- Classe A – extremamente instável
- Classe B – instável
- Classe C – Ligeiramente instável
- Classe D – Neutra
- Classe E – Ligeiramente estável
- Classe F – estável

As condições para ocorrência de instabilidade são a alta radiação solar e ventos de baixa velocidade. A condição instável é boa para a dispersão dos poluentes. A condição de estabilidade ocorre na ausência de radiação solar, ausência das nuvens e de ventos leves e representa condição desfavorável à boa dispersão de poluente.

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 se torna uma ferramenta apropriada para tratar informações vagas e incertas, em geral descritas em uma linguagem natural de acordo com Lima (2002).

A Lógica Fuzzy é baseada no uso de aproximações, com que se está naturalmente acostumado a trabalhar. Os conjuntos fuzzy podem ser encarados como uma extensão da teoria clássica dos conjuntos (conjuntos crisp), cujos valores variam no intervalo entre 0 (zero) e 1 (um). Já na lógica fuzzy, não se pode tratar uma variável como tendo apenas um estado atual, mas sim com 'n' estados, cada um com um grau de associação.

De acordo com Ganoullis (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, 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:

$$\tilde{A} = \{ (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X; \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1] \} \quad \text{Equação (2)}$$

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

Existem vários tipos de funções de pertinência parametrizadas como, por exemplo: triangular, trapezoidal, exponencial, gaussiana. As funções mais utilizadas são as trapezoidais e as triangulares, segundo Ganoullis (1994).

Modelo de Transporte Fuzzy

Como esta pesquisa tem como objetivo a determinação do risco e da confiabilidade, que segundo Vieira (2003), nada mais é do que a medida das incertezas, há a necessidade de formar a equação geral de transporte de poluente, em uma equação com características fuzzy. Neste contexto, os campos de concentração das substâncias poluentes terão que ser calculadas em forma de funções de pertinência. Em outras palavras, cada concentração calculada tem um grau

de pertinência que representa um nível de pertinência com que seu valor tem a possibilidade de ocorrer. Isto pode ser obtido transformando os parâmetros da equação geral de transporte em números fuzzys.

Observando a equação geral, pode-se verificar que u , Q , σ_y , σ_z , H são elementos do processo que irão determinar o comportamento do campo de concentração, a partir de um lançamento qualquer. Como todos esses parâmetros são incertos, há a necessidade de transformá-los em funções de pertinência, onde um valor mais provável pode ocorrer, cobrindo, assim, qualquer grau de incerteza que possa estar contido no processo de transporte. Assim, fazendo a transformação dos parâmetros para a forma fuzzy, a equação (1) se transforma em:

$$\tilde{C}(x, y, z) = \frac{\tilde{u}\tilde{Q}}{2\pi\tilde{u}\tilde{\sigma}_y\tilde{\sigma}_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\tilde{\sigma}_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\tilde{H}}{\tilde{\sigma}_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+\tilde{H}}{\tilde{\sigma}_z}\right)^2\right] \quad \text{Equação (2)}$$

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

$\tilde{\sigma}_y, \tilde{\sigma}_z$ são as funções de pertinência para os desvios padrões na direção y e z [L]; \tilde{u} é a função de pertinência para velocidade; \tilde{H} é a função de pertinência para a altura de lançamento [L]; \tilde{Q} é a função de pertinência para o fluxo de lançamento do poluente;

Risco Fuzzy

Para a determinação do risco fuzzy e da confiabilidade fuzzy é necessário definir uma função marginal de segurança que é função do campo de concentração calculado, e que representa o resultado do impacto causado pela emissão do poluente, e de uma função de pertinência que representa o limite mínimo a partir do qual o sistema perde o padrão de qualidade do ar.

Assim, seja a função de pertinência para o campo de concentração calculado; seja a função de pertinência que representa o limite de padrão de qualidade do ar; Define-se M , a função marginal de segurança, como sendo:

$$\tilde{M}(\alpha) = \tilde{R}(\alpha) - \tilde{C}(\alpha) \quad \text{Equação (4)}$$

Onde: $\tilde{M}(\alpha)$ é a função de pertinência da função marginal de segurança com nível de pertinência α ; α é o nível de pertinência para a função. seja \tilde{C} a função de pertinência para o campo de concentração calculado; seja \tilde{R} a função de pertinência que representa o limite de padrão de qualidade do ar;

Desta forma,

Se $\tilde{M}(\alpha) > 0 \rightarrow R=0$ e o sistema é seguro;

Se $\tilde{M}(\alpha) < 0 \rightarrow R=1$ e o sistema falha.

De acordo com Ganoullis (1994), o fator risco e o fator confiabilidade podem ser calculados por:

$$R = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_M(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_M(m) dm} \quad \text{Equação (5)}$$

$$G = \frac{\int_0^{\infty} \mu_M(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_M(m) dm} \quad \text{Equação (6)}$$

μ_M – é o grau de pertinência para a função marginal de segurança.

As funções de pertinência para um parâmetro K qualquer são representadas por funções triangulares definida por:

$$\mu_k = \frac{k - k_L}{k_m - k_L} \quad \text{para } k_L < k < k_m \quad \text{Equação (7)}$$

$$\mu_k = \frac{k - k_u}{k_m - k_u} \quad \text{para } k_m < k < k_u \quad \text{Equação (8)}$$

Onde: k_u = maior valor de k para grau de pertinência zero; k_m = valor de k para grau de pertinência 1; k_L = menor valor de k para grau de pertinência zero.

Para esta simulação, foram considerados para os coeficientes de dispersão transversal e vertical os valores de 21 e 13 metros para condição neutra a 300 metros do ponto de lançamento e os valores de 13 e 6 metros para condição estável. (Henry, 1989). A altura de lançamento foi

considerada 20 metros acima do solo e o fluxo de massa lançado 100 kg/dia. Na direção x, y e z foram consideradas distâncias para cálculo das concentrações, como $\Delta x = 300$ metros, $\Delta z = 4$ em 4 metros e $\Delta y = 20$ metros.

Resultados

Após uma série de simulações realizadas a partir do programa computacional na linguagem FORTRAN desenvolvido para esta pesquisa, para diferentes condições de lançamentos, os resultados podem ser analisados. Primeiramente, são apresentados os perfis de concentração, nas direções verticais e transversais, com grau de pertinência acima de 0.5 ($fp > 0.5$), para condição atmosférica neutra. As figuras foram elaboradas separadamente com relação as coordenadas x, y e z, em virtude dos cálculos das variáveis de controle terem sido tomadas apenas no eixo central, isto é, no centro da pluma, pois é a região mais desfavorável.

A figura 1, apresenta a concentração para a condição neutra referente a carga de 100 Kg.

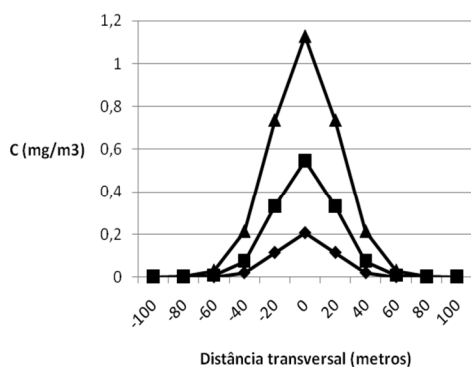


Figura 1. Concentração com grau de pertinência maior do que 0.5, a 300 metros da fonte, na direção transversal

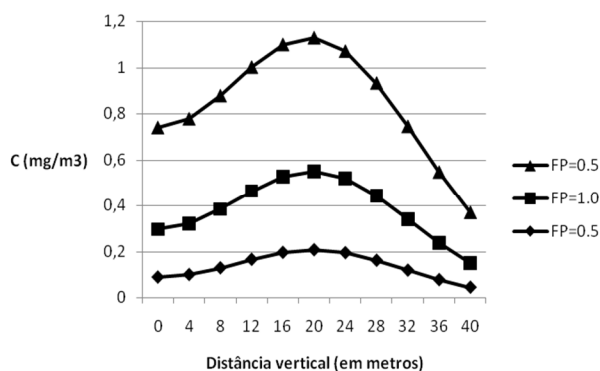


Figura 2. Concentração com grau de pertinência maior do que 0.5, a 300 metros da fonte, na direção vertical

Os resultados mostram como se comporta este campo de concentração de ponto a ponto. No sentido vertical, pode-se observar que a turbulência é grande pela troca de calor entre as camadas da atmosfera e que a pluma de poluentes se dispersa melhor em função da turbulência, influenciado por fatores como a velocidade do vento, a reflexão do solo e a temperatura, estes parâmetros influenciam no processo de dispersão, através de seus coeficientes como σ_y , σ_z .

Pode-se observar que para a condição neutra, os valores da concentração podem chegar a um valor máximo de aproximadamente 1.2 mg/m^3 . A figura 1, apresenta concentração com maior

grau de pertinência é de aproximadamente $0,6 \text{ mg/m}_3$. O objetivo é verificar como o campo de concentração pode ser controlado ao longo da dispersão dos poluentes. Pode-se observar ainda na figura 2, que as concentrações têm formato de uma gaussiana dupla, conforme previsto pela literatura do ponto de vista qualitativo, não do ponto de vista quantitativo, em virtude desta metodologia está sendo desenvolvida de forma preliminar. As figuras mostram que a região compreendida entre os contornos inferiores e superiores de concentração se encontram as concentrações de maior grau de pertinência. Essas concentrações são mais prováveis de ocorrer dentro dos padrões de lançamento considerados e que quanto mais próximo da linha central maior grau de pertinência. Estes resultados mostram a capacidade da teoria fuzzy de apresentarem os padrões de incertezas para cálculo do risco de falha do sistema de dispersão dos poluentes.

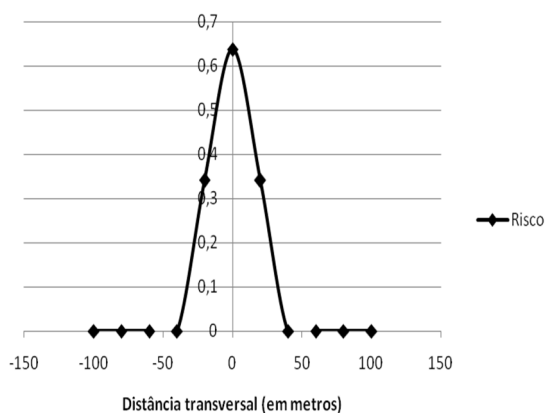


Figura 3. Risco no sentido transversal a 300 metros da fonte – condição neutra

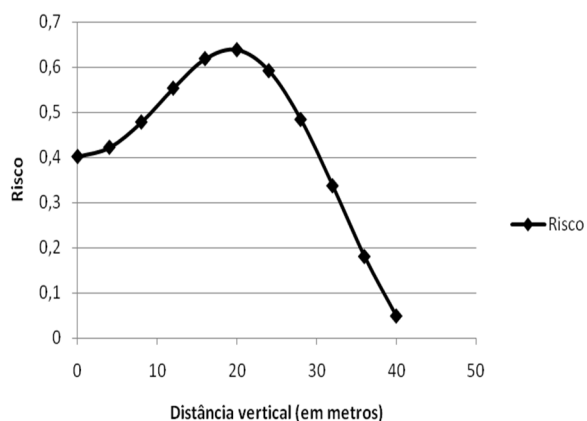


Figura 4. Risco no sentido vertical a 300 metros da fonte para condição neutra

As figuras 3 e 4 mostram que os riscos variam de 0 a 0,7 aproximadamente tanto no sentido vertical quanto no transversal. Entretanto, os resultados mostram que os campos de risco são diferentes nos dois sentidos, sendo a direção vertical maior dispersão, favorecendo a qualidade do ar. É importante notar, que os resultados mostram, que o risco do sistema de dispersão é maior na linha central, isto é no centro da pluma, pois é a região com maior concentração.

Para a condição estável, os gráficos são apresentados nas figuras 5 a 8. Comparando as figuras 2 e 6, constata-se que a condição estável é a pior situação para a dispersão dos poluentes, pois a figura 6 apresenta um pico de concentração de 2 mg/m_3 tanto no sentido transversal como no vertical. Estes resultados irão influenciar no cálculo do risco.

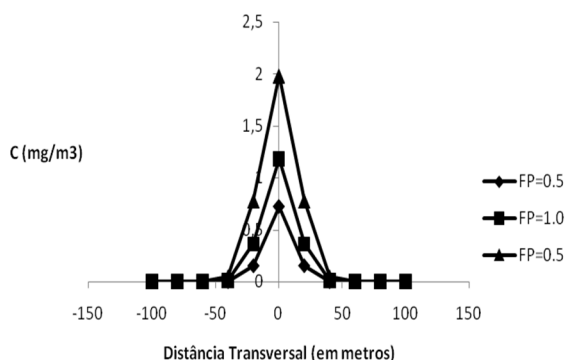


Figura 5. Concentração com grau de pertinência maior a 300 metros da fonte na distância transversal

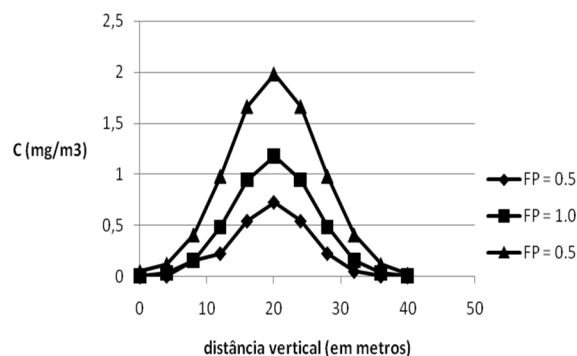


Figura 6. Concentração com grau de pertinência maior a 300 metros da fonte na distância vertical

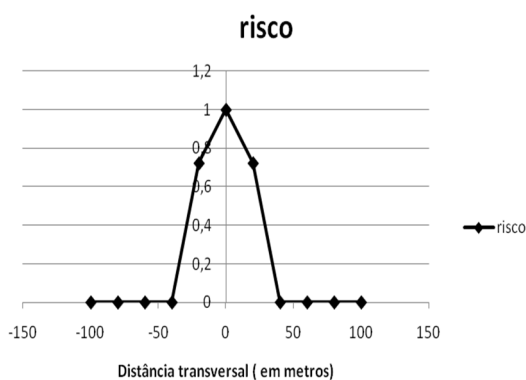


Figura 7. Risco no sentido transversal a 300 metros da fonte – condição estável

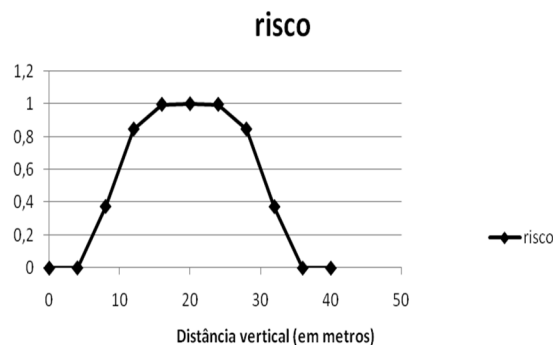


Figura 8. Risco no sentido vertical a 300 metros da fonte - condição estável

Comparando as figuras 1 e 5 no sentido transversal, observa-se o estreitamento do gráfico, demonstrando que na condição estável quase não há dispersão dos poluentes, e já no gráfico 1 a condição neutra é melhor comparada a esta condição comentada.

Comparando as figuras 3 e 7 no sentido transversal, observa-se que a condição estável é a pior situação para a dispersão dos poluentes, pois o risco varia de 0 a 1, podendo resultar em problemas de aquecimento, saúde, valores acima do recomendado pela legislação em qualidade do ar, conforme CONAMA no. 03/90.

Conforme a figura 4, vê-se a queda considerável do risco no sentido vertical para a condição neutra, mostrando que entre as duas condições analisadas a neutra é a melhor condição.

Conclusão

Após análise dos resultados, algumas conclusões foram tiradas com base nas diferentes condições de estabilidade atmosféricas.

O uso da teoria fuzzy em modelos de balanço de massa, que permite transformar esses modelos em equações diferenciais fuzzys, quando tratado adequadamente permite que se obtenham Funções de Pertinências para as variáveis de controle. No caso do estudo em questão, a variável de controle é a concentração do poluente que é lançado na atmosfera. Desta forma, a metodologia proposta permite que se determinem perfis de concentração, em sua forma fuzzy, que permite que se desenvolvam métodos de cálculo dos campos de risco e de garantia, para algumas distâncias do ponto de lançamento, para diferentes condições atmosféricas;

A quantificação do risco proporcionada por esta metodologia mostra a importância para emissões atmosféricas, pois os resultados demonstraram qual distância e local de lançamento o sistema está dentro ou fora dos padrões de qualidade do ar definidos pela legislação pertinente, identificando quais situações poderão ocasionar sérios problemas de saúde pública, provenientes dos poluentes atmosféricos quer sejam de fontes antrópicas ou naturais.

Os resultados permitem concluir também que para a condição atmosférica estável o risco de falha é maior do que para a condição neutra, sendo portanto a pior situação para a dispersão dos poluentes atmosféricos.

Referências bibliográficas

- BRASIL. Resolução CONAMA nº 03, de 28 de junho de 1990. Brasília, 1990.
- Fisher, H.B. (1979) In: *Mixing in inland and coastal water*. Academic Press.
- Ganoulis, J.G (1994) In: *Engineering risk analysis of water pollution. Probabilities and fuzzy sets*. VCH publishers Inc. Weinheim; New York; Basel; Tokyo.
- Henry, G., Heinke, W.G. (1989) *Environmental Science and Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. Y.
- Krieger, G.; *Dispersão dos poluentes*. Nota de aula, 2007.
- Lima, O.S.J. (2002) *Análise de pontos por função fuzzy*, dissertação de mestrado em engenharia de software, Universidade de Fortaleza, Fortaleza.
- Moraes, Marcelo Romero de (2004) *Implementação de uma Ferramenta para a Previsão de Ventos e Dispersão de Poluentes na Micro-Escala Atmosférica*.
- Pasquill, F., (1961) *The estimation of the dispersion of windborne material*, *The Meteorological Magazine*, vol 90, No. 1063, pp 33-49.
- Saavedra, O. R.(2003) *Introdução aos Conjuntos Difusos – Notas de aula – Inteligência Artificial*. Universidade Federal do Maranhão.
- Vieira, V. P. P. B. (2003) *Análise de Risco Aplicada a Recursos Hídricos*. Notas de aula. Curso de Doutorado em Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará.