

XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E XVII
ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS

MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS FREÁTICOS
BASEADO EM LÓGICA FUZZY

Érico Gaspar Lisboa¹; Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes² & Ana Rosa Baganha Barp²

Resumo – O mapeamento da vulnerabilidade utilizando um índice pelo sistema GOD (SIGOD) tende a gerar um indicador (IVUg) vago em função da interação de parâmetros desprovidos de fronteiras bem definidas. Assim, o objetivo deste trabalho é aplicar a teoria dos conjuntos fuzzy para melhor tratar as incertezas produzindo um índice *fuzzyficado* (IVUg^(f)). Para tanto se adotou o método Mamdani, que, a partir da inserção dos parâmetros do SIGOD como variáveis de entrada no Sistema de Inferência Fuzzy (SIF), via um conjunto de 27,0 regras, resultando em uma variável de saída *fuzzyficada*. Para a geração do SIF utilizou-se o software MATLAB 7.0. Por fim, fez-se o mapeamento da vulnerabilidade na Região Metropolitana de Belém (RMB) utilizando o IVUg, IVUg^(f) e o resultado da correlação entre eles IVUg^(f)(m). Os resultados mostraram, para um mesmo ponto, o grau de vulnerabilidade médio para IVUg (0,44-0,48); baixo para IVUg^(f) (0,32-0,36) e IVUg^(f)(m) (0,36-0,40). Por fim, a teoria dos conjuntos fuzzy proporcionou um índice acurado no mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos, quando aplicado na RMB.

Abstract – The mapping of vulnerability by using an index system GOD (SIGOD) tends to generate an indicator (IVUg) vague depending on the interaction parameter devoid of clearly defined boundaries. Then, the objective of this work is to apply the theory of fuzzy sets to better address uncertainties producing an index fuzzy (IVUg^(f)). Was adopted for both the Mamdani method, which, from the insertion of the parameters of SIGOD as input variables in Fuzzy Inference System (FIS), for a set of rules 27.0, resulting in an output variable fuzzy. For generating the SIF used the software MATLAB 7.0. Finally, he became the vulnerability mapping in the Metropolitan Region of Belem (MRB) using IVUg, IVUg^(f) and the result of the correlation between them IVUg^(f)(m). The results showed, at that point, the average degree of vulnerability to IVUg (0,44-0,48); down to IVUg^(f) (0,32-0,36) and IVUg^(f)(m) (0,36-0,40). Finally, the theory of fuzzy sets provided an accurate index for mapping the vulnerability of aquifers, when applied to the MRB.

Palavras-Chave – Teoria dos conjuntos fuzzy; Mapeamento da vulnerabilidade; Região Metropolitana de Belém.

¹ Mestrando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará –, Av. Augusto Corrêa, 01, Guamá - Belém/PA – CEP 66075-970, Fone: +55 – 91 - 3201 8063, Fax: +55 – 91 - 3201 8062, e-mail: erico@ufpa.br;

1 - INTRODUÇÃO

O mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos freáticos é um dos principais mecanismos gerenciais adotado na avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea. Tal mecanismo pode ser quantificado considerando duas bases de conhecimento: A 1ª, base de conhecimento específica (BCE), requer uma série de dados extensos e processos de interpolações medidos em campo demandando tempo e custos significativos. A 2ª, base de conhecimento generalizada (BCG), a vulnerabilidade é muito conceitual e a decisão sobre a mesma é feita com base no conhecimento hidrogeológico geral do transporte de contaminantes em aquífero por meio de indicadores de fácil aplicação. Os sistemas paramétricos são os mais difundidos da BCG, onde o índice final é produto de um modelo linear que categoriza classes de vulnerabilidade relativa pela ponderação de parâmetros hidrogeológicos. No entanto, pode-se obter um índice de vulnerabilidade idêntico para situações hidrogeológicas diferentes, ou seja, não existe um limite claro para o conjunto de parâmetros interpretados pelas indexações. Este índice denota uma importância bastante vaga em função da interação de um excesso de parâmetros ponderados, alguns dos quais apresentam forte correlação e sobreposição, gerando incertezas. A teoria dos conjuntos fuzzy pode melhor tratar tais incertezas criando regras que se adequem as condições hidrogeológicas localizadas e que podem ser ajustadas por especialistas.

Alguns autores utilizaram um modelo fuzzy para avaliar a vulnerabilidades das águas subterrâneas obtendo-se uma avaliação multi-objetiva dos parâmetros componentes do índice DRASTIC (IVUD), um dos mais usuais sistemas da BCG, (Chen, 1996, Che, 1998; Zhou et al. 1999). No entanto, os modelos foram protagonizados por dois níveis de otimização sendo que o padrão de avaliação de cada faixa de valor do IVUD não foi utilizado no processo de avaliação, ou seja, algumas informações para a avaliação não foram administradas. Não obstante, outros trabalhos desenvolveram uma metodologia de reconhecimento fuzzy padrão para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas a fim de melhor tratar as incertezas do IVUD. O grau de adesão de uma determinada amostra foi relacionado a níveis de poluições (1, 2,..n) com uma concepção fuzzy que interpretavam variáveis lingüísticas que abordavam classes de “mais difícil de ser poluída” a “mais fácil de ser poluída”. Tal procedimento foi aplicado a uma configuração hidrogeológica da Península de Dalian, na China, mostrando-se de fácil aplicação e podendo ser conduzida a resultados satisfatórios. (Shouyu & Guangatao, 2003). Outros trabalhos também trataram a abordagem fuzzy sobre o IVUD (Afshar et al. 2007).

O grupo de trabalhos supracitados tratou os conceitos dos conjuntos fuzzy de forma específica para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas considerando o IVUD. Sendo que este

índice é resultado de uma relação casual entre a vulnerabilidade e um conjunto variáveis sujeita a interpretação de um especialista capaz de ser simulada por um conjunto de regra (R) que são dependentes de configurações hidrogeológica peculiares e que necessita de um banco de dados significativos. No caso de uma determinada região não disponibilizar os dados para a compilação do IVUd, faz-se providencial a aplicação do índice GOD (IVUg), que pelas abordagens fuzzy descritas acima talvez não tenham resultados satisfatórios o que se refletirá em avaliações incertas acerca da vulnerabilidade.

O objetivo deste trabalho é aplicar a teoria dos conjuntos fuzzy criando um sistema de R obtendo-se um índice de vulnerabilidade fuzzyficado ($IVUg^{(f)}$) justificado em função das incertezas do IVUg determinístico/ conceitual. Pois, a lógica fuzzy supõe que a incerteza no reconhecimento e avaliação do grau de vulnerabilidade é ambígua, tendo uma natureza difusa podendo ser descrita por um conjunto de R lingüísticas “SE” e “ENTÃO”. Assim a modelagem matemática com base em R que estabelece uma relação fuzzy binária entre as entradas (parâmetros do IVUg) e saídas ($IVUg^{(f)}$) graduadas pelas funções de pertinência pertencente ao conjunto fuzzy são simuladas. Por fim, tal método será aplicado na Região Metropolitana de Belém (RMB) a fim de melhor inferir sobre a vulnerabilidade dos aquíferos freático à contaminação. Este método foi testado em um aquífero hipotético e os resultados foram comparados com o IVUd sendo que a vulnerabilidade resultou em valores mais acurado diminuindo as incertezas na tomada de decisão acerca da gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

2 - ÍNDICES DE VULNERABILIDADE MAIS USUAIS ADOTADA PELA BCG

Os sistemas paramétricos é a base do conhecimento generalizada, estes modelos usam parâmetros selecionados como indicadores de vulnerabilidade e aplicam seu espectro de valores e interações para produzir alguma forma de índice de vulnerabilidade. Como um dos modelos de indexação mais utilizado no mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação destaca-se o método DRASTIC e o GOD. No entanto, no trabalho em pauta, será abordado apenas o sistema de indexação GOD (SIGOD).

2.1 - Sistema de Indexação GOD (SIGOD)

A determinação da vulnerabilidade pela indexação GOD (IVUg) abrange dois aspectos fundamentais: o nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero; e, a capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero. Assim, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação considera parâmetros facilmente determinados e que geralmente

encontram-se disponibilizados os quais são: o confinamento hidráulico da água subterrânea no aquífero a ser considerado (G); os estratos de cobertura (zona não-saturada ou camada confinante), em termos da característica hidrogeológica e do grau de consolidação que determinam sua capacidade de atenuação do contaminante (O); e a distância até o lençol freático ou até o teto do aquífero confinado (D).

A metodologia empírica do IVUg, proposta por Foster e Hirata (1988), envolve alguns estágios distintos: 1º) Identificação do tipo de confinamento de água subterrânea, com a posterior indexação desse parâmetro na escala de 0,0–1,0; 2º) Especificação dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero em termos de (a) grau de consolidação (e, portanto, provável presença ou ausência de permeabilidade por fissuras) e (b) tipo de litologia (e, portanto, porosidade indiretamente dinâmico-efetiva, permeabilidade da matriz e teor de umidade da zona não saturada ou retenção específica); isto leva a uma segunda pontuação, numa escala de 0,4–1,0; 3º) Estimativa da profundidade até o lençol freático (de aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação na escala de 0,6–1,0.

O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices desses parâmetros. Deste modo, este trabalho analisa um conjunto de regras fuzzy onde as variáveis de entrada são os parâmetros do IVUg que, com a inferência do sistema fuzzy em função do grau de pertinência das variáveis, será possível obter um índice de vulnerabilidade fuzzyficado (IVUg^(f)).

3 - JUSTIFICATIVA NA ADOÇÃO DO IVUg^(f) POR IVUg

As vantagens dos índices (pertencentes aos sistemas paramétricos – BCG) são a facilidade de comunicação com o usuário e o fato de representar uma média de diversas variáveis em um único número, combinando unidades de medida diferentes em uma única unidade. Por outro lado, uma das desvantagens no processo de indexação é que alguns parâmetros que constituem a equação do índice podem influenciar drasticamente no resultado final sem nenhuma justificativa científica.

É neste sentido que adoção de uma inferência da teoria dos conjuntos fuzzy se faz necessário, uma vez que o índice de vulnerabilidade, como o do sistema GOD adotado para este trabalho, é determinístico e conceitual. A indexação GOD é determinística, porque ignora as propriedades estocásticas inerentes ao processo. Deste modo, a variância com que uma faixa de valores, como por exemplo, do Grau de confinamento, pode influenciar na decisão acerca da vulnerabilidade. A percepção deste parâmetro não é preciso o suficiente para que se julgue o valor correto na obtenção da informação de que um aquífero não-confinado coberto para o não-confinado varie de 0,6 a 1,0,

respectivamente. Tal questionamento se dá para os outros parâmetros componentes do IVUg, tornando-o vago. O SIGOD é conceitual, porque busca uma interpretação física para os diversos sub-processos envolvidos na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação.

Assim, conforme NRC (1993), a incerteza é inerente a qualquer avaliação de vulnerabilidade à contaminação; e, os sistemas mais complexos de avaliação da vulnerabilidade apresentam o risco de obscurecer o óbvio e tornar indistintas as sutilezas. Neste sentido, se faz necessário a adoção de técnicas que minimizem as incertezas acerca da vulnerabilidade a fim de melhor subsidiar as decisões e formulações de políticas de proteção de áreas potencialmente passíveis de serem poluídas. Deste modo, a justificativa na adoção da teoria dos conjuntos fuzzy prognosticando a obtenção de um índice de vulnerabilidade mais acurado se dá por dois aspectos principais.

O 1º aspecto aponta que a teoria dos conjuntos fuzzy oferece um alívio nas dificuldades do desenvolvimento e análise de sistemas complexos encontrados nas ferramentas matemáticas convencionais. O 2º aspecto é motivado pela observação do raciocínio humano em utilizar conceitos e conhecimentos desprovidos de fronteiras bem definidas como, por exemplo, conceitos vagos como o IVUg.

O 1ª aspecto está diretamente relacionado com a solução dos problemas do mundo real, enquanto que o 2º está relacionado com a Inteligência Artificial. A junção destes aspectos não só torna a teoria dos conjuntos fuzzy única e diferente de outras metodologias, como forma uma ponte natural entre o mundo quantitativo e o qualitativo. Esta tecnologia oferece um benefício único, não só provê meios com ótimo custo-benefício de modelar um complexo sistema envolvendo variáveis numéricas e não-numéricas, como também oferece uma descrição qualitativa do sistema que é de fácil compreensão. Todavia, a frente será dissertado o entendimento a cerca da teoria dos conjuntos fuzzy, bem como a adoção de um sistema de inferência fuzzy para a formulação do IVUg^(f).

4 - TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy é adequada para tomar decisões sobre sistemas complexo quando o contexto do problema é sempre obscuro. Esta ferramenta tem sido comumente usada para a informação imprecisa com sentido não-probabilística permitindo a integração de vários parâmetros para a modelagem e processo de avaliação. De modo mais específico, o conceito de conjuntos fuzzy, introduzido por Zadeh (1965), descreve uma imprecisão ou um estado vago. Logo, a teoria dos conjuntos fuzzy pode ser considerada como uma extensão da teoria dos conjuntos clássica. Assim, considerando um subconjunto A de um conjunto U é considerado um subconjunto

fuzzy de U caso seja analisado como um conjunto de pares ordenados conforme a expressão (1) abaixo descrita:

$$A = \{(x_i, \mu_A(x_i)); x_i \in U, \mu_A(x_i) \in [0,1]\} \quad (1)$$

Logo, conforme os termos do subconjunto A, visto na formulação (1), um conjunto fuzzy é definido em termos de $\mu_A(x_i)$ - função de pertinência (FP) - sendo processado por um sistema de inferência fuzzy (SIF) que serão melhor descritos abaixo.

4.1 - Função de Pertinência (FP)

As Funções de Pertinência (FP) são os pontos-chave no processo de modelagem da lógica fuzzy, pois estas definem um conjunto de ambigüidade de uma determinada variável que pode ser traduzido em termos de linguagem (lingüística). Elas dizem respeito, por meio de pares ordenados, a variável lingüística com ambigüidade em conformidade a equação 2.

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (2)$$

A equação (2) não representa um somatório convencional, mas sim a união entre os graus de adesão do subconjunto A. Assim a FP ($\mu_A(x_i)$) é uma função que determina com que grau x_i está em A onde: $\mu_A(x_i) = 1,0$, x_i pertence totalmente ao subconjunto A; e quando $0,0 < \mu_A(x_i) < 1,0$ significa que x_i pertence parcialmente ao subconjunto A; e, $\mu_A(x_i) = 0,0$ onde x_i não pertence ao subconjunto A. Deste modo, a FP pode assumir qualquer forma convexa, porém os mais comuns são a gaussianiana, trapezoidal e triangular. Para este trabalho foi adotado as função de pertinências trapezoidais (A), para as variáveis de entrada, e triangulares (B) para as variáveis de saída, conforme a Figura 1.

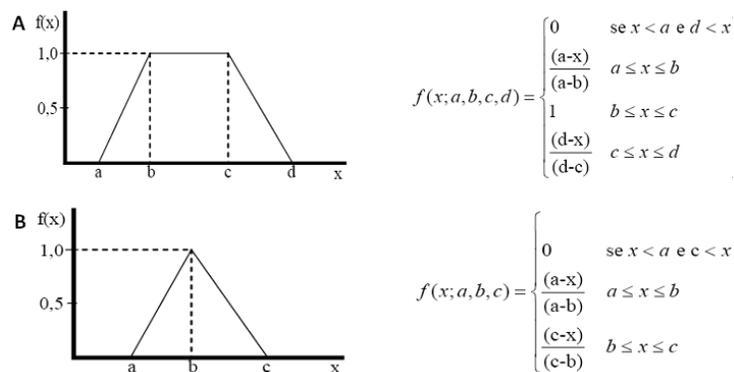


Figura 1. Formas das FP assumidas pelas variáveis de entrada (A) e variável de saída (B).

Ressalta-se que, como dito anteriormente, a álgebra entre os conjuntos fuzzy não segue a teoria clássica usual, em especial devido ao fato de que as operações de união e de intersecção de um conjunto e seu complementar são diferentes de 1 e vazio, respectivamente, e, portanto, as operações específicas entre os conjuntos fuzzy devem ser estabelecidas. Por conseguinte, será processado um sistema de inferência fuzzy (SIF), a fim de aplicar os conceitos da teoria dos conjuntos fuzzy melhor tratando as incertezas acerca de um índice determinístico/ conceitual de vulnerabilidade GOD.

4.2 - Sistema de Inferência Fuzzy (SIF)

Um SIF pode ser administrado por dois aspectos: O 1º considera a empregabilidade de um conjunto de regras sobre que as decisões que serão formadas. Tais regras podem ser formadas com base de conhecimento especializado. No entanto, o trabalho em tela emprega o conhecimento do sistema GOD, em uma condição ideal, podendo se beneficiar do conhecimento de especialistas locais para melhorar as regras e os desempenhos do sistema. Em 2º, o SIF pode ajustar as suas base de regras sob condições locais, isto é, as alterações nas variáveis de entrada no SIF irão responder a uma variável de saída alterada. Em outras palavras, um SIF é capaz de ajustar-se com o intervalo de variação dos índices de entrada. Além disso, diferentemente da função do índice GOD, a proposta de SIF é gerar uma função contínua da vulnerabilidade prognosticando um índice de vulnerabilidade fuzzyficado, como será visto na metodologia. Deste modo, conforme Grima & Verhoef (1999), a construção de SIF é seguida de três etapas:

1ª Etapa: Esta etapa se caracteriza pela seleção das variáveis de entrada e saída, as quais são baseadas, não somente, dos conhecimentos científicos (Estado da Arte), mas, também, na capacidade de julgamento;

2ª Etapa: Caracteriza-se na relação entre as variáveis de entradas e saídas pelo estabelecimento de regras. Para cada regra estabelecida no SIF adota-se o operador matemático mínimo para o conectivo lógico “E” e o operador máximo para o conectivo lógico “OU”. As sentenças “SE ...ENTÃO ...” são modeladas pela aplicação mínimo.

Para modelar matematicamente um conjunto de regras fuzzy, adotou-se neste trabalho o método Mamdani. Tal método propõe uma relação fuzzy binária (M) entre as entradas (x_i) e saídas (u_i). Assim a relação fuzzy M é o subconjunto fuzzy X e U cuja FP é dada por:

$$\mu_M(x_i, u_i) = \text{máximo}_{a \leq j \leq n} \{ \text{mínimo} [\mu_{A_j}(x_i), \mu_{B_j}(u_i)] \} \quad (3)$$

Onde n é o número de regras que compõem a base de regras, e $\mu_{A_j}(x_i)$ e $\mu_{B_j}(x_i)$ são os graus com que x_i e u_i pertencem ao conjunto fuzzy A_j e B_j , respectivamente. A fim de melhor ilustrar a concepção fuzzy em função do método Mamdani, consideram-se R_1 e R_2 as regras de SIF para duas variáveis de entrada (x_1 e x_2) e uma variável de saída (u) de modo que:

R_1 : “SE” x_1 é A_1^1 ... x_2 é A_2^1 “ENTÃO” u é B_1 ;

R_2 : “SE” x_2 é A_1^2 ... x_2 é A_2^2 “ENTÃO” u é B_2 .

Para o caso supra identificado tem-se que a FP é expressa por:

$$\mu_M(x_1, x_2, u) = \text{máximo} \left\{ \text{mínimo} \left[\mu_{A_1^1}(x_1), \mu_{A_2^1}(x_2), \mu_{B_1}(u) \right], \text{mínimo} \left[\mu_{A_1^2}(x_1), \mu_{A_2^2}(x_2), \mu_{B_2}(u) \right] \right\} \quad (4)$$

A FP acima descrita representa a relação fuzzy obtida da base de regras pelo método de Mamdani. Por conseguinte pode-se visualizar a metodologia Mamdani graficamente, conforme a Figura 2, onde se percebe as operações matemáticas mais comuns que envolvem a Lógica Fuzzy que são a INTERSECÇÃO, que se dá entre as variáveis de entrada, e UNIÃO, que se dá pela interação entre a saída B_1 e B_2 que resulta em B .

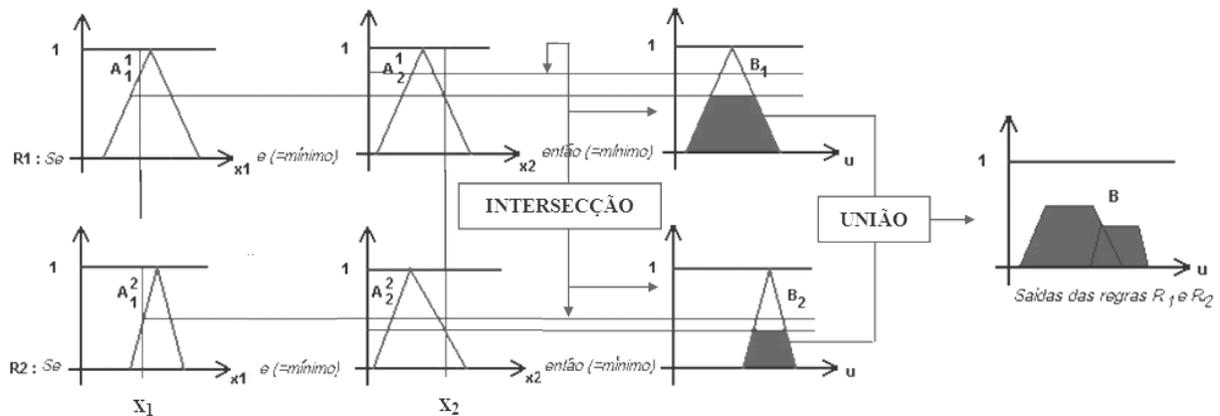


Figura 2. Método de Mamdani para a um SIF. Fonte: Adaptado de (Weber & Klein, 2003).

As operações de INTERSECÇÃO (\cap) também são um conjunto fuzzy e se aplicam “SE” A e B são dois conjuntos fuzzy, sendo definida como $C = A \cap B$ que é correspondente ao operador mínimo de modo que:

$$\mu_C(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5)$$

Não obstante, as operações de UNIÃO (\cup), como conjunto fuzzy, são definidas “SE” A e B são conjuntos fuzzy sendo definidas por $C = A \cup B$, que se caracteriza como operador máximo por:

$$\mu_C(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (6)$$

Neste sentido, a saída do controlador fuzzy, dada pelo método de inferência de Mamdani, é um conjunto fuzzy mesmo para o caso de uma entrada *crisp* (um número real, ou par de um número real). Este fato é que sugere a defuzzificação (visto na 3ª Etapa) do conjunto fuzzy de saída para se obter um valor *crisp* que o represente.

A 3ª Etapa se caracteriza pelo processo de defuzzificação que transforma a variável lingüística de saída em valores *crisp*. Dentre os processos de defuzzificação mais usuais está o método do centro de gravidade (Jager, 1995; Babuska, 1996) conforme é descrito pelas formulações (8) e (9).

$$D(B) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i \cdot \mu_B(u_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_B(u_i)} \quad (7)$$

$$D(B) = \frac{\int_R u_i \cdot \mu_B(u_i) du_i}{\int_R \mu_B(u_i) du_i} \quad (8)$$

Tal procedimento é semelhante a média aritmética para uma distribuição de dados, com a diferença que os pesos aqui são valores $\mu_B(u_i)$ que indicam o grau de compatibilidade do valor u_i com o conceito modelado pelo conjunto fuzzy B (Ver Figura 2), sendo expresso para um domínio discreto (7) e domínio contínuo (8).

5 - METODOLOGIA ADOTADA

Para melhor quantificar o índice GOD de vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, utiliza-se a teoria dos conjuntos fuzzy. Primeiramente, identificam-se as variáveis de entrada como sendo os parâmetros hidrogeológicos pertinentes aos componentes do SIGOD (**G**rau de confinamento da água subterrânea; **O**corrência do Estrato de Cobertura; **D**istância até o lençol freático), acima descritos. Em seguida, aplica-se o SIF, que consiste na organização do domínio das variáveis de entrada, dadas pelo próprio SIGOD, com as suas respectivas FP. As FP associadas às variáveis de entrada foram trapezoidais atribuindo-as aos domínios de entradas três subdomínios cujas variáveis lingüística são: BAIXO, MÉDIA e ALTA (Ver Figura 3).

Posteriormente, modelam-se as variáveis de entrada matematicamente pelo método de Mamdani onde o domínio de saída para o SIF representa o IVUg^(f). Em seguida é estabelecido o número de regras (R) por meio da relação que envolve o número de variáveis de entrada do índice GOD (x_i) e as lingüísticas (x_L), assim tem-se que $R = x_L^{x_i}$, logo, é obtido (3³) um total de 27 regras.

Este conjunto de regras de um SIF se dá por meio do estabelecimento de bases de regras que consiste de um conjunto fuzzy “SE” e “ENTÃO”.

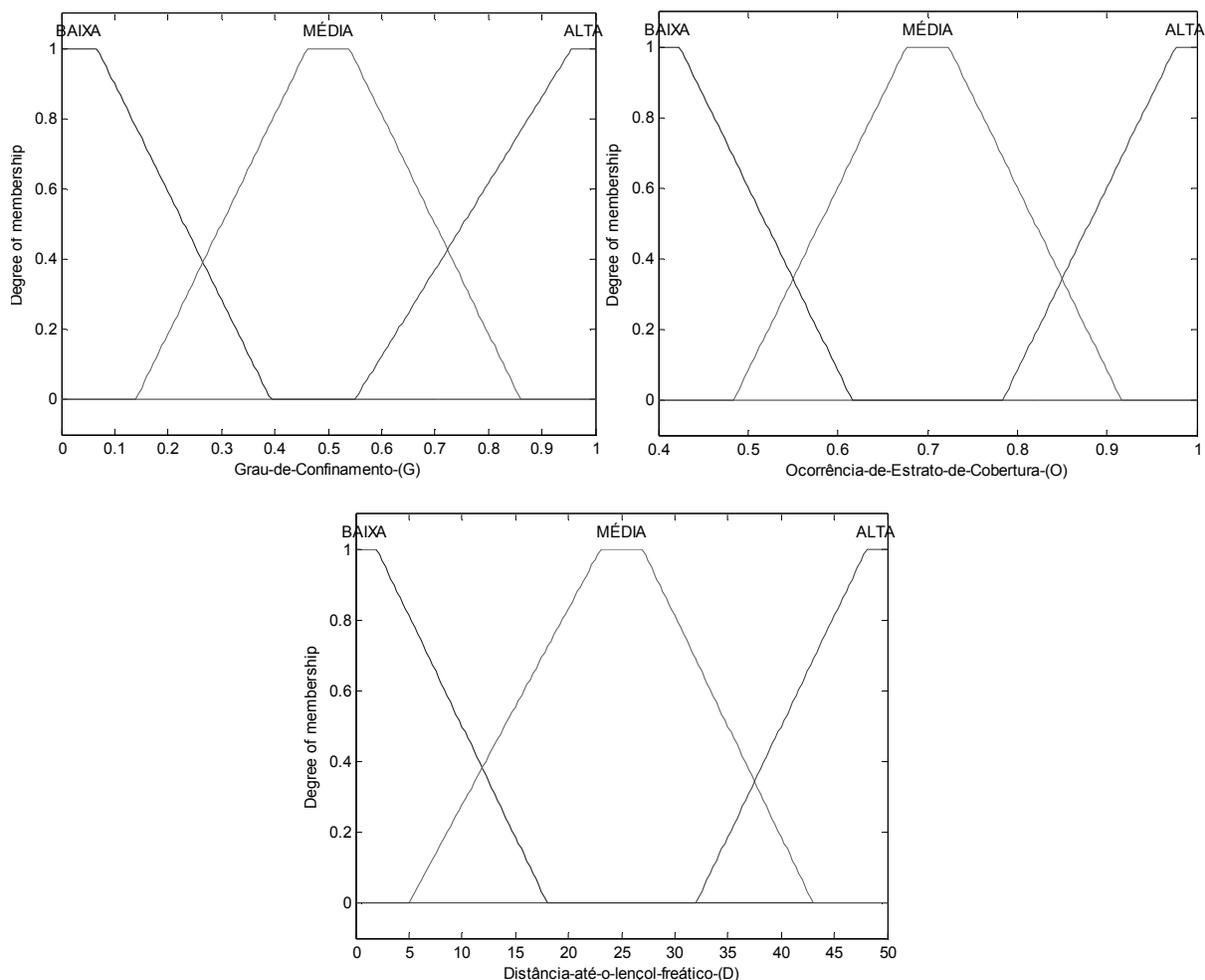


Figura 3. Função de Pertinência (FP) das variáveis de entrada do IVUg.

Neste estudo, os benefícios do conhecimento desenvolvido se deram a partir da base geral do sistema GOD. Este conhecimento pode ser construído sobre o quadro da regras definidas pelos especialistas. Como um exemplo: SE (“G” é Baixo); e (“O” é Baixo); e (“D” é Baixa); ENTÃO (“IVUg” é Insignificante). A Figura 4 descreve o procedimento metodológico adotado para este trabalho, cuja as soluções obtidas foram modeladas pelo software MATLAB 7.0 utilizando a ferramenta *toolboxes Fuzzy Logic*, conforme MATLAB (1999).

Assim, devido a duas variáveis do SIGOD serem compostas de valores não-*crisp* (Grau de confinamento e Ocorrência de estrado de cobertura) o domínio de entrada foi estabelecido pelas faixas de valores administrados pelo método GOD de acordo com Foster e Hirata (1988). Por outro lado, a variável Distância até o lençol teve seu domínio de entrada valores *crisp* (Ver Figura 3). Para

quantificar o índice de vulnerabilidade fuzzyficado ($IVUg^{(f)}$), após a inferência dos conjuntos R, escolheu-se o método do centro de gravidade como desfuzzyficador, tendo como FP a forma pseudo-trapezoidal (Ver Figura 5).

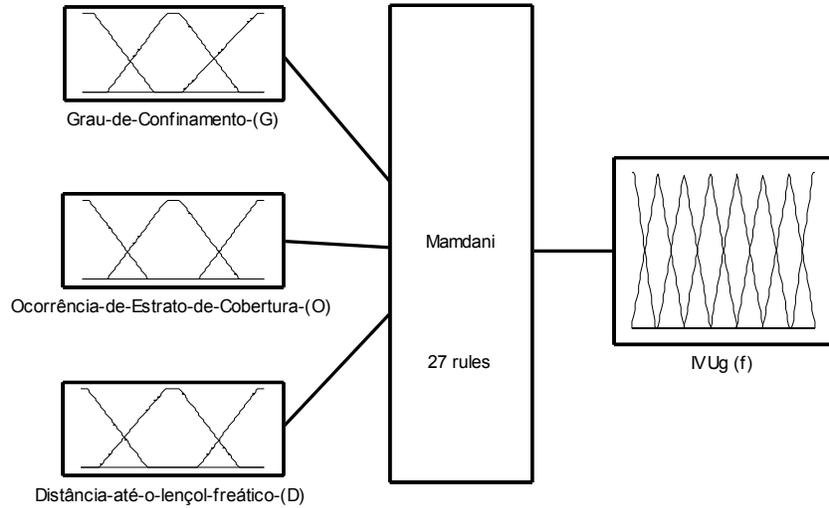


Figura 4. Função de Pertinência (FP) da variável de saída.

A variável de saída tem oito FP as quais denotam os termos lingüísticos referente ao grau de vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação (Ver Figura 5).

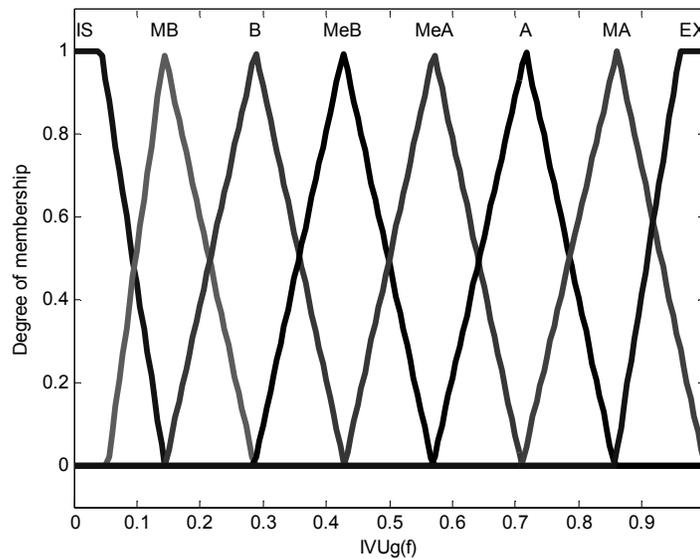


Figura 5. Função de Pertinência (FP) da variável de saída – $IVUg^{(f)}$.

Assim, não houve a necessidade de se normalizar a variável de saída uma vez que a faixa de valor tem intervalo de 0,0 a 1,0. No entanto, as variáveis lingüísticas adotadas pelo $IVUg$ interpretam as incertezas da vulnerabilidade de forma determinística e com o conceito interpretativo

único, já o $IVUg^{(f)}$ tem perspectiva conceitual mais abrangendo vindo a diminuir as incertezas com a adoção da teoria dos conjuntos fuzzy as quais dispõe-se de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Classes de valores do índice GOD determinístico-conceitual e fuzzyficado.

Grau	Grau de Vulnerabilidade	Faixa de Valores do $IVUg^{(f)*}$	Faixa de Valores do $IVUg$
	Insignificante – IS	<0,05	0,0 – 0,10
	Muito Baixo – MB	0,05 – 0,20	-
	Baixo – B	0,21 – 0,45	0,10 – 0,30
	Medianamente Baixo - MeB	0,46 – 0,55	0,30 – 0,50
	Medianamente Alto – MeA	0,56 – 0,65	
	Alto – A	0,66 – 0,75	0,50 – 0,70
	Muito Alto – MA	0,76 – 0,85	-
	Extremo - EX	>0,86	0,70 – 1,00

*A faixa de valores do $IVUg^{(f)}$ foi o domínio estabelecido para as FP. Os resultados da inferência do SIF obtiveram-se as FP de saída conforme a Figura 5 e suas respectivas interações com o conceito da teoria dos conjuntos fuzzy.

Por fim, procedeu-se a interpolação dos dados calculados para o $IVUg$ obtidos pelo SIGOD, $IVUg^{(f)}$ pelo SIF e para $IVUg^{(f)}$ (m) modelado pela correlação dos anteriores. O mapeamento da vulnerabilidade teve como aporte o software Surfer 8.0, cuja a interpolação espacial foi feito com a ferramenta *Kringing*, e o banco de dados foi adquirido de CPRM (2001) para um conjunto amostra de 229,0 poços freático localizados na Região Metropolitana de Belém (RMB) o qual se fez necessário, anterior ao mapeamento, uma breve dissertação acerca da sua caracterização hidrogeológica.

6 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA RMB

Os dados copilados por CPRM (2001) referem-se, basicamente, aos sedimentos do Mioceno Inferior ao Quaternário Recente, os quais guardam vários sistemas aquíferos. Estas unidades geológicas são conhecidas como Formação Pirabas, Grupo Barreiras e Pós-Barreiras, cujos sistemas vêm sendo explorados para abastecimento público, industrial e por particulares, com poços tubulares que variam de 12,0 m até 300,0 m de profundidade. Não obstante, segundo CPRM (2001), o domínio de aquíferos que circunda a RMB pode ser dividido em três.

O primeiro domínio é do tipo permoporoso, constituído pelos sedimentos da Cobertura Detritico Laterítica, que, por sua vez, está encimada por alúvios e colúvios. Corresponde à unidade aquífera superior, formada por níveis argilo-arenosos e inconsolidados, existentes no intervalo de 0,0 a 30,0 metros. O potencial hidrogeológico deste aquífero é fraco, como atestam as vazões. São

aquíferos livres cuja recarga se dá diretamente através das precipitações pluviométricas, enquanto a descarga se efetiva através dos rios, pelas fontes, evapotranspiração e poços.

O segundo domínio corresponde aos sedimentos do Grupo Barreiras, com litotipos de natureza heterogênea, indo desde argilitos até arenitos grosseiros interaleitados por argilas, lateritos e níveis argilosos caulinizados e com espessura máxima da ordem de 80,0 m. São camadas arenosas de espessuras variáveis, intercaladas com níveis mais argilosos, não permitindo grandes vazões (de 15 m³/h a 80 m³/h). São aquíferos de natureza livre e semi-livre, podendo, localmente, serem confinados. A recarga se dá por contribuição das camadas sobrepostas ou através da precipitação nas áreas em que estão aflorando. Os aquíferos Barreiras e Pós-Barreiras não estão conectados hidráulicamente.

O terceiro domínio corresponde às unidades da Formação Pirabas, formado por dois sistemas aquíferos do tipo multicamada, denominados de Pirabas Superior e Inferior, respectivamente. O 1º é caracterizado por sedimentos marinhos, fossilíferos, compostos por argilas calcíferas de coloração cinza-esverdeada e por leitos de calcário duro, cinza-esbranquiçado e que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero, siltitos e areias existentes no intervalo de 80,0 m a 180,0 m. Quando diminuem os níveis de calcário e folhelho, aumentam as espessuras de areia.

Nos aquíferos do tipo confinado aparecem as principais representações arenosas, encontradas nos intervalos de 84,0 a 94,0 m, 119,0 a 127,0 m, 140,0 a 145,0 m e 162,0 a 167,0 m. O potencial deste aquífero é moderado, contudo podem-se esperar boas vazões, principalmente nos horizontes de arenitos mais grosseiros.

Já o 2º domínio constitui-se, predominantemente, de camadas repetitivas de arenitos de cor cinza-esbranquiçada, granulometria fina à conglomerática, com intercalações mais espessas de argilas e siltitos esverdeados. Os principais níveis permeáveis deste aquífero ocorrem nos intervalos de 180,0 a 193,0 m, 197,0 a 211,0 m, 229,0 a 240,0 m e 251,0 a 259,0 m, constituindo um sistema estratificado confinado pelo pacote subjacente, que se caracteriza por uma permeabilidade vertical variável. Para melhor entendimento acerca da hidrogeologia regional da RMB, consultar CPRM (2001).

7 - APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE GOD FUZZYFICADO (IVU_g^(f))

A comparação da produção obtida pelo SIF com o SIGOD mostra que uma regra baseada na teoria dos conjuntos fuzzy é capaz de descrever a vulnerabilidade das águas subterrâneas diferentemente do que resulta um sistema determinístico/ conceitual. Não obstante, a capacidade de

um SIF é altamente dependente da qualidade das bases de regra (R). Apesar das diferenças entre SIF e SIGOD, em ambos os sistemas será possível obter o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação.

O desempenho da indexação fuzzy para a RMB resultou em três situações distintas quando comparado com o SIGOD determinístico/ conceitual. Conforme a Figura 6B, percebeu-se que nos ponto (2) o $IVUg^{(f)}$ subestimou a vulnerabilidade em relação ao $IVUg$. Por outro lado no ponto (1) tal relação foi superestimada, e no ponto (3) o $IVUg$ igualou-se ao $IVUg^{(f)}$. Não obstante, a análise das variáveis de entrada do SIGOD ao conjunto de regras R, prognosticou uma relação entre índices.

Deste modo, quando correlacionados o $IVUg$ consegue explicar em 75,78% do $IVUg^{(f)}$ a partir de um comportamento exponencial (Ver Figura 6A). Por conseguinte, pode-se analisar o desempenho do $IVUg$, $IVUg^{(f)}$ e do $IVUg^{(f)}(m)$ gerado a partir do modelo exponencial. Neste âmbito, percebe-se que o modelo exponencial é uma tentativa que consubstanciar uma relação entre o índice determinístico/ conceitual gerado pelo SIGOD e o índice fuzzyficado gerado pelo SIF.

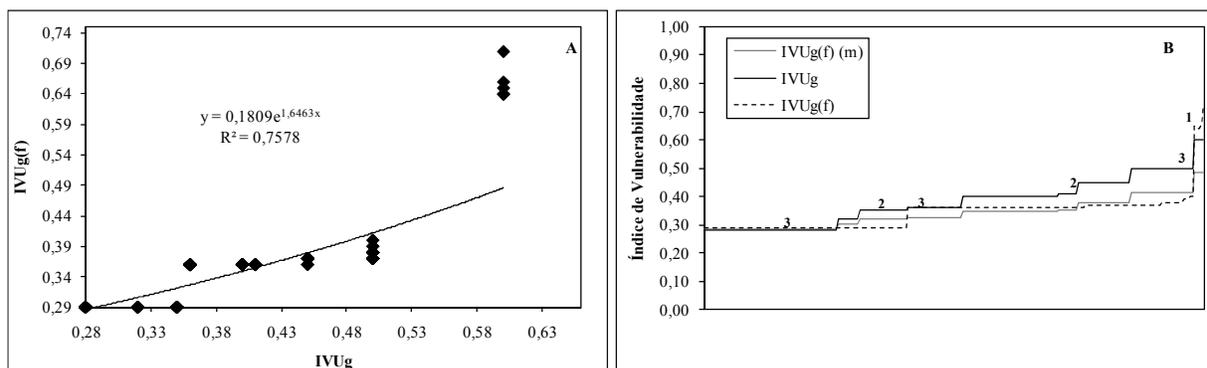


Figura 6. A) Correlação entre $IVUg^{(f)}$ x $IVUg$; B) Análise do $IVUg$, $IVUg^{(f)}$ e do $IVUg^{(f)}(m)$ aplicado na RMB.

A inferência do SIF foi analisado correlacionado a variável de saída ($IVUg^{(f)}$) em função das variáveis de entrada do SIGOD. As mesmas análises foram procedidas para o $IVUg$ e $IVUg^{(f)}(m)$. Quando relacionado a variável de entrada G o $IVUg$ e $IVUg^{(f)}$ não denotam diferenças significativa com tímida superestimação do $IVUg^{(f)}$ em relação ao $IVUg$. Se estende tal argumento ao $IVUg^{(f)}(m)$ igualando-se aos indicadores $IVUg$ e $IVUg^{(f)}$, visto na Figura 7A. Observa-se, ainda, na Figura 7A que o comportamento da variável que considera o Grau de confinamento dos aquífero se deu de forma constante.

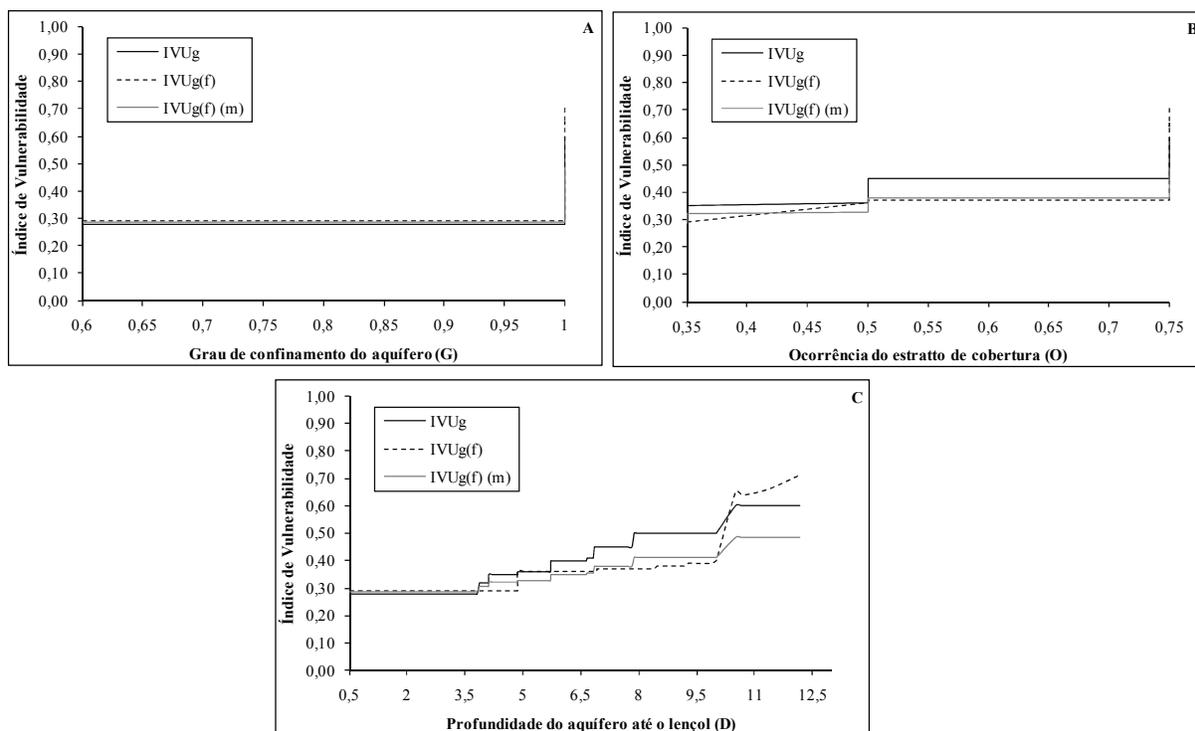


Figura 7. Correlação dos indicadores com: A) **G**; B) **O** e C) **D** nos aquíferos freáticos da RMB.

Tal circunstância deve-se ao fato de que 79,48% do conjunto amostral apresentou um grau de confinamento sob aquíferos não-confinados, correspondendo ao primeiro domínio hidrogeológico da RMB caracterizada por níveis argilo-arenosos e inconsolidados

Já quando relacionado com a variável **O**, o indicador do modelo determinístico/ conceitual é subestimado pelos indicadores fuzzy. No que tange ao $IVUg^{(f)}(m)$, o mesmo subestima a vulnerabilidade em função do parâmetro **O** até a ponderação 0,5. A partir de então tal indicador, modelado por uma função exponencial, se iguala ao IVUg, o mesmo acontecendo com o $IVUg^{(f)}$. Tal variação configura uma característica litológica da zona vadosa que varia de solos residuais a siltes, loess, till glacial para aquíferos inconsolidados, conforme a proposição Foster e Hirata (1988). Por conseguinte, a relação do IVUg com os $IVUg^{(f)}$ e $IVUg^{(f)}(m)$ é de superestimação no trecho que o parâmetro **O** varia de 0,50 a 0,75, configurando parte das características do segundo domínio corresponde aos sedimentos do Grupo Barreiras da RMB. Por fim, os indicadores se igualam em uma crescente, conforme visualizado na Figura 7B.

O parâmetro **D** (profundidade do aquífero até o lençol) revela que o indicador do SIF superestima, timidamente, a vulnerabilidade quando a profundidade do aquífero é inferior a 3,65 m, o mesmo acontecendo para $D > 10,0$ m ao ser comparado com o indicador do SIGOD e o que fora gerado pela correlação entre ambos. Por outro lado, para o conjunto amostral, 25,76% da

profundidade variaram entre 5,77 a 7,08 m, o que corresponde ao trecho em que o IVUg superestima a vulnerabilidade em relação ao $IVUg^{(f)}$ e $IVUg^{(f)}(m)$, podendo desta forma, obscurecer a tomada de decisão acerca da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação. Contudo, ressalta-se que a discretização do sistema de R do método Mamdani, foi o que proporcionou o comportamento da curva do $IVUg^{(f)}$ quando relacionado ao parâmetro D (Ver Figura 7C).

Em seguida procedeu a interpolação dos dados calculados para o IVUg obtidos pelo SIGOD, $IVUg^{(f)}$ pelo SIF e para $IVUg^{(f)}(m)$ pela correlação dos anteriores, conforme é mostrado na Figura 8. O mapeamento da vulnerabilidade teve como aporte o software Surfer 8.0, cuja interpolação espacial foi feita com a ferramenta *Kriging*, e o banco de dados adquirido de CPRM (2001).

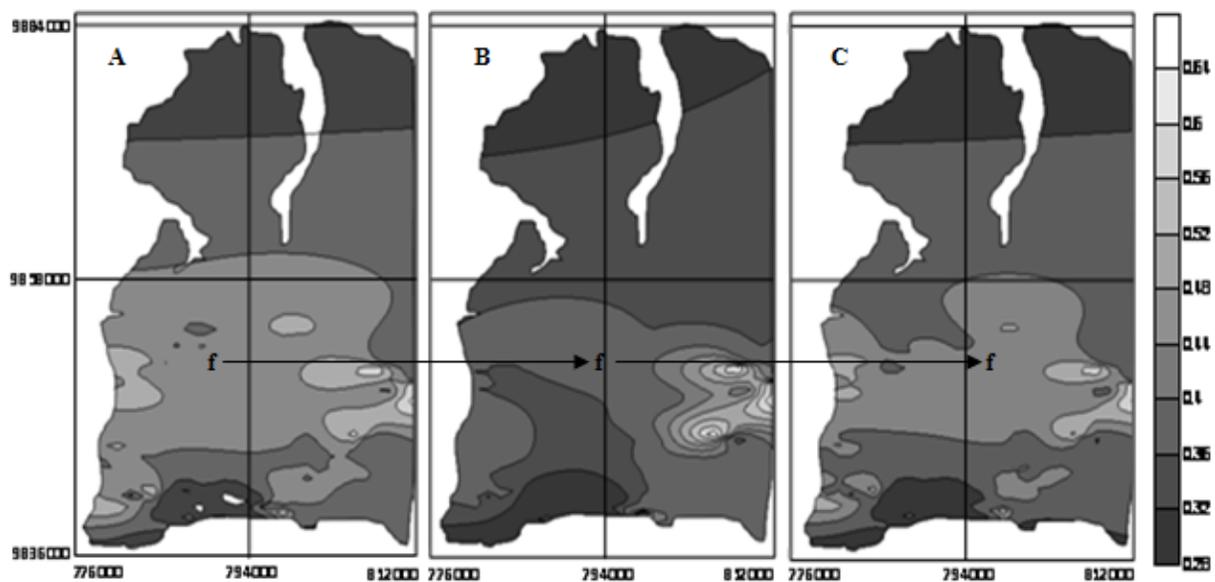


Figura 8. Mapeamento da vulnerabilidade utilizando: A) IVUg; B) $IVUg^{(f)}$ e; C) $IVUg^{(f)}(m)$ aplicado na RMB.

Pode-se visualizar que para um ponto f, a vulnerabilidade tem diferentes interpretações conceituais. No caso do IVUg ficou na escala de 0,44 a 0,48, o que implica em relacionar a um grau de vulnerabilidade médio. Por outro lado, para o mesmo ponto, o $IVUg^{(f)}$ foi de 0,32 a 0,36, indicando um grau de vulnerabilidade baixo, e, não obstante o resultado da correlação entre ambos, prognosticou um $IVUg^{(f)}(m)$ de 0,36 a 0,40, segundo a categoria do SIF, a vulnerabilidade seria baixa.

Deste modo, a aplicação de um SIF, baseado nos conjuntos de regras pelo método Mamdani, considerou que a vulnerabilidade para o ponto f, não é totalmente mediana como assim calculou-se pelo SIGOD deterministicamente. Assim, conforme as funções de pertinência que envolveu oito

variáveis lingüísticas, o grau que cada variável de entrada refletiu em um índice mais acurado e sensível as variações dos parâmetros considerados variáveis de entrada. Por fim, o modelo obtido pela relação entre os sistema resultou em análises similares ao $IVUg^{(f)}$, mas que no entanto, ainda deve ser utilizado com certa cautela.

8 - CONCLUSÕES

A indexação obtida pelo SIGOD tende a gerar um índice de vulnerabilidade de importância bastante vaga em função da interação de um conjunto de parâmetros desprovidos de fronteiras bem definidas. Assim com a adoção da teoria dos conjuntos fuzzy, o desempenho do SIF na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação foi significativa. Pois, com a aferição do conjunto de regras igual a 27,0, pelo método Mamdani, a sensibilidade do SIF em função de um $IVUg^{(f)}$ obteve-se um índice acurado, vindo a identificar indicadores diferenciado quando analisado por mecanismos determinísticos/ conceituais, e, por conseguinte, tal fato, pode melhor proporcionar a adoções de medidas de planejamento e gestão dos recursos hídricos subterrâneos em área que possivelmente teriam outras avaliações se calculado por um modelo vago.

Por fim, ao realizar a aplicação SIF, cujas variáveis de entrada foram os parâmetros **G**, **O** e **D**, do SIGOD, e proceder ao mapeamento da vulnerabilidade, desta vez com o índice de vulnerabilidade fuzzyficado, percebeu-se uma maior sensibilidade na interpretação do mesmo para um mesmo ponto inserido na RMB. Quando comprado com o $IVUg$ pelo SIGOD de forma determinística, a análise do grau de vulnerabilidade foi distinta.

O 1º, $IVUg^{(f)}$, indicou uma vulnerabilidade baixa, enquanto que o 2º proporcionou uma medida mediana da vulnerabilidade dos aquíferos a contaminação para um mesmo ponto de análise. As pequenas diferenças entre os dois sistemas podem estar relacionada com a discretização da variável de saída fuzzy. Por conseguinte a correlação entre os dois sistemas, cuja R^2 foi igual a 0,7578, proporcionou resultados significativo. Não obstante a adoção deste modelo deve ser controlado em função das variações dos $IVUg$ obtidos de forma determinística e conceitual, necessitando, ainda, de um teste de significância dos seus parâmetros. Deste modo, a teoria dos conjuntos fuzzy obteve resultados expressivos e mais acurados no mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos quando aplicado na RMB.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHAR, A; MARIÑO M. A; HON, M; EBTEHAJ, M; MOOSAVI, J. Rule-Based Fuzzy System for Assessing Groundwater Vulnerability. *Journal of Environmental Engineering*. Volume 133, Issue 5, pp. 532-540 (May 2007);
- BABUSKA, R., (1996). *Fuzzy Modelling and Identification*. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology. Delft, the Netherlands.
- CHEN, S. Y. (1996). Non-structured decision making analysis and fuzzy optimum seeking theory for multi-objective systems. *J. Fuzzy Math.* 4(2), 835–842;
- CHEN, S. Y. (1998). *Engineering Fuzzy Set Theory and Application* (in Chinese), 59–79. National Defence Industry Press, Beijing, China;
- CPRM. 2001. *Projetos de Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências*. Belém. 110 p;
- FOSTER, S. S. D. e R. HIRATA. 1988. “Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.” WHOPAHO/ HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Peru;
- GRIMA, M.A., VERHOEF, P.N.W., 1999. Forecasting rock trencher performance using fuzzy logic. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36, 413–432;
- JAGER, R., 1995. *Fuzzy Logic in Control*. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology. Delft, the Netherlands;
- MATLAB. (1999). “Language of technical computing.” *Fuzzy logic toolbox user’s guide*, Mathworks, Natick, Mass;
- NRC (National Research Council). 1993. *Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty*. Washington, D.C.: National Academy Press;
- SHOUYU, C., and GUANGTAO, F. (2003). “A DRASTIC-based fuzzy pattern recognition methodology for groundwater vulnerability evaluation.” *Hydrol. Sci. J.*, 48(2), 211–220;
- WEBER, L., KLEIN, P.A.T., 2003. *Application of Fuzzy Logic in Software and Hardware*. ULBRA, Canoas, RS, Brazil.
- ZADEH, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338–353 (London);
- ZHOU, H. C., WANG, G. L. & YANG, Q. (1999) A multi-objective fuzzy recognition model for assessing groundwater vulnerability based on the DRASTIC system. *Hydrol. Sci. J.* 44(4), 611–618.