

APLICAÇÃO DE UM MODELO DE RECONHECIMENTO PADRÃO FUZZY PARA AVALIAR O POTENCIAL POLUIDOR DE AQUÍFEROS

Application of a Model of Pattern Recognition Fuzzy to Polluter Potential Evaluate of Aquifers

ERICO GASPAR LISBOA ⁽¹⁾ e MANUEL PACHECO FIGUEIREDO ⁽²⁾

⁽¹⁾ Aluno de Doutoramento, PRODEC/FEUP,
Rua Professor António Cruz nº291, 5^ªF/D, 4200-001 Porto, dec12006@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Auxiliar, DEC/FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200 - 465 Porto, mpfiguei@fe.up.pt

Resumo

A avaliação do potencial poluidor de um aquífero pode ser abordada como um problema de reconhecimento de padrão. As características hidrogeológicas são interpretadas de forma qualitativa por um indexador que, quando comparado a valores padrão, indica o grau de vulnerabilidade do aquífero a ser poluído. Porém, como na prática a classificação do grau de vulnerabilidade não estabelece limites para os valores padrão, estabelece-se uma classificação dos potenciais de poluição a partir de um modelo de reconhecimento de padrão *fuzzy* (MRPF). Recorre-se a uma matriz padrão que reconhece a vulnerabilidade de aquíferos através de um indexador composto por três fatores hidrogeológicos (MGOD); de seguida, calcula-se um valor característico que estabelece uma classificação do potencial de uma determinada amostra a ser poluída, variando de "mais difícil" a "mais fácil". Numa área de 1.064,918km², na cidade de Belém (Brasil), 102 amostras dos fatores do MGOD são avaliadas por MRPF, com resultados que apontam para que 95,1% sejam classificadas como "mais difícil" a "difícil" de serem poluídas.

Palavras-chave: Reconhecimento de padrão *fuzzy*, vulnerabilidade de aquíferos, potencial poluidor.

Abstract

The evaluation of the potential pollution of an aquifer can be approached as a problem of pattern recognition. Hydrogeological characteristics are translated qualitatively by an indexer which, when compared to standard values, indicates the degree of vulnerability of the aquifer to be polluted. However, once actually the classification of the degree of vulnerability do not set limits to standard values, it is established a classification of pollution potential levels with a fuzzy pattern recognition model (FPRM). It uses a standard matrix which recognizes the vulnerability of aquifers using an indexer composed by three hydrogeological factors (MGOD); then, it is calculate a characteristic value that establishes a classification to the potential of a given sample to be polluted, ranging from "more difficult" to "easier". In an area of 1,064.918km², in the town of Belém (Brazil), 102 samples of factors GODM are evaluated by FPRM, whose results showed that 95.1 % are classified as "more difficult" to "difficult" to be polluted.

Keywords: Fuzzy pattern recognition, vulnerability of aquifers, pollution potential.

1. Introdução

A avaliação do potencial poluidor de um aquífero pode ser feita através de índices que expressam a vulnerabilidade de um aquífero ser contaminado. Dessa forma, se estabelece uma das primeiras ferramentas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Segundo Afshar *et al.* (2007), a forma de expressar a vulnerabilidade pode ser classificada como natural, ou intrínseca, e específica.

A vulnerabilidade específica considera as propriedades dos contaminantes, tais como o coeficiente de adsorção e o tempo de meia-vida, na sua composição.

A vulnerabilidade natural, ignorando as propriedades consideradas pela específica, é composta de variáveis hidrogeológicas. O produto da interação dessas variáveis representa um índice de vulnerabilidade natural.

O resultado desse índice enquadra-se em padrões qualitativos de vulnerabilidade que expressam o potencial poluidor, i.e., a vulnerabilidade à poluição de um determinado aquífero.

Assim, a classificação de um conjunto de amostras quanto à vulnerabilidade à poluição pode ser realizada através de um modelo de reconhecimento de padrão (MRP).

A literatura apresenta poucos trabalhos que aplicam um MRP para este fim, destacando-se a contribuição de Huicheng *et al.* (1999), que verificaram o funcionamento de um MRP para múltiplos objetivos, bem como os trabalhos de Shouyu e Guangtao (2003) e Carvalho e Pacheco (2010), que aplicaram um MRP para avaliação da vulnerabilidade natural da água subterrânea. Esses trabalhos utilizaram um modelo com base na teoria dos conjuntos *fuzzy* (Zadeh, 1965), utilizando como índice de vulnerabilidade a proposta do modelo DRASTIC (Aller *et. al.*, 1987).

Embora seja viável a introdução da teoria *fuzzy*, um conjunto amostral com um número reduzido de variáveis hidrogeológicas dificulta, ou inviabiliza, a aplicação ao modelo DRASTIC.

Assim, o objetivo deste trabalho consistiu na aplicação um modelo de reconhecimento de padrão *fuzzy* (MRPF) com base no modelo GOD (MGOD), proposto por Foster (1987), o qual recorre somente a três características hidrogeológicas.

Neste trabalho, o MRPF foi aplicado a uma área de 1.399,34 km², que compreende a cidade de Belém, estado do Pará, norte do Brasil, com disponibilidade de um conjunto de 102 amostras de dados referente a poços freáticos, nomeadamente os associados ao confinamento do aquífero, litologia e nível estático, e cuja metodologia é aqui resumidamente descrita.

2. Metodologia

2.1. Modelo de reconhecimento padrão *fuzzy* - MRPF

O MRPF desenvolvido por Huicheng *et al.* (1999) é baseado num conjunto de amostras de dados (n), cada uma caracterizada por um determinado número de fatores (m) correspondentes a outras tantas características hidrogeológicas, descrito por uma matriz (X)

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad [1]$$

em que x_{ij} representa o valor do fator i da amostra j ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), isto é, a variável hidrogeológica i de uma amostra de dados j . A aplicação dessa matriz requer a normalização dos seus elementos, uma vez que a premissa *fuzzy* só pode ser estabelecida por meio de um intervalo entre 0 e 1. Esse processo pode ser realizado através da Eq [2]

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} \quad [2]$$

em que $x_{i \max}$ e $x_{i \min}$ representam, respetivamente, os valores máximo e mínimo de uma variável hidrogeológica, isto é, os limites de cada uma das variáveis consideradas. Assim, os elementos da matriz X, quando transformados pela Eq [2], passam a compor uma matriz R normalizada:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad [3]$$

Portanto, pode-se realizar o enquadramento para $r_{ij} = 1$ e $r_{ij} = 0$, de tal modo que uma dada amostra j seja “mais fácil” e “mais difícil” de ser poluída, respetivamente.

O estabelecimento de uma suposição *fuzzy* para o modelo de reconhecimento foi atribuída inicialmente considerando que há uma distância que separa as amostras de $r_{ij} = 1$ e $r_{ij} = 0$, calculadas pelas Eq [4] e Eq [5], e visualizadas nas linhas vermelhas da Figura 1,

$$d_{jg} = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - g_j)]^p} \quad [4]$$

$$d_{jb} = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^m [w_i (b_j - r_{ij})]^p} \quad [5]$$

em que d_{jg} representa a distância entre uma amostra j até g ($g_j = 0$) e d_{jb} a distância até b ($b_j = 1$), podendo p ser 1 (Hamming, 1950) ou 2 (Euclidiana), e w_i ($i = 1, 2, \dots, m$) representam os pesos atribuídos aos fatores i , sujeitos à seguinte restrição:

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad [6]$$

Essas distâncias evidenciam que uma amostra j pode ser classificada como sendo, globalmente, “mais fácil” ($b_j = 1$) e “mais difícil” de ser poluída ($g_j = 0$).

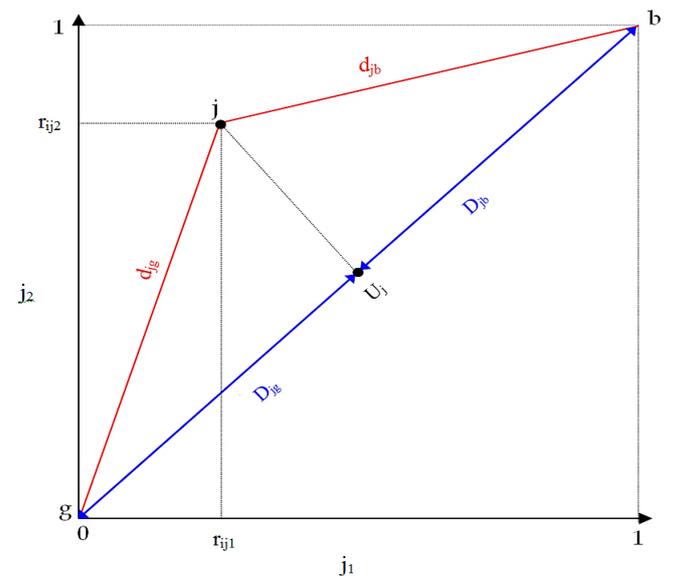


Figura 1. Análise gráfica da teoria *fuzzy* para um MRPF.

No entanto, a premissa *fuzzy* revela que “SE” a distância relativa padrão de uma amostra j até g for designada como u_j , “ENTÃO” a distância dessa mesma amostra j até b é $1-u_j$, calculadas respetivamente pelas Eq [7] e Eq [8] e visualizadas pelas linhas azuis da Figura 1.

$$D_{jg} = u_j \sqrt[p]{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - g_j)]^p} \quad [7]$$

$$D_{jb} = (1 - u_j) \sqrt[p]{\sum_{i=1}^m [w_i (b_j - r_{ij})]^p} \quad [8]$$

Deste modo, o valor de u_j é caracterizado como uma função que expressa o grau de pertinência com que uma amostra deve ser classificada quanto ao potencial poluidor.

Portanto, para estabelecer o enquadramento do potencial poluidor de uma amostra, considera-se que u_j é uma função objetivo de tal modo que o mínimo seja: $\min \{F(u_j) = D_{jg}^2 + D_{jb}^2\}$. Resolvendo a derivada $dF(u_j)/du_j = 0$, obtém-se uma função de reconhecimento padrão *fuzzy*:

$$u_j = \left\{ \frac{1 + \frac{\sum_{i=1}^m (w_i |r_{ij} - 1|)^p}{\sum_{i=1}^m (w_i \cdot r_{ij})^p}}{2} \right\}^{-1} \quad [9]$$

O potencial poluidor de uma amostra j ($u_j = 1, 2, \dots, n$) pode ser qualificada por níveis (h), cuja classificação se enquadra num intervalo de 0 a 1, ao longo da linha azul da Figura 1. Esse intervalo pode ser de “mais difícil” ao “mais fácil” de ser poluído (*i.e.*, o intervalo entre g e b).

A aplicação de um MRPF dependerá do número de variáveis hidrogeológicas e dos ajustes que devam ser realizados quanto à análise das ponderações das distâncias, entre outras. Essas análises deverão estar relacionadas com uma determinada finalidade ou objetivo.

A seguir descreve-se a aplicação do MRPF considerando três fatores ou variáveis hidrogeológicas ($i = 1, 2, 3$) e cento e duas amostras de dados ($j = 1, 2, \dots, 102$), sendo que todos os fatores contribuem igualmente para avaliação do potencial poluidor (*i.e.*, w_i foi considerado igual a $1/3$).

2.2. Considerações sobre a aplicação do MRPF

O processo metodológico baseou-se na tabulação de 102 dados secundários de poços freáticos numa área de 1.399,34 km², delimitada por subquadrantes, compreendendo, parcialmente, a cidade de Belém, norte brasileiro (Figura 2).

Além da descrição da hidrogeologia local, os dados contêm informações do grau de confinamento (X_G), características litológicas (X_O) e profundidade do nível estático de poços (X_D) (CPRM, 2001). Assim, optou-se pelo índice GOD (MGOD), produto da multiplicação de X_G , X_O e X_D , indicando cinco graus de vulnerabilidade: insignificante “I”, baixa “B”, média “M”, alta “A” e extrema “E” (Foster e Hirata (1988)).

Construiu-se uma matriz padrão Y com base no MGOD, cujo número de linhas é igual a três (*i.e.*, número de variáveis do MGOD), e o número de colunas igual a dez, definidas pelos níveis (h) de enquadramento do potencial poluidor (“mais difícil” a “mais fácil” de ser poluído):

$$Y = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ 0,4 & 0,45 & 0,5 & 0,55 & 0,6 & 0,65 & 0,7 & 0,75 & 0,8 & 1 \\ 51 & 45 & 40 & 35 & 30 & 25 & 20 & 10 & 5 & 0,5 \end{bmatrix} \quad [10]$$

Em seguida, com a normalização da matriz Y , obteve-se a matriz $S = (s_{i,h})$,

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0,11 & 0,22 & 0,33 & 0,44 & 0,56 & 0,67 & 0,78 & 0,89 & 1 \\ 0 & 0,31 & 0,38 & 0,46 & 0,54 & 0,62 & 0,69 & 0,77 & 0,85 & 1 \\ 0 & 0,09 & 0,19 & 0,39 & 0,49 & 0,58 & 0,68 & 0,78 & 0,88 & 1 \end{bmatrix} \quad [11]$$

Os níveis h de classificação estão associados ao potencial poluidor de uma determinada amostra (u_j) através de variáveis linguísticas (Shouyu e Guangtao, 2003).

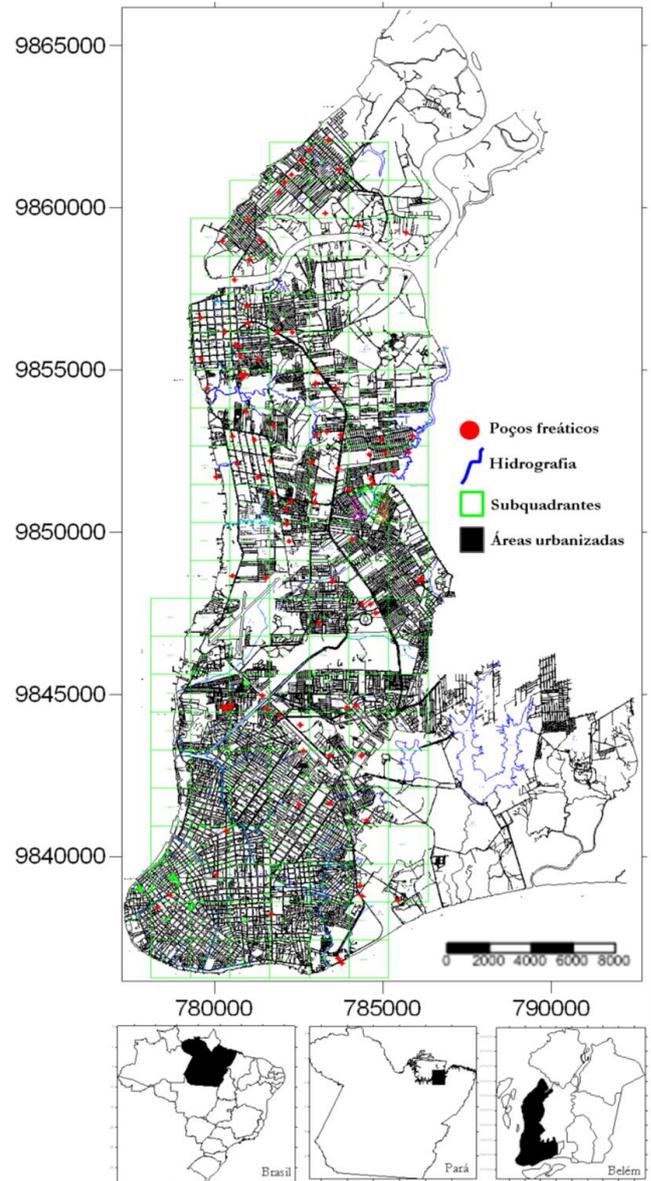


Figura 2. Delimitação da área em estudo.

Quadro 1. Níveis h para classificação do potencial poluidor.

h	Variáveis linguísticas
1	mais difícil de ser poluído
2	muito difícil de ser poluído
3	bastante difícil de ser poluído
4	difícil de ser poluído
5	levemente difícil de ser poluído
6	levemente fácil de ser poluído
7	fácil de ser poluído
8	bastante fácil de ser poluído
9	muito fácil para ser poluído
10	mais fácil de ser poluído

Os componentes da matriz S são calculados pela Eq [12], que relaciona $y_{i,1}$ com $S_{i,1} = 0$ (*i.e.*, “mais difícil” de ser poluído) e $y_{i,10}$ com $S_{i,10} = 1$ (*i.e.*, “mais fácil” de ser poluído):

$$S_{i,h} = \begin{cases} 0 & h=1 \\ \frac{(y_{i,h} - y_{i,1})}{(y_{i,10} - y_{i,1})} & 2 \leq h \leq 9 \\ 1 & h=10 \end{cases} \quad [12]$$

Desenvolveu-se o modelo de reconhecimento comparando estas matrizes com os valores dos dados amostrais da matriz X, obtida pela Eq [1], sendo que $x_{i,j}$ representa o valor da amostra ($j = 1, 2, \dots, 102$) para cada variável hidrogeológica ($i = 1, 2, 3$). Em seguida transformou-se a matriz X em R = ($r_{i,j}$) através da Eq [2], de modo que:

$$r_{i,j} = \frac{x_{i,j} - y_{i,1}}{y_{i,10} - y_{i,1}} \quad [13]$$

Posteriormente, construiu-se uma matriz do grau de pertinência de cada amostra j, considerando o nível de classificação do potencial poluidor, pela Eq [14],

$$U = (u_{h,j})_{h \times j} \quad [14]$$

em que $u_{h,j}$ representa a função de pertinência da amostra j ($j = 1, 2, \dots, 102$) relativamente ao nível h ($h = 1, 2, 3, \dots, 10$), sujeita à restrição (Zadeh, 1965):

$$\sum_{h=1}^{10} u_{h,j} = 1 \quad [15]$$

Para o cálculo das distâncias ponderadas, os pesos de cada variável hidrogeológica foram uniformizados, ou seja, $w_1 = w_2 = w_3 = 1$, obtendo-se:

$$d_{h,j} = \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[(r_{i,j} - S_{i,h})^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [16]$$

Desse modo, as variáveis do MGOD foram consideradas igualmente importantes para a classificação do potencial poluidor. Adotando a distância euclidiana ($p = 2$), é estabelecida a premissa *fuzzy* a partir do cálculo da distância ponderada,

$$D_{h,j} = u_{h,j} \cdot d_{hj} = u_{h,j} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[(r_{i,j} - S_{i,h})^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [17]$$

e determinado $u_{j,h}$ por minimização da função objetivo:

$$\min \left\{ F(u_{h,j}) = \sum_{h=1}^{10} D_{hj}^2 \right\} \quad [18]$$

Para o efeito, recorre-se ao método dos multiplicadores de Lagrange (λ_j) (Shouyu e Guangtao, 2003), de modo que as derivadas parciais da função lagrangeana sejam iguais a zero para u_{hj} ($\partial L(u_{h,j}, \lambda_j) / \partial u_{hj} = 0$) e λ_j ($\partial L(u_{h,j}, \lambda_j) / \partial \lambda_j = 0$), a fim de resolver o grau de pertinência de uma determinada amostra.

Assim, formulou-se o cálculo do grau de pertinência das 102 amostras, considerando 10 níveis para a classificação do potencial poluidor, igual a:

$$u_{h,j} = \left(d_{hj}^2 \sum_{k=1}^{10} d_{hj}^{-2} \right)^{-1} = \frac{1}{d_{hj}^2 \sum_{k=1}^{10} d_{hj}^{-2}}, \quad d_{hj} \neq 0 \quad [19]$$

quando d_{hj} for igual a 0 e $r_{i,j}$ é igual a $S_{i,h}$, significa que a amostra j pertence completamente ao nível h.

De seguida calculou-se a matriz do grau de pertinência de cada amostra ($j = 1, 2, \dots, 102$) pertencente a cada nível ($h = 1, 2, \dots, 10$) por:

$$U^* = \begin{bmatrix} u_{1,1}^* & u_{1,2}^* & \dots & u_{1,102}^* \\ u_{2,1}^* & u_{2,2}^* & \dots & u_{2,102}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{10,1}^* & u_{10,2}^* & \dots & u_{10,102}^* \end{bmatrix} = (u_{h,j}^*) \quad [20]$$

A evolução do nível de uma amostra não pode ser definida pela matriz U^* , de tal maneira que se calculou um valor característico de classificação através de um vetor u_j^* .

Assim sendo, pode-se atribuir a classificação do potencial poluidor de cada uma das 102 amostras sobre o eixo dos 10 níveis h ($u_{h,j}^*$).

Esse procedimento é similar à unidade de massa sobre um eixo, como na mecânica, representando o centro da forma rodeado por nível h e $u_{h,j}^*$ no plano de coordenadas de $h \sim u_{h,j}^*$ definido por (Shouyu e Guangtao, 2003) como H_j :

$$H_j = (1,2,\dots,10)u_j^* = \sum_{h=1}^{10} u_j^* \cdot h \quad [21]$$

Portanto, atribui-se a H_j o valor característico para enquadramento do potencial poluidor (Quadro 1), a fim de compará-lo com os valores padrão da matriz Y.

3. Análise e Discussão dos Resultados

A aplicação do MRPF com base no MGOD revelou que 95,1% dos dados enquadraram o potencial poluidor do aquífero freático da área em estudo entre “mais difícil” a “levemente difícil” de ser poluído ($1 \leq H_j \leq 5$). Já 4,9% das amostras ficaram enquadradas entre “levemente fácil” a “mais fácil” de ser poluído ($5 \leq H_j \leq 10$).

O MGOD apontou que 84,3% das amostras são vulneráveis a contaminantes conservadores a longo prazo, quando lançados ou lixiviados (grau baixo, “B”, entre 0,11 e 0,30). Já 10,8% das amostras apresentaram camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (*i.e.*, grau de vulnerabilidade insignificante, “I”). Assim, estes resultados são equivalentes aos do MRPF para o intervalo $1 \leq H_j \leq 5$.

No entanto, pelo MGOD, 3,9% das amostras apontaram que o aquífero é vulnerável a muitos contaminantes em várias condições de contaminação (alto grau de vulnerabilidade, “A”); e apenas 1,0% são vulneráveis à maioria dos contaminantes, com impacto rápido em muitos cenários de contaminação (grau de extrema vulnerabilidade, “E”).

Quando o MGOD classificou o grau de vulnerabilidade em “A” ou “E”, a água subterrânea pode ser enquadrada pelo MRPF como potencialmente “fácil” de ser poluída ($5 \leq H_j \leq 10$), não se observando uma diferença de enquadramento pelos dois modelos. Portanto, os resultados obtidos com o MRPF foram similares quando comparados com os do MGOD.

Essa similaridade pode ser visualizada pela Figura 3, onde se verificam picos de subida e descida, de ambos os modelos, de forma sincronizada, embora se notem algumas diferenças em três trechos.

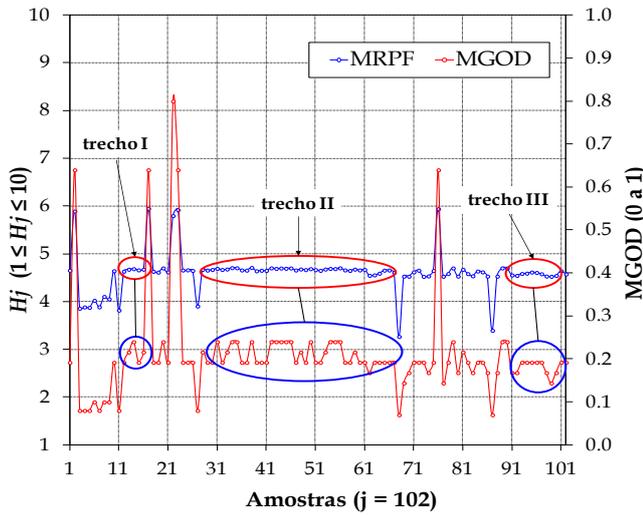


Figura 3. Comparação entre MGOD e MRPF.

No trecho I os resultados do MRPF são constantes, enquanto com o MGOD existem dois picos de subida e descida dos valores. O comportamento foi o mesmo nos trechos II e III, de modo que os valores de ambos os modelos, em síntese, não apresentaram grandes variações qualitativas. No entanto, as diferenças identificadas nos trechos supracitados não foram visualmente perceptíveis na interpolação dos resultados do MRPF e do índice do MGOD. O mapeamento da vulnerabilidade pelo MGOD, em comparação com o MRPF, apresenta similaridades, embora tenham sido identificadas algumas diferenças qualitativas na classificação do potencial poluidor dos aquíferos (Figura 4).

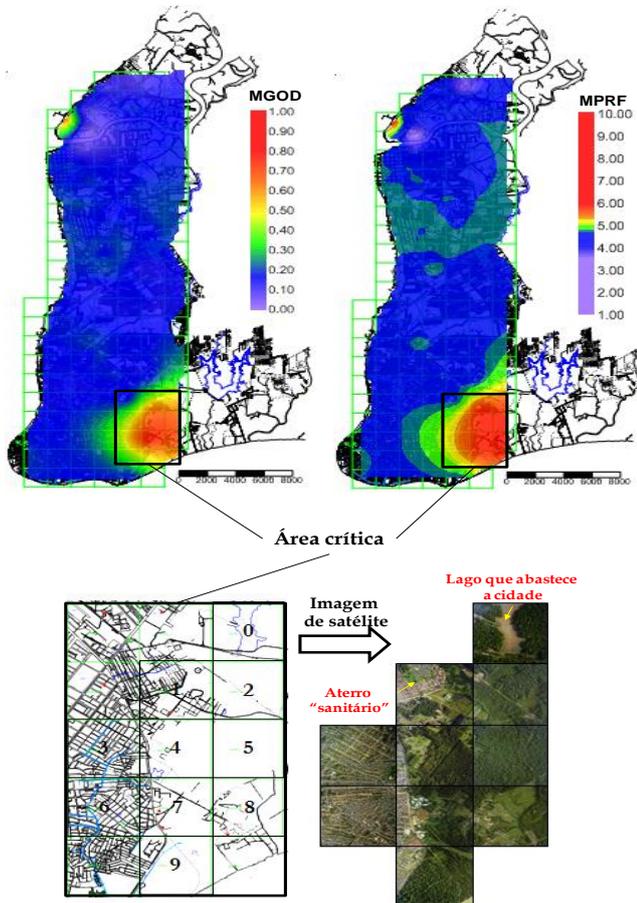


Figura 4. Comparação espacial entre MGOD e MRPF.

Essas conclusões foram similares aos de Lisboa *et al.* (2013) que aplicaram um sistema de inferência *fuzzy*, conjuntamente com técnicas geostatísticas, para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos na região metropolitana de Belém.

Assim sendo, adotando-se o MRPF para avaliar o potencial poluidor de aquíferos, determinaram-se, na prática, duas regiões importantes para a tomada de decisão: a) “mais fácil” a “fácil”; e, b) “mais difícil” a “difícil” do aquífero ser poluído.

As regiões cuja classificação é “mais fácil” a “fácil” do aquífero freático ser poluído deve, naturalmente, merecer maior atenção, pois, em tais regiões, a água subterrânea está exposta a vários tipos de contaminantes.

A área analisada indicou que algumas regiões têm potencial poluidor classificado como “fácil” a “mais fácil” de ser poluída. A região com gradiente de cor verde, por exemplo, apresenta-se atualmente como uma zona de expansão urbana, sendo crescente o número de atividades potencialmente poluidoras (*e.g.*, postos de combustíveis). O processo de urbanização não dispõe de infraestruturas suficientes uma vez que, nessa região, pouco mais de 60% da população tem rede de água canalizada. Essa realidade produziu um crescimento de 72% na perfuração de poços freáticos domiciliares registrados por IBGE (2011).

Além disso, a cidade de Belém possui pouco mais de 8% dos domicílios atendidos por uma rede de esgoto sanitária. Assim, grande parte do esgoto produzido é coletada por fossas sépticas que, após um pré-tratamento via filtro anaeróbio, é despejado no sistema de microdrenagem. Portanto, a zona identificada como “mais fácil” a “fácil” de ser poluída, definida por nove subquadrantes, deve ter o uso e ocupação do solo redefinido.

Outro aspecto é que, no subquadrante 0, onde se encontra o lago que abastece a rede de água da cidade, rodeado pelas zonas de crescimento urbano (subquadrante 3 e 6), localiza-se um aterro sanitário que está, aproximadamente, a 250 m da tomada d’água (subquadrante 1).

Embora esse aterro tenha sido recentemente desativado, recebia todos os resíduos sólidos gerados por mais de 2,7 milhões de habitantes, sem qualquer tipo de tratamento. Assim, de forma prática, o mapeamento do potencial poluidor pelo MRPF apresentou-se como uma ferramenta de planejamento do espaço urbano (ordenamento e instalação de atividades poluidoras) para a cidade de Belém (Brasil).

4. Conclusões e Recomendações

A aplicação do MRPF para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação foi adotada para melhor gerenciar os recursos hídricos subterrâneos, como medida de proteção da água subterrânea à contaminação.

A partir dessa concepção, adotou-se como base o modelo GOD para enquadramento de padrões qualitativos de vulnerabilidade que expressaram o potencial poluidor a que um determinado aquífero pode ser exposto.

Assim sendo, a metodologia desenvolvida é passível de ser novamente aplicada em outros sistemas de aquíferos, considerando os aspectos da inacessibilidade e capacidade de atenuação de contaminantes. No entanto, para determinadas configurações hidrogeológicas, a matriz de padrões pode ser ajustada.

Por outro lado, a aplicação de um modelo de reconhecimento de padrão, sustentado pelas variáveis hidrogeológicas do MGOD, pode ser administrado por uma análise hierárquica de processo de tal modo que, a partir da ponderação das respectivas variáveis, os resultados se apresentem distintos.

Adicionalmente a essa recomendação, o uso de técnicas geoestatísticas também se apresenta como um contributo para melhorar o mapeamento da vulnerabilidade.

Em resumo, os resultados da aplicação do MRPF foram similares aos obtidos pelo MGOD, com diferenças apenas qualitativas. No entanto, a maior abrangência de áreas "mais fáceis" de serem poluídas, designadas de áreas críticas, indicou que o MRPF tem um caráter preventivo. Desse modo, a proposta metodológica apresenta-se como uma ferramenta de planeamento do espaço urbano (ordenamento e instalação de atividades poluidoras), bem como para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Ensino e Pesquisa, Brasil (CNPq) pela concessão de bolsa de doutoramento. Ao Prof. Hui-Cheng Zhou e ao aluno de doutoramento Eng. Zhichun Xue, ambos pertencentes à Dalian University of Technology, China - Institute of Water Resources & Flood Control, pelo contributo metodológico e análise dos resultados.

Referências

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, H. J., Petty, J. R., e Hackett, G. (1987). *DRASTIC; A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. USEPA-600/2-87-035, 622 pp;
- Asfhar, A., Marino, M., Ebtehaj, M., e Moosavi, J. (2007). *Rule-based fuzzy system for assessing groundwater vulnerability*. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 133(5), 532-540;
- Carvalho, G. e Pacheco, F. (2010). *Análise da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Sordo (Vila Real) pelo método Fuzzy-Drastic*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Volume 31, nº 01;
- CPRM. (2001). *Projetos de Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências*. Belém. 110 p;
- Foster, S. e Hirata, R. (1988). *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHOPAHO/ HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Peru;

- Foster, S. (1987)., *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conferenc*. Noordwijk Aan Zee, The Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied S, Netherlands Organization for Applied Scientific Research.
- Hamming, R. (1950). "Error detecting and error correcting codes", Bell System Technical Journal 29 (2): 147-160;
- Huicheng, Z., Guoli, W. e Qing, Y. (1999). *A multi-objective fuzzy pattern recognition model for assessing groundwater vulnerability based on the DRASTIC system*. Hydrological Sciences Journal, 44(4), pp.611-618.
- IBGE. (2011). *Área territorial oficial*. Resolução da Presidência do IBGE de nº 5 (R.PR-5/02). Página visitada em 5 dez. 2012;
- Lisbôa, E., Barp, A., Mendes, R. (2013). *Proposição Fuzzy-Geoestatística para o Mapeamento da Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 18 (1), pp. 111-123;
- Shouyu, C. e Guangtao, F. (2003). *A DRASTIC-based fuzzy pattern recognition methodology for groundwater vulnerability evaluation*. Hydrological Sciences Journal, 48(2), pp.211-220.
- Zadeh, L. (1965). *Fuzzy Sets - Information and Control*, vol. 8, pp 338-353.