

UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

MAIA, P. H. P.¹ & CRUZ, M. J. M.²

1- Instituto de Gestão das Águas e Clima. Av. Antônio Carlos Magalhães nº 357 Itaipara, CEP 41825-000 - Salvador, BA – Brasil. e-mail: phpmaia@gmail.com

2- Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Departamento de Geoquímica. Rua Barão de Gemoabo S/N, Campus Ondina, CEP 40170-115 - Salvador, BA – Brasil. e-mail: jeronimo@ufba.br

ABSTRACT

Maia, P. H. P. & Cruz, M. J. M. 2011. A New Method for Evaluating the Vulnerability of Aquifers. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.* 15(2): 29-40. eISSN: 1983-9057. Mapping of vulnerability index is useful for planning and use of land and water, specially in the quality preservation of groundwater resources. The main purpose of this research was to develop a method in which vulnerability should be determined giving priority to quantitative over qualitative aspects, trying to define the variables with least subjectivity in order to allow the comparison of vulnerabilities of the various types of aquifers in different regions. The aim is to describe the intrinsic vulnerability of aquifers with a system formed by a set of interrelated entities that cooperate for a common goal, their protection or vulnerability. Only variables that could be measured were selected for being applied in the model. The analysis of the relationships between the variables and the vulnerability was decisive for the deduction of the proposed algebraic model. The result is a new method able to describe the aquifers' vulnerability, using a group of connected components able to determine an index of vulnerability. This method is represented by a simple algebraic equation, formed by a set of mathematical and logical relationships between the variables and the vulnerability with clearly defined terms, where the mathematical relationships between variables and vulnerability are precisely described.

Keywords: Vulnerability, new method, aquifers, quality

INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é decorrente das propriedades físico-químicas inerentes do meio aquífero que expressa a susceptibilidade hidrogeológica da água ser afetada por contaminantes.

Nas últimas três décadas tem-se verificado um crescente desenvolvimento de modelos e técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, como uma ferramenta para sua proteção. A cartografia de vulnerabilidade tem servido a racionalizar ações de proteção de aquíferos, na medida em que tenta compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade do terreno em suportá-las, sem prejuízo das águas subterrâneas (Hirata, 2001).

Todos os aquíferos são vulneráveis a médio ou em longo prazo a contaminantes que apresentam características persistentes e móveis, gerados por uma atividade amplamente distribuída em uma região. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada, o mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca do aquífero (Foster et al. 1988). O mesmo autor reconhece também que as águas subterrâneas constituem uma reserva estratégica e vital para o abastecimento público, remete a uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos.

Toda água subterrânea é vulnerável, em maior ou menor grau, à contaminação; a incerteza é inerente a qualquer avaliação de vulnerabilidade à contaminação; os sistemas mais complexos de avaliação da

vulnerabilidade apresentam o risco de obscurecer o óbvio e tornar indistintas as sutilezas (NRC, 1993).

Necessita-se, portanto, de um sistema menos refinado e mais genérico para o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero. Tendo em vista um objetivo mais prático, a solução por ora é produzir um mapa integrado da vulnerabilidade, desde que os termos usados estejam claramente definidos e as limitações, precisamente descritas (Foster et al., 1988).

Para se assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos é necessário conhecer as zonas de maior vulnerabilidade, mapear as fontes potenciais de contaminação e estabelecer programas específicos de inspeção e monitoramento (Aguêro Valverde & Mesalles, 2002).

A vulnerabilidade de um aquífero é caracterizada por meio dos seguintes fatores naturais: a) acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes, b) capacidade de atenuação resultante da retenção físico-química ou reação ao poluente na zona não saturada e, c) a diluição e a remobilização dos contaminantes (Foster et al., 2002). A atuação desses fatores pode ser avaliada com a aplicação em uma equação matemática que traduz um índice de vulnerabilidade a partir de variáveis medidas que representam características intrínsecas do meio aquífero.

Os métodos tradicionais para avaliar a vulnerabilidade foram desenvolvidos, de maneira geral, para um tipo particular de aquífero, quase sempre definindo os valores das variáveis por meio de tabelas e apli-

cando fatores de ponderação definidos com bastante subjetividade a cada uma delas, o que compromete seus resultados.

A aplicação de diferentes métodos em uma mesma área produz resultados discrepantes, como pode ser observado na determinação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero de Beja em Portugal por Paralta et al. (2007; Tabela 1).

Os fatores que influenciam o comportamento hidrogeológico dos aquíferos variam: 1) nos aquíferos Fissurais, dependem da intensidade do fraturamento; 2) nos Cársticos, do grau de carstificação e 3) nos Granulares, de ambientes deposicionais e processos diagenéticos. Esses fatores não são avaliados nas tabelas/ábacos e provocam distorções nos índices dos principais métodos.

As variáveis utilizadas nos métodos tradicionais, como o DRASTIC e o SINTACS, são medidas em unidades de natureza diferente com intervalos de valores de diferentes amplitudes que causam impactos desproporcionais nas equações e que requer compensação por meio de fatores de ponderação nas equações.

Para evitar o uso desses fatores de ponderação procurou-se tratar os valores das variáveis e colocá-los em uma escala equivalente adequada, sem que esses percam a relação com os valores medidos e permitir que esses índices possam ser aplicados na equação sem o uso de fatores de compensação de impactos.

A partir da decomposição e análise dos métodos mais utilizados, foram selecionadas somente as variáveis passíveis de serem medidas para utilizar na dedução da equação do novo método que descrever a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos.

Utilizando as variáveis selecionadas foi deduzida uma equação, a partir do papel que cada uma exerce sobre os fatores naturais de proteção e das relações matemáticas entre as variáveis e a vulnerabilidade, capaz de expressar de forma quantitativa um índice vulnerabilidade dos aquíferos.

A vulnerabilidade dos aquíferos foi modelada por um sistema, constituído por um conjunto de entidades ou componentes inter-relacionados que cooperam para um objetivo comum, a proteção ou a

vulnerabilidade dos mesmos. A análise das relações matemáticas entre as variáveis e a vulnerabilidade foi determinante para a dedução do modelo algébrico proposto, tornando-o capaz de expressar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi caracterizada por uma consulta as referencias bibliográficas sobre o tema. Todos os dados e informações relativos a vulnerabilidade foram armazenados em um dispositivo modelado para essa finalidade. A análise de livros e artigos científicos publicados sobre a vulnerabilidade de aquíferos propiciou uma melhor compreensão sobre o assunto.

Para entender os princípios utilizados internacionalmente na qualificação da vulnerabilidade, e aproveitar o que tem de melhor em cada um deles foi realizada uma análise crítica dos métodos mais conhecidos para verificar os pontos fortes e as deficiências e decompor suas equações para avaliar o alcance de cada variável na proteção do aquífero.

As variáveis foram avaliadas com a finalidade de selecionar as mais indicadas para compor as equações do método para o cálculo da vulnerabilidade dos aquíferos em escala regional. Para tanto, elas foram descritas, de maneira mais ou menos uniforme, com o objetivo de facilitar o entendimento do papel que cada uma delas exerce sobre os fatores de proteção naturais e seu rebatimento na vulnerabilidade dos aquíferos.

Verificou-se a eficiência de cada variável, as zonas de sombreamentos de algumas, na qual duas ou mais variáveis exercem o mesmo papel nas equações e, permitiu ainda identificar novas variáveis passíveis de serem utilizadas no método.

As variáveis selecionadas foram utilizadas para compor a formulação matemática básica de um novo método para o cálculo da vulnerabilidade dos aquíferos em escala regional.

Seguindo a tendência da escola alemã, que procura priorizar aspectos quantitativos sobre os qualitativos no cálculo da vulnerabilidade (Auge, 2004), os valores das variáveis medidos em unidades de

Tabela 1- Vulnerabilidade dos Aquíferos de Beja (Paralta et al., 2007).

Método	Tipo de Índice	Classe	Vulnerabilidade
DRASTIC	Numérico	100-119	Baixa
D. PESTICIDE	Numérico	120-139	Baixa a Média
IS	Numérico	65 a 75%	Média - Alta
AVI	Numérico	1 a 2,7	Moderada a Extremamente Alta
GOD	Numérico	0,2 a 0,4	Baixa a Moderada
EPPNA	Qualitativo	V6	Baixa a Variável

natureza diversa e em intervalos de valores de diferentes amplitudes, foram colocados em uma escala equivalente para evitar o uso de fatores de ponderações usados nos métodos tradicionais. A estratégia consistiu em reduzir a índices os valores medidos, considerando o menor um e o maior dez e, os demais valores obtidos por interpolação. Desse modo com a utilização das escalas equivalentes, as variáveis passaram a apresentar o mesmo impacto na equação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Principais Métodos

Encontram-se na bibliografia sobre o assunto, diversos métodos de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster et al., 2002), os quais podem ser classificados em três grupos principais, de acordo com a abordagem adotada (Vrba & Zaporozec, 1994):

a) Ambientes hidrogeológicos: baseiam a avaliação da vulnerabilidade, em termos qualitativos, nas características gerais do ambiente, usando mapas temáticos (Albinet & Margat, 1970).

b) Modelos análogos: utilizam expressões matemáticas para os parâmetros essenciais tais como tempo de trânsito médio na zona vadosa como indicadores do índice de vulnerabilidade (Monkhouse, 1983).

c) Sistemas paramétricos: usam parâmetros selecionados como indicadores de vulnerabilidade e aplicam seu espectro de valores e interações para

produzir alguma forma de índice de vulnerabilidade relativo ou absoluto. Incluem como exemplo desse método o DRASTIC de Aller & Bennet (1987); além da metodologia GOD. Outro método digno de nota nessa categoria é o EPIK, desenvolvido especificamente para aquíferos cársticos e discutido por Doerfliger & Zwahlen (1997).

Alguns desses sistemas incluem índices de vulnerabilidade formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos de um modo bem definido. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem, em princípio, de eliminar ou minimizar a subjetividade inerente aos processos de avaliação.

Com o objetivo de entender a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, os principais métodos foram descritos e analisados, procurando conhecer as técnicas aplicadas, suas equações foram decompostas para avaliar o alcance de cada variável na proteção do aquífero e compreender os princípios usados internacionalmente na qualificação da vulnerabilidade. Também foram verificados os pontos fortes e as deficiências de cada método com a finalidade de aproveitar o que tem de melhor em cada um deles, (Tabela 2).

Vale ressaltar que os principais métodos empregados para a qualificação e mapeamento da vulnerabilidade foram desenvolvidos especialmente para aquíferos granulares livres. Exceto o EPIK que é exclusivo para aquíferos cársticos e o $\Delta hT'$, método que utiliza as variáveis; potencial hidráulico e transmissividade vertical em processo de desenvolvimento

Tabela 2- Principais métodos utilizados no cálculo da vulnerabilidade.

EKV	Índice = $E.Kv$; sendo (E) profundidade da superfície freática, (Kv) permeabilidade vertical da zona subsaturada.
GOD	Índice = $G.O.D.$ sendo (G) o grau de confinamento, (O) a litologia e o grau de consolidação da cobertura e (D) a profundidade da superfície freática.
DRASTIC	Índice = $D.Dw + R.Rw + A.Aw + S.Sw + T.Tw + I.Iw + C.Cw$ sendo (D) profundidade da superfície freática, (R) taxa de recarga, (A) tipo do aquífero, tipo de solo, (T) topografia ou declividade do terreno, (I) Impacto da zona não saturada e (C) condutividade hidráulica e, $Dw=5$ e, $Rw=4$, $Aw=3$, $Sw=2$, $Tw=1$, $Iw=5$ e $Cw=3$, os respectivos fatores de ponderação.
SINTACS	Índice = $S.Sw + I.Iw + N.Nw + T.Tw + A.Aw + C.Cw + S.Sw$ sendo (S) profundidade da água, (I) infiltração, (N), seção subsaturada, (T), tipo de solo, (A), características do aquífero, (C), condutividade hidráulica e, (T) declividade topográfica. $Sw=22$, $Iw=8$, $Nw=12$, $Tw=9,8$, $Aw=17,7$, $Cw=18,6$, $Sw=11,9$, os respectivos fatores de ponderação.
EPIK	Índice = $(\alpha.E1) + (\beta.Pi) + (\gamma.li) + (\delta.ki)$ sendo $E1=1$, $E2=2$, $E3=3$; $P1=1$, $P2=2$, $P3=3$, $P4=4$ e, $I1=1$, $I2=2$, $I3=3$, $I4=4$; $K1=1$, $K2=2$, $K3=3$, e os fatores de ponderação; $\alpha=3$, $\beta=1$, $\gamma=3$ e $\delta=2$
AVI	Índice = $\sum (di / Ki)$ sendo (di) a espessura de cada camada sedimentar acima da zona saturada e (Ki) a condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas.

determinar a vulnerabilidade para aquíferos semi-confinados (Auge, 2004).

Seleção das Variáveis

Os métodos tradicionais foram decompostos e as variáveis utilizadas foram descritas com o objetivo de entender do papel que cada uma delas exerce sobre os fatores de proteção naturais e avaliar o seu rebatimento na determinação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos. Verificou-se que as variáveis utilizadas nos métodos tradicionais são, em sua maioria, determinadas por meio de tabelas e ábacos (Tabela 3).

Para provar que algo existe temos que medir, quantificar. Nesse contexto a análise das variáveis foi importante para selecionar somente aquelas passíveis de serem medidas nos poços ou nos aquíferos. A idéia de priorizar os aspectos quantitativos sobre os qualitativos foi para imprimir um caráter universal ao novo método e permitir a comparação das vulnerabilidades de aquíferos de diferentes regiões.

A avaliação propiciou momentos de reflexão sobre zonas de sobreamentos nos efeito de proteção das variáveis, na qual duas ou mais variáveis exercem o mesmo papel nas formulações matemáticas dos métodos de cálculo e, sobretudo permitiu ainda identificar novas variáveis a serem aplicadas no novo método objeto da pesquisa.

As variáveis foram selecionadas, considerando a forma de obtenção, os efeitos de proteção e a relação com a vulnerabilidade. A seguir descrevemos as variáveis selecionadas e para serem utilizadas na construção da equação do novo método:

a. Profundidade da Água (PA) é o mesmo que nível estático, seus dados são obtidos a partir de medida direta nos poços. Apresenta uma forte relação com a topografia do terreno em aquíferos livres. Apresenta um efeito de proteção relacionado não só a acessibilidade ao meio aquífero, como também a atenuação de contaminantes da zona não saturada. As reações físico-químicas que ocorrem nesta zona promovem

a degradação e/ou captura dos contaminantes.. Sua relação é direta com o fator de proteção e inversa com a vulnerabilidade, quanto maior for a profundidade, maior o efeito de proteção e menor a vulnerabilidade.

b. Espessura do solo (ES) é uma variável cujo fator de proteção está relacionado não só a acessibilidade ao aquífero, mas também a atenuação de contaminantes. A espessura do regolito está relacionada aos processos pedogenéticos influenciados pelo clima, relevo, vegetação e pela natureza da rocha. Os dados pontuais são obtidos dos perfis de poços tubulares e podem ser espacializados por meio de interpolações. Sua relação é direta com o fator de proteção e inversa com a vulnerabilidade, quanto maior for a espessura, maior o efeito de proteção e menor a vulnerabilidade.

c. Declividade do Terreno (DT) definida como a inclinação do terreno em relação a um plano horizontal, a variável é obtida a partir de um mapa topográfico. Os efeitos de proteção sobre aquífero está relacionado a acessibilidade de contaminantes. O terreno com declividade elevada favorece o escoamento superficial e terreno com baixa inclinação favorece a infiltração tanto da água como de contaminantes. Sua relação com o fator de proteção é direta e inversa com a vulnerabilidade, quanto maior a declividade, maior o fator de proteção e menor a vulnerabilidade.

d. A Capacidade específica (CE) é definida como a relação entre a vazão de uma captação e o respectivo rebaixamento, expresso em m³/h/m. É parâmetro muito útil para comparar a produtividade de aquíferos e bastante influenciada pelas características hidrogeológicas locais. Considerando que a facilidade ou dificuldade do aquífero tem para produzir água é a mesma que ele tem para aportá-la, a atuação do fator de proteção dessa variável está relacionada a acessibilidade de contaminantes ao aquífero. Sua relação é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade, quanto maior for a capacidade específica, menor é o efeito de proteção e maior a vulnerabilidade.

Tabela 3 - Forma de obtenção das variáveis utilizadas nos principais métodos. D/P/S – Variáveis medidas; R/I – Variáveis estimadas em tabelas e ábacos.

DRASTIC	SINTACS	EPIK	GOD	EK _v
D Profundidade da água	S Profundidade da água	E Intensidade de carstificação	G Tipo de aquífero	E Profundidade da água
R Recarga	I Infiltração	P Espessura da cobertura	O Litologia da cobertura	K _v Permeabilidade vertical
A Aquífero	N Zona não saturada	I Infiltração	D Profundidade da água	
S Tipo de solo	T Tipo de solo	K Rede cárstica		
T Declividade topográfica	A Característica do aquífero			
I Impacto da zona não satur.	C Condutividade hidráulica			
C Condutividade	S Declividade topográfica			

e. Recarga potencial (RE) é a Pluviosidade média anual, equivalente aos efeitos da recarga real utilizada em outros métodos, incluindo o DRASTIC, (Aller et al., 1987).é o volume de água incorporado as reservas de uma formação aquífera se esta tivesse capacidade de armazenamento suficiente para comportar toda a água de precipitação. A água das chuvas que recarrega o aquífero é o vetor que transporta os contaminantes para seu interior. A recarga traduz a acessibilidade de contaminantes ao aquífero para a zona saturada, bem como promove a diluição daqueles solúveis em água. Sua relação é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade, quanto maior a recarga maior a vulnerabilidade. A decisão de usar diretamente o valor da pluviosidade média anual foi para evitar o uso de tabelas no cálculo da recarga.

f. Densidade de Fraturas (DF) é uma variável específica para os aquíferos Fissurais e Carsticos nos quais o tectonismo, é determinante para geração de estruturas abertas favoráveis a acumulação e circulação da água subterrânea. Está relacionada a acessibilidade de contaminantes ao meio aquífero, quanto maior for o grau de fraturamento, maior será a acessibilidade. Sua relação é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade, quanto maior for a densidade de fraturas, menor será o efeito de proteção e maior a vulnerabilidade.

g. Transmissividade do Aquífero (TA) é uma variável influenciada pelas características hidrogeológicas locais. Representa a capacidade de um meio para transmitir água. Também pode ser definida como a quantidade de água que se escoar através da seção vertical do aquífero quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade e se expressa em m²/dia ou cm²/s. Sua relação com a vulnerabilidade é direta e com o fator de proteção inversa, quanto maior for

transmissividade, menor será o fator de proteção e maior será a vulnerabilidade.

A utilização do Grau de Confinamento, como determinado para o GOD, inicialmente foi cogitada, porém o fato da mesma de maneira geral não ser medida como as demais variáveis selecionadas, sua aplicação na equação foi descartada, porem nada impede que decorrente de necessidades específicas ela possa ser agregada.

A condutividade hidráulica não foi utilizada porque a correlação entre os valores do Condutividade Hidráulica e da Transmissividade revelou um coeficiente de correlação elevado (0,868), sinalizando para uma superposição do efeito de proteção das duas variáveis, o que faz com que uma ou de outra possa ser aplicada na equação (Figura 1). Neste caso, optou-se pelo uso da Transmissividade do Aquífero no novo método.

A qualidade dos testes de bombeamento dos aquíferos Fissurais e Carsticos, realizados para dimensionar e posicionar as bombas nos poços comprometeu a determinação das variáveis, Transmissividade (TA) e Coeficiente Hidráulico (CH) nos aquíferos Fissurais e Carsticos. A determinação dessas variáveis, pelo método de recuperação de Cooper & Jacob, apresentou resultados discrepantes entre as vazões e os rebaixamentos observados nos poços; 1, 3, 4, 5, 10, 11, 13 e 15 e, portanto, pouco confiáveis (Tabela 4).

As variáveis, profundidade da água e a espessura do solo são variáveis distintas e não apresentam qualquer superposição de efeitos. A espessura da cobertura pode até coincidir com a profundidade do nível estático, porém os efeitos de proteção são diferentes. A matriz de correlação das variáveis utilizadas indica que não está ocorrendo qualquer superposição nos efeitos de proteção das variáveis na equação do novo método. Cada variável medida representa somente

Figura 1 - Correlação entre o condutividade hidráulica e a transmissividade.

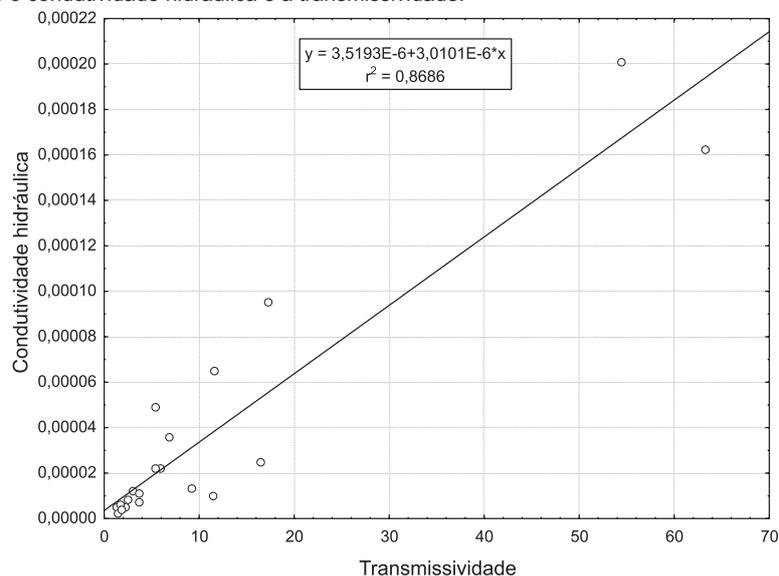


Tabela 4 - Cálculo da transmissividade e da condutividade hidráulica. Valores em negrito representam resultados discrepantes entre as vazões e os rebaixamentos observados nos poços.

Poço Nº	IDENTIF.	Q (m ³ /h)	NE (m)	ND (m)	TA (m ² /h)	CH (m/s)
1	2-349/84	2,64	97,00	131,00	6,84	0,000036
2	1-3235/85	3,74	4,32	52,63	1,29	0,000005
3	1-2263/84	0,57	1,00	53,13	3,09	0,000012
4	1-5371	7,99	100,64	156,46	2,25	0,000005
5	2-457	10,98	89,76	121,25	3,73	0,000011
6	1-1207	14,94	41,55	51,86	63,29	0,000162
7	2-1866	0,82	108,75	136,61	2,46	0,000008
8	1-1426/82	0,64	113,25	181,15	1,73	0,000006
9	1-2190/84	4,80	23,06	63,84	3,77	0,000007
10	2-2308	3,38	25,90	114,20	1,50	0,000002
11	1-2467/84	3,19	84,40	132,00	17,27	0,000095
12	1-5404/93	0,79	79,75	174,00	1,89	0,000004
13	2-555/84	1,80	123,65	136,46	11,57	0,000065
14	2-1318	2,30	128,70	149,49	5,93	0,000022
15	1-1266/81	1,11	1,00	57,80	5,45	0,000022
16	1-232/81	2,02	63,40	81,24	5,45	0,000049
17	2-2055	37,71	4,54	6,56	54,45	0,000201
18	1.318/82	131,97	50,18	80,20	16,45	0,000025
19	1.010/80	186,12	19,90	66,92	11,41	0,000010
20	1.338/82	99,00	54,78	87,98	9,27	0,000013

uma única propriedade do aquífero relacionada com a vulnerabilidade (Tabela 5).

As variáveis são medidas em unidades de natureza distinta, por exemplo, a Profundidade da Água (m); Espessura do Solo (m); Densidade de Fraturas (m/km²); Capacidade Específica (m³/h/m). Elas também apresentam intervalos de valores com diferentes amplitudes, por exemplo, o valor da Capacidade Específica de um determinado aquífero, dados reais, varia de 0,003 e 2,03 (m³/h/m) enquanto que o valor da Profundidade da Água para o mesmo aquífero, varia no intervalo de 1,04 m até mais de 100 m. Essa diferença de amplitude nos valores, provoca impactos diferenciados nas equações e faz com que os autores dos métodos tradicionais utilizem os fatores de ponderação para compensar.

As frações equivalentes representam a mesma parte do todo. Os valores das variáveis foram colocados em uma escala equivalente, de forma a evitar o uso de ponderações subjetivas para realçar efeitos de algumas delas nas equações. As escalas são proporcionais e todas as equivalentes são de mesma amplitude. Os valores das variáveis relacionadas a vulnerabilidade foram transformados em índices, considerando o menor valor de cada variável um e o maior dez e os valores intermediários foram obtidos por meio de interpolação.

Dedução das Equações

Nomeando as variáveis selecionadas: Profundidade da Água (PA); Espessura do Solo (ES); Densidade de Fraturas (DF); Capacidade Específica (CE); e considerando as relações entre cada variável com a vulnerabilidade dos aquíferos temos que a Vulnerabilidade (V) possui:

1) Uma relação inversa com a Profundidade da Água (PA), Espessura do Solo (ES) e Declividade do terreno (DT), portanto:

$$V = \left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right) \text{ (Equação 1)}$$

2) Uma relação direta com Densidade de Fraturas (DF), Transmissividade do Aquífero (TA), Capacidade Específica (CE) e Recarga Potencial (RE), portanto:

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right) + CE + RE + DF + TA\right] \text{ (Equação 2)}$$

Nos levantamentos de dados para equação verificou-se que alguns termos da equação apresentaram problemas na obtenção, como por exemplo, a Transmissividade (TA) e Densidade de Fratura (DF).

Apesar dos dados de Densidade de Fratura (DF) dos aquíferos Fissurais e Carsticos ainda não estarem disponíveis, sua determinação faz parte do projeto do Mapa Hidrogeológico do Estado da Bahia e não está descartada a sua utilização futura quando

Tabela 5 - Matriz de correlação das variáveis utilizadas na aplicação experimental.

	PA	ES	DT	CE	RE
PA	1	0,231	0,214	0,046	0,026
ES		1	0,242	0,001	0,087
DT			1	0,054	0,124
CE				1	0,014
RE					1

esses levantamentos estiverem disponíveis. Portanto, essas reflexões suscitaram modificações na equação e, para aplicação no cálculo da vulnerabilidade em ambientes aquíferos fissurais, que fica:

$$V = \left[\left(\left(\frac{1}{PA} \right) + \left(\frac{1}{ES} \right) + \left(\frac{1}{DT} \right) \right) + CE + RE + DF \right] \quad (1)$$

E para a aplicação em ambientes aquíferos granulares que dispõe de testes de bombeamento de qualidade para permitir o cálculo da transmissividade com confiabilidade, a equação fica:

$$V = \left[\left(\left(\frac{1}{PA} \right) + \left(\frac{1}{ES} \right) + \left(\frac{1}{DT} \right) \right) + CE + RE + TA \right] \quad (2)$$

Como os resultados produzidos com as duas equações estão na mesma escala, o novo método pode ser aplicado no mapeamento da vulnerabilidade de todos os tipos de aquíferos sem qualquer problema para comparar os índices obtidos.

Simulando uma aplicação

Com objetivo de simular a aplicação da equação deduzida, considerou-se que os índices obtidos para as variáveis (PA, ES, DT) após a conversão para escalas equivalentes seja X, foram então calculados os valores de Y correspondentes a 1/PA, 1/ES e 1/DT abaixo:

X	Y=1/X
x = 1	y = 1,00
x = 2	y = 0,50
x = 3	y = 0,33
x = 4	y = 0,25
x = 5	y = 0,20
x = 6	y = 0,16
x = 7	y = 0,14
x = 8	y = 0,12
x = 9	y = 0,11
x = 10	y = 0,10

Aplicando esses valores na equação (1) foi simulado o cálculo do valor mínimo e máximo para a vulnerabilidade.

O aquífero portador de um elevado fator de proteção, com valores mais altos de PA, ES e DT e mais baixos para CE, RE e DF, a vulnerabilidade mínima fica:

$$V. \text{ Min.} = [(1/10)+(1/10)+(1/10)+1,0+1,0+1,0] = 0,10+0,10+0,10+1,0+1,0+1,0 = 3,3$$

O aquífero com baixo fator de proteção, expresso por valores menores de PA, ES, DT e mais elevados para CE, RE e DF, a vulnerabilidade máxima fica:

$$V. \text{ Max.} = [(1/1)+(1/1)+(1/1)+10+10+10] = 1+1+1+10+10+10 = 33$$

A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem de eliminar a subjetividade inerente aos processos de avaliação. Conhecendo os valores mínimos e máximos, podemos estabelecer os limites de valores dos índices e definir os intervalos:

- Baixa ≤ 10,5
- 10,5 < Média ≤ 18,0
- 18,0 < Alta ≤ 25,5
- Extrema > 25,5

assim:

$$\text{Vuln. baixa} = [(1/1) + (1/1) + (1/1) + 2 + 2 + 1] = 1 + 1 + 1 + 2 + 2 + 1 = 8,0$$

$$\text{Vuln. média} = [(1/3) + (1/4) + (1/4) + 6 + 5 + 5] = 0,33 + 0,25 + 0,25 + 6 + 5 + 5 = 16,83$$

$$\text{Vuln. alta} = [(1/7) + (1/7) + (1/6) + 7 + 7 + 6] = 0,14 + 0,14 + 0,16 + 7 + 7 + 6 = 20,44$$

$$\text{Vuln. extrema} = [(1/10) + (1/10) + (1/10) + 10 + 10 + 10] = 0,1 + 0,1 + 0,1 + 10 + 10 + 10 = 30,3$$

Com o objetivo de examinar as relações entre as Variáveis utilizadas no método e a Vulnerabilidade, os valores de X e Y foram substituídos na fórmula 1 para simular o cálculo dos índices de vulnerabilidade (Tabela 6).

A partir da interpolação dos dados pontuais das variáveis determinadas pela equação são produzidos os diversos níveis de informações espaciais que podem ser integradas, por meio de tecnologia GIS para determinar os índices e gerar o mapa de vulnerabilidade MAIA de acordo com os procedimentos da Figura 2.

Aplicação Experimental

A aplicação experimental do novo método foi na área piloto, localizada nos municípios de Lençóis e Lagedinho, selecionada estrategicamente por comportar os quatro tipos de classes de aquíferos. Cerca de 20 poços foram pesquisados na área, sendo 12 em aquífero Cárstico, 5 em Metassedimentar e 4 no Cristalino. Para avaliar o comportamento do novo método em toda diversidade de aquíferos, foram incluídos mais 3 poços em um aquífero Granular da Bacia Sedimentar do Recôncavo.

Os dados dos poços tubulares forneceram somente as variáveis: PA, ES, DT, CE e RE. Não foi possível contar com as variáveis: Densidade de Fraturas, por ainda não ter sido levantada, e Transmis-

sividade do Aquífero, devido a qualidade dos testes de bombeamento. Assim optou-se pela aplicação da equação modificada (3) com as variáveis disponíveis para o cálculo dos índices de vulnerabilidade com o novo método, aqui denominado de MAIA - Método de Avaliação Intrínseca de Aquíferos (Figura 10).

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA} \right) + \left(\frac{1}{ES} \right) + \left(\frac{1}{DT} \right) \right] + CE + RE \quad (3)$$

A escala de valores do índice para esta aplicação foi obtida a partir da determinação dos valores máximos e mínimos, como descrito a seguir:

$$V \text{ min.} = \left(\left[\frac{1}{10} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10} \right] + 1,00 + 1,00 \right) = 0,1 + 0,1 + 0,1 + 1,0 + 1,0 = 2,3$$

$$V \text{ Max.} = \left\{ \left[\left(\frac{1}{1} \right) + \left(\frac{1}{1} \right) + \left(\frac{1}{1} \right) \right] + 10 + 10 \right\} = 1,0 + 1,0 + 1,0 + 10 + 10 = 23,0$$

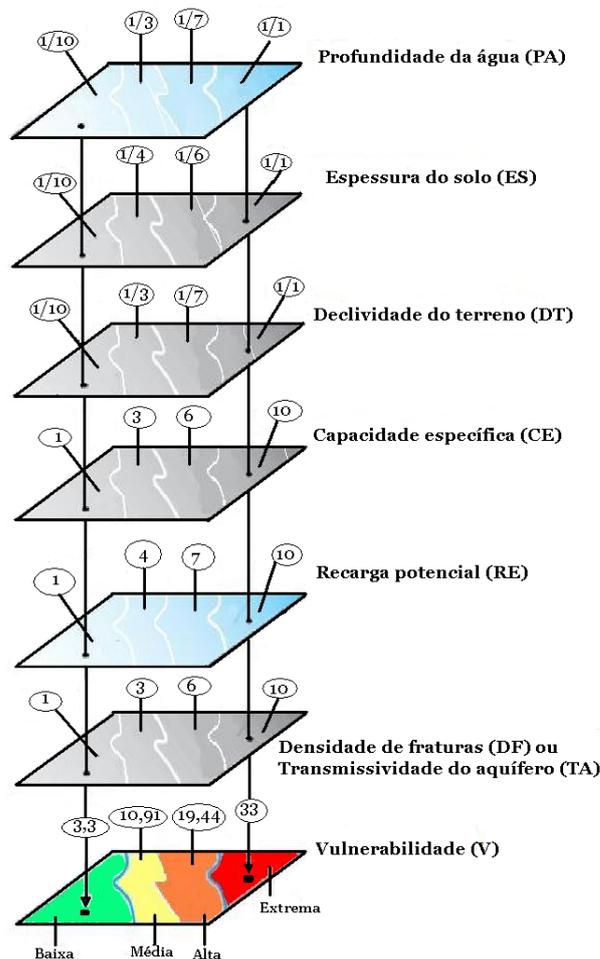
Índices de Vulnerabilidade:

- Baixa ≤ 7,5
- 7,5 < Média ≤ 12,5
- 12,5 < Alta ≤ 17,5
- 17,5 < Extrema < 23,0

Também foram calculados os índices dos métodos DRASTIC (Aller & Bennet, 1987) e GOD (Foster et al., 1988), cujos resultados foram correlacionados entre si e, com o índice MAIA com a finalidade de avaliar o comportamento de cada um deles (Tabela 8).

Nos métodos mais utilizados quase todas as variáveis são vinculadas a características dos solos e a litologia dos aquíferos e seus valores estimados por meio de tabelas e ábacos. Provavelmente é em decorrência dessa forma de determinar os valores

Procedimentos para determinação do índice de vulnerabilidade



Equações:

Aquíferos Fissurais:	Aquíferos Granulares:
$V = \left[\left(\frac{1}{PA} + \frac{1}{ES} + \frac{1}{DT} \right) + CE + RE + DF \right]$	$V = \left[\left(\frac{1}{PA} + \frac{1}{ES} + \frac{1}{DT} \right) + CE + RE + TA \right]$

Tabela 6 - Índices de vulnerabilidade obtidos na simulação.

X	Y=1/X	Índices de Vulnerabilidade
1	1	6,00
2	0,5	7,50
3	0,33	9,99
4	0,25	12,75
5	0,20	15,60
6	0,16	18,48
7	0,14	21,42
8	0,12	24,36
9	0,11	27,33
10	0,10	30,30

Figura 2 - Procedimento para gerar o mapa com os índices de vulnerabilidade (modificado de FOSTER et. al., 2006).

que ocorre uma tendência de reproduzir índices de vulnerabilidade iguais para aquíferos com mesmo tipo de rocha. Esse comportamento é mais acentuado no GOD do que no DRASTIC porque este último utiliza mais parâmetros que o primeiro.

A aplicação desses métodos em uma área com mesmo tipo rocha e de solo, sem grandes variações nos níveis estáticos, poderá acarretar em uma uniformidade nos resultados, decorrente dos valores estimados por meio de tabelas, fazendo com que o mapa fique com uma só classe de vulnerabilidade.

A aplicação de fatores de ponderação sobre cada variável, definidos com bastante subjetividade com o intuito de realçar ou reduzir o impacto de cada

Tabela 7 - Variáveis utilizadas no cálculo do Índice MAIA e qualificação para os poços analisados.

Poço	IDENTIF.	PAi	ESi	DTi	CEi	REi	I. MAIA.	Qualificação
1	2-349/84	1,00	1,1	1,3	1,01	1,2	5,7	Baixa
2	1-3235/85	2,99	3,8	1,9	1,01	1,0	10,6	Média
3	1-2263/84	10,00	4,0	1,4	1,00	1,0	17,5	Alta
4	1-5371	1,00	10,0	2,2	1,03	1,2	15,4	Alta
5	2-457	1,01	1,0	1,1	1,07	1,2	5,4	Baixa
6	1-1207	1,13	5,3	1,5	1,28	1,6	10,8	Média
7	2-1866	0,99	4,4	1,8	1,00	1,2	9,4	Média
8	1-1426/82	0,99	0,9	10,0	1,00	1,6	14,5	Alta
9	1-2190/84	1,30	1,1	1,6	1,02	1,0	6,1	Baixa
10	1-2078/84	10,00	10,0	1,0	1,00	1,0	23,0	Extrema
11	2-2308	1,26	10,0	1,1	1,01	1,8	15,1	Alta
12	1-2467/84	1,02	1,2	2,6	1,01	1,2	7,0	Baixa
13	1-5404/93	1,02	1,0	3,2	1,00	1,8	8,0	Média
14	2-555/84	0,98	1,4	6,1	1,03	1,8	11,3	Média
15	1-955/80	0,99	1,0	2,7	1,00	1,8	7,5	Baixa
16	2-1318	0,98	1,0	3,5	1,02	1,6	8,1	Média
17	1-1266/81	10,00	6,9	1,1	1,00	1,0	19,9	Extrema
18	1-232/81	1,05	1,1	2,1	1,02	1,6	6,9	Baixa
19	2-2129	1,13	1,3	1,1	10,00	2,2	15,6	Alta
20	2-2055	2,89	1,5	3,0	4,63	3,7	15,7	Alta
21	1.318/82	1,09	0,9	6,3	1,85	10,0	20,1	Extrema
22	1.010/80	1,36	1,1	2,3	1,78	10,0	16,5	Alta
23	1.338/82	1,07	1,3	3,0	1,58	10,0	16,9	Alta

uma delas na equação, provavelmente provoca distorções na avaliação da vulnerabilidade e compromete seus resultados.

Em contraposição, as variáveis aplicadas no método MAIA ao serem colocadas em uma mesma escala equivalente e proporcional, evita o uso de fatores de ponderação e torna o método mais consistente para a determinação da vulnerabilidade dos aquíferos.

A estratégia de usar somente parâmetros mensuráveis acentua a sensibilidade do Índice MAIA para detectar diferenças na vulnerabilidade decorrente

de pequenas variações nos valores dos parâmetros e imprime um caráter universal ao método que o qualifica para ser aplicado tanto em áreas com um mesmo tipo de aquífero, como em áreas com vários tipos diferentes.

A matriz de correlação entre os Índices de Vulnerabilidade MAIA, DRASTIC e GOD aponta para valores baixos, menores que 0,3196, que denotam uma total falta de relação entre seus valores, provavelmente em decorrência da utilização de variáveis diferentes. A correlação entre os índices de vulnerabilidade GOD

Tabela 8 - Quadro comparativo dos índices de vulnerabilidade.

Poço	Aquífero	DRASTIC	Qualif.	GOD	Qualif.	MAIA	Qualif.
1	Cárst.	86	Insignificante	0,5	Alta	5,7	Baixa
2	Crist.	109	Muito Baixo	0,4	Média	10,6	Média
3	Crist.	116	Muito Baixo	0,5	Alta	17,5	Alta
4	Meta.	61	Insignificante	0,2	Baixa	15,4	Alta
5	Cárst.	76	Insignificante	0,1	Baixa	5,4	Baixa
6	Cárst./Met.	55	Insignificante	0,3	Média	10,8	Média
7	Cárst.	80	Insignificante	0,1	Baixa	9,4	Média
8	Cárst.	80	Insignificante	0,1	Baixa	14,5	Alta
9	Cárst./Met.	40	Insignificante	0,2	Baixa	6,1	Baixa
10	Crist.	97	Insignificante	0,2	Baixa	23,0	Extrema
11	Cárst./Met.	88	Insignificante	0,2	Baixa	15,1	Alta
12	Cárst.	90	Insignificante	0,1	Baixa	7,0	Baixa
13	Cárst.	90	Insignificante	0,1	Baixa	8,0	Média
14	Cárst.	84	Insignificante	0,1	Baixa	11,3	Média
15	Cárst.	86	Insignificante	0,1	Baixa	7,5	Baixa
16	Cárst.	84	Insignificante	0,1	Baixa	8,1	Média
17	Crist.	116	Muito Baixo	0,2	Baixa	19,9	Extrema
18	Cárst.	55	Insignificante	0,1	Baixa	6,9	Baixa
19	Meta.	73	Insignificante	0,2	Baixa	15,6	Alta
20	Cárst.	144	Alto	0,2	Baixa	15,7	Alta
21	Sedim.	123	Baixo	0,4	Média	20,1	Extrema
22	Sedim.	143	Moderado	0,6	Alta	16,5	Alta
23	Sedim.	123	Baixo	0,3	Média	16,9	Alta

e DRASTIC é intermediária, menor que a dos índices DRASTIC e MAIA e um pouco maior que a dos índices GOD e MAIA (Tabela 9).

CONCLUSÕES

A partir das relações entre os fatores de proteção das variáveis e a vulnerabilidade, é possível avaliar o impacto que cada uma delas imprimiu no cálculo e constatar que os dados medidos nos poços e nos aquíferos estão coerentes com os índices obtidos na modelagem. A avaliação dos resultados nos conduz a percepção de que o novo método é eficaz na determinação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos (Tabela 10).

Os índices de vulnerabilidade Baixos observados nos poços 1, 5, 9, 12, 15 e 18 é o resultado da integração dos efeitos de proteção determinados por valores elevados para as variáveis com relação inversa com a vulnerabilidade, tais como: PA entre 23,06 e 114,6 m; ES entre 33,7 e 47 m; DT entre 0,62 e 2,56 % e valores baixos para as variáveis que apresentam uma relação direta com a vulnerabilidade, tais como a CE com valores entre 0,02 e 2,56 m³/h/m e RE entre 680 e 750 mm.

Os índices de vulnerabilidade Extremos determinados nos poços 10, 17 e 21 é o resultado do somatório dos fatores de proteção representados pelos

Tabela 9 - Matriz de correlação entre os índices de vulnerabilidade.

	MAIA	DRASTIC	GOD
MAIA	1	0,3196	0,0749
DRASTIC		1	0,2625
GOD			1

valores baixos das variáveis com relação inversa com a vulnerabilidade, tais como: PA entre 0,99 e 50,18 m; ES entre 2,3 e 60 m; DT entre 0,23 e 3,04 % e valores elevados para as variáveis com relação direta com a vulnerabilidade, tais como a CE entre 0,02 e 4,39 m³/h/m e RE entre 650 e 1800 mm.

As demais qualificações resultaram na integração dos valores das variáveis que compõe a equação, na qual as variáveis com relação inversa, relacionadas a atenuação e acessibilidade de contaminantes, se somam aos efeitos de proteção das variáveis com relação direta, relacionadas a acessibilidade de contaminantes ao aquífero.

O novo método apresenta características de um Modelo Análogo e Paramétrico que utiliza duas expressões matemática constituídas por parâmetros indicadores de vulnerabilidade, cuja aplicação do espectro de valores medidos no aquífero e suas interações, produzem um índice de vulnerabilidade absoluto. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem de eliminar a subjetividade inerente aos processos de avaliação.

Tabela 10 - Correlação entre as variáveis utilizadas com o índice MAIA.

Nº	IDENT.	PA	ES	DT	CE	RE	I. MAIA	Qualificação
1	2-349/84	97	38	1,79	0,078	680	5,7	Baixa
2	1-3235/85	4,32	6	1,03	0,077	650	10,6	Média
3	1-2263/84	0,99	5,5	1,51	0,01	650	17,5	Alta
4	1-5371	100,64	2	0,82	0,143	680	15,4	Alta
5	2-457	89,76	46	2,56	0,349	680	5,4	Baixa
6	1-1207	41,55	4	1,46	1,45	730	10,8	Média
7	2-1866	108,75	5	1,07	0,029	680	9,4	Média
8	1-1426/82	113,25	74	0,14	0,0095	730	14,5	Alta
9	1-2190/84	23,06	38	1,25	0,118	650	6,1	Baixa
10	1-2078/84	0,99	2	3,04	0,0071	650	23,0	Extrema
11	2-2308	25,9	2	2,63	0,038	750	15,1	Alta
12	1-2467/84	84,4	33,7	0,66	0,067	680	7,0	Baixa
13	1-5404/93	79,75	48	0,51	0,0083	750	8,0	Média
14	2-555/84	123,65	23	0,24	0,14	750	11,3	Média
15	1-955/80	114,6	47	0,62	0,02	750	7,5	Baixa
16	2-1318	128,7	51	0,45	0,11	730	8,1	Média
17	1-1266/81	0,99	3	2,67	0,02	650	19,9	Extrema
18	1-232/81	63,4	41	0,87	0,11	730	6,9	Baixa
19	2-2129	40,46	30	2,68	46,31	800	15,6	Alta
20	2-2055	4,54	22	0,54	18,66	1000	15,7	Alta
21	1.318/82	50,18	60	0,23	4,39	1800	20,1	Extrema
22	1.010/80	19,9	40	0,76	4,01	1800	16,5	Alta
23	1.338/82	54,78	28	0,56	2,98	1800	16,9	Alta

Podemos observar que todas as variáveis aplicadas no método proposto, são medidas diretamente nos aquíferos e apresentam uma relação matemática com a vulnerabilidade. São características intrínsecas dos aquíferos que se relacionam de forma direta ou inversa com a vulnerabilidade.

A matriz de correlação entre as variáveis utilizadas no novo método indica que não está ocorrendo qualquer superposição nos efeitos de proteção dos aquíferos na equação. Cada variável medida representa a atuação de somente uma única propriedade do aquífero relacionada com a vulnerabilidade.

A equação descreve a vulnerabilidade a partir do somatório dos efeitos de proteção das parcelas representadas pelas variáveis: Profundidade da Água (PA), Espessura do Solo (ES) e Declividade Topográfica (DT), inversamente relacionadas a atenuação e acessibilidade de contaminantes, adicionado aos efeitos na vulnerabilidade produzidos pelas parcelas Capacidade Específica (CE), Recarga Potencial (RE), Densidade de Fraturas (DF) e Transmissividade, (TA), diretamente relacionadas a acessibilidade de contaminantes ao aquífero.

Ao contrário dos métodos tradicionais, evitou-se a utilização de fatores de ponderação que aumentam o grau de subjetividade da avaliação da vulnerabilidade, colocando todas as medidas das características intrínsecas do aquífero em uma mesma escala, determinada a partir do conceito de frações equivalentes. As escalas equivalentes são proporcionais as escalas das variáveis medidas e com a mesma amplitude de variação.

O modelo utilizado para descrever a vulnerabilidade do aquífero está ancorado em uma formulação matemática elementar, no qual cada termo da equação apresenta uma relação direta ou inversa com a vulnerabilidade. É notável a simplicidade e consistência do novo método, no qual os termos utilizadas são obtidos a partir medidas diretas de atributos do aquífero relacionados a vulnerabilidade. Decorrente desse fato, o resultado de sua aplicação permite a comparação da vulnerabilidade de toda a diversidade de aquíferos de uma mesma região ou de regiões distintas.

A comparação dos resultados determinados neste trabalho com os obtidos por outros métodos ainda é considerado insipiente e o método deverá ser testado em outra área onde ocorrem somente aquíferos fissurais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agüero Valverde, J. & MesalleS, R. P. 2002. Analisis de vulnerabilidad a la contaminacion de una seccion de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.

Disponível em <http://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad_acuíferoscr.htm>.

Albinet, M. & Margat, J. 1970. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau soter-raine. Bull BRGM 2me Series 3(4): 13-22.

Aller, L.; Bennet, T. Lehr, J. H.; Hackett, G.; Petty, R. J. & Thornhill, J. 1987. DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting . U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA, Report 600/2-87-035; 1-455, 1987.

Auge, M. Vulnerabilidad de acuíferos: conceptos y metodos. 2004. Buenos Aires: Universidade de Buenos Aires. Disponível em: <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html>>.

Doerfliger, N. & Zwahlem, F. 1997. EPIK; a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: Int. Symp. on Karst Waters and Environ. Impacts. 1997, Antalya, Turkey. Proceedings... Rotterdam: [s.n.], 1997. p. 117-123.

Foster, S. S. D.; Hirata, R. C. A. & Rocha, G. A. 1988. Riscos de poluição de água subterrânea: uma proposta de avaliação regional. São Paulo: CEPIS/OPS.

Foster, S. S. D.; Hirata, R.; Gomes D.; D' Elia M. & Paris, M. 2002. Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Ed. brasileira: SERVIMAR, SãoPaulo, 114p.

Hirata, R. C. A. 2001. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: I Seminario - Taller: Protección de Acuíferos frente a la contaminación, Toluca, Mexico. 2001. Disponível em < <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Hirata.html>>.

NRC (National Research Council). 1993. Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty. Washington, D.C.: National Academy Press.

Monkhouse, R. A. 1983. Vulnerability of aquifers and groundwater quality in the United Kingdom. Institute of Geological Sciences Report. Nottingham, Reino Unido.

Paralta, E.; Frances, A. & Ribeiro, L. 2005. Avaliação da vulnerabilidade do sistema Aquífero dos Gabros de Beja e análise crítica das redes de monitorização no contexto da Directiva Quadro da Água. Publicações do 7º Simpósio de Hidráulica e recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SISLUBA). Évora, 30 de Maio a 2 de Junho de 2005.

Maia et al.: Novo método para avaliação de aquíferos

Vrba, J. & Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Hannover: International Association of Hydrogeologists. 131 p.

Submetido: Abril/2010

Revisado: Janeiro/2011

Aceito: Fevereiro/2011