

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE NATURAL, ANTRÓPICA E TOTAL DE AQUÍFERO - VAN

METHOD OF EVALUATION OF NATURAL, ANTHROPIC AND TOTAL AQUIFER VULNERABILITY - VAN

Alteredo Oliveira CUTRIM^{1, 2}; Joana Angélica Guimarães da LUZ¹

¹Universidade Federal do Sul da Bahia – Reitoria. Rua Itabuna, s/n, Rodovia Ilhéus – Vitória da Conquista, km 39, BR 415, Ferradas, Itabuna-BA. E-mail: jasguimaraes7@gmail.com.

²Universidade Federal de Mato Grosso – FAGEO - Faculdade de Geociências. Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367 – Bairro Boa Esperança. Cuiabá, MT. E-mail: alteredoc@hotmail.com

Introdução
Materiais e métodos
 Desenvolvimento do Método VAN
 Determinação das classes de vulnerabilidade
Conclusão e considerações
Agradecimentos
Referências

RESUMO - O método VAN foi desenvolvido com o objetivo de avaliar as vulnerabilidades natural, antrópica e total de aquífero, usando parâmetros hidrogeológicos e de uso do subsolo. A estimativa individual dessas vulnerabilidades permite avaliar a acessibilidade natural, induzida e total de aquífero, permitindo uma avaliação mais realista de impacto de obras subterrâneas sobre a vulnerabilidade de aquíferos. Desse modo, o método VAN será uma ferramenta importante para produzir dados e informações para subsidiar a elaboração de plano de gestão de aquífero, considerando o impacto de obras subterrâneas.

Palavras-chave: Método VAN. Vulnerabilidade natural. Vulnerabilidade antrópica. Vulnerabilidade total de aquífero.

ABSTRACT - The VAN method was developed with the objective of evaluating the natural, anthropic and total aquifer vulnerabilities, using hydrogeological and subsoil parameters. The individual estimation of these vulnerabilities allows to evaluate the natural, induced and total aquifer accessibility, allowing a more realistic assessment of the impact of underground works on the vulnerability of aquifers. In this way, the VAN method will be an important tool to produce data and information to support the elaboration of aquifer management plan, considering the impact of underground construction.

Keywords: VAN method. Natural vulnerability. Anthropic vulnerability. Total aquifer vulnerability.

INTRODUÇÃO

A grande importância do conhecimento da vulnerabilidade e risco à contaminação de águas subterrâneas para a elaboração de plano de gestão tem tornado frequente o uso de métodos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos, entretanto esses métodos não levam em conta a vulnerabilidade gerada por atividades antrópicas específicas de subsolo, as quais são comuns no meio geológico.

Essa especificidade de vulnerabilidade de aquífero contribuiu para o desenvolvimento deste método que usa parâmetros naturais do aquífero e a profundidade de penetração de obras nas

zonas não saturada e saturada do aquífero. No desenvolvimento deste método foram consideradas alguns princípios dos métodos Drastic (Aller et al., 1987) e God (Foster et al., 2002) que foram aplicados no aquífero urbano de Rondonópolis (Cutrim & Campos, 2010a,b).

O método VAN foi desenvolvido para avaliar vulnerabilidade de aquífero considerando o significado estrito de vulnerabilidade (acessibilidade). A avaliação de risco ou perigo à contaminação envolve a integração da vulnerabilidade com a existência de fontes de contaminação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolvimento do Método VAN

O método VAN considera que o contaminante pode ser incorporado à zona saturada do aquífero através da infiltração de águas pluviométricas e de usos das zonas não saturada e saturada e o contaminante tem a mobilidade da água.

Desse modo o VAN foi desenvolvido para

avaliar a vulnerabilidade antrópica (V_a), natural (V_n) e total (VAN) de aquífero, considerando os parâmetros hidrogeológicos: modo de ocorrência do aquífero, profundidade da água no aquífero, condutividade hidráulica da zona não saturada e topografia da área e o parâmetro antrópico, profundidade de usos das zonas não saturada e

saturada do aquífero (Figura 1).

Essas vulnerabilidades são estimadas através do desenvolvimento sequencial dos tópicos do fluxograma, os quais permitem determinar as vulnerabilidades (V_a) e (V_n) em função somente da soma ponderada dos seus respectivos parâmetros na mesma posição, assim como a vulnerabilidade VAN gerada pela soma de (V_a) e (V_n).

Portanto, este método produz três mapas de

vulnerabilidade, um para (V_a), um para (V_n) e um para (VAN).

O mapa VAN pode ser elaborado pela superposição dos mapas V_a e V_n , usando software específico, ou pela digitalização dos mapas V_a e V_n , adotando uma malha de digitalização que contemple a diversidade dessas vulnerabilidades. Estes mapas permitem fazer uma avaliação mais realista da contribuição dos parâmetros naturais e antrópicos sobre a vulnerabilidade de aquífero.

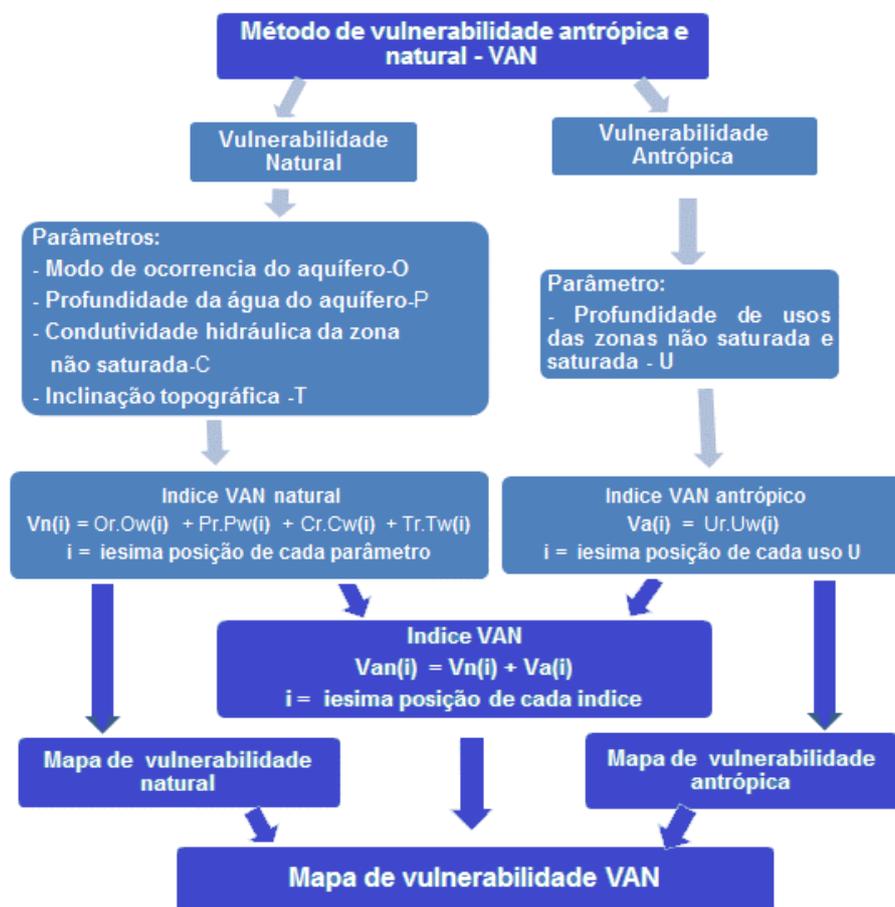


Figura 1 – Fluxograma esquemático do desenvolvimento do método VAN.

Para quantificar os tipos de vulnerabilidade VAN, todos os seus parâmetros receberam um fator de ponderação w , atribuídos conforme a sua importância para a vulnerabilidade de aquífero (Figura 2A). Cada parâmetro foi dividido em classes (r) de contribuição ao índice VAN, sendo que a classe de maior contribuição recebe valor 10 e a menor 1, e estes números são multiplicados pelo fator de ponderação w de cada parâmetro (Figura 2B a 2F).

A diferença de contribuição de cada parâmetro natural ao índice VAN é melhor entendida através das suas características que mostram a sua influência à acessibilidade à zona saturada do aquífero (Figura 3).

O modo de ocorrência (O) de aquífero (livre

exposto, livre coberto e confinado) tem relação direta com a sua vulnerabilidade, pois cada um deles indica o seu nível de contato com a superfície e com os usos na subsuperfície do terreno (Figura 2B). A profundidade do nível estático (P) corresponde à profundidade que o contaminante terá de percorrer para alcançar a água do aquífero. Em aquífero livre P é igual ao seu nível freático e em aquífero confinado P é igual à profundidade do seu topo (Figura 2C).

A condutividade hidráulica (C) expressa a capacidade de percolação de fluxo e depende das propriedades do meio e do fluxo. Portanto, C da zona não saturada corresponde à média de C dos tipos de solos e/ou rochas situadas acima da zona saturada do aquífero. Este parâmetro condiciona o

tempo de deslocamento dos contaminantes e os vários processos de atenuação (Figura 2D).

A inclinação porcentual da topografia (T) tem grande influência na velocidade do escoamento superficial, no gradiente hidráulico e no direcionamento de fluxos preferenciais, principalmente nos aquíferos livres (Figura 2E).

Os tipos de usos das zonas não saturada e saturada (U), principalmente aqueles que penetram esta zona, tornam mais fácil o acesso de fluido à zona saturada do aquífero, portanto, cria uma vulnerabilidade antrópica.

O nível desta vulnerabilidade está relacionado com o modo de ocorrência do aquífero e com a distância do uso à zona saturada do aquífero. Em aquíferos confinados somente os usos que penetram o topo do aquífero originam esta

vulnerabilidade. Nos aquíferos livres esta vulnerabilidade existe em toda a espessura da zona não saturada, ela aumenta com a aproximação e penetração na zona saturada do aquífero (Figura 2F).

Ressalta-se a importância do mapeamento e georreferenciamento desses usos, considerando que alguns deles têm caráter espacial pontual, como poço tubular, cacimba, fossas sépticas e negras e depósitos de combustíveis, e outros de dimensões alongadas e estreitas, como rede de esgoto, valas pluviais urbanas, canais para desvios de rios, tuneis, etc, e outras com maiores dimensões, como cavas para lixão, aterro sanitário, lagoas de tratamento de esgoto, represas, etc. Todas essas dimensões são muito pequenas quando comparadas às dimensões do aquífero.

Ponderação dos Parâmetros do VAN			Tipo de ocorrência do aquífero		
Parâmetro	Descrição	Fator de ponderação- W	Ocorrência	Classe – Or	Or.Ow
O	Ow	5	Livre (exposto)	10	50
P	Pw	5	Livre coberto por solo arenoso	8	40
C	Cw	4	Livre coberto por solo areno argiloso	6	30
T	Tw	2	Livre coberto por solo argilo arenoso	4	20
U	Uw	5	Livre coberto por solo argiloso	2	10
			Confinado	(B) 1	5

Profundidade da água do aquífero			Condutividade hidráulica da zona não saturada		
Categoria (m)	Classe – Pr	Pr.Pw	Categoria(m/dia)	Classe – Cr	Cr.Cw
0 a 1,5	10	50	0,030 a 4,000	1	4
1,5 a 4,6	9	45	4,000 a 10,00	2	8
4,6 a 9,1	7	35	10,000 a 20,000	4	16
9,1 a 15,2	5	25	20,000 a 40,000	6	24
15,2 a 22,9	3	15	40,000 a 80,000	8	32
22,9 a 30,5	2	10	> 80,000	10	40
>30,5	1	5			

Inclinação topográfica percentual			Profundidade e usos das zonas não saturada e saturada			
Categoria %	Classe – Tr	Tr.Tw	Razão U/P	Ocorrência do aquífero	Classe-Ur	Ur.Uw
0 a 1	10	20	≥ 100%	Confinado e livre	20	100
1 a 5	8	16	99,9 a 70%	Livre	15	75
5 a 10	5	10	70 a 40%	Livre	10	50
10 a 20	3	6	40 a 10%	Livre	5	25
>20	1	2	10 a 5%	Livre	2	10
			5 a 0%	Livre	(F) 1	5

Figura 2 – Ponderação e classificação dos parâmetros do método VAN.

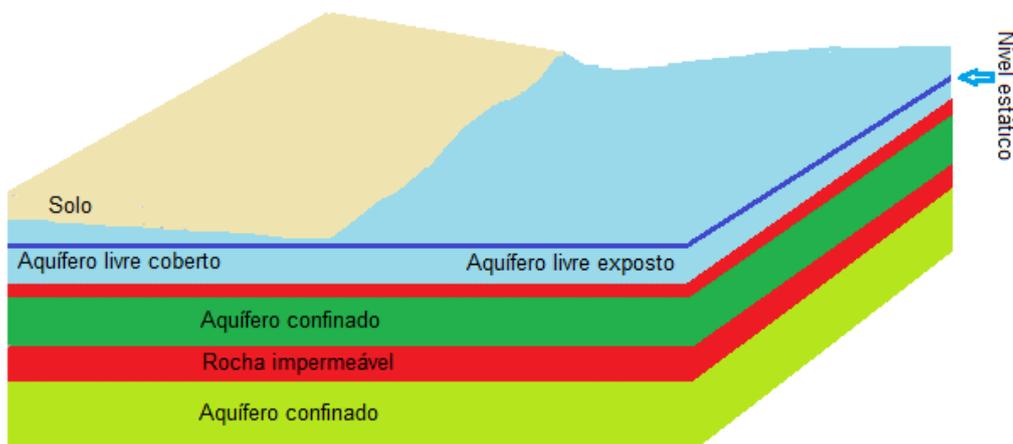


Figura 3 – Modelo hidrogeológico conceitual contendo aquíferos livre exposto, livre coberto e confinados.

Tabela 1 – Modo de geração de índices de vulnerabilidade Va georreferenciados para elaboração de mapa (Figuras 1 e 2F).

E-W	N-S	Ur	Wr	Va
662413	8682301	20	5	100
662748	8683027	20	5	100
666324	8682469	20	5	100
666491	8682776	20	5	100
662748	8683027	20	5	100
665922	8693548	15	5	75
665873	8693251	15	5	75
665823	8692855	15	5	75
665724	8692508	15	5	75
663743	8692409	15	5	75
663693	8692607	15	5	75
662028	8689644	10	5	50
662122	8689625	10	5	50
662159	8689270	10	5	50
663280	8691250	15	5	75
664662	8690764	15	5	75
663896	8690465	15	5	75
662028	8689737	15	5	75
663093	8689438	15	5	75
661676	8683136	15	5	75
661775	8683235	15	5	75
661808	8682938	15	5	75
661941	8683004	15	5	75
661875	8682772	15	5	75

Tabela 2 – Modo de geração de índices de vulnerabilidade Vn georreferenciados para elaboração de mapa (Figuras 1, 2B, 2E)

E-W	N-S	Or.Ow	Pr.Pw	Kr.Kw	Tr.Tw	Vn
663773	8689150	20	35	4	20	79
662405	8687675	20	35	4	20	79
663203	8690724	20	35	4	20	79
663889	8689526	20	35	4	20	79
661335	8690894	20	35	4	20	79
661874	8685889	20	35	4	20	79
662160	8690632	20	35	4	20	79
662893	8686722	20	35	4	20	79
662613	8686801	20	35	4	20	79
661183	8674234	20	35	4	20	79
662880	8681352	20	35	4	20	79
661301	8691121	20	35	4	20	79
666305	8682657	20	35	4	20	79
661773	8679486	20	25	4	20	69
664881	8693920	20	35	4	20	79
665513	8691532	20	35	4	20	79
661148	8673908	20	25	4	20	69
659629	8689311	20	35	4	20	79
665236	8688114	20	35	4	20	79
660535	8683056	20	35	4	20	79
658992	8683524	20	25	4	20	69
660369	8683286	20	45	4	20	89
680310	8688299	20	45	4	20	89
665481	8688046	20	45	4	20	89

Tabela 3 - Modo de geração de índices de vulnerabilidade VAN gerados pela digitalização dos mapas Va e Vn (Figura 1)

E-W	N-S	Vn	Va	Va(i)+Vn(i)=VAN(i)
659970	8696047	77,7573	0	77,7573
659970	8695009	77,6729	0	77,6729
60037	8694004	77,7253	0	77,7253
660037	8692999	77,8956	0	77,8956
660037	8691994	78,1991	0	78,1991
660037	8691022	78,5439	30	108,544
660037	8690051	78,8585	30	108,858
660003	8689012	78,8281	30	108,828
660003	8688543	78,4858	30	108,486
660037	8687974	78,1235	30	108,124
660003	8687002	77,6911	30	107,691
660003	8685964	77,8348	30	107,835
660003	8684959	78,8878	30	108,888
660037	8683988	81,6979	30	111,698
660104	8683016	81,2816	30	111,282
660037	8681978	74,4329	30	104,433
659970	8681107	72,0987	30	102,099
660003	8680068	70,4103	30	100,41
660070	8679030	69,9262	30	99,9262
660037	8677991	70,739	0	70,739
660003	8676919	72,1833	0	72,1833
660037	8676082	73,3712	0	73,3712
660048	8674991	73,9649	0	73,9649
660048	8673986	71,6016	0	71,6016

Determinação das classes de vulnerabilidade

Os valores do índice VAN são distribuídos em intervalos ordenados para formar as classes de vulnerabilidade (Figura 4). Na determinação dessas classes é considerada a influência de cada parâmetro, de modo que elas gerem um cenário de vulnerabilidade com maior coerência hidrogeológica e uso da zona não saturada, para tornar mais visível a acessibilidade ao aquífero. Essas classes devem ser apresentadas em mapa para mostrar a distribuição espacial e viabilizar o seu uso nas diversas áreas em plano de gestão de águas subterrâneas.

A vulnerabilidade extrema significa que o aquífero é vulnerável a todas as águas poluídas, com rápido impacto em todos os cenários de poluição. A vulnerabilidade muito alta indica que o aquífero é vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles com extrema capacidade de absorção. A vulnerabilidade alta indica que o aquífero é vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles fortemente absorvidos. A vulnerabilidade moderada significa que o aquífero é vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando lançados ou

despejados continuamente. A vulnerabilidade baixa indica que o aquífero é vulnerável somente a poluentes conservativos em longo prazo, quando continua e largamente despejados ou lançados. A vulnerabilidade desprezível significa que o aquífero é confinado por camadas com insignificante fluxo vertical.

Ainda que o método de geração do mapa de vulnerabilidade envolva simplificações geológicas, hidrogeológicas e de uso da zona não saturada, parâmetros esses que, na maioria dos casos, são bastante complexos, a sua aplicação em locais específicos podem resolver problemas locais e específicos e assim, a avaliação da vulnerabilidade do aquífero é possível.

A avaliação do risco à contaminação do aquífero é feita através do mapa de risco, gerado pela superposição do mapa das fontes de contaminação ao mapa de vulnerabilidade, ambos de mesma escala. O mapa de fontes de contaminação é constituído através das fontes de contaminação da área, classificadas em termos de potenciais de contaminação, usando método específico para tal fim.

Classes de vulnerabilidade VAN	
Valor do índice VAN	Classes de vulnerabilidade VAN
<70	Desprezível
70 a 90	Baixa
90 a 110	Moderada
110 a 130	Alta
130 a 150	Muito alta
>150	Extrema

Figura 4 - Classes de vulnerabilidade do método VAN.

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

O método VAN possibilita avaliar as vulnerabilidades natural, antrópica e total de aquífero, o que não era possível com os métodos de vulnerabilidade existentes. O conhecimento individual dessas vulnerabilidades é importante para avaliar o impacto de estrutura subterrânea de

qualquer obra, sobre a vulnerabilidade de aquíferos. Desse modo, o método VAN será uma ferramenta importante para produzir dados e informações sobre o impacto de obras na vulnerabilidade de aquífero, a partir do projeto da obra e de dados hidrogeológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia. Chamada Pública MCT/Finep CT Hidro 01/2010)) pela concessão do apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R.; HACKETT, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. USEPA, EPA/600/2-87/035, EUA, 1987.
- CUTRIM, A.O. & CAMPOS, J.E.G. Aplicação dos métodos Drastic e Posh para a determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 2, p. 127-142, 2010a.
- CUTRIM, A.O. & CAMPOS, J.E.G. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos God e Posh. **Revista Geociências**, v. 29, n. 3, p. 401-411, 2010b.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies**. World Bank, GWMATE. Washington, 101 p., 2002.

*Submetido em 3 de maio de 2019
Aceito para publicação em 7 de janeiro de 2021*