

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFEROS CÁRSTICOS: SUBSÍDIOS PARA UMA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Santos, R. A.¹; Cruz, M. J. M.²; Nascimento, S. A. M.³

¹ Aluno do curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia – IGEO/UFBA. rodrigo.santos@ufba.br

² Geólogo, Dr. em Petrologia. Professor Associado do IGEO/UFBA. E-mail: jeronimo@ufba.br

³ Geólogo, Dr. Geologia. Professor Associado do IGEO/UFBA. sergionm@ufba.br

Nota do editor – Artigo didático

RESUMO. O presente trabalho tem como objetivo discutir as representações cartográficas da vulnerabilidade como instrumento importante para a gestão dos recursos hídricos em ambientes cársticos. Para tanto, serão abordados alguns conceitos de vulnerabilidade natural de aquíferos e os meios de análises necessários para definir seus parâmetros. O conhecimento da dinâmica hidrogeológica em aquíferos cársticos é de fundamental importância para se analisar o grau de sensibilidade desse sistema, bem como identificar as fontes potenciais de poluição. Dessa forma, o desenvolvimento de técnicas de mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas tem-se mostrado como um caminho seguro para o gerenciamento desses recursos hídricos.

Palavras-chave: Aquíferos cársticos; vulnerabilidade; contaminação; gestão.

ABSTRACT. Evaluation of the natural vulnerability of karstic aquifer: subsidies for a management of groundwater resources. The present work aims to argue the cartographic representations of the vulnerability as important instrument for the management of karst groundwater environments. Some concepts of water-bearing natural vulnerability and the ways of analyses will be boarded necessary to define its parameters. The knowledge of the hydrogeological dynamics in karst water-bearing has a basic importance to analyze the degree of sensitivity of this system, as well as identifying the potential sources of pollution. The development of techniques of mapping of the natural vulnerability of underground waters has revealed as a safe way for the management of these resources.

Key words: Karst water-bearing; vulnerability; contamination; management.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida no planeta, sendo utilizada também como insumo básico para a imensa maioria das atividades econômicas. É encontrada na natureza em quantidades que variam aleatoriamente no tempo e no espaço, sendo também extremamente vulnerável à deterioração qualitativa.

As atividades humanas e os elementos característicos do meio ambiente, especialmente do solo, fazem com que as águas subterrâneas sejam cada vez mais propensas à poluição. Nesse sentido, o estudo da vulnerabilidade em aquíferos é de fundamental importância, pois através deste é possível conhecer os fatores que comprometem a qualidade da água e os riscos pelos quais ela pode ser poluída.

A análise da vulnerabilidade serve ainda como parâmetro para ações gerenciais que visem a gestão racional dos mananciais subterrâneos, bem como para a gestão, por parte dos órgãos públicos, com relação à implementação de políticas de controle e preservação.

As regiões cársticas normalmente são áreas de grande interesse econômico e hidrogeológico porque, na maioria das vezes, dispõem de bons

solos agricultáveis, valiosas reservas de água no subsolo e possuem grande importância ambiental. O conhecimento das peculiaridades hidrológicas dos carstes se apresenta em crescente ascensão, não só pelo interesse como reservatório subterrâneo, mas também pela sua fragilidade a uma série de problemas ambientais.

Nessa perspectiva, esse trabalho se justifica pela necessidade de compreender a importância do estudo da vulnerabilidade na identificação da qualidade das águas subterrâneas e do potencial de poluição, especialmente em ambientes cársticos. Sendo assim, para garantir a qualidade e quantidade da água destes reservatórios, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que permitam um diagnóstico e análise deste ambiente, com o objetivo principal de contribuir para uma gestão racional dos recursos hídricos subterrâneos.

VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFEROS

O conceito de vulnerabilidade tem sido usado para expressar características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga poluente

antrópica imposta (Hirata, 2001). Contudo, ao citar uma carga contaminante antrópica, o autor refere-se somente a uma carga contaminante de origem artificial.

Para Russo (2009), o termo “vulnerabilidade natural de um aquífero” pode ser definido como o primeiro passo para a avaliação da susceptibilidade do aquífero a vir a ser contaminado. Dependente de diversos fatores ambientais, a estimativa da avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea é caracterizada pelo autor como uma predição do processo que está ocorrendo abaixo da superfície da Terra. Esta depende de diversos fatores como geologia, geomorfologia, espessura da camada não saturada, recarga natural, escoamento superficial, exploração da água, dentre outros.

Reunindo alguns conceitos, Tripet *et al.* (2000) define a vulnerabilidade natural como sendo a intrínseca propriedade de aquífero (características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e hidrogeológicas), que determina a sensibilidade à poluição das águas subterrâneas.

RISCO DE POLUIÇÃO

O conceito de vulnerabilidade ainda não foi definido completamente e sem ambigüidades no contexto da poluição das águas subterrâneas. Frequentemente, o termo “vulnerabilidade à poluição” é usado com um sentido composto que talvez pudesse melhor ser descrito como “risco de poluição”.

Para Ferreira (1998) a vulnerabilidade é distinta do risco de poluição. Este depende não só da vulnerabilidade, mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo.

De acordo com esse autor é possível existir um aquífero com alto índice de vulnerabilidade, mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente, ou de haver um risco de poluição exponencial apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo.

Portanto, é importante precisar a diferença entre vulnerabilidade e risco de poluição. O risco é causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, muito estáveis, mas também pela existência de atividades poluentes, fator dinâmico, que em princípio pode ser controlado.

Nesse sentido, a vulnerabilidade atrelada ao risco de poluição é a associação da vulnerabilidade natural à carga potencial contaminante, que acarrete na concentração de poluentes na água subterrânea, com valores analíticos acima dos padrões de potabilidade definidos em lei (IG *et al.*, 1997 *apud* Russo, 2009).

É importante lembrar que pelo fato de existir um aquífero com alto índice de vulnerabilidade,

não significa que este já esteja contaminado, mas sim que esta área é de risco. Sua contaminação ou não vai depender das atividades antrópicas que estão sobre ele localizadas, ou seja, este pode ser altamente vulnerável, mas não correr nenhum risco de ser contaminado por estar localizado numa área distante de fontes poluidoras.

Sendo assim, a determinação do risco de poluição das águas subterrâneas deve servir, principalmente, para identificar quais os aquíferos, ou parte deles são mais vulneráveis (frágeis) à poluição imposta pelas atividades desenvolvidas pelo homem. Além disso, deve estabelecer quais dessas atividades são responsáveis pelos maiores riscos de aporte de poluentes numa determinada área.

AQUÍFEROS CÁRSTICOS

Por definição, um aquífero é todo corpo rochoso ou formação capaz de armazenar e transmitir água. Esta capacidade é própria de cada tipo litológico, ou seja, a capacidade de armazenar (porosidade) e transmitir água (permeabilidade); é o resultado da interação de fatores geológicos com o corpo rochoso, desde a sua formação. Dessa maneira, cada tipo litológico traz, ao se formar, sua própria característica hidrogeológica, e por sua vez, reagem de maneira própria aos fatores atuantes (Guerra, 1986).

O aquífero cárstico é basicamente o resultado da ação solubilizadora da água sobre as rochas carbonatadas. No processo de carstificação existe um mecanismo básico que é a dissolução pela água de uma rocha carbonática (solúvel) fissurada. São peculiares aos carstes as entradas de água de superfície em condutos localizados (sumidouros). Este modo localizado das infiltrações deve-se à grande variabilidade espacial da permeabilidade e da capacidade de infiltração, que é muito maior nos meios cársticos que em outros meios permeáveis (Silva, 1998).

Uma das características principais de áreas cársticas é a presença de drenagem de sentido predominantemente vertical e subterrânea, seguindo fendas, condutos e cavernas, resultando na escassez de águas superficiais. A carstificação, representada pela dissolução das rochas carbonáticas, não se faz de forma homogênea. Inúmeros fatores intervêm, tais como: variação na composição química da rocha; diferença no grau de fraturamento; posição estratigráfica relativa. A ação conjugada desses fatores faz com que determinadas áreas sejam mais susceptíveis a dissolução, enquanto outras não, oferecendo uma maior resistência à dissolução da rocha (Bigarella *et al.*, 1994).

Os estudos hidrogeológicos dos carstes recentemente vem apresentando uma crescente importância, não só pelo interesse como

reservatório de água subterrânea, mas também por uma série de influências geoambientais. Em muitas circunstâncias o entendimento do sistema hidráulico desse tipo de aquífero torna-se muito difícil em vista de suas características genéticas. O principal resultados destas características é o de que o armazenamento e a circulação das águas subterrâneas são condicionados à dissolução aleatória e ao fraturamento ou outras descontinuidades das rochas carbonáticas.

Embora existam inúmeras pesquisas e trabalhos desenvolvidos em diversas regiões cársticas do mundo, os seus resultados não podem ser extrapolados ou aplicados para todos os carstes conhecidos, uma vez que as suas características geomorfológicas e hidrogeológicas variam de um lugar a outro (Figura 1). Assim em cada caso estudado, devem ser adaptadas todas as técnicas de vulnerabilidade às condições locais de geologia, hidrogeologia e hidrologia.

VULNERABILIDADE NATURAL EM AQUÍFEROS CÁRSTICOS

A qualidade da água nos terrenos cársticos depende basicamente da composição química da rocha, dos fatores climatológicos e estruturais, além das atividades humanas, já que os cársticos são considerados de alta vulnerabilidade.

A sensibilidade (ou “vulnerabilidade”) de uma fonte de água subterrânea para os impactos humanos depende da capacidade de purificação

do aquífero e do tempo de percolação das águas subterrâneas. Portanto, devido ao comportamento hidrológico heterogêneo de fluxo subterrâneo em aquíferos cársticos, a água ao atingir uma fonte de poluição representa a mistura de diferentes componentes ao aquífero (Tripet *et al.*, 2000).

Foster (1993) lembra que as águas subterrâneas, por se encontrarem total ou parcialmente confinadas, são geralmente mais protegidas da poluição que as águas superficiais, devido à presença de solo atuando como meio filtrante.

Sobre esta questão Fritszons *et al.*, (2001) ressalta que a zona insaturada do solo constitui a primeira linha de defesa a ser monitorada. Assim, os aspectos pedológicos precisam ser levados em consideração, numa avaliação de vulnerabilidade.

No caso de aquíferos cársticos, a zona insaturada é muito mais efetiva no processo de atenuação de poluentes que a zona saturada, devido aos processos microbiológicos e físico-químicos. Isto ocorre por que o sistema de fissuras das rochas calcárias facilitam a rápida penetração dos poluentes no aquífero (Fritszons *et al.*, 2001).

Para Frantz (2005) a alta vulnerabilidade natural dos cársticos se atribui a velocidade de circulação da água subterrânea relativamente alta e sua escassa interação contaminante-rocha, o que provoca uma elevada capacidade de propagação neste meio.

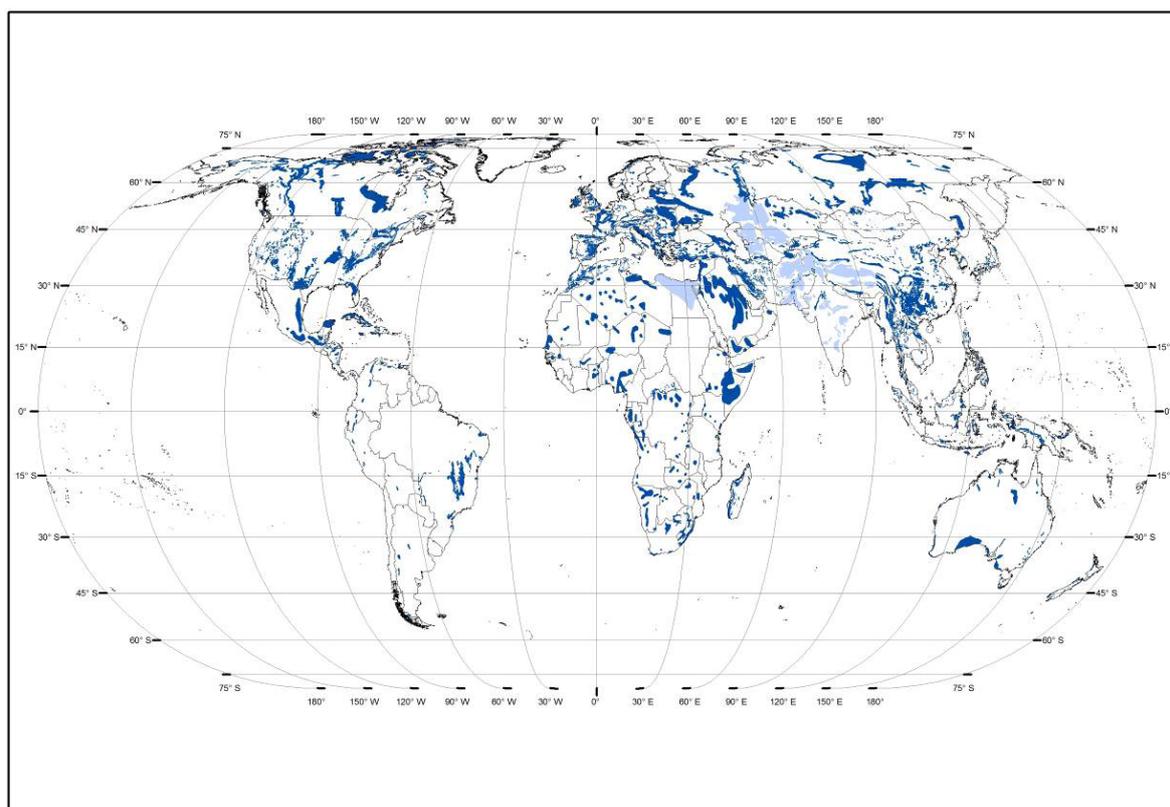


Figura 1. Distribuição espacial das rochas carbonáticas de acordo com Williams e Fong (2008). As áreas em azul escuro correspondem a regiões carbonáticas relativamente contínuas.

CONDIÇÕES DE INFILTRAÇÃO

Aquíferos cársticos são considerados especialmente vulneráveis a poluição devido a sua estrutura original. Essa estrutura é altamente heterogênea (redes de condutos de alta permeabilidade). A recarga ocorre tanto pela dispersão quanto pela concentração da entrada de água. Isto implica que uma certa quantidade de água de recarga infiltra-se diretamente na rede de condutos, de modo que a atenuação de contaminantes não ocorra de forma eficaz como em aquíferos porosos (Doerfliger e Zwahlen, 1999).

As diferenças de litologia, estrutura, clima e cobertura sobre a superfície da Terra agem de forma conjunta no processo de desenvolvimento do sistema cárstico. Tais fatores possibilitam analisar os vários tipos de carste que ocorrem em diferentes áreas calcárias (Bigarella *et al.*, 1994).

A infiltração de água no solo é um fenômeno físico que consiste na entrada de água pela sua superfície, podendo ser influenciada pelas suas propriedades intrínsecas e pelo modo como a água atinge a superfície.

Para Andrade (2004) no processo de infiltração é fácil perceber uma estreita relação entre a umidade do solo, a distância a partir da superfície inundada e o tempo. Esse fenômeno é de grande importância prática, pois a rapidez da infiltração determina, freqüentemente, o volume da água que escorrerá sobre a superfície por ocasião das chuvas, exercendo influência no processo de erosão e recarga dos aquíferos.

Ainda segundo esta autora, nos sistemas cársticos as condições de permeabilidade e armazenamento estão intimamente relacionadas aos mecanismos de dissolução das rochas carbonáticas, os quais são influenciados pelos aspectos climáticos, hidrogeoquímicos e posicionamento das fissuras e fraturas, criando condições que regulam a hidrodinâmica do escoamento e armazenamento de água subterrânea.

De acordo com Lino (1988) *apud* Bigarella *et al.*, (1994), a carstificação representada pela dissolução dos maciços calcários não se faz de forma homogênea. Inúmeros fatores intervêm, tais como:

- variação na composição química da rocha;
- diferença no grau de fraturamento;
- posição estratigráfica relativa;

A ação conjugada desses fatores faz com que determinadas áreas sejam mais susceptíveis a dissolução, enquanto que outras não, oferecendo maior resistência a dissolução da rocha.

Os aquíferos cársticos, por sua vez, são considerados vitais para o abastecimento de água em regiões onde os sistemas fluviais de superfície estão quase ausentes. O conhecimento da distribuição e modo de ocorrência de feições

cársticas é necessário ao planejamento da ocupação humana e exploração dos bens naturais destas áreas. Isto porque existe uma diversidade de problemas ambientais relacionados, por exemplo, com grande susceptibilidade do aquífero à poluição.

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE

A determinação da vulnerabilidade em aquíferos está relacionada à capacidade de atenuação da zona vadosa, através da avaliação e integração de diferentes atributos litológicos e hidrogeológicos, tendo sido desenvolvidos diversos métodos analíticos (Quadro 1).

O desenvolvimento dos métodos de avaliação da vulnerabilidade acompanha a necessidade crescente de exploração dos recursos hídricos subterrâneos, analisando os diferentes tipos de aquíferos.

Dentre as principais técnicas para avaliação da vulnerabilidade destacam-se os métodos de índices, os quais baseiam-se na análise de alguns parâmetros do aquífero, classificando cada característica de acordo com faixas de valores (índices) e distribuídos espacialmente. Os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade (Tavares *et al.*, 2009). Podem-se citar os seguintes métodos de índices: DRASTIC (Aller *et al.*, 1987); GOD (Foster 1987); SINTACS (Civitia, 1994) e EPIK (Doerfliger e Zwahlen, 1997).

DRASTIC. Foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987), com objetivo de avaliar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. Este método é uma abordagem popular nos estudos da vulnerabilidade das águas subterrâneas, pois é relativamente barato e simples, além disso, usa dados que estão geralmente disponíveis ou pode ser estimado para a produção de mapas de vulnerabilidade (Hammouril; El-Naqa, 2008).

O índice DRASTIC corresponde à soma ponderada de sete valores relacionados aos seguintes indicadores hidrogeológicos: D – profundidade da superfície freática; R – recarga do aquífero; A – tipo de aquífero; S – tipo de solo; T – topografia ou declividade do terreno; I – Influência na zona não saturada; C – condutividade hidráulica do aquífero. A cada parâmetro é atribuído um índice (entre 1 e 10), que depois é multiplicado por um peso (entre 1 e 5). O índice final é obtido somando-se os produtos de cada parâmetro pelo respectivo peso. O índice final varia entre 23 (mínima) e 230 (máxima). Quanto mais elevado o índice maior a vulnerabilidade (Quadro 2).

Quadro 1. Principais métodos para determinação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos (modificado de Hirata, 2001).

Método	Avaliação	Fatores	Referência
$\Delta HT'$	Vulnerabilidade em aquífero semiconfinado	Potencial hidráulico e transmissividade vertical	AUGE (2001)
IS	Vulnerabilidade geral	Profundidade da água, recarga, litologia, topografia e ocupação do solo	FRANCÉS <i>et al.</i> (2001) ; PARALTA <i>et al.</i> (2001)
EPPNA	Vulnerabilidade geral	Características litológicas e hidrogeológicas	PLANO NACIONAL DA ÁGUA (1998)
EPIK	Vulnerabilidade geral	Carstificação superficial, cobertura de proteção, infiltração e rede cárstica	DOERFLIGER; ZWAHLEN (1997)
EKv	Vulnerabilidade geral	Espessura da zona subsaturada e permeabilidade da zona saturada	AUGE (1995)
AVI	Vulnerabilidade geral	Espessura da camada acima do aquífero e cond. Hidráulica	VAN STEMPVOORT (1993)
SANEAMENTO <i>IN SITU</i>	Vulnerabilidade e saneamento <i>in situ</i>	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, prof. E qualidade da água	FERREIRA; HIRATA (1993)
SEM NOME	Vulnerabilidade geral	Característica litológica, permeabilidade e profundidade da água	ADAMS; FOSTER (1992)
SINTACS	Vulnerabilidade geral	Prof. da água, tipo de solo, infiltração, aquífero, cam. Subsaturada, condutividade, topografia	CIVITA <i>et al.</i> (1990)
GOD	Vulnerabilidade geral	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, prof. da água	FOSTER; HIRATA (1988)
SEM NOME	Vulnerabilidade geral	Condutividade, prof. água, umidade do solo e recarga real	MARCOLONGO; PRETTO (1987)
POTENTIAL WASTE SITES (PWDS)	Disposição de resíduos sólidos	Vulnerabilidade, confinamento, prox. da fonte, tipo e quant. do cont., veloc. zona saturada, percolação	BGS (sem data)
GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE	Potencial de lixiviação de nitrato	Tipo de solo, carac. hidráulicas, e litologia do aquífero	CARTER <i>et al.</i> (1987)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	Prof. água, recarga, aquífero, solo, topografia, impacto, cond. hidráulica	ALLER <i>et al.</i> (1985)
LANDFILL SITE RANKING	Aterros sanitários	Distância aterro/poço, gradiente, permeabilidade e capac. de atenuação	LE GRAND (1983)
SITE RANKING METHODOLOGY	Disposição de resíduos sólidos	Receptor, população, uso da água, prof. da água, degradação, caminhos, contam., pluv., perm. do solo, carac. do resíduo, manejo e espect. oper. e construt.	KULFS <i>et al.</i> (1980)
WASTE-SOIL INTERACTION MATRIX	Disposição de resíduos sólidos e líquidos	Efeitos na saúde, caract. e comport. do produto, capac. de atenuação do solo, hidrografia	PHILIPS <i>et al.</i> (1977)
POLUIÇÃO DOS LENÇÓIS AQUIFEROS	Vulnerabilidade geral	Geologia (litologia e estrutura)	TALTASSE <i>et al.</i> (1972)
SITE RANKING SYSTEM	Disposição de produtos químicos	Solo, carac. hidráulicas, sorção e tamponam. químico, hidrodinâmica, ar, população	HARGERTY <i>et al.</i> (1973)
SURFACE IMPOUNDMENT ASSESSMENT	Disposição de águas servidas	Zona não saturada importância do rec, qualidade da água e periculosidade do material	LE GRAND (1964)

Quadro 2. Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
180 – 230	Muito alta
150 – 179	Alta
120 – 149	Intermediária
23 – 119	Baixa

Trata-se de um método muito difundido, sendo um dos primeiros a ser utilizado para se qualificar a vulnerabilidade.

Contudo, apesar deste método empregar uma maior quantidade de variáveis (7), este fato pode se tornar um inconveniente, quando não se dispõe dos valores de algumas delas. Além disso, a crítica ao DRASTIC se dá, principalmente, com

relação à subjetividade dos parâmetros R e C, ambos relacionados com o processo de recarga do aquífero (Auge, 2004).

GOD. Este método proposto por Foster (1987) foi amplamente testado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 e, graças à sua simplicidade conceitual e de aplicação, tornou-se um método bastante difundido.

O índice GOD baseia-se nos seguintes fatores: G – tipo de aquífero; O – classe de aquífero em termos de grau de confinamento e litologia; D – profundidade do nível da água subterrânea. O índice de vulnerabilidade é obtido a partir do produto entre esses três fatores. Foster e Hirata (1998) subdividiram as classes de vulnerabilidade em cinco categorias, sendo que sua definição prática e respectivos índices de

vulnerabilidade associados estão representados no Quadro 3.

Quadro 3. Classes de vulnerabilidade do índice GOD (Foster; Hirata, 1998).

Classes de vulnerabilidade	Definição prática	Índice de vulnerabilidade
Extrema	Vulnerável a muitos poluentes, com rápido impacto em muitos cenários de contaminação	0,7 – 1,0
Alta	Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles muito pouco móveis e pouco persistentes	0,5 – 0,7
Moderada	Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançados	0,3 – 0,5
Baixa	Somente vulnerável a contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançado	0,1 – 0,3
Desprezível	Camadas confinadas com fluxo vertical descendente não significativo	0 – 0,1

De acordo com Russo (2009) é possível assumir que o modelo GOD estima a vulnerabilidade a partir do estudo da zona vadosa (espessura do solo, camada confinante e litologia). Aplicando constantes entre 0 e 1 para cada variável, determina-se o índice de vulnerabilidade, partindo da vulnerabilidade nula à extrema, com os índices intermediários da baixa, média e alta vulnerabilidade.

Sua maior vantagem é a simplicidade de operação devido ao pequeno número de variáveis requeridas para sua aplicação. Contudo, tal fato pode resultar em definições menos claras que outros métodos como o DRASTIC, que utiliza sete variáveis. Ocorre que, quando se reduz o número de variáveis consideradas se simplifica a avaliação, porém, se perde em definição (Auge, 2004).

SINTACS. É uma derivação do método DRASTIC, desenvolvido por Civita *et al.* (1994) para se adequar às diversificadas características hidrogeológicas existentes na Itália, com a finalidade de desenvolver um mapa com maiores detalhes (Auge, 1994). Utiliza os seguintes parâmetros: S – profundidade da água; I – infiltração; N – seção subsaturada; T – tipo de cobertura de solo; A – características hidrogeológicas do aquífero; C – condutividade hidráulica; S – declividade topográfica.

O SINTACS atribui a cada parâmetro um índice de 1 a 10. O resultado final é um cálculo do índice de vulnerabilidade que resulta no somatório dos sete parâmetros, cada um multiplicado por um peso respectivo. A relação entre a classe de vulnerabilidade e o índice SINTACS é apresentada no Quadro 4.

Por ser uma derivação do DRASTIC, o SINTACS apresenta as mesmas vantagens e desvantagens que aquele. As variáveis utilizadas são praticamente as mesmas, exceto a recarga (R) que foi substituída pela infiltração (I), o que não os distingue, uma vez que ambas avaliam o aporte de água no aquífero.

Quadro 4. Classes de vulnerabilidade do índice SINTACS (Civita *et al.*, 1994).

Índice SINTACS	Vulnerabilidade
I > 210	Muito alta
186 < I < 210	Alta
140 < I < 186	Moderadamente alta
105 < I < 140	Média
80 < I < 105	Baixa
I < 80	Muito baixa

EPIK. É um parâmetro de ponderação e método de avaliação desenvolvido por Doerfliger; Zwahlen (1997) especialmente para aquíferos cársticos. Utiliza os seguintes parâmetros: E – epikarst (zona carstificada próxima a superfície); P – cobertura protetora; I – condições de infiltração (pontual ou difusa); K – desenvolvimento da rede cárstica.

Considerando os valores relativos e os fatores de ponderação, o método sugere que o índice de vulnerabilidade de um aquífero cárstico pode variar entre extremos de 9 (mais vulnerável) e 34 (menos vulnerável) (Quadro 5).

Quadro 5. Classes de vulnerabilidade do índice EPIK (Doerfliger; Zwahlen, 1997).

Classe de vulnerabilidade	Valor atribuído
Muito alta	(< 9)
Alta	(9 – 19)
Média	(20 – 25)
Baixa	(26 – 34)
Muito baixa	(> 34)

O método EPIK apresenta o atributo favorável de ser o único desenvolvido especificamente para aquíferos cársticos. É recomendado para áreas cársticas com feições de dissolução, no entanto, exige uma avaliação detalhada desses recursos, que muitas vezes é difícil, caro e demorado porque envolve trabalhos de campo, geofísicos, estudos hidrogeológicos e análise de caráter hidráulico.

Naturalmente, os principais objetivos ao se estimar a vulnerabilidade de aquíferos é a preservação dos recursos hídricos subterrâneos e a definição de perímetros para a proteção das áreas utilizadas para abastecimento público.

QUE MÉTODO ESCOLHER?

Para Auge (2004) a escolha do método para avaliar a vulnerabilidade da água subterrânea em uma região depende de vários fatores, dentre os quais se destacam os que seguem.

- Conhecimento e difusão da metodologia: existem regiões, países ou continentes em que alguns métodos são mais difundidos que outros, a exemplo do DRASTIC (método mais utilizado na América do Norte), GOD (muito utilizado nos países latinoamericanos e também na Espanha e Inglaterra), SINTACS (utilizado pela maioria dos países europeus) e EPIK (utilizado na região da costa do Mediterrâneo).

- Informações disponíveis: para uma condizente avaliação da vulnerabilidade faz-se necessário a obtenção de informações preliminares existentes para se concluir uma representação cartográfica adequada. Para tanto, é necessário um Sistema de Informações Geográficas (SIG) capaz de atender aos parâmetros estabelecidos pelo método escolhido.

- Escala de avaliação: de acordo com este autor o grau de detalhe da avaliação depende do objetivo proposto, sendo que para trabalhos semiregionais (normalmente são utilizadas escalas de 1:100.000 a 1:500.000) e regionais (1:500.000 ou menores), para tanto, mostram-se práticos os métodos que requerem menos valores paramétricos, como o GOD e o Ekv. Para os estudos de semidetelhes (utiliza-se 1:25.000 a 1:100.000) e de detalhe (maiores de 1:25.000), para estes tem-se melhores definições métodos com maiores quantidades de parâmetros, como o DRASTIC e SINTACS.

Acerca dessa questão, Hirata e Fernandes (1998) ressalta que os métodos de cartografia de vulnerabilidade são mais eficientes para lidar com grandes áreas e para analisar um elevado número de atividades potencialmente poluidoras. Geralmente estes mapas são produzidos nas escalas menores que 1:100.000.

O método EPIK, por ser o único desenvolvido especialmente para aquíferos cársticos, pode ser aplicado independentemente de uma dimensão escalar, considerando dessa forma, a unidade hidrogeológica cárstica.

Validade dos resultados: para avaliar a representatividade dos mapas de vulnerabilidade, Para tanto, Auge (2004) sugere que sejam aplicadas diferentes metodologias nos sítios afetados por cargas contaminantes, a fim de verificar qual delas se apresentará como a mais adequada, para ser empregada com o objetivo

principal de prevenir a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.

A CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Segundo Foster e Hirata (1993) a condição essencial para o desenvolvimento de estratégias, visando a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, é o estabelecimento de áreas ou atividades com maior risco de degradação dos aquíferos, a fim de priorizar a aplicação dos recursos técnicos e financeiros em locais de maior interesse sócio-econômico e ambiental.

Para isso, uma avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à poluição constitui-se um dos aspectos mais importantes para subsidiar o planejamento do uso do solo e para gerenciar a instalação e o funcionamento de empreendimentos potencialmente impactantes aos recursos hídricos subterrâneos. Este tipo de avaliação é de grande importância para subsidiar a gestão ambiental de territórios diante das mais diversas atividades desenvolvidas pelo homem na natureza (Bós, 2007).

Por outro lado, de acordo com Hirata e Fernandes (1998) devido à grande heterogeneidade dos materiais aquíferos, os diferentes métodos têm-se mostrado ainda confusos quando se trata de avaliar a vulnerabilidade em áreas de geologia complexa, como em aquíferos cristalinos, multicamadas, cársticos e sistema com porosidade dupla. Essa complexidade tem feito os métodos existentes simplificarem e generalizar a hidrogeologia a grupos litológicos, muitas vezes sem o necessário detalhamento das discontinuidades presentes nestes grupos.

Dessa forma, é importante ressaltar, a partir das considerações de Hirata (2001), que a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas e a criação de mapas para determinar as áreas susceptíveis do aquífero à ação dos contaminantes é algo que inclui um número muito grande de variáveis e de dados, o que pode gerar limitações e possíveis erros de interpretação. Tais ressalvas formulam três princípios básicos aos estudos da vulnerabilidade de aquíferos:

- os aquíferos são todos vulneráveis em algum grau;
- a incerteza é inerente a todas as cartografias de vulnerabilidade;
- o risco que o óbvio possa ser obscurecido e o sutil indistinguível existe sempre;

Em suma, é inegável a existência de lacunas no entendimento da variação dos parâmetros hidráulicos nos meios complexos, dificuldade que somente pode ser superada através do conhecimento tridimensional das características

geológicas que regem o fluxo de água nestes aquíferos. Sendo assim, após estudos detalhados que forneçam tais informações, os métodos deverão incorporar os conceitos geológicos que melhor descrevam os fluxos preferenciais (Hirata e Fernandes, 1998).

Mesmo assim, como instrumento de proteção dos recursos hídricos subterrâneos, o mapeamento da vulnerabilidade natural serve como ferramenta que espacializa áreas com maior suscetibilidade a poluição, considerando o uso e ocupação da superfície do terreno onde se desenvolve as dinâmicas antropogênicas de transformação dos recursos naturais. A confiança em tais mapas estará assegurada, desde que fiquem claras ao usuário as limitações associadas ao método utilizado (Foster e Hirata, 1998).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, é evidente o fato de que os recursos hídricos subterrâneos apresentam-se como alternativa viável ao suprimento das necessidades de abastecimento das populações em diferentes setores. Contudo, para manter o atendimento a uma determinada demanda contínua, além de garantir a qualidade, torna-se necessário uma investigação detalhada que coloque em prática a gestão adequada dos recursos hídricos.

A análise da vulnerabilidade é um instrumento importante para o estudo do potencial de poluição das águas subterrâneas, que está relacionado tanto aos mecanismos e características hidrogeológicas naturais, quanto às atividades antrópicas poluentes.

Regiões cársticas em todo o mundo requerem gerenciamento específico, principalmente quanto se trata dos riscos de contaminação de seus mananciais subterrâneos. Apesar de naturalmente vulneráveis, a poluição das águas subterrâneas em áreas cársticas não é inevitável, e para uma melhor proteção desses recursos deve ser dada prioridade à prevenção.

Assim, o desenvolvimento de estudos e mapeamentos de vulnerabilidade natural das águas subterrâneas em ambientes cársticos tem-se mostrado como um caminho seguro para o gerenciamento desses reservatórios. Da mesma forma, a análise da vulnerabilidade dos aquíferos à poluição antrópica é, seguramente, uma das ferramentas mais adequadas para se encarar a preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

REFERÊNCIAS

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R. J. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings. Ada, USA: National Water Well Association, 1987.

ANDRADE, S. M. **Avaliação do impacto da agricultura intensiva irrigada na dinâmica de fluxo da água na zona não saturada de um aquífero cárstico, com aplicação da chuva simulada**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

AUGE, M. Vulnerabilidad de acuíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, n. 4, p. 85-103.

BIGARELLA, J. J.; DECKER, R. D.; SANTOS, G. F. dos. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994.

BÓS, S. M. **Importância do estudo da vulnerabilidade das águas subterrâneas**. Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 3, 2007. Disponível em <<http://www.amigosdanatureza.org.br>> Acesso em: 25 out. 2009.

CIVITTA, M. **La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica**. Bologna: Pitagora Editrice, 1994, 325p.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P. Y.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of desining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology**, v. 39, n. 2, 1999.

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: Günay, G.; Jonshon, A.I. (Ed). **International symposium and field seminar on karst waters and environmental impacts**. Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 117-123, 1997.

EL-NAQA, A.; HAMMOURI, N. GIS based hidrogeological vulnerability mapping of groundwater resources in Jarash area – Jordan. **Geofísica Internacional**, submetido (2008).

FERRARI, J. A. **Interpretação de feições cársticas na região de Itaquara-Bahia**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1990.

FERREIRA, J.P.C.L **Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal**. 1998. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/023.pdf>>, Acesso em: 12 out. 2009.

FOSTER, S. **Contaminação de las águas subterraneas**. Lima, Peru: Organización Mundial de la Salud, 1987.

FOSTER, S. **Poluição das águas subterrâneas: um documento executivo da situação da América**

Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável. São Paulo, Instituto Geológico, 1993, 54 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation: a methodology based on available data.** CEPIS/PAHO Technical Report Lima/Peru, 1998, 78p.

FOSTER, S., HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIAM.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial, 2006. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/.../GroundwaterQualityProtectionGuide_Portuguese.pdf> Acesso em: 02 nov. 2009.

FRANTZ, L. C. **Avaliação do índice de vulnerabilidade do aquífero Guarani no perímetro urbano da cidade de Sant'ana do Livramento – RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

FRISTZSONS, E.; RIZZI, N.; BITTENCOURT, A.V.L.; MANTOVANI, L. E. Estudo do impacto de contaminação por nitrogênio numa bacia hidrográfica cárstica. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 49, p. 39-52, 2001.

GUERRA, A. M. Processos de carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê – Bahia. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

HIRATA, R. Os recursos hídricos subterrâneos e as novas exigências ambientais: aspectos teóricos para a definição de proteção e controle. **Revista do Instituto Geológico**, v. 1, n. 12, p. 39-62, 1993.

HIRATA, R. **Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição**

de aquíferos. Seminário-Traller, 1. Protección de Acuíferos Frente a La Contaminacion: Metodologia. Toluca, México, jun. 2001.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. Contaminação das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F.A.C. MANUEL FILHO, J. (Org). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** CPRM, 1998.

OSÓRIO, Q. S. **Vulnerabilidade natural de aquíferos e potencial de poluição das águas subterrâneas.** Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RUSSO, A. S. **Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informações geográficas e geoestatística – UGRHI – PCJ.** Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009, 75p.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de; COSTA, C. T. F. da; SILVEIRA, J. G. P. da; ALMEIDA JR. F. J. B. de. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **REM**, v. 62, n. 2, p. 227-236, 2009.

TRIPET, J. P.; DOEFLIGER, N.; ZWAHLEN, F.; DELPORTE, C. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. **Acta carsologica**, v. 12, p. 163-171, 2000.

WILLIAMS, P.; FONG, Y.T. **World map of carbonate rock outcrops v 3.0.** New Zealand: SGGES/University of Auckland. Disponível em: <http://www.sges.auckland.ac.nz/sges_research/karst.shtm>. Acesso em: 20 out. 2008.