

Geoinformação e Sensoriamento Remoto em Geografia

# Cartografia da Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos: revisão conceitual

Vulnerability mapping to aquifer contamination: conceptual review

Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto Melo<sup>1</sup> ,  
Maria da Conceição Rabelo Gomes<sup>1</sup> , Luiz Rogério Bastos Leal<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Ondina, BA, Brasil

## RESUMO

O texto objetiva realizar discussão conceitual referente a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, realizando uma revisão bibliográfica, recordando fatos que corroboraram nesta linha de pesquisa. Nesta análise percebe-se uma evolução do pensamento científico, com uma convergência teórico-metodológico em focar os perigos e ameaças de contaminação, contextualizando-o à um modelo de gestão ambiental. Além disto, nota-se a inexistência de um consenso comum sobre quais aspectos são relevantes na avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquífero. Com isto, faz-se uma classificação geral de avaliação da vulnerabilidade, em específica e intrínseca, para em seguida agrupar os métodos de avaliação. Por fim, constata-se a existência de uma correlação entre escala, consistência da informação e quantidade de variáveis analisadas.

**Palavras-chave:** Aquífero; Avaliação da vulnerabilidade; Vulnerabilidade intrínseca; Vulnerabilidade específica

## ABSTRACT

The object of the text is starting a conceptual discussion regarding the vulnerability of contamination of aquifers, carrying out a literature review, since the first publications, remembering facts that corroborate this line of research. In this analysis it is recognized an evolution of scientific thought, with a theoretical and methodological convergence to focus on the hazards and contamination threats, contextualizing it to an environmental management model. In addition, there is the lack of a common consensus on what aspects are relevant in assessing the vulnerability to contamination of the aquifer. With this, it is done an overall rating of vulnerability assessment in specific courses, in the following section to group the assessment methods. Finally, it is noted the existence of a correlation between scale, information consistency and quantity variables analyzed.

**Keywords:** Groundwater; Vulnerability assessment; Intrinsic vulnerability; Specific vulnerability

## 1 INTRODUÇÃO

Questões relacionadas ao meio ambiente afligem toda a sociedade, tornando-se notícia cotidiana nos jornais de circulação nacional, principalmente quando o tema envolve a escassez hídrica.

Com isto, instituições governamentais, centros de pesquisa e a sociedade civil organizada têm dedicado maior atenção na investigação e proposições de medidas preventivas e regulatórias com o intuito de conservar e preservar estes recursos, de maneira ecologicamente correta e sustentável.

Nesta perspectiva, algumas linhas de pesquisa buscam analisar a intervenção antrópica no ambiente, utilizando procedimentos metodológicos para modelar o ambiente a fim de identificar áreas que apresentam maior fragilidade às intervenções antrópicas, com alterações e inter-relações espaciais e temporais. Uma destas linhas de pesquisa confere a noção de vulnerabilidade, que apresenta caráter preventivo no uso das áreas estudadas, determinando a capacidade de proteção natural do ambiente, de modo a compatibilizar e monitorar as ações antrópicas, ao invés de remediá-las.

Para estabelecer um procedimento metodológico para aferir sobre o meio ambiente, faz-se necessário construir, ou reconstruir o conhecimento e o olhar sobre as peculiaridades do meio ambiente, reconhecendo seus componentes e suas relações e inter-relações, para em seguida traçar uma estratégia de avaliação de sua vulnerabilidade.

O presente trabalho apresenta uma reflexão sobre os fatos que corroboraram para o desenvolvimento do estudo de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, abordando os conceitos metodológicos que o norteiam, o significado e evolução dos estudos sobre vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, mostrando os métodos mais utilizados, com a análise de alguns parâmetros que auxiliam o pesquisador na escolha de um método.

## 2 FATOS QUE CORROBORARAM PARA O DESENVOLVIMENTO DESTA METODOLOGIA

As primeiras décadas pós Segunda Guerra Mundial foram preconizadas por renovações, com efeito imediato sobre a forma de pensar e analisar as interações do homem com o meio ambiente. Enquanto a Europa era reconstruída, outros países como Brasil, México e China, demandavam alinhamento e crescimento no eixo político-econômico mundial. Para atingir este objetivo, os países promoveram a valorização das atividades primárias e exploração de recursos naturais, ensejando mudanças econômicas e sociais, com exploração desenfreada dos recursos naturais, revelando a fragilidade socioambiental.

Diante disto, eclodiu uma nova percepção sobre o “ambiente”, com reflexões aglutinadas sobre o nome de paradigma ‘ecológico’ (JØRGENSEN, 2012), introduzindo, gradativamente, novos princípios metodológicos relacionadas “as maneiras de se conceber a estruturação e funcionamento dos fenômenos da natureza e como a sociedade se relaciona com ele. Propõe-se com isso, o desenvolvimento da abordagem e método sistêmicos. Sua conceituação, apesar do fácil entendimento, se mostra de difícil aplicação, ao passo que se destaca, basicamente, por ser a relação entre o plano completo (o todo) e entre um conjunto de procedimentos que se relacionam e objetivam uma dada organização, ou até mesmo a organização das funções que se encontram em sequência e interdependentes de acordo com sua finalidade.

Embora o termo “sistema”, propriamente dito, não tivesse sido realçado, a história desse conceito evidencia importantes nomes: Gottfried Leibniz (1646-1716), que expunha a visão sistêmica sob a designação de Filosofia Natural; Cusa (1404-1461) e Hermann Hesse (1877-1922), que entendiam o funcionamento do mundo a partir de um jogo abstrato construído junto à visão sistêmica (BERTALANFFY, 1968; DRACK; APFALTER; POUVREAU, 2007; DRACK, 2009). A análise

sistêmica, portanto, nasce da ligação e inter-relação dos elementos e um objetivo comum, que é entender e explicar a totalidade.

Esta abordagem sistêmica permite conferir que o ambiente apresenta uma estabilidade (equilíbrio dinâmico), decorrente de constantes modificações, que são caracterizadas pela transferência de energia e matéria. Ross (1990) ressalva a atuação antagônica de duas forças ou fontes de energia – as forças endógenas (internas) e as forças exógenas (externas).

Com base nesta noção de estabilidade, Christofolletti (2002) relata dois aspectos importantes: o de resistência, que reporta a capacidade de uma unidade fisiográfica, por exemplo, em permanecer inabalada; e a resiliência referente a habilidade do sistema em retornar às suas condições originais após ser afetado.

O nível de resposta do ambiente perante as mudanças ocasionadas por estes fatores reporta a noção de sensibilidade. Por outro lado, a capacidade de reação ou disposição de suscetibilizar às mínimas ações, refere-se à suscetibilidade.

Neste sentido, a Geociência se apropria destes preceitos para investigar a fisiografia do relevo, com destaque para os trabalhos de Becker e Egler (1996), Beroutchachvili e Bertrand (1978), Beroutchachvili e Clopes (1977), Bertrand (1967), Chorley e Kennedy (1971), Crepani *et al.* (2001), Haase (1989), Lindeman (1942), Preobrazhensky; Aleksandrova; Kupriyanova (1988), Sotchava (1978), Tricart (1977), Troppmair (1983) e Verstappen e Van Zuidan (1975), que analisam as características dinâmicas e a evolução da paisagem, descrevendo os fatores condicionantes ou modeladores do ambiente. Ao analisar estes trabalhos, percebe-se a presença de alguns pontos em comum, como: a ideia de unidade e globalidade; homogeneidade e heterogeneidade; a paisagem é o reflexo da sinergia dos elementos fisiográficos que a compõem; há uma dinâmica témporo-espacial distinta entre os elementos fisiográficos.

Atrelada a estes estudos, surgiu uma linha de pesquisa relacionada a implantação de atividades socioeconômicas que avalia a probabilidade de ocorrência de um impacto (positivo ou negativo, social ou natural), com alterações e inter-relações

espaciais e temporais, denominada de vulnerabilidade (CHRISTOFOLETTI, 2002, DAUPHINE; PROVITOLLO, 2013; EGLER, 1996; ZWAHLEN, 2003).

### **3 O DESENVOLVIMENTO DOS ESTUDOS SOBRE VULNERABILIDADE A CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFERO**

Na hidrogeologia, esta linha de pesquisa pauta versa principalmente sobre a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, com destaque para as investigações pioneiras de Albinet (1963, 1970), Albinet e Margat (1971), LeGrand (1964), Margat e Albinet (1965), Margat; Monition; Ricour (1967; 1968), Margat (1968), Taltasse (1972), Vladimirskij (1960, apud VÍAS; ANDREO; PERLES, 2008), Vrana (1968), Vuillaume (1966), Walker (1969), Zanoni (1972) e Hirata *et al.* (1991). Estes trabalhos estabelecem os conceitos básicos da avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, considerando-o como uma ferramenta preventiva, que permite determinar, a priori, a capacidade de proteção natural dos aquíferos e distinguir quais áreas necessitam de medidas mitigatórias e/ou reducionistas ao perigo de contaminação diante da intervenção antrópica (ANDERSEN; GOSK, 1989). Para tanto, estes autores focam os perigos e ameaças de contaminação, contextualizando o meio ambiente.

Este tipo de pesquisa começou a ser bem vista pela comunidade científica, e em 1971 no simpósio internacional sobre aquíferos, realizada na cidade de Moscou (IAHS, 1975), promulgando os primeiros debates sobre esta temática.

Concomitante às evoluções científicas, eclodiu os sistemas automatizados e, a comunidade científica discutiram amplamente a possibilidade de se adaptar a estas “inovações”, com o objetivo de representar (ou modelar) aspectos específicos do mundo real, numa base geograficamente referenciada, a partir de informações advindas de diversas fontes. Este sistema foi denominado de Sistema de Informação Geográfica – SIG (MELO *et al.*, 2015).

Em pouco tempo o SIG se consolidou como ferramenta indispensável nos estudos hidrogeológicos, suprimindo as necessidades de gestão da informação geográfica e incorporando as inovações metodológicas e tecnológicas (MELO *et al.*, 2015).

Estas inovações auxiliaram na compreensão e distribuição da fisiografia do relevo. Com isto, na década de 1980, um grupo de pesquisadores coordenados por Linda Aller, propuseram um método para avaliar a vulnerabilidade intrínseca e específica à contaminação de aquífero, baseado na análise paramétrica-indexadores (ALLER *et al.*, 1985). Estes pesquisadores utilizaram sete parâmetros relacionados com os mecanismos que envolvem o transporte dos contaminantes, sendo eles: profundidade do aquífero (*Depth to groundwater*), recarga do aquífero (*net Recharge*), material da zona saturada (*Aquifer media*), pedologia (*Soil media*), declividade (*Topography*), material da zona não saturada (*Impact of the vadose zone media*) e condutividade hidráulica do aquífero (*Hydraulic Conductivity*). Cada parâmetro é atribuído um índice para expressar o grau de vulnerabilidade (entre 1 e 10), que depois é multiplicado por um peso relativo (entre 1 e 5). O índice final é obtido somando os produtos de cada índice pelo respectivo peso, variando de 23 a 226. Quanto mais elevado o índice maior a vulnerabilidade.

Em 1987 a Agência de Proteção Ambiental dos EUA adota este método no planejamento e gestão territorial (ALLER *et al.*, 1987), tornando-o conhecido, e aplicado, mundialmente. Esta concepção (paramétrica-indexador) ajudou a aprimorar o conhecimento sobre os elementos fisiográficos da paisagem, conduzindo ao desenvolvimento de outros métodos, onde os pesquisadores buscaram:

- Reduzir a quantidade de parâmetros, como GOD (FOSTER, 1987), AVI (STEMPVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1992), BÓS (BÓS, 2008), CALVUL (TROIANO; MARADE; SPURLOCK, 1999), EKV (AUGE, 1995), DART (DENNIS; DENNIS, 2012), DAT (ROSS, *et al.*, 2004), DRAIA (VAEZIHIR; TABARMAYEH, 2015), DRARCH (QINGHAI, *et al.*, 2007), DRAMIC (WANG, *et al.*, 2007), DRARCH (GUO; *et al.*, 2007), DRIST (CHENINI, ZGHIBI, KOUZANA, 2015), DRAV (ZHOU, *et al.*, 2010), FAVA (ARTHUR; *et al.*, 2007), HYDRUS 1D (LINDSTRÖM, 2005), IS (FRANCÉS; PARALTA; FERNANDES, 2001), IVI (NOBRE; *et al.* 2007),

MAIA (MAIA; CRUZ, 2013), PATHS (ORTEGA; MIRANDA, 2004), SGD (HÖLTING; *et al.*, 1995), SI (RIBEIRO, 2000);

- Modificar a análise de alguns parâmetros, como DIVERSITY (RAY; O'DELL, 1993), DRASIC-LU (KHAN; UMAR; LATEH, 2010), DRISTPI (JIMÉNEZ-MADRID, *et al.*, 2013), GALDIT (ÖZYURT; ERGIN, 2010) OREADIC (QIAN; *et al.*, 2012) e SINTACS (CIVITA; DE MAIO, 1997), bem como analisar a vulnerabilidade específica ou o risco potencial de contaminação, como a inclusão do mapa de uso e ocupação do solo (EVANS; MYERS, 1990; SECUNDA; COLLIN; MELLOUL, 1998; FRITCH, *et al.*, 2000; PANAGOPOULOS; ANTONAKOS; LAMBRAKIS, 2006; DICKERSON, 2007), características estruturais (RODRÍGUES, 2004; POLEMIO, 2005), propriedades dos contaminantes (RUPPERT, 2001; LI, *et al.*, 2017; LI; WU; QIAN, 2020) ou no tempo de retenção do contaminante (MAXE; JOHANSSON, 1998);

- Inserir novos parâmetros, como o DRASTICA (SINGH, *et al.*, 2015), DRASTICM (MENDONZA; BARMEN, 2006), DRASTI-FM (DENNY; ALLEN; JOURNEAY, 2007), DRASTIC-LU (ALAM, *et al.*, 2012),

- Adequação para aplicação em aquíferos específicos, como o método EPIK (DÖRFLIGER; ZWAHLEN, 1996) para aplicação em aquíferos cársticos, e o SWI (LOBO-FERREIRA; CABRAL, 1991) e o GALDIT (ÖZYURT; ERGIN, 2010) para serem utilizados em aquíferos que possuem interface água doce/salgada.

Semelhante ao DRASTIC, o método EPIK influenciou o desenvolvimento dos métodos para a aplicação em ambiente cárstico, como o COP (VÍAS; *et al.*, 2006), COP-K (ANDREO; RAVBAR; VÍAS, 2009), DSWAP (BLODGETT, 1993), IRISH (DALY; DREW, 1998), KarstALEA (FILIPPONI; *et al.*, 2012), KARSTIC (DAVIS; LONG; WIREMAN, 2002), PaPRIKa (DÖRFLIGER; PLAGNES; KAVOURI, 2009), PI (GOLDSCHIEDER *et al.*, 2000), PRESK (KOUTSI; STOURNARAS, 2011), RESK (MALIK; SVASTA; REKS, 1999), RISK (DÖRFLIGER; 2005), RISKE (PETELET-GIRAUD; DÖRFLIGER; CROCHET, 2001), RISKE 2 (PLAGNES; DÖRFLIGER; PRANVILLE, 2008) e VUKA (LEYLAND; WITTHÜSER, 2010).

Diante das inúmeras investigações científicas analisadas sobre esta temática, constata-se a existência de duas vertentes:

- A) Desenvolvimento de novas metodologias;
- B) Aplicação destes métodos em áreas distintas.

### **3.1 Conceito teórico relacionado à vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos**

O conceito de vulnerabilidade é utilizado nas mais diversas áreas do conhecimento (da economia à geologia), portanto, sua definição “pode ser determinada em função de vários aspectos e seu significado se diversifica conforme o contexto onde se insere” (HIRATA; FERNANDES, 2008, p. 405).

De acordo com Foster (2002), inicialmente o término “vulnerabilidade” foi utilizado sem definição formal, fazendo referência à possibilidade de contaminação de aquífero. Consequentemente, alguns autores passaram a definir a expressão “vulnerabilidade à contaminação de aquíferos”, apresentando significados diferentes (quadro 1), ocasionando o surgimento de sinônimos, como por exemplo: sensibilidade à contaminação, contaminação potencial, poluição potencial, risco de poluição, fragilidade, risco total entre outras.

Todavia, Christofolletti (2002) relata que estudos de vulnerabilidade está relacionado a implantação de atividades socioeconômicas, utilizando a modelagem para avaliar a probabilidade de ocorrência de um impacto, positivo ou negativo, social ou natural, com alterações e inter-relações espaciais e temporais.

A contaminação corresponde a presença de alguma substância estranha no meio ambiente, provocando degradação da qualidade ambiental de um ou mais elementos, ou seja, poluindo-o (AYALA, 1988).



Quadro 1 – Algumas definições de vulnerabilidade à contaminação

<b>Autores</b>	<b>Definição</b>
Albinet e Margat (1971)	caracterização geológica e hidrogeológica para caracterizar a capacidade de infiltração e difusão de um contaminante no aquífero (tradução dos autores).
Bachmat e Collin (1987)	Sensibilidade da qualidade da aquífero frente a atividades antrópicas, sendo caracterizadas como impróprias para uso (tradução dos autores).
Daly e Warren (1998)	Análise das características geológicas e hidrogeológicas para determinar a sensibilidade dos aquíferos à contaminação por atividades antrópicas (tradução dos autores).
Foster (1987)	Caracterização intrínseca das camadas que separam a zona saturada do aquífero da superfície do terreno, o qual determina sua sensibilidade a ser adversamente afetada por uma quantidade de contaminantes (tradução dos autores).
Sotornikova e Vrba	habilidade do sistema em se proteger de modificações naturais ou humanas, que afetam suas características no tempo e espaço (tradução dos autores).
Zaporozec (1989)	avaliação das características pedológicas, litológicas, hidrogeológicas (tradução dos autores).

Fonte: Organizado pelos autores (março, 2021)

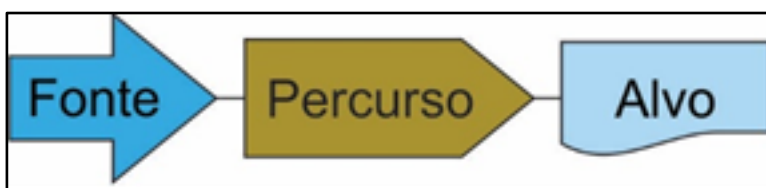
Outras conceituações embutidas nesta definição estão presentes no art. 3º, da Lei 6938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981), onde:

- 1) Degradação da qualidade ambiental, a alteração adversa das características do meio ambiente;
- 2) Poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:
  - a. Prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
  - b. Criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
  - c. Afetem desfavoravelmente a biota;
  - d. Afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;

- e. Lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

A Cooperação Europeia de Ciências e Tecnologia (*European Cooperation in Science and Technology* – COST EU) apresentou uma proposta metodológica simplificada para estudos da vulnerabilidade à contaminação de aquífero (COST EU, 2001), como ilustrado na figura 01.

Figura 1 - Modelo Simplificado de gestão ambiental



Fonte: Adaptada de COST EU (2001), organizada pelos autores (2021)

Onde: a **fonte** refere-se ao tipo de contaminante. A *Office of Technology Assessment* (OTA), modificada por Manoel Filho (2008), é possível distinguir as seguintes fontes de contaminação: **(a)** Fontes projetadas para recepção de substâncias; **(b)** Fontes projetadas para armazenar, tratar ou receber substâncias; **(c)** Fontes projetadas para reter substâncias durante transporte; **(d)** Fontes produtoras de substâncias em virtude de outras atividades; **(e)** Fontes que podem atuar como condutoras da água contaminada; **(f)** Fontes naturais cuja descarga é criada pela atividade humana.

O contaminante é carregado e lixiviado, percolando a zona não saturada até atingir o aquífero. Este **percurso** é formado por elementos fisiográficos (topografia, geologia, edafologia, biogeografia, climatologia), o qual condicionam a capacidade do mesmo em degradar e/ou impedir a chegada dos contaminantes ao aquífero, o alvo. Desta forma, este modelo pode ser considerado a premissa que fundamenta a avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos.

### 3.1.1 Avaliação da Vulnerabilidade à contaminação

Ao longo dos anos surgiram vários métodos de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos. Para De Maio *et al.* (2001) e Hirata e Fernandes (2008) isto ocorreu por conta da diversidade e complexidade ambiental, da disponibilidade de informações; da finalidade da avaliação e da fonte contaminante.

Diante desta diversidade de expressões, conceitos e a importância do tema para a proteção dos aquíferos, procura-se estabelecer uma base para avaliar a vulnerabilidade à contaminação, podendo ser dividida em três importantes etapas, a saber:

- 1) Identificação;
- 2) Como ela ocorre e seu desencadeamento;
- 3) Como intervir e mitigar.

Com relação ao primeiro item, Civita e De Maio (1997), Civita e De Regibus (1995) e Vrba e Zaporozec (1994) classificam os métodos de análise da vulnerabilidade à contaminação de aquífero em:

- **Intrínseca:** ou natural, expressa a vulnerabilidade do sistema aquífero por meio da caracterização de suas condicionantes (geológica, hidrogeologia, condições climáticas, biológicas), determinando o grau de fragilidade natural à contaminação;
- **Específica:** Analisa o impacto de um contaminante no ambiente, como os processos de absorção-adsorção, dissolução, precipitação e atenuação natural (Por exemplo o método LOS (SALEMI, *et al.* 2011), MERLIN (AVELINE, *et al.*, 2009).

A vulnerabilidade específica oferece uma visão concreta do problema, pois considera os processos físico-químicos que o contaminante pode causar ao ambiente. Por outro lado, a vulnerabilidade intrínseca mostra uma visão global do problema, considerando a susceptibilidade fisiográfica à contaminação, mas aconselhável para a modelagem e compreensão do ambiente (DALY; WARREN, 1998; GOGU; DASSARGUES, 2000).

O segundo item está associado a análise dos fatos, em função de ferramentas que auxiliam na sua identificação, como: séries estatísticas,

probabilidades, mapas entre outros. O grau de definição, de apreensão da vulnerabilidade, portanto, nesse caso, resultado da quantidade de dados disponíveis e no método a ser adotado de avaliação da vulnerabilidade. O que implica na necessidade de estabelecer um banco de dados para analisar as possíveis causas e efeitos.

De modo geral, diversos métodos executam a análise da fisiografia da paisagem, tendo como resultado a confecção de um único produto cartográfico, construído a partir de uma escala, ou índice, que expressa o grau de vulnerabilidade de cada unidade. Um método bastante difundido é o de Foster (1987), apresentando cinco classes de vulnerabilidade à contaminação, atribuindo valores de estabilidade ambiental de 0 à 1 (figura 2).

Figura 2 – Escala de vulnerabilidade à contaminação

Valores	Grau de vulnerabilidade
1.0	Vulnerável
0.9	
0.8	
0.7	Moderadamente Vulnerável
0.6	
0.5	Medianamente Vulnerável
0.4	
0.3	Moderadamente Estável
0.2	
0.1	Estável
0.0	

Fonte: Adaptada de Foster (1987), organizada pelos autores (2021)

O terceiro item alude a tomada de decisão com base no resultado da avaliação da vulnerabilidade, possibilitando distinguir áreas prioritária para a

proteção do aquíferos e/ou de medidas de mitigação e redução dos potenciais perigos de contaminação.

Para a representação cartográfica da vulnerabilidade, adota-se os critérios da comunicação cartográfica, a qual busca associar às cores quentes e seus matizes (vermelho, laranja e amarelo) situações de emergência. Assim, a cor vermelha representa maior vulnerabilidade, enquanto que a cor amarela representa a de menor vulnerabilidade.

Este modelo é aplicado individualmente em cada variável que compõem o estudo de vulnerabilidade. Nesta escala de vulnerabilidade, as unidades que apresentam maior estabilidade são representadas por valores próximos de 0; os valores próximos de 0.5 apresentam estabilidade intermediária; enquanto valores próximos de 1 possuem maior vulnerabilidade.

### 3.1.2 Métodos de avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos

Os procedimentos metodológicos e a definição das normas técnicas para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos estabelecem um conjunto de objetivos cartográficos exequíveis, centrados na avaliação de diversas variáveis. Porém, não existe um “estado da arte” que avalie e compatibiliza a complexidade destas integrações supracitadas, por conseguinte, foram desenvolvidos vários métodos.

O quadro 2 apresenta os principais métodos e suas respectivas variáveis utilizadas. Em seguida são apresentadas as equações dos métodos AVI (STEMPVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1992), EPIK (DÖRFLIGER; ZWAHLEN, 1996) e Marcolongo e Pretto (1987), com o intuito de propiciar um melhor entendimento das inferências geográficas aplicadas.

Quadro 2 – Métodos de vulnerabilidade e variáveis básicas

Continua...

Método	Variáveis															
	Precipitação	Topografia	Densidade da rede de drenagem	Edafologia				Conexão hidrogeológica	Infiltração	Características da zona não saturada	Características geológicas	Nível piezométrico	Características hidrogeológicas	Condutividade hidráulica	Características do contaminante	Uso e ocupação do solo
				Espessura, textura e mineralogia	Umidade	Permeabilidade	Características físico-químicas									
BRGM (1970), Albinet e Margat (1971)								•		•	•		•	•		
Vrana (1968), Olmer e Rezac (1974)										•			•			
Fenge (1976), Villumsen; Jacobsen; Soenderskov (1982)				•												
Josopait e Schwerdtfeger (1979)									•	•	•		•	•		
Haertlè (1983), Zampetti (1983), Fried (1987)										•	•					
Vrana (1984)	•			•						•			•			
Ponsatí e Asturias (1984), Fobe e Goossens (1990), Goossens e Van Damme (1987)								•		•	•		•	•		

Quadro 2 – Métodos de vulnerabilidade e variáveis básicas

Continuação...

Método	Variáveis															
	Precipitação	Topografia	Densidade da rede de drenagem	Edafologia				Conexão hidrogeológica	Infiltração	Características da zona não saturada	Características geológicas	Nível piezométrico	Características hidrogeológicas	Condutividade hidráulica	Características do contaminante	Uso e ocupação do solo
				Espessura, textura e mineralogia	Umidade	Permeabilidade	Características físico-químicas									
Vierhuff; Wagner; Aust (1981)								•				•	•	•		
Engelen (1985)								•		•	•		•			
Zaporozec (1985)				•	•	•			•	•			•			
AF/RF (RAO; HORNSBY; JESSUP, 1985)	•					•							•		•	
Breeuwsma <i>et al.</i> (1986)				•	•	•	•		•	•			•			
Sotornikova; Vrba (1987)						•					•	•		•		
Ostry <i>et al.</i> (1987)				•			•				•		•			
Carter; Palmer; Monkhouse (1987), Palmer (1988)				•		•	•						•			
Marcolongo; Pretto (1987)					•				•			•		•		
Marcolongo; Pretto (1988)					•				•	•	•					

Quadro 2 – Métodos de vulnerabilidade e variáveis básicas

Continuação...

Método	Variáveis															
	Precipitação	Topografia	Densidade da rede de drenagem	Edafologia				Conexão hidrogeológica	Infiltração	Características da zona não saturada	Características geológicas	Nível piezométrico	Características hidrogeológicas	Condutividade hidráulica	Características do contaminante	Uso e ocupação do solo
				Espessura, textura e mineralogia	Umidade	Permeabilidade	Características físico-químicas									
DRASTIC (ALLER, <i>et al.</i> , 1985)		•		•					•	•	•		•	•		
GOD (FOSTER, 1987)											•	•		•		
Trojan e Perry (1988)		•							•	•		•			•	
SEEPAGE (MOORE, 1988)		•		•	•	•	•				•					
Schmidt, Kessier (1989)				•				•		•	•		•			
Método-base GNDCI-CNR (CIVITA, 1987)								•		•	•		•	•		
SINTACS R2 (CIVITA, 1990)	•	•	•	•				•	•	•	•		•	•		
AVI (STEMPVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1992)											•			•		
ISIS (DE REGIBUS, 1994)				•			•		•	•		•	•			•



Quadro 2 – Métodos de vulnerabilidade e variáveis básicas

Conclusão

Método	Variáveis															
	Precipitação	Topografia	Densidade da rede de drenagem	Edafologia				Conexão hidrogeológica	Infiltração	Características da zona não saturada	Características geológicas	Nível piezométrico	Características hidrogeológicas	Condutividade hidráulica	Características do contaminante	Uso e ocupação do solo
				Espessura, textura e mineralogia	Umidade	Permeabilidade	Características físico-químicas									
SGD (HÖITING; <i>et al.</i> , 1995)									•		•			•		
Ekv (AUGE, 1995)							•				•					
EPIK (DÖRFLIGER; ZWAHLEN, 1996)		•	•				•	•	•				•		•	
CALVUL (TROIANO; MARADE; SPURLOCK, 1999)				•								•			•	
SINTACS R5 (CIVITA; DE MAIO, 2000)	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•		
VULK (JEANNIN; <i>et al.</i> , 2001)		•		•		•	•			•	•					
PATHS (ORTEGA; MIRANDA, 2004)	•	•									•	•	•			
KSI (BEYNEN; TOWNSEND, 2005)	•	•									•	•			•	

Quadro 2 – Métodos de vulnerabilidade e variáveis básicas

Conclusão

Método	Variáveis															
	Precipitação	Topografia	Densidade da rede de drenagem	Edafologia				Conexão hidrogeológica	Infiltração	Características da zona não saturada	Características geológicas	Nível piezométrico	Características hidrogeológicas	Condutividade hidráulica	Características do contaminante	Uso e ocupação do solo
				Espessura, textura e mineralogia	Umidade	Permeabilidade	Características físico-químicas									
KarstALEA (FILIPPONI; <i>et al.</i> , 2012)		•								•	•		•			
MAIA (MAIA; CRUZ, 2013)		•		•				•			•	•	•			
GATNEK (MORAIS, 2016)				•							•	•	•			

Fonte: Adaptada de CIVITA e De Maio (1997) e Vías (2003), organizado pelos autores (2021)

O método de Marcolongo e Pretto (1987) é uma proposta derivada da lei de Darcy onde o índice de vulnerabilidade é o resultado da seguinte fórmula:

$$\text{Índice de vulnerabilidade} = \frac{k * \left[ \frac{Q_i}{S_i} \right]}{MS}$$

Onde  $k$  é a condutividade hidráulica da zona não saturada;  $(S_i)$  reporta a profundidade da água subterrânea;  $MS$  é a umidade do solo; e  $Q_i$  é a infiltração por unidade de superfície.

O método AVI cujo nome é um acrônimo do inglês **A**quífer **V**ulnerability **I**ndex, analisa duas variáveis: espessura de cada camada da zona não saturada ( $d$ ) e

condutividade hidráulica das mesmas ( $k$ ). O índice é calculado mediante a seguinte expressão:

$$\text{Índice de vulnerabilidade} = \sum \frac{d_i}{k_i}$$

Onde  $i$  corresponde a cada uma das camadas que compõem a zona não saturada. O índice final se agrupa em cinco classes mediante intervalos irregulares que seguem uma progressão logarítmica.

O método EPIK foi desenvolvido especificamente para ser empregado em regiões cársticas, analisando 4 variáveis que o seu nome, sendo eles: epicárstico (*Epikarst*), cobertura de proteção (*Protective cover*), condições de infiltração (*Infiltration conditions*) e desenvolvimento da área cárstica (*Karst network development*). Para cada um dos fatores analisados, o autor estabelece valores para serem multiplicados as variáveis para a padronização do resultado.

O índice de vulnerabilidade é calculado mediante a seguinte expressão:

$$\text{Índice de vulnerabilidade} = 3E_i + 1P_j + 3I_k + 2K_l$$

Onde  $i$  corresponde a um determinado tipo de relevo epicárstico, que possui uma significância, o mesmo é adotado para o  $j$  (cobertura de proteção),  $k$  (condição de infiltração) e  $l$  (desenvolvimento da área cárstica).

Por conseguinte, De Maio *et al.* (2001) e Gogu e Dassargues (1998) classificam os métodos em:

- **Simulação:** com o intuito de predizer o transporte de contaminantes, tanto no tempo como no espaço, faz-se simulações dos processos físico-químicos do movimento da água com o contaminante;
- **Estatísticos:** Incluem a descrição estatística das concentrações de um contaminante e a análise de regressão para incorporar os efeitos de distintas variáveis fisiográficas. O objetivo é descrever uma relação entre a qualidade da água e as características ambientais, por meio de variáveis independentes.

- **Índices e classes (ou paramétrico):** baseia-se na combinação de diversas variáveis que representam a vulnerabilidade intrínseca, com um campo definido e dividido em intervalos hierárquicos. A cada intervalo se admite um valor qualitativo, com valores que refletem a susceptibilidade à contaminação;

- **Ambientes hidrogeológicos:** avaliam a vulnerabilidade de grandes ambientes hidrogeológicos de modo qualitativo, comparando-a com outras áreas e com o uso de técnicas de inferência geográfica. De acordo com Vías (2003) este método é apropriado para estudos de grandes áreas com alta variabilidade fisiográfica.

Em síntese, as duas primeiras classes são recomendadas para avaliação da vulnerabilidade específica, as demais para a avaliação da vulnerabilidade natural.

Para auxiliar na escolha de qual método utilizar na avaliação da vulnerabilidade à contaminação, De Maio *et al.* (2001) estabelecem uma correlação entre quantidade de variáveis, o denominador de escala e a consistência da informação.

O denominador de escala reporta ao nível de detalhes no mapa, apresentando um relacionamento inversamente proporcional a escala cartográfica. Ou seja, quanto maior o denominador, menor é a escala. A escolha da escala deve ser selecionada com base na compatibilização cartográfica entre níveis de detalhe, ou generalização, previstos para o levantamento da informação e o mapa final. Visando uma orientação geral, o IBGE (2007) faz uma classificação da escala, com base no nível de detalhamento, ilustrado no quadro 3.

Quadro 3 – Relação entre escala do mapa e o nível de detalhamento

Nível de detalhe	Escala
Ultra detalhado	1:500 – 1:5.000
Detalhado	1:7.000 – 1:20.000
Semi detalhado	1:25.000 – 1:50.000
Reconhecimento	1:50.000 – 1:750.000
Exploratório	1:750.000 – 1:2.500.000

Fonte: IBGE (2007)

A consistência da informação está relacionada a natureza das variáveis e as possíveis medições realizadas sobre elas. As variáveis são classificadas em qualitativa (permite nomear a informação, como por exemplo, aquífero cárstico, aquífero fissural), possibilitando descrever, comparar e interpretar as variáveis; e quantitativa (expressa em números mensuráveis, por exemplo, precipitação de 200 ml, 300 ml), a qual utiliza a quantificação nas modalidades de coleta de informações e no seu tratamento, mediante técnicas estatísticas, como percentual, média, variância, entre outros. Regularmente são utilizadas, quando se necessita garantir a precisão e exatidão dos resultados, evitando distorções de análise de interpretação. Desta forma, as variáveis quantitativas apresentam uma maior consistência na análise das informações do que as variáveis qualitativas.

Nos estudos ambientais, as variáveis quantitativas são informações pontuais e tendem a ser onerosas e demanda de tempo para a coleta das amostras quanto para o seu tratamento. Por conseguinte, estudos de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos realizados com variáveis quantitativas tende a ser realizado em pequenas áreas, provavelmente para fins específicos (por exemplo, implantação de uma indústria petroquímica, posto de gasolina, usina de tratamento de resíduos líquidos), e conseqüentemente, necessita de um denominador de escala pequeno (nível de detalhe ultra detalhado ou detalhado), podendo ser analisado uma quantidade média de variáveis, como ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Relação entre três parâmetros fundamentais empregados para a confecção de um mapa de vulnerabilidade



Fonte: Adaptada de DE MAIO *et al.* (2001), pelos autores (2021)

Por outro lado, quando se faz uma análise da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos por meio de variáveis qualitativas, como no uso da sobreposição de mapas temáticos (geológica, pedológica, morfológica) e variáveis quantitativas (profundidade do aquífero, condutividade hidráulica), emprega-se os métodos de índice e/ou classe. Como na maioria das vezes, os mapas temáticos estão disponíveis em escala de semidetalhe ou de reconhecimento.

No caso do método de ambientes hidrogeológicos, emprega-se apenas as variáveis qualitativas, tendo como resultado uma cartografia de vulnerabilidade com nível de detalhe de reconhecimento ou exploratório, como apontado por Auge (1995) e Hirata e Fernandes (2008).

#### 4 APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD

O método paramétrico GOD foi desenvolvido por Foster (1987) e aprimorado para atender as condições dos países latino-americanos por Foster e Hirata (1988) e FOSTER *et al.* (2002). Ele consiste na hierarquização de índices relativos à extrema ou

baixa vulnerabilidade intrínseca do aquífero, com base nos mecanismos de recarga da água subterrânea e na capacidade natural de atenuação de contaminantes, variando conforme as condições geológicas. De acordo com Bartolomeu (2012), este método enfatiza os mecanismos de recarga, deve-se ter uma atenção para a contabilização de fraturas e outras heterogeneidades de rocha, pois podem favorecer o fluxo preferencial, sendo um fator crucial para o aumento da vulnerabilidade.

Este método se baseia na análise das três variáveis que a compõem: tipo de aquífero (**G***roundwater occurrence*), características geológicas (**O***verall aquifer class*) e profundidade do nível piezométrico (**D***epth to groundwater*); sendo atribuído valores de 0,0 à 1,0 para cada parâmetro analisado.

O índice final integral da vulnerabilidade à contaminação do aquífero é o produto da multiplicação dos três índices, dada pela equação:

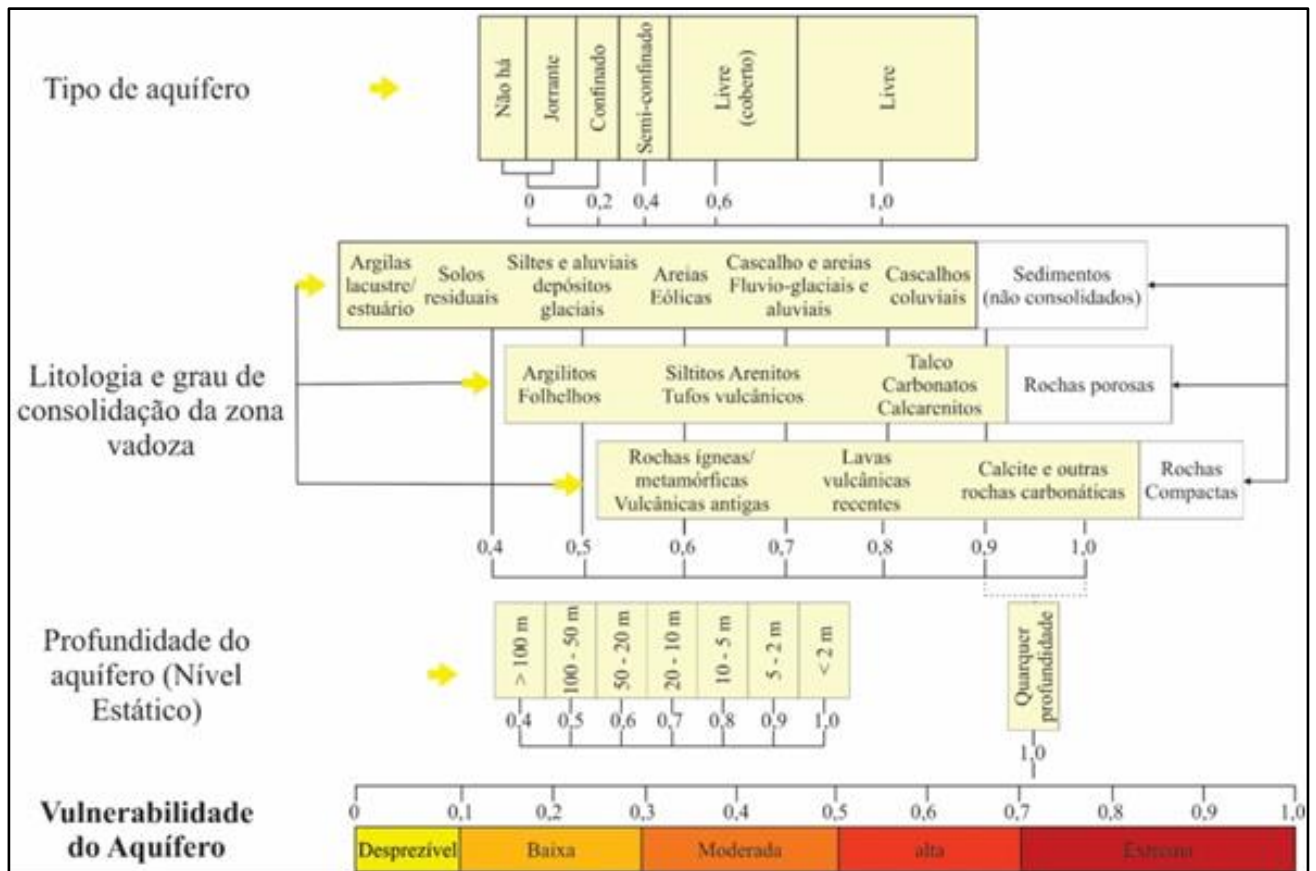
$$\text{Índice de vulnerabilidade} = G \times O \times D$$

O método aplicado nestas pesquisas (MELO *et al.*, 2019; GOMES *et al.*, 2018) consta da confecção do mapa de vulnerabilidade à contaminação de aquífero do município de Camaçari (BA) e nos municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha (CE). O método GOD consiste na hierarquização de um índice relativo à extrema ou baixa vulnerabilidade intrínseca do aquífero, com base nos mecanismos de recarga da água subterrânea e na capacidade natural de atenuação de contaminantes, variando conforme as condições geológicas (FOSTER, 1987; FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2002).

A Figura 4 representa o diagrama para quantificar cada uma das variáveis, com algumas modificações em relação à versão original, como reflexo dos resultados obtidos com experiências de aplicação desse método (FOSTER *et al.*, 2002).

O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto da multiplicação dos três índices, com variação de 0,0 à 1,0.

Figura 4 – Diagrama do método GOD



Fonte: Adaptado de FOSTER *et al.* (2002), pelos autores (2021)

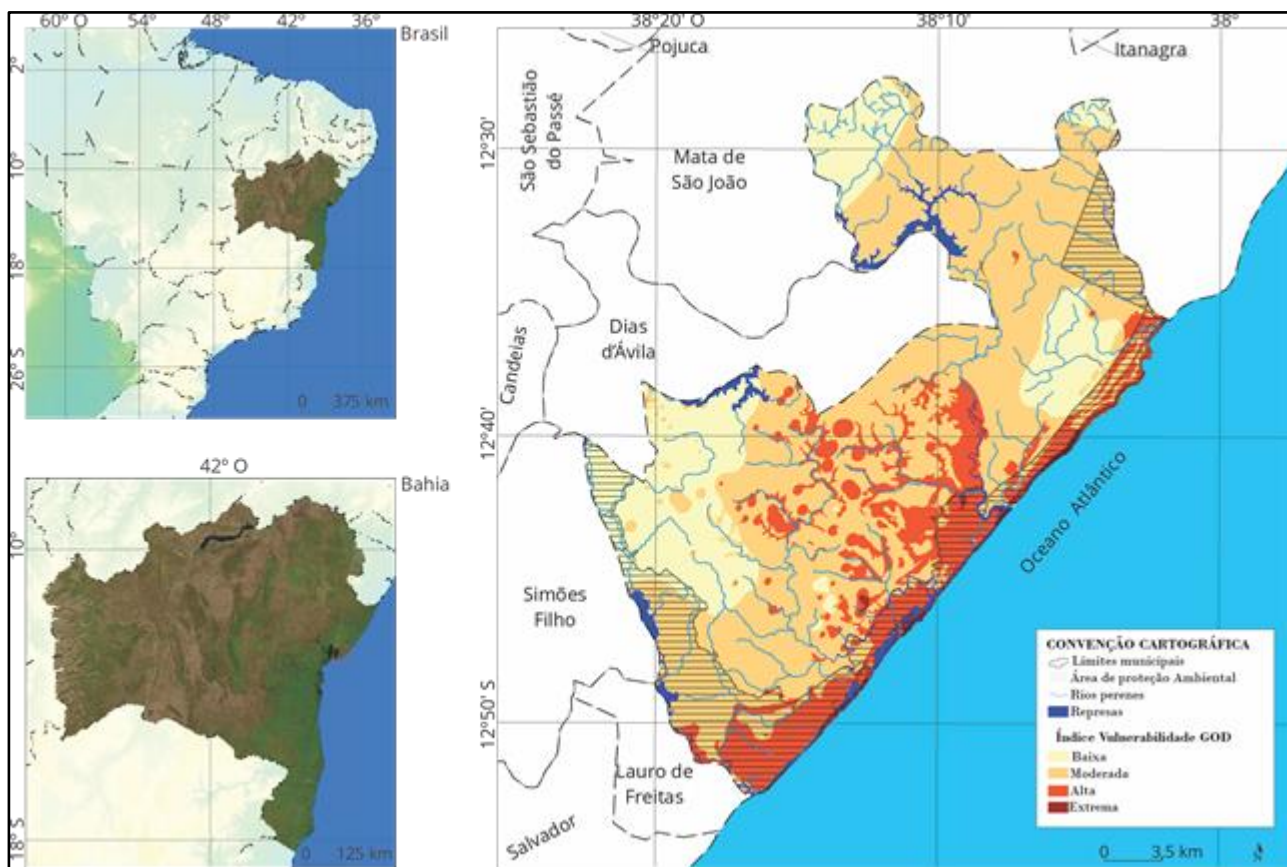
A Figura 5 apresenta o resultado da operação de sobreposição de mapas sumarizado a partir do método GOD. Foram obtidas 4 classes de vulnerabilidade: baixa, moderada, alta e extrema. As áreas de extrema vulnerabilidade estão localizadas nas regiões dos depósitos sedimentares litorâneos, paralelos a linha de costa, ocupando aproximadamente 1% da área do município. As zonas de alta vulnerabilidade foram identificadas nas áreas de dunas, flúvio-lagunares e leques aluvionais coalescentes.

Estes dois últimos estão associados a drenagem superficial, nascentes e fundos de vales e baixa profundidade dos aquíferos. Fato semelhante foi constatado na pesquisa de Kemerich *et al.* (2013), na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, Estado do Rio Grande do Sul, constituída principalmente por rochas sedimentares.



Já as áreas de moderada e baixa vulnerabilidade estão associadas a Formação Marizal e São Sebastião e unidades hidrogeológicas de mesmo nome.

Figura 5 – Mapa de vulnerabilidade à contaminação pelo método GOD



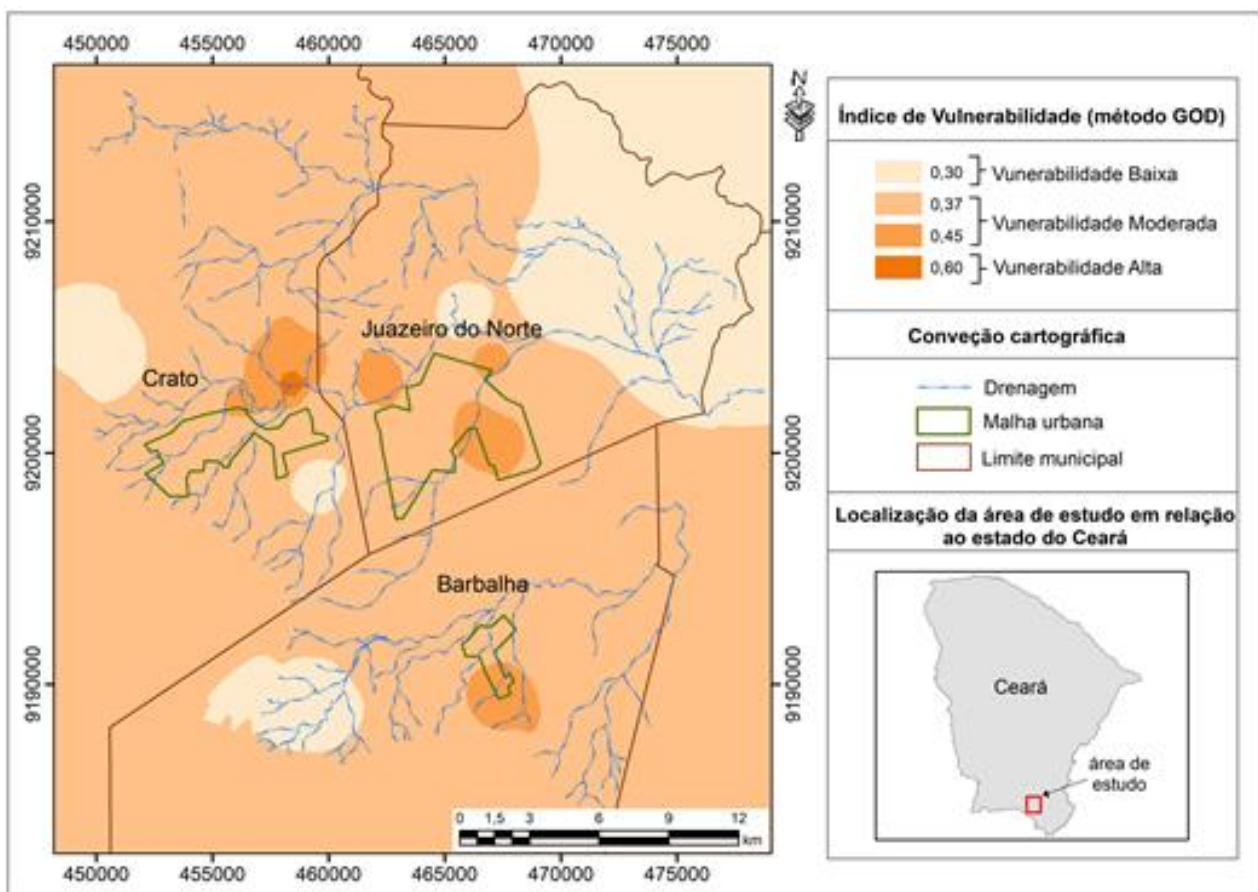
Fonte: MELO *et al.* (2002)

Acredita-se que os principais fatores condicionantes para o aumento na vulnerabilidade à contaminação no município de Camaçari-BA, elaborados a partir do método GOD, são a litologia e a proximidade do nível estático com a superfície. As litologias compostas por areias apresentaram uma maior vulnerabilidade quando comparadas às outras litologias da região. Isso ocorre, devido a elevada porosidade e permeabilidade do meio, que conota aos aquíferos um elevado risco à contaminação. Observou-se, de maneira geral, valores do nível estático aumentando em direção ao Oceano Atlântico, principal exutório da região, responsável pelo aumento dos valores associados à vulnerabilidade que crescem substancialmente nesse sentido.

A Figura 6 apresenta a segunda pesquisa aplicando o método GOD. As características hidrogeológicas verificadas na área permitem classificar a área com a ocorrência da água subterrânea de forma não confinada (aquíferos livres), com valores de Índice G variando de 0,6 a 0,9. Quanto à caracterização dos estratos de cobertura, constata-se a predominância de arenitos, sobrepostos por sedimentos não consolidados constituídos de argila, areia, cascalho, margas, folhelhos e calcários conferindo uma variação do Índice O entre 0,6 e 0,9. E, com relação ao nível da água subterrânea, destaca-se que 47% da área apresenta níveis entre 5 e 20m e 33%, entre 20 e 50m, predominando, portanto, os Índices D iguais a 0,8 e 0,7.

Os resultados indicam que a vulnerabilidade dos aquíferos na área varia de baixa a alta (entre 0,30 e 0,60), com predomínio de vulnerabilidade moderada (80%). Resultados semelhantes foi encontrado por Viana (2007).

Figura 6 – Mapa de vulnerabilidade à contaminação pelo método GOD



Fonte: GOMES *et al.* (2018)

Analisando a vulnerabilidade por município, destaca-se Crato, Barbalha e Juazeiro do Norte com aproximadamente, 89%, 91% e 63%, respectivamente, dos seus mananciais subterrâneos classificados como moderadamente vulneráveis (Figura 5). Segundo Hirata e Fernandes (2008), no caso do índice moderado, a área é vulnerável a alguns poluentes quando continuamente lançados e lixiviados (sais, nitratos e hidrocarbonetos). Juazeiro do Norte apresenta a maior área com vulnerabilidade baixa (36%) em relação aos demais municípios. Hirata e Fernandes (2008) corrobora que, nessa classe somente é vulnerável a contaminantes persistentes em longo prazo, quando continua e amplamente lançados e lixiviados, tais como sais e nitratos. Na porção norte da sede de Crato, onde ocorre as coberturas arenosas, o índice obtido (0,60) indica alta vulnerabilidade em detrimento do grau de consolidação da zona vadosa, formada predominantemente por arenitos e pela influência de níveis estáticos mais rasos (< 5 metros de profundidade). Nesse caso, a área é vulnerável a muitos poluentes, exceto os pouco móveis e persistentes (hidrocarbonetos, compostos aromáticos, bactérias, vírus, sais e nitratos).

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos é um instrumento importante para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos, sendo analisado a interação do contaminante com a fisiografia da paisagem e com os aspectos hidrogeológicos. Estes estudos acontecem há mais de 45 anos e, ainda se discute a sua definição e a aplicabilidade dos métodos de avaliação. Isto ocorre em decorrência da maioria dos métodos executarem uma análise qualitativa, tendo como resultado um mapa indicando áreas homogêneas com alta, média ou baixa vulnerabilidade à contaminação; inexistência de um consenso sobre “quais aspectos” são relevantes na avaliação da vulnerabilidade à contaminação.

No tocante ao uso de diversos dados, a escala e a delimitação das unidades fisiográficas tem se mostrado um problema fundamental para a aplicação dos métodos, devido a sua concepção e classificação se apresentarem de formas distintas para diferentes autores, evidenciando essencialmente o problema o nível de detalhe e a data de aquisição da informação.

Na análise de diversos artigos sobre esta temática, constata-se a existência de duas vertentes nos estudos relacionados a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos: (a) Desenvolvimento de novas metodologias baseadas na análise geográfica, nas características ambientais e disponibilidade da informação; (b) Aplicação destes métodos em áreas distintas.

Na análise destes artigos, há uma tendência, dos autores, em aplicar mais de um método de avaliação da vulnerabilidade de um aquífero. A validação de um método ou de outro faz-se por meio de critérios estatísticos e observações qualitativas realizadas em campo.

A grande diversidade de métodos de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos obriga os investigadores em ter um conhecimento adequado das características de cada método, bem como dos dados utilizados para a sua aplicação. Caso contrário, pode-se cometer alguns erros na sua aplicação, bem como interpretação dos resultados.

Contudo, é importante ressaltar que tais métodos devem ser vistos como instrumento auxiliar na identificação de áreas vulneráveis. Portanto, os estudos de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos podem ser considerados instrumentos de gestão e tomada de decisão, sendo incorporado como ferramenta na proteção dos recursos hídricos subterrâneos, devendo ser utilizados de modo ágil e eficaz.

## REFERÊNCIAS

ALAM, F.; UMAR, R.; AHMAD, S.; DAR, A. F. A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of Central Ganga plain, India. **Arabian Journal of Geoscience**, v. 7, n. 3, p. 927 - 937, mar. 2012.

- ALBINET, M. La pollution des eaux souterraines. **Bureau de recherches géologiques et minières**. Orléans, DS 63 A 127, oct. 1963. 127 p.
- ALBINET, M. Les cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, 70 SGN 325 HYD, aug. 1970. 31 p.
- ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. In: SYMPOSIUM GROUNDWATER POLLUTION, aug. 1971, Moscou. **Proceedings** [...] Moscou: IAHS, 1971. p. 58 - 70.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. Drastic: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. **Research and Development**, Chicago, EPA/600/2-85/018, may 1985. 177 p.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. Drastic: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. **Research and Development**, Chicago, EPA/600/2-87/035, june 1987. 641 p.
- ANDERSEN, L. J.; GOSK, E. Applicability of vulnerability maps. **Environmental Geology and water sciences**. New York, v. 13, n. 1, p. 39 - 43. jan./feb. 1989.
- ANDREO, B.; RAVBAR, N.; VÍAS, J. M. Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. **Hydrogeology Journal**. Cham, v.17, n. 3, p. 749 - 758, may, 2009.
- ARTHUR, J. D.; WOOD, H. A. R.; BAKER, A. E.; CICHON, J. R. RAINES, G. L. Development and implementation of a bayesian-base aquifer vulnerability assessment if Florida. **Natural Resources Research**, Chan, v. 16, n. 2, p. 93 - 107, jun. 2007.
- AUGE, M. **Primer curso de posgrado de hidrogeología Ambiental**. Buenos Aires: UBA, 1995.
- AVELINE, A.; ROUSSEAU, M. L.; GUICHARD, L.; LAURENT, M.; BOCKSTALLER, C. Evaluating an environmental indicator: Case study of MERLIN, a method for assessing the risk of nitrate leaching. **Agricultural Systems**, v. 100, n. 1-3, p. 22 – 30, apr. 2009.
- AYALA, F. J. Introducción a los riesgos geológicos. In: Instituto Geológico y Minero de España – IGME. **Riesgos Geológicos**. Madrid: IGME, 1987. p. 3 - 19.
- BACHMAT, Y.; COLLINS, M. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. In: VAN DUIJVENBOODEN, W. Van; WAEGENINGH, H. G. Van. (Eds.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants: proceedings and information** n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 297 - 307.
- BARTOLOMEU, D. **Análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método GOD e avaliação dos condicionantes geotécnicos**. 2012. 173 p. Dissertação (Mestrado em geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 2012.



BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. **Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelos Estados da Amazônia Legal**. Brasília: MMA/SAE, 1996.

BEROUTCHACHVILI, N.; BERTRAND, G. Le géosystème ou système territorial naturel. **Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, v. 49, n. 2, p. 167 - 180, 1978.

BEROUTCHACHVILI, N.; CLOPES, J. M. P. Tendencia actual de la ciencia del paisaje em la Unión Soviética: el estudio de los geossistemas en la estación de Martkopi (Georgia). **Revista de Geografia**, v.11, n. 1-2, p. 23 - 36, 1977.

BERTAFALANFFY, L. **General System Theory: foundations, development and applications**. New York: George Braziller, 1968.

BERTIN, J. **Sémiologie graphique: les diagrammes, les réseaux, les cartes**. Paris: La Haye, Mouton, Gauthier-Villars, 1967.

BEYNEN, P.; TOWNSEND, K. A disturbance index for karst environments. **Environments Management**. Cham, v. 36, n. 1, p. 101 - 116, jul. 2005.

BLODGETT, R. Drinking water vulnerability assessment in Texas. *In*: 1993 ANNUAL CONFERENCE: MANAGEMENT AND REGULATIONS, jun., 1993, Denver. **Proceedings [...]** Denver: AWWA, 1993. p. 589 - 597.

BÓS, S. M. **Mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Sananduva – RS**. 2008. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo. UPF, 2008.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, D.F., 02 set. 1981, Seção 1, p. 16509.

BREEUWSMA, A.; WOSTEN, J. H. M.; VLEESHOUWER, J. J.; VAN SLOBBE, A. M.; BOUMA, J. Derivation of land quality to assess environmental problems from soil surveyes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 1, p.186 - 190, jan./feb. 1986.

BUREAU DE RECHERCHE GÉOLOGIQUE ET MINIERE – BRGM. **Atlas des eaux souterraines de la France**. Orleans: BRGM, 1970.

CARTER, A. D.; PALMER, R. C.; MONKHOUSE, R. A. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice, particularly with respect to nitrate. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE VULNERABILITY OF SOIL AND GROUNDWATER TO POLLUANTS, 10., mar., 1987. Noordwijk aan Zee. **Proceedings 38 [...]** The Hague: T.N.O/NIPHEH, 1987. p. 333 - 342.

CHENINI, I.; ZGHIBI, A.; KOUZANA, L. Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resource protection and management: State of the art and a case study. **Journal African Earth Science**, v. 109, p. 11 - 26, sep. 2015.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical geography: a system approach**. London: Prentice Hall, 1971.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

CIVITA, M. La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. *In*: CONVEGNO NAZIONALE PROTEZIONE E GESTIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE: METODOLOGIE, TECNOLOGIE E OBIETTIVI, 1., set., 1990. Marano sul Panaro. **Atti [...]** v. 3. Perugia: GNDCI-CNR, 1990. p. 39 - 86.

CIVITA, M. L'inquinamento delle risorse idriche sotterranee in Italia: scenari, problematiche e strategie d'intervento. *In*: CONGRESSO INTERNAZIONALE GEOIDROLOGIA L'ANTROPIZZAZIONE E LA DEGRADAZIONE DELL'AMBIENTE FISICO, 1., dic., 1987. Firenze. **Atti [...]** Perugia: GNDCI-CNR, 1987. p. 299 - 306.

CIVITA, M.; DE MAIO, M. **SINTACS**: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automatizzazione. Bologna: Pitagora Editrice, 1997.

CIVITA, M.; DE MAIO, M. **Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico - SINTACS R5**. Bologna: Pitagora, 2000. (Quaderni e Tecniche di Protezione ambientale, 72).

CIVITA, M.; DE REGIBUS, C. Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. **Quaderni di Geologia Applicata**, suplemento v. 3, p. 63 - 72, 1995. (2º Conv. Naz. Protezione e gestione acque sotterranee).

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. **Relatório de Pesquisa**. São José dos Campos: INPE, 2001. (INPE-8454-RPQ/722).

DALY, D.; DREW, D. The role of karst and karst vulnerability in the Irish groundwater protection scheme. *In*: VULNÉRABILITÉ ET PROTECTION DES EAUX KARSTIQUES, may, 1998. Neuchatel. **Workshop [...]** Neuchâtel: CHYN, 1998. p. 4.

DALY, D.; WARREN, W. P. Mapping groundwater vulnerability: the Irish perspective. *In*: ROBINS, N. S. (ed.) **Groundwater pollution: aquifer recharge and vulnerability**. London: Geological Society, 1998. p. 179 - 190.

DAUPHINÉ, A.; PROVITOLLO, D. **Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer**. 2ª ed. Paris: Armand Colin, 2013.

DAVIS, A. D.; LONG, A. J.; WIREMAN, M. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 42, n. 1, may 2002. p. 65 - 72.

DAVIS, A.; LONG, A.; WIREMAN, M. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. **Environmental Geology**, v. 42, n. 1, p. 65 - 72, may 2002.

DE MAIO, M.; CIVITA, M.; FARINA, M.; ZAVATTI, A. **Linee-guida per l'aredazione e l'usodelle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento**. Roma: ANPLA, 2001.

DENNIS, I.; DENNIS, R. Climate Change vulnerability index for South African aquifers. **Water SA**, v. 28, n. 3, p. 417 - 426, Special Edition, 2012.

DENNY, S. C.; ALLEN, D. M.; JOURNEAY, J. M. DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. **Hydrogeology Journal**. Liege: Springer, v. 15, n. 3, p. 483 - 493, may, 2007.

DICKERSON, J. R. **A modified DRASTIC model for sisting confined animal feeding operations (CAFOs) in Williams County, Ohio, USA**. 2007. 46 p. Thesis (Master of Science) – Bowling Green State University, Cleveland, 2007.

DÖRFLIGER, N. **Guide méthodologique cartographie de la vulnérabilité em vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique**. Orléans: Bureau de RecherchesGéologiques et Minières, 2005.

DÖRFLIGER, N.; PLAGNES, V.; KAVOURI, K. PaPRIKa a multicriteria vulnerability method as a tool for sustainable management of karst aquifers: example of application on a test site in SW France. *In*: INTERNATION INTERDISCIPLINARY SCIENTIFIC CONFERENCE: SUSTAINABILITY OF THE KARST ENVIRONMENT, sept., 2009, Plitvice Lakes. **Proceedings** [...] Plitvice Lakes: UNESCO, 2009. p. 48-56.

DÖRFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK a metodology for evaluating vulnerability of groundwater to contamination in karstic aquifer; its application on a test site in Swiss Jura. *In*: INTERNATION SYMPSIUM AND FIELD SEMINARION: KARST WATERS & ENVIRONMENTAL IMPACTS, sept., 1995, Antalya. **Abstract** [...] Antalya: UKAM, 1995. p. 81 - 82.

DRACK, M. Ludwig von Bertalanffy's early system approach. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 26, n.5, p. 563-572, sep/oct. 2009.

DRACK, M.; APFALTER, W.; POUVREAU, D. On the making of a system theory of life: Paul A Weiss and Ludwig von Bertalanffy's conceptual connection. **The Quarterly Review of Biology**, v. 82, n. 4, p. 349 - 373, dec. 2007.

EGLER, C. A. G. Risco ambiental como critério de gestão do território: uma aplicação à zona costeira brasileira. **Revista Território**. Rio de Janeiro, v. 1, n.1. p.31 - 41, jul./dez., 1996.

ENGELN, G. B. Vulnerability and restoration aspects of groundwater systems in unconsolidated terrains in the Netherlands. *In*: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGISTS, 18, 1985, Cambridge. **Proceedings** [...] Cambridge: IAH, 1985. p. 64 - 69.

EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY (COST EU). **Cost 620: vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers**. Luxembourg: European commission, 2001.



EVANS, B.; MYERS, W. L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. **Journal of soil and water conservation: the science and art of natural resource management for sustainability**, v. 45, n. 2, p. 242 - 245, mar. 1990.

FENGE, T. Geomorphic aspects in aquifer vulnerability pollution, risk and protection strategy. **Western Geographical Service**, v. 12, p. 241 - 286, 1976.

FILIPPONI, M.; PARRIAUX, A.; SCHMASSMANN, S.; JEANNIN, P-Y. KarstALEA: a practical guide for the prediction of karst-related hazards in underground works. *In: SWISS GEOSCIENCE MEETING*, 10., nov., 2012. Bern. **Proceedings** [...] Bern: SC/NAT/UB, 2012. p. 425 - 426.

FOBE, B.; GOOSSENS, M. The groundwater vulnerability map for the Flemish region: its principles and uses. **Engineering Geology**, v. 29, n. 4, p. 355 - 363, dec. 1990.

FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *In: DUIJVENBOODEN, W.; WAEGENINGH, H. G. (Eds.). Vulnerability of soil and groundwater to pollutants: proceedings and information n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69 - 86.*

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environmental agencies**. Washington: World Bank Group, 2002.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: CEPIS, 1988.

FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FERNANDES, J. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE GROUNDWATER RESOURCES AT RISK*, 3, 2001, Lisbon. **Proceedings** [...] Lisbon: UNESCO, 2001.

FRIED, J. J. (Coord.) Groundwater resources in European Community: 2nd phase, - vulnerability quality. **Synthetical Report**, 184 p. Brussels: European Commission - DG JRC, 1987. Atlas. Escala: 1:500.000. (Nine National Reports)

FRITCH, T G; MCKNIGHT, C L; YELDERMAN JR, J C; ARNOLD, J G. An aquifer vulnerability assessment of the paluxy aquifer, central Texas, USA, using GIS and a modified DRASTIC approach. **Environmental Management**, v. 25, n. 3, p. 337 - 345, 2000.

GOGU, C. R.; DASSARGUES, A. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic, Southern Belgium. **Hydrogeology Journal**. Liege: Springer, v. 8, n. 3, p. 337 - 345, jun., 2000.

GOGU, C. R.; DASSARGUES, A. A short overview on groundwater vulnerability assessment: basic statements for use in the framework of the Cost 620 action. *In: VULNÉRABILITÉ ET PROTECTION DES EAUX KARSTIQUES*, may, 1998. Neuchatel. **Workshop** [...] Neuchâtel: CHYN, 1998. p. 4.

GOLDSCHIEDER, N.; KLUTE, M.; STURM, S.; HÖTZL, H. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. **Zeitschrift für angewandte Geologie**. Stuttgart: Schweizerbart science publishers, v. 46, n. 3, p. 157-166 jul., 2000.

GOMES, M. da C, R.; MENDONÇA, L. A. R.; CAVALCANTE, I. N. Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas na Porção Leste da Bacia Sedimentar do Araripe, Ceará, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n.3, p.252-259, 2018.

GOOSSENS, M; VAN DAMME, M. Vulnerability mapping in Flanders, Belgium. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE VULNERABILITY OF SOIL AND GROUNDWATER TO POLLUANTS, 10., mar., 1987. Noordwijk aan Zee. **Proceedings 38** [...] The Hague: T.N.O/NIPHEH, 1987. p. 355 - 360.

GUO, Q.; WANG, Y.; GAO, X.; MA, T. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. **Environmental Geology**. Liege, v. 52, n. 5, p. 923 - 932, apr. 2007.

HAASE, G. Medium scale landscape classification in the German Democratic Republic. **Landscape Ecology**, v. 3, n. 1, p. 29 - 41, 1989.

HAERTLÉ, T. Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. **International Association of Hydrogeological Sciences**, v. 142, p. 1073-1085, 1983.

HIRATA, R. C. A.; BASTOS, C. R. A.; ROCHA, G. A.; GOMES, D. C.; IRITANI, M. A. Groundwater Pollution Risk and Vulnerability Map of the State of São Paulo, Brazil. **Water Science and Technology**, v. 24, n.11, p. 159 - 169, dec. 1991.

HIRATA, R. C. A; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org. e Coord.) **Hidrologia: conceitos e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 405 - 424.

HÖLTING, B.; HAERTLÉ, T.; HOHBERGER, K-H.; NACHTIGALL, K. H.; VILLINGER, E.; WEINZIERL, W.; WROBLE, J-P. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der -Grundwasserüberdeckung. **Geologisches Jahrbuch**, v. C, n. 63, p. 6 - 65, 1995. (translated into English by the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources: Concept for the Determination of the Protective Effectiveness of the Cover above the Groundwater against Pollution.)

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de pedologia**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 2007.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES (IAHS). **Symposium on groundwater pollution: 1971**. Rennes: IAHS, 1975. 240 p.

JEANNIN, P. Y.; CORNATON, F.; ZWAHLEN, F.; PERROCHET, P. VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. *In*: CONFERENCE ON LIMESTONE HYDROLOGY AND FISSURED MEDIA, 7., sept. 2001, Besançon. **Proceedings** [...] Besançon: UFC, 2001. p. 185-190.

JIMÉNEZ-MADRID, A.; CARRASCO, F.; MARTÍNEZ, C.; GOGU, R. C. DRISTPI, a new groundwater vulnerability mapping method for use in karstic and non-karstic aquifers. **Quarterly Journal of Engineering Geology & Hidrogeology**. London, v. 46, p. 2, p. 245 - 255, mar. 2013.

JOSOPAIT, V.; SCHWERDTFEGGER, B. **Geowissenschaftliche karte des naturraumpotentials von Niedersachsen und Bremen**. Hanover: Niedersachsische Landesamt für Bodenforshung. Escala 1:200000.

JØRGENSEN, S. E. **Integration of Ecosystem Theories: a pattern**. Dordrecht: Springer, 2012.

KEMERICH, P. D. C.; MARTINS, S. R.; KOBAYAMA, M.; SILVEIRA, DESCOVI FILHO, L.; RIZZARDI, A. BORBA, W. F. Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim: uso da metodologia GOD. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 189 - 207, mar./abr. 2013.

KHAN, M. M. A.; UMAR, R.; LATEH, H. Assessment of aquifer vulnerability in parts of Indo Gangetic plain, India. **International Journal of Physical Sciences**, v. 5, p. 1711 - 1720, sep. 2010.

KOUTSI, R.; STOURNARAS, G. Groundwater vulnerability assessment in the Loussi polje area, N Peloponessus: the PRESK method. In: LAMBRAKI, N.; STOURNARAS, G.; KATSANO, K. (ed.) **Advances in the research of aquatic environment**. V. 2. Berlin: Springer, 2011. p. 335 - 358.

LEGRAND, H. E. System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 56, n. 8, p. 959 - 974, aug. 1964.

LEYLAND, R. C.; WITTHÜSER, K. T. VUKA: a modified COP vulnerability mapping method for karst terrains in South Africa. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, London, v. 46, p. 107 - 116, feb. 2010.

LI, H.; YU, X.; ZHANG, W.; HUAN, Y.; YU, J.; ZHANG, Y. Risk assessment of groundwater organic pollution using hazard, intrinsic vulnerability, and groundwater value, Suzhou city in China. **Exposure and Health**, v. 10, n. 2, p. 99 - 115, june 2018.

LI, X.; WU, H.; QIAN, H. Groundwater contamination risk assessment using intrinsic vulnerability, pollution loading and groundwater value: a case study in Yinchuan plain, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, aug. 2020.

LINDEMAN, R. L. The trophic dynamic aspect of ecology. **Ecology**, Washington, v. 23, n. 4, p. 399 - 418, oct. 1942.

LOBO-FERREIRA, J. P.; CABRAL, M. Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources. In: MEETING OF THE EUROPEAN INSTITUTE FOR WATER, feb. 1991. Brussels. **Proceedings** [...] Brussels: EIW, 1991.

MAIA, P. H. P.; CRUZ, M. J. M. Proposta de modificações no método MAIA para avaliar a vulnerabilidade do aquífero Urucuia. **Cadernos de Geociências**, Salvador, v. 10, n. 2, p. 150-157, nov. 2013.

MALIK, P.; SVASTA, J. REKS: an alternative method of karst groundwater vulnerability estimation. *In: CONGRESS OF INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGISTS, XXIX*, sept. 1999, Bratislava. **Proceedings** [...] Bratislava: IAH, 1999. p. 79 - 85.

MANOEL FILHO, J. Contaminação das águas subterrâneas. *In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) Hidrologia: conceitos e aplicações*. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 5.3, p. 381-404.

MARCOLONGO, B.; PRETTO, L. **Vulnerabilità degli acquiferi nella pianura a nord di Vicenza**. Padova: Gruppo nazionale difesa catastrofi idrogeoloiche, 1987.

MARCOLONGO, B.; PRETTO, L. **Carta dell'uso del suolo' nell'alta pianura vicentina: una conoscenza di base per la stima del carico inquinante sopportato dalle falde**. Padova: Gruppo nazionale difesa catastrofi idrogeoloiche, 1988.

MARGAT, J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution: bases de la cartographie. **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, 68 SGL 198 HYD, nov. 1968. 12 p.

MARGAT, J.; ALBINET, M. La pollution des eaux souterraines par les eaux de surface. **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, DS 65 A 96, nov. 1965. 21 p.

MARGAT, J.; MONITION, L.; RICOUR, J. Eaux souterraines et pollutions radio-actives. **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, DS 67 A 132, oct. 1967. 7 p.

MARGAT, J.; MONITION, L.; RICOUR, J. Emploi des eaux souterraines enc as de pollution radioactive superficielle. **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, 68 SGL 153 HYD, oct. 1968. 13 p.

MAXE, L.; JOHANSSON, P. O. Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators. **Hydrogeology Journal**, Heidelberg, v. 6, n. 3, p. 441 - 449, oct. 1998.

MENDOZA, J. A.; BARMEN, G. Assessment of groundwater vulnerability in the Rio Artiguas basin, Nicaragua. **Environmental Geology**, v. 50, n. 4, p. 569 - 580, jul. 2006.

MELO, D. H. C. T. B.; SILVA, H. M.; BRITO, P. L.; MENEZES, L. A. Sistema de Informação Geográfica: uma análise sobre o desenvolvimento técnico, tecnológico, acadêmico e conceitual. **Revista MundoGEO**. Curitiba: MundoGEO, ano 17, n. 83, sept. 2015. (Conteúdo Complementar).

MELO, D. H. C. T. B.; CAVALCANTI, S. C.; SALLES, L. Q.; SANTOS, C. B.; VIOLA, D. N.; LEAL, L. R. B. Vulnerabilidade à contaminação do aquífero no município de Camaçari – Ba: uma aplicação dos métodos GOD e GODS. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, XVIII*, Fortaleza. 2019. **Anais** [...]. Fortaleza: UFC/SBGFA, 2019.

MOORE, J. S. **Seepage: A system for early evaluation of the pollution potential of agricultural ground water environments**. Washington: USDA, 1988.

MORAIS, J. B. A. **Vulnerabilidade e riscos à poluição/contaminação das águas subterrâneas na área do Complexo Industrial Portuário do Pecém (CIPP) – Estado do Ceará**. Tese (Tese de doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

NOBRE, R. C. M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MANSUR, W. J.; NOBRE, M. M. M.; COSENZA, C. A. N. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. **Journal of contaminant Hydrology**. New York, v. 94, n. 3 - 4, p. 277 - 292, dec. 2007.

OLMER, M.; REZAC, B. Methodical principles of maps for protection of ground water in Bohemia and Moravia: scale 1:200.000. *In*: CONGRÈS DE MONTPELLIER, 1974, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: IAH, 1974, p. 105 - 107.

ORTEGA, R. M. V.; MIRANDA, W. R. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos cubanos. *In*: SEMINARIO-TALLER. PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN: PROTECCIÓN DE LA CALIDADE DEL AGUA, IV., 2004, Lima. **Anais [...]** Lima: CYTED, 2004.

OSTRY, R. C.; LEECH, R. E. J.; COOPER, A. J.; RANNIE, E. H. Assessing the susceptibility of ground water supplies to non-point source agricultural contamination in South Ontario. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE VULNERABILITY OF SOIL AND GROUNDWATER TO POLLUANTS, 10., mar., 2012. Noordwijk aan Zee. **Proceedings 38[...]** The Hague: T.N.O/NIPHEH, 1987. p. 437 - 445.

ÖZYURT, G.; ERGIN, A. Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers. **Journal of Coastal Research**, v. 26, n. 2, p. 265 - 273, mar. 2010.

PALMER, R. C. **Groundwater vulnerability Map Severn Trent Water**. Bedford: Soil Survey and Land Research Centre, 1988.

PANAGOPOULOS, G. P.; ANTONAKOS, A.; LAMBRAKIS, N.J. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 6, p. 894 - 911, sep. 2006.

PETELET-GIRAUD, E.; DÖRFLIGER, N.; CROCHET, P. Multicriterion assessment of the vulnerability of karstic aquifers in Mediterranean area using the RISKE method (karst in the North part of Montpellier). *In*: CONFERENCE ON LIMESTONE HYDROLOGY AND FISSURED MEDIA, 7., 2001, Besançon. **Proceedings [...]** Besançon: UFC, 2001, p. 281 - 284.

PLAGNES, V.; DÖRFLIGER, N.; PRANVILLE, J. Karst Vulnerability Mapping: Examples of Application of RISKE 2 Method. *In*: JOINT ANNUAL MEETING, oct. 2008, Houston. **Proceedings [...]** Houston: GSA, 2008.

POLEMIO, M. Seawater intrusion and groundwater quality in the southern Italy region of Apulia: a multi-method approach to protection. **Technical Documents in Hydrology**. UNESCO/IHP, n. 77, 2005.

PONSATÍ, A. C.; ASTURIAS, J-M. S. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos del valle bajo de Llobregat (Barcelona). In: CONGRESO ESPAÑOL DE GEOLOGÍA, I, 1984, Segovia. **Actas** [...] Segovia: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, 1984, p. 795 - 808.

PREOBRAZHENSKY, V. S.; ALEKSANDROVA, T. A.; KUPRIYANOVA, T. P. **Fundamentals of landscape analysis**. Moscou: Nauka, 1988.

QIAN, H.; PEIYUE, L.; HOWARD, K. W. F.; YANG, C.; ZHANG, X. Assessment of groundwater vulnerability in the Yinchuan Plain, Northwest China using OREADIC. **Environmental & Monitoring and Assessment**. Liege: Springer, v. 184, n. 6, p. 3613 - 3628, jun. 2012.

QINGHAI, G.; YANXIN, W.; XUBO, G.; TENG, M. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: A case study in Taiyuan basin, northern China. **Environmental Geology**, v. 52, n. 5, p. 923 - 932, may 2007.

RAO, P.; HORNSBY, A. G.; JESSUP, R.E. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. In: SOIL AND CROP SCIENCE SOCIETY OF FLORIDA, 15, 1985, Daytona Beach. **Proceedings v 44** [...] Daytona Beach: SCSSE, 1985, p. 23 - 25.

RAY, J. A.; O'DELL, P. W. DIVERSITY: a new method for evaluating sensitivity of groundwater to contamination. **Environmental Geology**, v. 22, n. 4, p. 345 - 352, dec. 1993.

DE REGIBUS, C. **Valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Analisi e confronto delle metodologie: sperimentazione su aree - campione**. 1994. 165 p. Tesi (Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geologico - Ambientale) - Politecnico di Torino, Torino, 1994.

RIBEIRO, L. SI: A New Index of Aquifer Susceptibility to Agricultural Pollution. **Internal report**. Lisboa: ERSHA/CVRM, 2000.

RODRÍGUEZ, R. C. The role of urban areas in aquifer vulnerability assessments: the Salamanca, Mexico, case. **Geofísica Internacional**, v. 43, n. 4, p. 583 - 589, oct/dec. 2004.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia, ambiente e planejamento. São Paulo: Contexto, 1990.

ROSS, M.; MARTEL, R.; LEFEBVRE, R.; PARENT, M.; SAVARD, M.M. Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: a case study from the St. Lawrence Lowlands, Canada. **Geofísica Internacional**, v. 43, n. 4, p. 591 - 602, 2004.

RUPPERT, M. G. Calibration of the DRASTIC ground wáter vulnerability mapping method. **Groundwater**, v. 39, n. 4, p. 625 - 630, jul. 2001.

SALEMI, E.; COLOMBANI, N.; ASCHONITIS, V.; MASTROCICCO, M. Assessment of specific vulnerability to nitrates using LOS índices in the Ferrara Province, Italy. In: LAMBRAKI, N.; STOURNARAS, G.; KATSANOOU, K. (ed.) **Advances in the research of aquatic environment**. V. 2. Berlin: Springer, 2011. p. 283 - 290.

SCHMIDT, R. R.; KESSIER, K. **Groundwater contamination susceptibility in Wisconsin**. Wisconsin: WDNR/WGNHS. 1987. Escala 1:1.000.000.



SECUNDA, S.; COLLIN, M.; MELLOUL, A. J. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive land use in Israel's sharon region. **Journal of Environmental Management**, v. 54, n. 1, p. 39 - 57, set. 1998.

SING, A.; SRIVASTAV, S. K.; KUMAR, S.; CHAKRAPANI, G. J. A modified-DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Luchnow, India. **Environmental Earth Science**, v. 74, n. 7, p. 5475 - 5490, oct. 2015.

SOTORNIKOVA, R.; VRBA, J. Some remarks on the concept of vulnerability maps. *In*: DUIJVENBOODEN, W.; WAEGENINGH, H. G. (Eds.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants**: proceedings and information n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 471 - 475.

SOTCHAVA, V. B. **O estudo do geossistema**. São Paulo: USP, 1978 (Série Métodos em Questão).

SOTORNIKOVA, R.; VRBA, J. Some remarks on the concept of vulnerability maps. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE VULNERABILITY OF SOIL AND GROUNDWATER TO POLLUANTS, 10., mar., 1987. Noordwijk aan Zee. **Proceedings 38** [...] The Hague: T.N.O/NIPHEH, 1987. p. 471 - 475

STEMPVOORT, D.; EWERT, L. WASSENAAR, L. **AVI: A method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada**. Saskatoon: Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute, 1992. (Prairie Provinces Water Board Report 114).

TALTASSE, P. **Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP)**. São Paulo: USP (Instituto de Geociências), 1972. (Publicação Avulsa, n. 1).

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

TROIANO, J.; MARADE, J.; SPURLOCK, F. Empirical modeling of spatial vulnerability applied to a norflurazon retrospective well study in California. **Journal of Environmental Quality**. Madison: ACSESS, v. 28, n. 2, p. 397 - 403, mar/april 1999.

TROJAN, M. D.; PERRY, J. A. Assessing hydrogeologic risk over larger geographic areas. **Station Bulletin**. Minnesota: Minnesota Agricultural Experiment Station, 585, 1988. (AD-SB-3421)

TROPMAIR, H. Ecosistemas e geossistemas do Estado de São Paulo. **Boletim de Geografia**, v. 13, n. 25, p. 27 - 36, 1983.

VAEZIHIR, A.; TABARMAYEH, M. Total vulnerability estimation for the Tabriz aquifer (Iran) by combining a new model with DRASTIC. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 3, p. 2949-2965, apr. 2015.

VERSTAPPEN, H. T.; VAN ZUIDAN, R. A. **ITC System of Geomorphological Survey**. Enschede: International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences, 1969.

VIANA, N. O. **Vulnerabilidade e risco à poluição do Sistema Aquífero Médio entre Crato e Missão Velha, Bacia do Araripe, Ceará**. 2007. 131 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

VÍAS, J. M. **Vulnerabilidad y peligro de contaminación em el acuífero carbonatado de Torremolinos (Málaga)**. Málaga: CEDMA, 2003.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J. P. Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos: aplicación en acuíferos kársticos y detríticos. *In*: ANDREO, A. (ed.) **Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos**. Madrid: IGME, 2008.

VÍAS, J. M. V.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers: the COP method. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 6, p. 912 - 925, dez. 2006.

VIERHUFF, H.; WAGNER, W.; AUST, H. Die grundwasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. **Geologisches Jahrbuch**, reihe C, 1981. (Band C, heft 30)

VILLUMSEN, A. JACOBSEN, O. S.; SOENDERSKOV, C. Mapping the vulnerability of ground water reservoirs with regard to surface pollution. **Årbog – Danmarks Geologiske Undersøgelse**, v. 2, p. 17 - 38, 1982.

VRANA, M. **Map of groundwater protection in Bohemia and Moravia**. Praha: Wat. Res. Plan Cent., 1968.

VRANA, M. Methodology for construction of groundwater protection maps. *IN*: KOZLOVSKY, E. A. (ed.) **Hydrogeological principles of groundwater protection: handbook of scientific methods**. V. 1. Moscow: UNESCO/UNEP, 1988, P. 147 - 149.

VRBA, J.; ZAPOREZEC, A. (Ed.). **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. Hannover: Heinz Heise Verlag, 1994.

VUILLAUME, Y. Les conditions de l'épuration naturelle des eaux souterraines par les roches aquifères filtrantes (pollution par les micro-organismes). **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, DS 66 A 67, jun. 1966. 50 p.

WALKER, W. H. Illinois ground water pollution. *Journal American Water Works Association*. Washington: AWWA, v. 61, n.1, p. 31 - 40, jan. 1969.

WANG, Y.; MERKEL, B. J.; LI, Y.; HUI, Y.; FU, S.; IHM, D. Vulnerability of groundwater in quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan city, China. **Environmental Geology**, v. 53, n. 3, p. 479 - 484, 2007.

ZAMPETTI, M. Informazioni e dati relativi alla quantità ed alla qualità delle acque sotterranee nella Comunità Europea. *In*: CONFERENZA INTERNAZIONALE INQUINAMENTO DELLE ACQUE SOTTERRANEE DA COMPOSTI ORGANO-CLORURATI DI ORIGINE INDUSTRIALE, 8, 1983, Milano. *Proceedings* [...] Milano: Monduzzi Editore, 1983, p. 197 - 204.

ZANONI, A. E. Ground-water pollution and sanitary landfills – a critical review. *Groundwater*, v. 10, n. 1, p. 3-16, jan. 1972.



ZAPOROZEC, A. A. **Groundwater protection principles and alternatives for Rock County, Wisconsin**. Wisconsin: Wisconsin Geological and Natural History Survey, 1985. (Special Report 8).

ZAPOROZEC, A. A. Hydrogeologic mapping for groundwater protection. *In*: Moore, J. E. *et al.* (Eds.). **Recent advances in groundwater hydrology**. Illinois: AIH, 1989. p. 588 - 597.

ZHOU, L.; LI, G.; LIU, F.; WANG, Y.; GUO, X. DRAV model and its application in assessing groundwater vulnerability in arid area: A case study por phreatic water in Tarim Basin, Xinjiang, Northwest China. **Environmental Earth Science**, v. 60, n. 5, p. 1055 - 1063, may 2010.

ZWAHLEN, F. (Ed.) **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers: scope, goals results**. Luxembourg: European Commission, 2003.

## Contribuições de autoria

### 1 – Danilo Heitor Melo (Autor Correspondente)

Universidade Federal da Bahia, geógrafo – Doutor em Geologia

<https://orcid.org/0000-0003-2083-6211> • [danilo.melo@ufba.br](mailto:danilo.melo@ufba.br)

Contribuição: Conceituação | Curadoria de dados | Análise formal | Metodologia | Escrita - primeira redação | Escrita - revisão e edição

### 2 – Maria da Conceição Rabelo Gomes

Universidade Federal da Bahia, geóloga – Doutora em Geologia

<https://orcid.org/0000-0001-7841-4201> • [conceicaorabelo@yahoo.com.br](mailto:conceicaorabelo@yahoo.com.br)

Contribuição: Metodologia | Escrita - revisão e edição

### 3 – Luiz Rogério Bastos Leal

Universidade Federal da Bahia, geólogo – Doutor em Geologia

<https://orcid.org/0000-0003-4015-3370> • [lrogerio@ufba.br](mailto:lrogerio@ufba.br)

Contribuição: Análise formal | Investigação | Metodologia

## Como citar este artigo

MELO, D. H.; GOMES, M. C. R.; LEAL, L. R. B. Cartografia da Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos: revisão conceitual. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 26, e11, 2022. Disponível em: 10.5902/2236499465331. Acesso em: dia mês abreviado. ano.