

Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica

Aquifer vulnerability to pollution: a methodological review

Maíra Sampaio da Costa¹; Maria da Conceição Rabelo Gomes²; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento³

¹ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, Brasil. Email: mairasampaio42@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0973-0822>

² Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza/CE, Brasil. Email: conceicaoabelo@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7841-4201>

³ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, Brasil. Email: sergiomn@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1751-2323>

Resumo: As águas subterrâneas representam o maior volume de água doce disponível do planeta Terra, por isso, são consideradas um recurso indispensável para o abastecimento humano. Todavia, o avanço da civilização contribuiu para a poluição dos aquíferos, o que ampliou a necessidade de remediação e preservação desses sistemas. Devido a isso, pesquisadores estudam, desde a década de 60, o conceito de vulnerabilidade de aquíferos, proporcionando recentemente o entendimento que o grau de vulnerabilidade de um aquífero está associado a um conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada e/ou do aquífero confinante, que controlam a chegada de contaminantes ao sistema subterrâneo. Concomitantemente, o aprofundamento desse estudo foi possível graças ao viés matemático adotado, possibilitando o desenvolvimento de metodologias cartográficas que delimitam classes de vulnerabilidade, como o COP, o DRASTIC, o GOD e o AVI. No entanto, essas metodologias utilizam formulações com diferentes critérios físicos e geológicos, resultando em mapas distintos para uma mesma área de estudo. Considerando essa particularidade, este trabalho propõe apresentar a revisão bibliográfica das quatro metodologias citadas, visando indicar a melhor empregabilidade destas metodologias frente aos distintos ambientes geológicos e geográficos.

Palavras-chave: Métodos matemáticos; Revisão bibliográfica; Vulnerabilidade.

Abstract: Groundwater 60iferente6060 the largest volume of fresh water available on planet Earth, therefore, it is considered to be an essential resource for humanity's water supply. However, the advance of civilization has contributed to the pollution of aquifers, which has increased the necessity for the remediation and preservation of these systems. Hence, since the 1960s, researchers have been studying the 60iferente60 the vulnerability of aquifers, which has led to na understanding that the degree of vulnerability of na aquifer is associated with a set of physical, 60iferent and biological characteristics of the unsaturated zone and/or from the confining aquitard, which control the arrival of contaminants into the underground system. Simultaneously, delving into this study has been possible thanks to the mathematical approach that has been adopted, enabling the development of cartographic methodologies which delimit vulnerability classes, such as COP, DRASTIC, GOD and AVI. Despite that, these methodologies use formulations with 60iferente physical and geological criteria, resulting in 60iferente maps for the same study 60ife. Considering this particularity, the 60iferent study proposes to introduce a methodological review of the four above-mentioned methodologies, aiming to designate their most appropriate uses in 60iferente geological and geographic environments.

Keywords: Mathematical methods; Methodological review; Vulnerability.

1. Introdução

As águas subterrâneas são o maior volume de água doce e líquida do planeta Terra, representando cerca de 10.3 milhões km³, enquanto os lagos e rios, ocupando a segunda posição, acumulam somente cerca de 104 mil km³. Além disso, os aquíferos apresentam baixa suscetibilidade à poluição quando comparados aos mananciais superficiais, o que os tornam indispensáveis para o abastecimento hídrico de residências e dos setores de produção (BABIKER *et al.*, 2005; REBOUÇAS, 2008).

No entanto, devido ao avanço civilizatório, a indiscriminada poluição ambiental e seu consequente reflexo nos aquíferos, se tornou um tema de discussão para pesquisadores ambientais e para governantes, impulsionando estudos e, posteriormente, o entendimento que a poluição das águas subterrâneas provoca, muitas vezes, impactos irreversíveis para o ecossistema (BABIKER *et al.*, 2005).

A poluição das águas subterrâneas pode ter diversas origens, no entanto, as mais comuns estão relacionadas com as atividades industriais, domésticas e agrícolas. Essa primeira atividade pode poluir os aquíferos através de descartes de compostos químicos, de metais, de elementos radioativos, do chorume e de acidentes com produção química. A segunda pode poluir através do chorume de aterros sanitários e lixos e acidentes com fossas sépticas de redes de esgotos. Por fim, a última pode poluir através de solutos dissolvidos por chuvas ou irrigação, fertilizantes e pesticidas (HIRATA; FERNANDES, 2008).

Como a remediação de aquíferos é frequentemente dispendiosa e impraticável, o aprofundamento de estudos sobre a vulnerabilidade e preservação desses sistemas se tornou imprescindível, possibilitando o desenvolvimento de conceitos sobre o tema a partir de estudos como Le Grand (1964), Albinet & Margat (1970), Taltasse (1972), Aller *et al.* (1987), Bachmat & Collin (1987), Foster & Hirata (1988), VRBA & Zaporozec (1994), Hirata & Fernandes (2008), Cutrim & Campos (2010); e Yu & Michael (2019).

Utilizando-se de definições porpostas por Cutrim & Campos (2010) pode-se compreender que a vulnerabilidade intrínseca de um aquífero está relacionado ao conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada do sistema e/ou do aquífero confinante, que controlam a chegada do contaminante ao sistema. Já a vulnerabilidade específica está relacionada a fatores extrínsecos, como uma carga ou uma atividade contaminante.

Um dos métodos aliados a esse estudo é a cartografia de vulnerabilidade de aquíferos, que foi inicialmente investigada por Le Grand (1964), Seller & Canter (1980) e Cartel *et al.* (1987). A cartografia de vulnerabilidade é uma ferramenta preventiva capaz de distinguir as zonas de vulnerabilidade de um aquífero, o que possibilita a análise da capacidade de sua proteção natural (HIRATA; FERNANDES, 2008).

Devido aos avanços tecnológicos, a cartografia de vulnerabilidade se associou às técnicas de geoprocessamento implementadas em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Este feito ampliou a capacidade de análise espacial, resultando na redução do tempo de trabalho e no aumento da precisão das informações (PAULA; SOUZA, 2011).

Ao longo do tempo, muitos métodos de cartografia de vulnerabilidade foram desenvolvidos, todavia, suas fórmulas foram fundamentadas em diferentes critérios físicos e geológicos. Devido a isso, quando uma mesma área é estudada por diferentes métodos cartográficos, os mapas obtidos apresentam zonas de vulnerabilidades diferentes.

Considerando essa particularidade, este trabalho propõe apresentar uma revisão bibliográfica a cerca de quatro metodologias utilizadas na cartografia de vulnerabilidade, sendo elas, DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), GOD (FOSTER; HIRATA, 1988), COP (VIÁS *et al.*, 2002; 2006) e AVI (STEMPVOORT *et al.*, 1992), visando sugerir uma melhor empregabilidade delas frente aos distintos ambientes geológicos e geográficos.

2. Metodologia

2.1 Metodologia COP

Desenvolvida por Viás *et al.* (2002; 2006) baseando-se nas premissas da Ação Europeia COST 620, a metodologia COP foi inicialmente idealizada para regiões de clima semi-árido, sobretudo em locais de baixa pluviosidade, com o propósito de avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos (ZWHALEN, 2003; ABDULLAH *et al.*, 2020). No entanto, devido aos seus resultados satisfatórios, essa metodologia passou a ser utilizada em muitos países, como África, Cuba, China, Alemanha, Eslovênia, França, Itália, Portugal e Brasil (NOSSA, 2011).

Segundo Viás *et al.* (2006) e Nossa (2011), a metodologia COP utilizada em seus cálculos três variáveis com pesos iguais: (C) concentração do fluxo, (O) camadas de proteção e (P) precipitação.

O fator C corresponde a intensidade com que as águas das chuvas atravessam a zona não saturada e infiltram no interior das cavidades cársticas. Assim, essa variável representa a influência da infiltração para a vulnerabilidade de um aquífero. Este fator está atrelado a dois cenários possíveis:

Cenário 1: Situação na qual as zonas de recarga são recobertas por finas camadas de baixa permeabilidade ou encontram-se aflorantes, favorecendo a infiltração concentrada e resultando em um fluxo que penetra facilmente pela zona não saturada. O fator (C), neste caso, é representado por quatro variáveis: a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (dh) e dolinas (ds) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). A declividade é subdividida em quatro classes associada a presença ou ausência da cobertura vegetal, originando o subparâmetro (sv). O fator C é registrado como:

$$\text{Fator (C)} = sv \times ds \text{ ou } sv \times dh$$

Cenário 2: Situação na qual a recarga ocorre a partir de infiltração difusa. O fator (C) é subdividido em três fatores: feições superficiais (sf), declividade (s) e vegetação (v). As feições superficiais (sf) englobam formas geomorfológicas específicas de rochas carbonáticas e a presença ou ausência de camadas de recobrimento, que influenciam no processo de escoamento superficial e/ou infiltração. A declividade e vegetação entram como parâmetros correlacionados (sv). O fator (C) é registrado como:

$$\text{Fator (C)} = sv \times sf$$

O fator O corresponde a proteção intrínseca do aquífero, que é representado pela textura, litologia e espessura das camadas acima da zona saturada. Esse fator considera que a capacidade de atenuação de contaminantes aumenta proporcionalmente com o aumento das camadas de proteção. Para calcular o fator (O) aplica-se os subfatores solo [OS] e litologia [OL].

$$\text{Fator O} = [Os] + [OL]$$

O fator P representa a precipitação e as variáveis que influenciam na taxa de infiltração, como frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de chuvas. Estas variáveis determinam a atuação da precipitação no transporte de contaminantes da superfície para o aquífero, em que quanto maior for a capacidade de transporte de contaminantes, maior será a vulnerabilidade do aquífero. O fator (P) é representado por dois subfatores: quantidade de precipitação [PQ] e distribuição temporal da precipitação [PI].

$$\text{Fator P} = [Pq] + [PI]$$

Por fim, o índice COP é calculado através da equação:

$$\text{COP Índex} = \text{Factor C} \times \text{Factor O} \times \text{Factor P}$$

As classes de vulnerabilidade e os valores adotados para cada fator são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Classes de vulnerabilidade pela metodologia COP.

Fator C	Redução da proteção
0 - 0.2	Muito alta
0.2 - 0.4	Alta
0.4 - 0.6	Moderada
0.6 - 0.8	Baixa
0.8 - 1.0	Muito baixa
Fator O	Redução da proteção
1	Muito baixa
2	Baixa
2 - 4	Moderada
4 - 8	Alta
8 - 12	Muito alta
Fator P	Redução da proteção
0.4 - 0.5	Muito alta
0.6	Alta
0.7	Moderada
0.8	Baixa
0.9 - 1.0	Muito baixa
Índice COP	Classe de vulnerabilidade
0 - 0.5	Muito alta
0.5 - 1.0	Alta
1.0 - 2.0	Moderada
2.0 - 4.0	Baixa

Fonte: Viás et al. (2006).

Tabela 2 – Valores atribuídos para cada fator da metodologia COP. Fonte: Viás et al. (2006).

Fator	Subfator	Variável	Variável	Valor		
C	Cenário A: áreas de recarga (cavidades cársticas)	Distância dos sumidouros (dh)	<500 m	0,0		
			500 -1000m	0,1		
			1000-1500m	0,2		
			1500-2000m	0,3		
			2000-2500m	0,4		
			2500-3000m	0,5		
			3000-3050m	0,6		
			3500-4000m	0,7		
			4000-4500m	0,8		
			4500-5000m	0,9		
		>5000m	1,0			
		Distância das Dolinas (ds)	<10m	0,0		
			10-100m	0,5		
			>100m	1,0		
		Declividade e Cobertura vegetal (sv)	≤8%	1,0		
	8-31%, elevada		0,95			
	8-31%, pouco ou ausente		0,90			
	31-76%, elevada		0,85			
	31-76% pouca ou ausente		0,80			
	Cenário B: Demais áreas do aquífero	Feições cársticas e camadas superficiais (sf)	Carste muito desenvolvido, ausente	0,25		
			Carste muito desenvolvido, permeável	0,50		
			Carste muito desenvolvido, impermeável	0,75		
			Carste pouco desenvolvido, ausente	0,50		
			Carste pouco desenvolvido, permeável	0,75		
			Carste pouco desenvolvido, impermeável	1,0		
			Carste fissurado, ausente	0,75		
			Carste fissurado, permeável	0,75		
Carste fissurado, impermeável			1,0			
Ausência de feições cársticas, ausente			1,0			
Ausência de feições cársticas, permável			1,0			
Ausência de feições cársticas, impermeável			1,0			
Declividade e cobertura vegetal (sv)	≤8%	0,75				
	8-31%, elevada	0,80				
	8-31%, pouca ou ausente	0,85				
	31-76%, elevada	0,90				
	31-76%, pouca ou ausente	0,95				
O	Solos [Os]	Textura e espessura	Argiloso, >1,0m	5,0		
			Argiloso, 0,5 - 1,0m	4,0		
			Argiloso, <0,5m	3,0		
			Siltoso, >1,0m	4,0		
			Siltoso, 0,5- 1,0m	3,0		
			Siltoso, <0,5m	2,0		
			Argilo-arenoso, >1,0m	3,0		
			Argilo-arenoso, 0,5-1,0m	2,0		
			Argilo-arenoso, <0,5m	1,0		
			Arenoso, >1,0m	2,0		
			Arenoso, 0,5-1,0m	1,0		
			Arenoso, <0,5m	0,0		
			Litologia [OL]	Litologia e faturamento (ly)	Argila	1500
					Silte	1200
					Metapelitos e rochas ígneas não fraturadas	1000
	Calcários com margas	500				
	Metapelitos e rochas ígneas fraturadas	400				
	Conglomerados e brechas cimentados ou não fraturados	100				
	Arenito	60				
	Conglomerados e brechas pouco fraturados ou cimentados	40				
	Areia e cascalho	10				
	Basaltos fraturados	5				
	Rochas cársticas fraturadas	3				
	Rochas cársticas não fraturadas	1				
	Condições de confinamento (cn)	Confinado	2,0			
		Semi-confinado	1,5			
		Não confinado	1,0			
Espessura da litologia considerada (m)		<250m	1			
		250-1.000m	2			
		1.000-2.500m	3			
	2.500-10.000m	4				
>10.000m	5					
P	Quantidade [Pq]	Média anual das precipitações no período chuvoso	>1600 mm/ano	0,4		
			>1200 e ≤1600 mm/ano	0,3		
			>800 e ≤1200 mm/ano	0,2		
			>400 e ≤ 800 mm/ano	0,3		
			<400 mm/ano	0,4		
	Intensidade [Pi]		Distribuição temporal	<10 mm/dia	0,6	
				≥10 e ≤ 20 mm/dia	0,4	
		>20 mm/ dia	0,2			

2.2 Metodologia DRASTIC

Desenvolvida na Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos por Aller *et al.* (1987), a metodologia DRASTIC é uma ferramenta que avalia a vulnerabilidade de aquíferos com diversas configurações hidrogeológicas e é amplamente utilizada em mapeamento de detalhe (THIRUMALAIVASAN *et al.*, 2003).

Essa metodologia utiliza sete variáveis em sua equação denominadas sub-índice *i*: **D** (*Depth*) profundidade do topo do aquífero em metros; **R** (*Recharge*) recarga do aquífero em mm/ano; **A** (*Aquifer material*) tipo de material do meio aquífero; **S** (*Soil*) tipo de solo; **T** (*Topography*) topografia; **I** (*Influence of the unsaturated zone*) influência da zona não saturada do solo; e, **C** (*Conductivity*) condutividade hidráulica do aquífero em cm/seg (THIRUMALAIVASAN *et al.*, 2003), descritas na Tabela 3.

Através de cálculos matemáticos, Aller *et al.* (1987) atribuiu valores para cada sub-índice, conforme a Tabela 4. Além disto, a metodologia vale-se de um sistema de peso denominado sub-índice *p*, na qual, os sub-índices *i* mais relevantes possuem pesos maiores e os menos relevantes pesos menores (Tabela 3).

Tabela 3 – Peso para cada sub-índice *i* da metodologia DRASTIC.

Fator	Descrição	Peso
Profundidade	Refere-se a profundidade entre a superfície e a zona saturada. Maiores profundidades implicam em menor chance de ocorrência de contaminação.	5
Recarga do aquífero	Refere-se ao montante de água que penetra na superfície e alcança o lençol freático. A recarga da água representa o veículo de transporte dos poluentes.	4
Material do aquífero	Refere-se as propriedades do material da zona saturada, que controla os processos de atenuação dos poluentes.	3
Solo	Representa a porção superior desgastada da zona não saturada e controla o volume de recarga do aquífero	2
Topografia	Representa a inclinação da superfície terrestre. Dita se o contaminante permanecerá na superfície ou se infiltrará para a zona saturada.	1
Influência da zona não saturada	É definido como o material da zona vadosa. Controla a passagem e atenuação dos contaminantes para a zona saturada.	5
Condutividade Hidráulica	Indica a habilidade do aquífero de transmitir a água, consequentemente determina a taxa de fluxo dos contaminantes dentro do sistema.	3

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Por fim, o grau de vulnerabilidade de um aquífero é obtido a partir da equação abaixo e é agrupado em classes de vulnerabilidade que variam de baixo à muito alto (Tabela 4).

$$Drastic = D_i D_p + R_i R_p + A_i A_p + S_i S_p + T_i T_p + I_i I_p + C_i C_p$$

Tabela 4 – Peso dos sub-índices e classificação da vulnerabilidade pelo método DRASTIC.

26	71	126	180	226
Baixo	Médio	Alto	Muito alto	
Profundidade		Valor atribuído	Peso	
0 - 1.5		10	5	
1.5 - 4.5		9		
4.5 - 9		7		
9 - 15		5		
15 - 22.5		3		
2.5 - 30		2		
>30		1		
Recarga de aquífero		Valor atribuído	Peso	
<51		1	4	
51 - 102		3		
102 - 178		6		
178 - 254		8		
> 254		9		
Litotipo		Valor atribuído	Peso	
Folhelhos maciço		1 - 3	3	
Ígneas metamórficas		2 - 5		
Ígnea metamórficas intemperizadas		3 - 5		
Till glacial		4 - 6		
Arenito acamadado, calcário e folhelho		5 - 9		
Arenito maciço		4 - 9		
Calcário maciço		4 - 9		
Arenito e cascalho		4 - 9		
Basalto		2 - 10		
Calcário cárstico		9 - 10		
Tipo de solo		Valor atribuído	Peso	
Fino ou ausente		10	2	
Cascalho		10		
Arenoso		9		
Turfoso		8		
Argila agregada e/ou contraída		7		
Marga arenosa		6		
Marga		5		
Argila margosa		3		
Lixo esterco		2		
Argila desagregada e não expansível		1		

Condutividade hidráulica	Valor atribuído	Peso
40.7 – 81.5	8	3
4.1 – 12.2	2	
28.5 – 40.7	6	
12.2 – 28.5	4	
0 -4.1	1	
>81.5	10	
Inclinação do relevo	Valor atribuído	Peso
0 -1	10	1
1 – 6	9	
6 – 12	5	
12 – 18	3	
18	1	
Zona vadosa	Valor atribuído	Peso
Camada confinante	1	5
Silte / argila	2-6	
Folhelho	2-5	
Calcário	2-7	
Arenito	4-8	
Calcário acamadado, arenito, folhelho	4-8	
Areia e cascalho com significativo silte e argila	4-8	
Ígneas metamórficas	2-8	
Areia e cascalho	6-9	
Basalto	2-8	
Calcário cárstico	8-10	

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987).

2.3 Metodologia AVI

Desenvolvida por Stempvoort *et al.* (1992) no Instituto Nacional de Pesquisa Hidrológica do Canadá (NHRI), a metodologia AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) é responsável por avaliar a vulnerabilidade de aquíferos de forma simples, devido a utilização de poucos parâmetros nos seus cálculos matemáticos (SANTOS; PEREIRA, 2011).

O principal índice considerado é a resistência hidráulica (C), que reflete a resistência da zona vadosa ao fluxo vertical, ou seja, o tempo que os poluentes levam para atravessar a zona não saturada (BUSICO *et al.*, 2019). O fator (C) é obtido pela divisão dos subfatores condutividade hidráulica [D_i] e espessura da camada sedimentar (K_i).

O fator D_i , nomeada como condutividade hidráulica, representa a taxa de fluidez da água no sistema, expressando a velocidade que os contaminantes se movem através do aquífero. Desta forma, quanto maior o D_i de uma área, maior será o transporte de contaminantes, o que favorece a maior vulnerabilidade de um aquífero (BUSICO *et al.*, 2019).

O fator K_i representa a espessura da camada sedimentar do sistema, na qual, considera-se que maiores espessuras de camada favorecem a diluição dos contaminantes até o aquífero, proporcionando uma menor vulnerabilidade do sistema. Assim como o cenário oposto (ZHONG, 2005).

Por fim, o grau de vulnerabilidade de um aquífero é obtido através da equação abaixo e é agrupado em classes de vulnerabilidade que variam de baixo à muito alto, conforme tabelas 5 e 6.

$$C = \sum D_i / K_i$$

Tabela 5 – Classes de condutividade hidráulica pelo metodologia AVI.

Condutividade hidráulica	
Classe	Valor (m/dia)
Baixa	0,07
Moderadamente baixa	0,31
Moderada	1,00
Moderadamente alta	2,25
Alta	3,75
Muito alta	5,00

Fonte: Van stempvoort et al. (1992).

Tabela 6 – Classes de vulnerabilidade pelo metodologia AVI.

Resistência hidráulica (dias)	Classes de vulnerabilidade
0-10	Extremamente alta
10-100	Alta
100-1.000	Moderada

Fonte: Van stempvoort et al. (1992).

2.4 Metodologia GOD

A metodologia GOD, desenvolvida no Reino Unido por Foster (1987), é uma ferramenta que avalia a vulnerabilidade de aquíferos de forma básica, devido a utilização de poucos variáveis nos cálculos matemáticos (RIBEIRO *et al.*, 2001; ONI *et al.*, 2017).

Na sua equação, a metodologia utiliza três variáveis com pesos iguais denominadas sub-índice *i*, sendo elas: Tipo de Aquífero (G); Litologia e Grau de Consolidação da Zona Vadosa ou Camadas Confinantes (O); e Profundidade do nível d'água ou da base confinante do aquífero (D) (RIBEIRO *et al.*, 2011; GUETTAIA *et al.*, 2017; MFONKA *et al.*, 2018).

O fator G, que corresponde ao tipo de aquífero, é classificado como livre, semi-confinado ou confinado. Cada tipo de aquífero influencia na quantidade de contaminantes vindos da superfície que é capaz de penetrar no lençol freático (CUTRIM & CAMPOS, 2010).

O fator O corresponde a litologia e o grau de consolidação da zona vadosa. Ele influencia na transmissividade de contaminantes até o aquífero e está intrinsecamente associado as variações de porosidade e/ou permeabilidade das rochas. A respeito disso, Cutrim & Campos (2010) explica que uma rocha de granulometria grossa tem menor capacidade de atenuação dos contaminantes quando comparado a uma rocha de granulometria fina.

O fator D corresponde a profundidade do nível d'água, desta forma, também representa a profundidade que o contaminante terá de percorrer para alcançar a zona saturada do aquífero (CUTRIM; CAMPOS, 2010).

Por fim, o grau de vulnerabilidade de um aquífero é obtido através da equação abaixo e é agrupado em classes de vulnerabilidade, que variam de insignificante à extrema, conforme Figura 1 e Tabela 7.

$$GOD = G_i * O_i * D_i$$

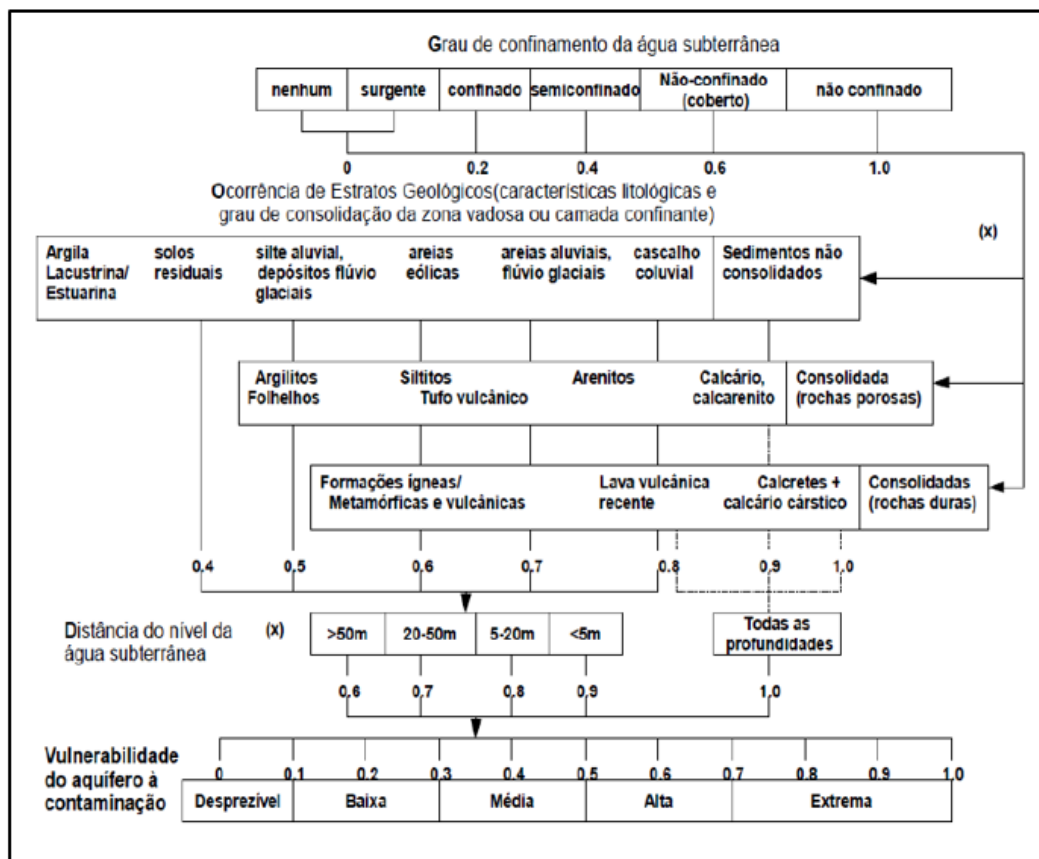


Figura 1 – Classes de vulnerabilidade pela metodologia GOD.

Fonte: Foster (1987).

Tabela 7 – Classes de vulnerabilidade pela metodologia GOD.

Classes de vulnerabilidade	Definição Correspondente
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação
Alta	Vulnerabilidade a muitos contaminantes, exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados.
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).

Fonte: adaptado de Foster (1987).

3. Resultados e discussão

Para estabelecer comparações entre as metodologias apresentadas, contou-se com os trabalhos de Vías *et al.* (2006), Kazakis & Voudouris (2011), Fraga *et al.* (2013) e Putranto & Yusrizal (2018).

Viás *et al.* (2006) utilizaram as quatro metodologias em foco (COP, DRASTIC, AVI e GOD), para o estudo da vulnerabilidade de dois aquíferos cársticos, o Sierra de Lbar e o Torremolinos, no sul da Espanha. A respeito da litologia, o primeiro aquífero é constituído majoritariamente por calcários carstificados do Jurássicos, e o segundo é constituído por mármore do Triássico menos carstificado.

A partir dos resultados cartográficos (Figura 2 e 3), concluiu-se que o mapa obtido através da metodologia COP apresentou mais delimitações das classes de vulnerabilidade do que as demais metodologias. Isso ocorreu porque o COP utiliza variáveis específicas para aquíferos cársticos, possibilitando resultados mais satisfatórios nesse tipo de sistema. No entanto, devido à essa especificidade, seu uso foi desaconselhado para outros tipos de aquíferos. Além disto, essa metodologia baseia-se em oito variáveis e por isso necessita de um volumoso banco de dados, sendo normalmente utilizado em escala de detalhe.

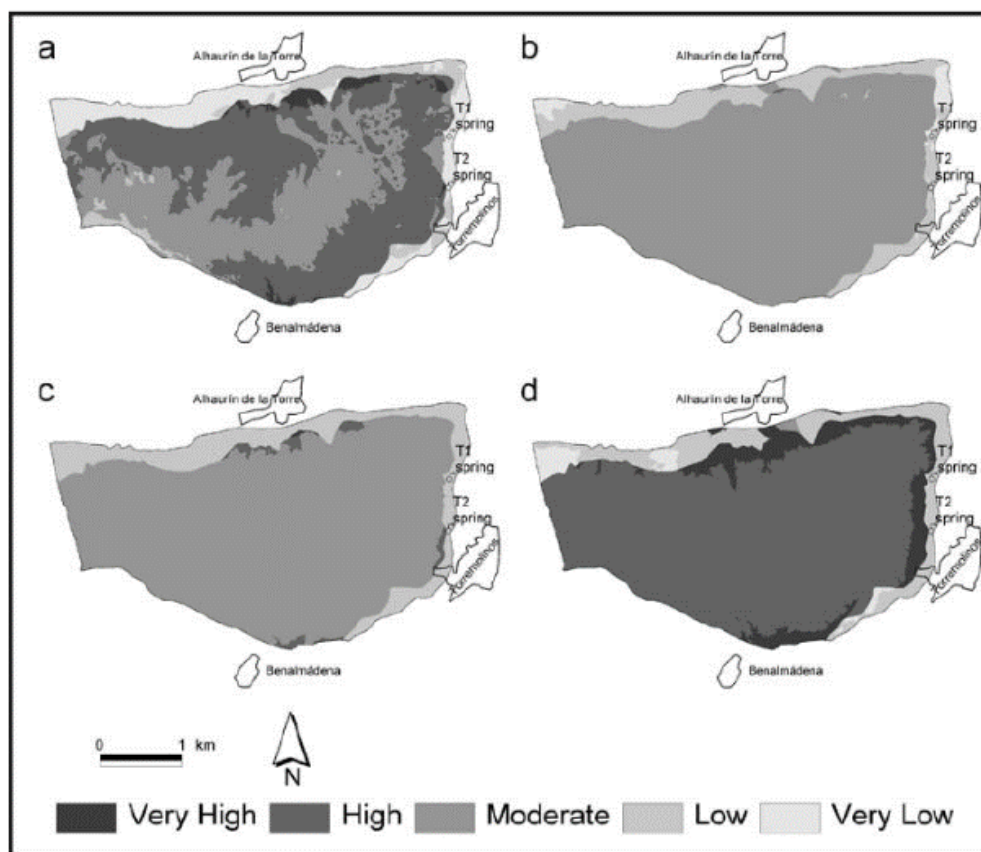


Figura 2 – Mapas de vulnerabilidade obtidos a partir as metodologias COP (a), DRASTIC (b), GOD (c) e AVI (d) em Torremolinos.

Fonte: Viás *et al.* (2006).

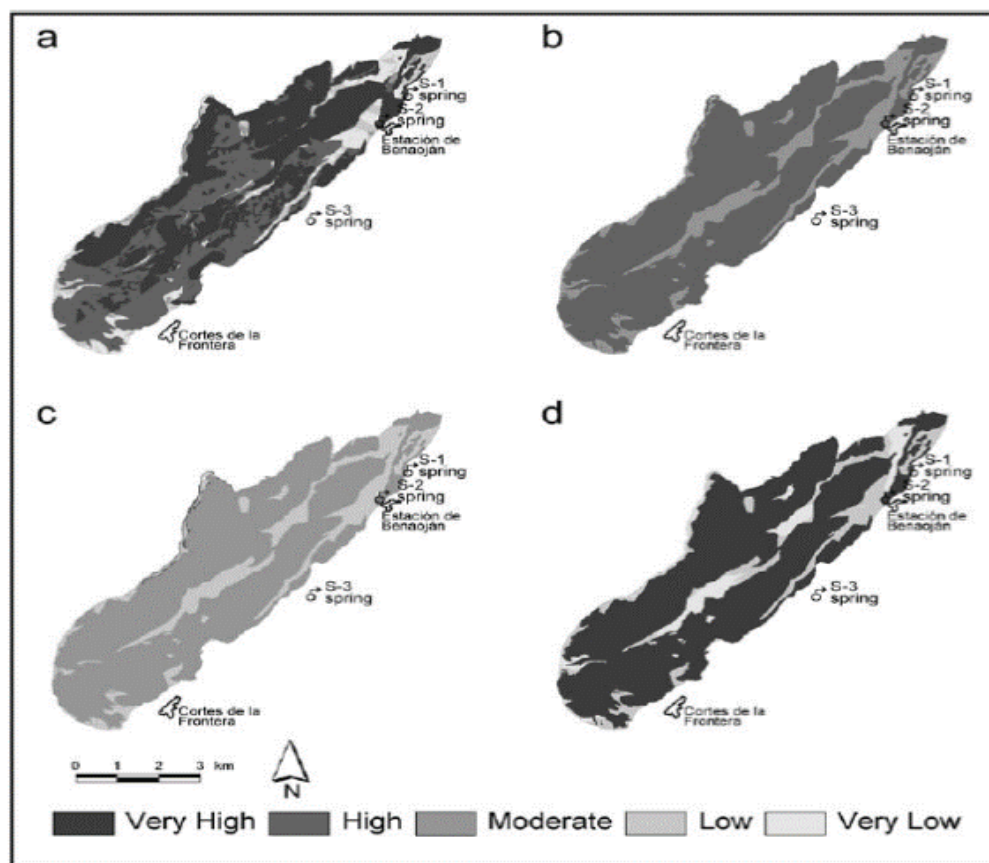


Figura 3 – Mapas de vulnerabilidade obtidos a partir das metodologias COP (a), DRASTIC (b), GOD (c) e AVI (d) em Sierra de Libar.

Fonte: Viás et al. (2006).

Fraga *et al.* (2013) utilizaram os métodos DRASTIC, AVI e GOD para o estudo da vulnerabilidade da bacia hidrográfica do rio Sôrdo, em Portugal. Essa bacia é constituída majoritariamente por metassedimentos Paleoproterozoicos, cobertos por sedimentos aluviais.

A partir dos resultados cartográficos (Figura 4), concluiu-se que o mapa obtido através da metodologia DRASTIC apresentou mais delimitações de classes de vulnerabilidade do que as demais metodologias. Tal resultado pode estar associado a formulação dessa metodologia, que é suportada por sete variáveis, o que também lhe garante maior confiabilidade de resultados.

Além disso, Fraga *et al.* (2013) sugerem que por ser uma metodologia que necessita de um banco de dados volumoso, é mais indicado para estudos de escala de detalhe e com disponibilidade de dados.

As desvantagens dessa metodologia, segundo Putranto & Yusrizal (2018), referem-se: *i.* ao sistema de pesos adotado, considerado como cálculo matemático subjetivo; *ii.* à dificuldade de precisar a recarga da água subterrânea, já que esta variável necessita de informações a respeito da evapotranspiração, chuva e escoamento da água; *iii.* à dúvida quanto à necessidade da topografia nos cálculos, já que é uma variável menos influente no resultado final.

O mapa obtido através da metodologia GOD apresentou intermediárias delimitações de classes de vulnerabilidade quando comparado aos demais mapas (Figura 4). Este resultado reflete a simplicidade da formulação da metodologia, que utiliza no seu cálculo apenas três variáveis. Devido a isso, o GOD pode ser aproveitado para rápidos diagnósticos de vulnerabilidade, para decisões ambientais urgentes e para escalas regionais que precisam de pouco detalhamento.

A desvantagem da metodologia GOD, segundo Putranto & Yusrizal (2018), trata-se dessa simplicidade explanada, que repercute nas limitações das delimitações das classes de vulnerabilidade, o que resulta em uma menor confiabilidade dos resultados.

Por fim, a metodologia AVI apresentou a menor delimitação das classe de vulnerabilidade quando comparado aos demais mapas (Figura 4), sendo por isso considerada a menos eficaz e realista das três ferramentas. Por outro lado, devido a simplicidade dos seus cálculos, que considera apenas duas variáveis, foi reconhecida como uma ferramenta capaz de oferecer rápidos diagnósticos quanto a vulnerabilidade de uma área, podendo ser utilizadas para decisões ambientais urgentes e para escalas regionais.

Contudo, segundo Putranto & Yusrizal (2018), essa metodologia consegue demonstrar uma melhor variação da resistência hidráulica nos resultados, justamente por ser baseada exclusivamente em variáveis físicas.

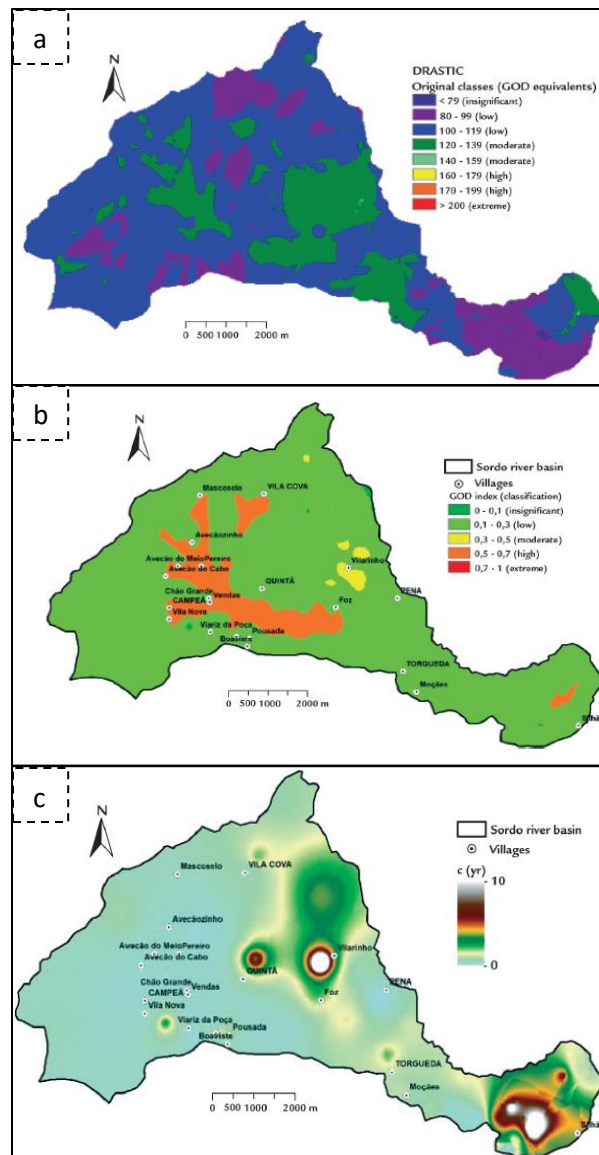


Figura 4 – Mapa de vulnerabilidade referente aos métodos (a) DRASTIC, (b) GOD e (c) AVI na bacia hidrográfica do rio Sôrdo.

Fonte: Fraga et al. (2013).

Kazakis & Voudouris (2011) utilizaram os métodos DRASTIC, AVI e GOD para o estudo da vulnerabilidade da bacia de Florina, que é um sistema constituído majoritariamente por rochas cristalinas.

Os resultados cartográficos obtidos foram semelhantes aos de Fraga *et al.* (2003), mas além disso, Kazakis & Voudouris (2011) utilizaram a análise de regressão linear para obter uma matriz de correlação linear (Tabela 8).

A matriz obtida entre as metodologias GOD e o DRASTIC apresentou valor acima de 0.5, devido a isso, é possível sugerir associação entre elas. Kazakis & Voudouris (2011) justificou esse resultado afirmando que o primeiro método utiliza três variáveis existentes na equação do segundo, e por isso, o GOD pode ser considerado uma versão simplificada do DRASTIC.

Já a matriz obtida entre as metodologias DRASTIC e AVI apresentou valor abaixo de 0.5, por isso sugere-se pouca associação entre elas. Esse resultado foi sustentando a partir da comparação entre os mapas de vulnerabilidade dessas metodologias, que apresentaram significativas diferenças quanto a delimitação das classes de vulnerabilidade.

Tabela 8 – Matriz de correlação linear das metodologias GOD, AVI e DRASTIC.

Matriz de correlação	GOD	AVI	DRASTIC
DRASTIC	0.76	0.27	1.00
AVI	0.46	1.00	
GOD	1.00		

Fonte: Kazakis & Voudouris (2011).

Outros estudiosos obtiveram resultados semelhantes aos apresentados, como Jiménez *et al.* (2004) que utilizaram as metodologias DRASTIC, GOD, e AVI no estudo do aquífero Zaachila, no México; Ekwere *et al.* (2017) que utilizaram as mesmas metodologias no estudo do aquífero Oban Massif, no Sudeste da Nigéria; Kemerich *et al.* (2020) que utilizaram as metodologias DRASTIC e GOD no estudo da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, no Brasil; e Borges *et al.* (2017) que utilizaram as metodologias DRASTIC e GOD no estudo do aquífero Serra Geral, no Brasil.

Segue abaixo quadro comparativo dispondo das principais conclusões obtidas sobre as metodologias COP, DRASTIC, GOD e AVI (Tabela 9).

Tabela 9 – Comparação entre as metodologias COP, DRASTIC, GOD e AVI.

COMPARAÇÃO	COP	DRASTIC	GOD	AVI
Divisão de classes de vulnerabilidade	Maior	Maior	Intermediário	Menor
Confiabilidade	Alta	Alta	Intermediária	Baixa
Facilidade de aplicação	Menor	Menor	Maior	Maior
Escala de estudo	Escala de detalhe	Escala de detalhe	Escala regional	Escala regional
Hidrogeologia	Aquífero cárstico	Aquífero fissural Aquífero porosos	Aquífero fissural Aquífero porosos	Aquífero fissural Aquífero poroso
Orçamento	Maior	Maior	Menor	Menor
Parâmetros físicos	Não	Sim	Não	Sim
Parâmetros Hidrogeológicos	Sim	Sim	Sim	Não
Sistema de peso de parâmetros	Não	Sim	Não	Não

Fonte: Autoria própria.

4. Considerações finais

As metodologias COP, DRASTIC, GOD e AVI são utilizadas no estudo de vulnerabilidade de aquíferos, sendo representadas a partir de resultados cartográficos que apresentam delimitações de classes de vulnerabilidade, que variam, de maneira geral, de muito baixa à extrema.

A metodologia COP foi considerada mais apropriada para o estudo de vulnerabilidade de aquíferos cársticos, já que utiliza critérios específicos para este tipo de sistema, sendo capaz de diferenciar as classes de vulnerabilidade de maneira mais realista. Todavia, devido a esta especificidade, torna-se um método inviável para outros tipos de aquíferos. Além disto, pela necessidade de muitas variáveis em seu cálculo, é melhor aplicado em escalas de detalhe e demanda um volumoso banco de dados para sua execução.

A metodologia DRASTIC foi a que obteve melhores resultados quanto a delimitação das classes de vulnerabilidade em mapas de aquíferos fissurais e porosos, justamente devido a utilização de sete variáveis físicas e hidrogeológicas. No entanto, devido a necessidade de muitos dados, foi considerada uma ferramenta com elevado custo de aplicação, mais apropriada para escalas de detalhe.

A metodologia GOD utiliza três variáveis em seus cálculos, e por isso, apresentou mapas com intermediárias delimitações de classes de vulnerabilidade quando comparado às demais metodologias. Contudo, por tratar-se de uma metodologia com uma formulação simples, foi considerada apropriada para escala regional e para estudos com limitações de dados e/ou orçamento, principalmente de aquíferos fissurais e porosos.

A metodologia AVI considera duas variáveis físicas em seus cálculos, e por isso, apresentou mapas com menores delimitações de classes de vulnerabilidade quando comparado às demais metodologias. No entanto, devido a simplicidade de sua formulação, pode ser utilizada em escalas em regionais e em estudos limitados quanto à disponibilidade de dados e/ou orçamento, principalmente de aquíferos fissurais e porosos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal da Bahia (UFBA), ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CNPq) pelo apoio à pesquisa, possibilitando o desenvolvimento de estudos ambientais.

Referências

- Abdullah, O.T.; Ali, S.S.; Al-ansari, A.N; Knutsson, S. Assessment of groundwater vulnerability to pollution using two different vulnerability models in Halabja-Saidsadiq Basin, Iraq, *Groundwater for Sustainable Development*, v.10, 03-05, 2020.
- Albinet, M.; Margat, J. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull BRGM 2me Series*, v. 3, n.4, 13-22, 1970.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H. AND PETTY, R. J. DRASTIC. DRASTIC: *A standardized system for evaluating ground-water pollution potential using hydrogeological setting*. Office of Research and Development. Environmental Protection, Agency USA, 1987.
- Babiker, S.I.; Mohamed, A.A.M.; Hiyama, T.; Kato, K. A GIS-based DRASTIC modiciel for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, v. 345, n.1, 127-140, 2005.
- BACHMAT, Y. & COLLIN, M. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. In: DUIJVENBOODEN, V.W.; WAEGENINGH, V.G.H. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceeding and Information. n. 38, 1987. p. 297-307.
- Borges, M.V.; Athayde, B.G.; Reginato, R.A.P. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. *Águas subterrâneas*, v.31, n.4, 327-337, 2017.

- Busico, G.; Kazakis, N.; Cuoco, E.; Colombani, N.; Tedesco, D.; Voudouris, K.; Astroicco, M. A novel hybrid method of specific vulnerability to anthropogenic pollution using multivariate statistical and regression analyses. *Water Research*, v.171, n.1, 12-13, 2019.
- Cartel, A. D., Palmer, R. C.; Monkhouse, R. A. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice, particularly with respect to nitrate. *National Institute Public Health and Environmental Hygiene*, v.3, n.1, 38, 1987.
- Cutrim, O.A.; Campos, G.E.J. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.29, n.3, 405-410, 2010.
- Ekwere, A; Edet, A. A Comparative Assessment of Vulnerability of the Oban Massif Aquifer System, SE-Nigeria, Using DRASTIC, GOD and AVI Models. *Science and International Journal of Engineering Investigations*, v.6, n.1, 68-78, 2017.
- Fraga, C.; Fernandes, L.; Pacheco, F.; Reis, C. R.; Moura, J. Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Sordo River Basin, Northeast of Portugal. *Revista Escola de Minas*, v.66, n.1, 49-58, 2013.
- FOSTER, S.S.D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden, W.V.; Waegeningh, H.G. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants* TNO Committee on hydrological research, the Hague. Proceeding and Information. n. 38, 1987. p.69-86.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. Pan American Health Organization: World health Organization, 1988. p.51.
- Guettaia, S.; Hacini, M., Boudjema, A.; Zahrouna, A. Vulnerability assessment of an aquifer in an arid environment and comparison of the applied methods: case of the mio-plio-quadernary aquifer. *Energy Procedia*, v.119, n.1, 482-489, 2017.
- HIRATA, R.C.A.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos. In: Feitosa, C.A.F.; FILHO, M.J.; FEITOSA, C.E.; DEMETRIO, A.G.L. *Hidrologia: conceitos e aplicações*, 3ª edição. Rio de Janeiro, CPRM, 2008. p.812.
- Jiménez, B.S.I.; Enriquez, C.J.; Alatorre-zamora, M.A. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*, v.4, n.3, 283-300, 2004.
- Kazakis, N.; Voudouris, K. Comparison of three applied methods of groundwater vulnerability mapping: A case study from the Florina basin, Northern Greece. *Advances in the Research of Aquatic Environment*, v.235, n.1, 361-365, 2011.
- Kemerich, C. D. P.; Martins, R.S.; Kobiyama, M.; Filho, D.V.L.L.; Borda, F.W.; Souza, B.E.E.; Fernandes, D.G. Análise da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea: comparativo entre a metodologia GOD e DRASTIC. *Revista de Geociências do Nordeste*, v.6, n.2, 45-51, 2020.
- Le grand, H. System for evaluating contamination poten-tial for some waste sites. *American Water Work Association Journal*, v.56, n.8, p. 959-974, 1964.
- Mfonka, Z.; Ngoupayou, N.R.J.; Ndjigui, A.D.P; Kpoumie, P.D.A.; Zammouri, M.; Ngouh, A.N.; Mouncherou, F.O.; Rakotondrabe, F. GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Fouban (Western-Cameroon). *Groundwater for Sustainable Development*, v.7, n.2, 250-264, 2018.
- NOSSA, B. C.T. *Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP*. Salvador, 2018. 81-90f. Tese (doutorado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2011.

- Paula, S. M. E.; Souza, N. J. M. Sistemas de informações geográficas na análise da vulnerabilidade ambiental da bacia do rio Ceará – CE. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 63/64, n.4, p. 515-525, 2011.
- Putranto, T.; Yusrizal, S. Determining the groundwater vulnerability using the aquifer vulnerability index (AVI) in the Salatiga groundwater basin in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, v.316, 316-325, 2018.
- Oni, T.; Omosuyi, G; Akinlalu, A. Groundwater vulnerability assessment using hydrogeologic and geoelectric layer susceptibility indexing at Igbara Oke, Southwestern Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v.6, n.2, 125, 2017.
- Santos, M.G.; Pereira, S.Y. Método AVI (Aquifer Vulnerability Index) para a classificação da vulnerabilidade das águas subterrâneas na região de Campos dos Goytacazes. *Engenharia Sanitária Ambiental*, Rio de Janeiro, v.16, n.3, 281-290, 2011.
- STEMPVOORT, V.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. *A Method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada*. Groundwater na contaminant Project. Prairie Provinces Water Board, Edição 114, 1992.
- Ribeiro, M.D.; Rocha, F.W.; Garcia, V.J.A. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da Sub-bacia do Rio Siriri, Sergipe. *Revista águas subterrâneas*, v.5, n.1, 95-96, 2011.
- REBOUÇAS, C. A. Importância das águas subterrâneas. In: Feitosa, C.A.F.; FILHO, M.J.; FEITOSA, C.E.; DEMETRIO, A.G.L. *Hidrologia: conceitos e aplicações*, 3ª edição, Rio de Janeiro, CPRM, 2008. p. 13-14.
- Seller, L.; Canter, L. Summary of selected groundwater quality impact assessment methods. *NCGWR Report*, Norman, Oklahoma, USA, 142, 1980.
- Taltasse, P. Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). Universidade de São Paulo (IGc), *Publ. Avulsa*, n.1, 1972.
- Thirumalaivasan, D.; Karmegam, M.; Venugopal, K. AHP-Drastic: software for specific aquifer vulnerability assessment using drastic model and GIS. *Environmental Modelling & Software*, v.18, n.1, 645-656, 2003.
- Vías, J. M.; Andreo, B.; Perles, M. J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jiménez, P. Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. Em, Karst and Environment, *Hidrogeology Journal*, v.14, n.6, 75-83, 2002.
- Vías, J. M.; Andreo, B.; Perles, M. J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jiménez, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hidrogeology Journal*, v.14, n.1, 912-925, 2006.
- Vrba, J.; Romijn, E. Impacto of agricultural activities on groundwater. International Association of Hydrogeologists, *International Contribution to Hydrogeology*, 05, 1986.
- Yu, X.; Michael, A. H. Mechanisms, configuration typology, and vulnerability of pumping-induced seawater intrusion in heterogeneous aquifers. *Advances in Water Resources, Geophysical Research Letters*, v.46, 2553-2562, 2019.
- ZWAHLEN, F. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. European Commission COST Action 620. Directorate-General Science, Research and Development. European Commission, 2003. 297p.
- Zhong, Z.S. A discussion of groundwater vulnerability assessment methods. *Earth Sci Journal*, v.16, n.1, 12-13, 2005.