



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 6, nº 2 (2020)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19080>



ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: COMPARATIVO ENTRE A METODOLOGIA GOD E DRASTIC

Pedro Daniel da Cunha Kemerich¹; Sérgio Roberto Martins²; Masato Kobiyama³; Leônidas Luiz Volcato Descovi Filho⁴; Willian Fernando de Borba⁵; Éricklis Edson Boito de Souza⁶; Gabriel D'ávila Fernandes⁷

¹Doutor em Engenharia Ambiental, Pró-Reitoria de Graduação, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Bagé/RS, Brasil.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9369-769X>
Email: eng.kemerich@yahoo.com.br

²Doutor em Agronomia, Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal da Fronteira do Sul (UFFS), Laranjeiras do Sul/PR, Brasil.
ORCID:
Email: sergio.martins@uffs.edu.br

³Doutor em Engenharia Florestal, Departamento de Obras Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0615-9867>
Email: masato.kobiyama@ufrgs.br

⁴Doutor em Geografia, Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém/PA, Brasil.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9245-308X>
Email: leonprs@gmail.com

⁵Doutor em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen/RS, Brasil.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5717-1378>
Email: borbawf@gmail.com

⁶Mestrando em Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, Brasil.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8138-8040>
Email: ericklisboito@gmail.com

⁷Doutorando em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1106-3838>
Email: enggabrielfernandes@gmail.com

Resumo

A água é um recurso natural imprescindível para todas as formas de vida, porém, atividades antrópicas, aumento populacional e urbanização estão alterando a qualidade dos mananciais superficiais, tornando indisponível para determinados usos. Surge como alternativa para complementar ou até mesmo substituir o uso da água superficial a água subterrânea, porém, e necessita-se de um controle para que atividades antrópicas não venham a contaminar o aquífero. Nesse sentido, esse estudo tem por objetivo comparar os métodos DRASTIC e GOD na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, no estado do Rio Grande do Sul. Ambos os métodos tiveram suas classes de vulnerabilidade entre insignificante e extrema, com maior predominância da vulnerabilidade média (DRASTIC) e alta (GOD). O método GOD concentrou 89,91 % da vulnerabilidade em 2 classes (Média e alta), já o DRASTIC apresentou 66,15 % nessas mesmas classes. Assim, o DRASTIC, na área de estudo apresentou, uma maior variabilidade das classes, indicando resultados mais consistentes, e com parâmetros obtidos a campo. Porém, o GOD é mais simplificado pelo número de variáveis necessárias para sua aplicação. Assim, destaca-se a importância da aplicação dessas metodologias para fornecer subsídios para tomadas de decisões para gestores dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Aquífero, Hidrogeologia, Susceptibilidade a contaminação.

ANALYSIS OF NATURAL VULNERABILITY TO GROUNDWATER CONTAMINATION: COMPARISON BETWEEN THE GOD AND DRASTIC METHODOLOGIES

Abstract

Water is an essential natural resource to all forms of life; however, anthropic activity, population increase and urbanization are changing the quality of shallow springs and making them

unavailable for certain uses. Groundwater emerges as alternative to complete or even replace surface water; however, it is essential to have control over antropic activities so they would not contaminate aquifers. Thus, the aim of the present study is to compare the DRASTIC and GOD methods applied to the Vacacaí-Mirim River basin, in Rio Grande do Sul State. Both methods recorded vulnerability classes between insignificant an external, with higher prevalence of moderate (DRASTIC) and high (GOD) vulnerability. The GOD method held 89.91% of the vulnerability in 2 classes (moderate and high), whereas the DRASTIC one recorded 66.15% in these same classes. The DRASTIC method presented the highest class vulnerabilities in the study site. This outcome regards more consistent results and similar to parameters recorded in the field. Nevertheless, GOD is simpler due to the number of variables necessary for its application. It is important highlighting the importance of applying these methodologies to provide subsidies for decision-making by water resource managers.

Keywords: Aquifer, Hydrogeology, Susceptibility to contamination.

ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD NATURAL A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA: COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA GOD Y DRASTIC

Resumen

El agua es un recurso natural esencial para todas las formas de vida, sin embargo, las actividades humanas, el crecimiento de la población y la urbanización están cambiando la calidad de las fuentes de agua superficial, haciéndolas no disponibles para ciertos usos. Es una alternativa para complementar o incluso sustituir el uso de las aguas superficiales a las aguas subterráneas, sin embargo, y las necesidades es un control para que las actividades humanas no vienen a contaminar el acuífero. En este sentido, este estudio tiene como objetivo comparar los métodos GOD y DRASTIC en la cuenca del río Vacacaí-Mirim, en el estado de Rio Grande do Sul. Ambos métodos tenían sus clases de vulnerabilidad entre insignificante y extrema, con un mayor predominio de vulnerabilidad media (DRASTIC) y alta (GOD). El método GOD concentró el 89.91% de la vulnerabilidad en 2 clases (media y alta), mientras que DRASTIC presentó el 66.15% en estas mismas clases. Por lo tanto, DRASTIC, en el área de estudio, presentó una mayor variabilidad de clase, lo que indica resultados más consistentes y con parámetros obtenidos en el campo. Sin embargo, GOD se simplifica por la cantidad de variables requeridas para su aplicación. De este modo, se pone de relieve la importancia de la aplicación de estas metodologías para proporcionar información para la toma de decisiones para los administradores de los recursos hídricos.

Palabras-clave: Acuífero, hidrogeología, susceptibilidad a la contaminación.

1. INTRODUÇÃO

Muitas atividades desenvolvidas na superfície terrestre apresentam um potencial de contaminação dos recursos naturais, isso ocorre devido ao crescimento e desenvolvimento

populacional e industrial. Assim, os autores Guo, Kuai e Lio (2019) citam que esse crescimento está associado a questões ambientais cada vez mais graves, como poluição do ar, escassez e poluição da água, desertificação e poluição do solo.

No que se refere aos recursos hídricos, a contaminação dos mananciais superficiais causados principalmente pelo lançamento de efluentes líquidos sem o tratamento adequado impossibilitando o consumo a determinados usos, tornam a água subterrânea como uma forma de suprir essa lacuna que envolve o abastecimento público. Porém, se explorada de forma inadequada, pode se tornar um grave problema ambiental.

Nesse sentido, surgem estudos envolvendo as questões hidrogeológicas que visam promover a gestão adequada desses recursos (Terra et al., 2016; Borba et al., 2016a, 2016b; Ribeiro et al., 2017; Silva et al. 2017; Rosa et al., 2019; Favaretto et al., 2020; Ncibi et al. 2020). Esses estudos têm por objetivo, identificar quais as áreas mais susceptíveis a contaminação, a partir da análise de uma gama de parâmetros.

Dentre as principais ferramentas utilizadas para indicar quais as áreas mais adequadas para o desenvolvimento de atividades potencialmente poluidoras, destaca-se as metodologias que estimam a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação. Essas metodologias, geralmente necessitam de informações que envolvem ensaios à campo, ou ainda em laboratório, ou ainda utilizam informações disponíveis em banco de dados de agências governamentais.

No meio de uma gama de metodologias existentes, destacam-se o método DRASTIC (*Depth to water, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact the vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer*) descrito por Aller et al. (1987), GOD (*Groundwater confinement, Overling strata, Depth to groundwater*) e POSH (*Poluent Origin and its Surchage Hydraulic*) propostos por Foster et al. (2002; 2006). Além destes, recentemente Ribeiro (2005) modificou o método DRASTIC (Aller et al., 1987) original, retirando duas variáveis (*Recharge, Aquifer media, Soil media, Conductivity of the aquifer*) e acrescentou o parâmetro LU (*Land Use*), sendo esse método conhecido como Índice de Susceptibilidade (IS), muito utilizado em pesquisas realizadas em Portugal - POR.

Nesse contexto, envolvendo os mais variados tipos de métodos que visam estimar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, esse estudo tem por objetivo comparar os métodos DRASTIC (Aller et al., 1987) e GOD (Foster et al., 2002; 2006) na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, no estado do Rio Grande do Sul.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim está localizada na parte central do Estado do Rio Grande do Sul, entre as latitudes de 29° 36' 55"S e 29° 39' 50"S e longitudes de 53° 46' 30"W e 53° 49' 29"W, abrangendo uma área total de 1145,7 km² (CASAGRANDE, 2004). Está inserida em três grandes compartimentos geomorfológicos, com características morfológicas e geológicas distintas: Região do Planalto, do Rebordo do Planalto e da Depressão Central ou Periférica.

Na Região do Planalto é onde se localizam suas nascentes, à

altitude entre 300 m e 480 m, a qual é formada pelos eventos vulcânicos Jura-cretáceos que cobriram a Bacia Sedimentar do Paraná, ocorrido no Mesozóico, com a presença de basaltos e arenitos “intertraps”. A região é caracterizada pela presença de um relevo ondulado e suavemente ondulado, resultante do trabalho de dissecação fluvial na superfície do Planalto. A drenagem tem padrão dendrítico, com vales em V ou de fundo plano.



Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS. Fonte: Kemerich et al. (2014).

A área do Rebordo do Planalto localiza-se na transição entre o Planalto e a Depressão Central. A sua topografia caracteriza-se por ser formada por escarpas abruptas, drenagem fluindo no sentido da Depressão Central e padrão dendrítico, com presença marcante de vales em V. A área da Depressão Central ou Periférica é constituída por rochas sedimentares da bacia hidrográfica do rio Paraná, que datam do Paleozóico e Mesozóico (Triássico), encobertas, localmente, por sedimentos cenozóicos e recentes (planícies aluviais). Na região da Depressão Central a topografia é mais ou menos plana e suavemente ondulada, com morros de forma arredondada (Casagrande, 2004).

O clima, na área da bacia hidrográfica, pela classificação climática de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano e os solos predominantes, de acordo com o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), são, na Região do Planalto os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Alumínicos, em alguns locais associado aos NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos; na Região do Rebordo do Planalto os NEOSSOLOS LITÓLICOS, ocorrendo também CHERNOSSOLOS ARGILÚVICOS e; na Depressão Central, os PLANOSSOLOS e os CHERNOSSOLOS ARGILÚVICOS (CASAGRANDE, 2004). A vegetação natural, na área de Planalto e do Rebordo do Planalto, é constituída, predominantemente, por floresta do tipo subtropical e na Depressão Central ou Periférica de campos de pastagem natural. Em meio aos campos, é comum a presença de capões isolados de mata de pequeno e grande porte (SEPLAN, 1986).

2.2. Estimativa da vulnerabilidade pelo sistema GOD (Foster et al., 2002; 2006)

Foram utilizadas as informações disponíveis no portal do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), mantido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) do Serviço Geológico do Brasil, no portal: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Assim, utilizou-se as informações como perfis geológicos, coordenadas UTM, nível estatística, dentre outras. Foram coletadas as informações de 121 poços tubulares localizados nos municípios integrantes da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim, RS.

A vulnerabilidade é obtida a partir do produto das variáveis G (Grau de confinamento da água subterrânea), O (Ocorrência de extratos de cobertura) e D (Distância do nível freático). Assim, a vulnerabilidade é classificada como insignificante (valores entre 0 e 0,1), baixa (0,1 a 0,3), média (0,3 a 0,5), alta (0,5 a 0,7) e extrema (0,7 a 1,0).

Assim, a Figura 2 mostra um exemplo de aplicação do sistema GOD (Foster et al., 2002; 2006) para a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS.

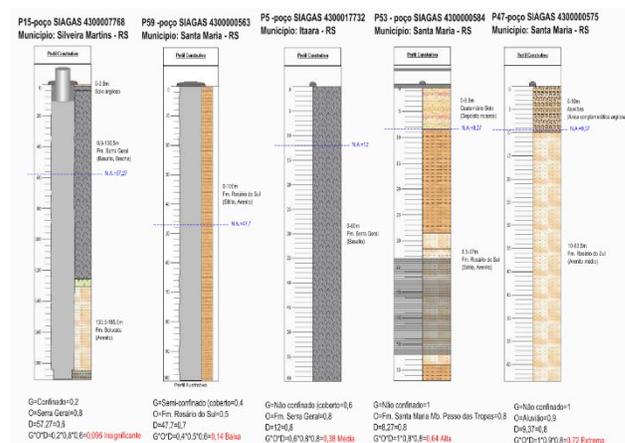


Figura 2 - Exemplo de aplicação do sistema GOD (Foster et al., 2002; 2006) na área de estudo. Fonte: Kemerich et al. (2013).

2.3. Estimativa da vulnerabilidade pelo método DRASTIC (Aller et al., 1987)

A determinação da vulnerabilidade pelo método DRASTIC, seguiu segundo o proposto por Aller et al. (1987). Assim, os valores referentes para as variáveis a D (profundidade do nível da água), R (Recarga), A (Material do aquífero), S (Tipo de solo), T (Topografia), I (Influência das características da zona vadosa) e C (Condutividade hidráulica do solo ou zona vadosa), estão ilustrados nas Tabelas 1 (variáveis D, R e T), 2 (variáveis A e S), 3 (variável I) e 4 (variável C).

As informações referentes aos sete parâmetros necessários para a estimativa da vulnerabilidade natural à contaminação foram obtidas de diversas bases de dados. O parâmetro D foi obtido na base de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). A variável R, foi obtida dos valores propostos por Hausmann (1995), já o A foi adquirido em Hentges

(2009). A variável S foi adquirida através do mapa de solos do Estado do Rio Grande do Sul, elaborado por Streck et al. (2008).

As declividades (T) foram obtidas com base nas imagens da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de resolução espacial de 30 metros (USGS, 2004), disponíveis em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. As variáveis I e A, foram determinadas conforme Lopes da Silva (2015), onde cruzaram-se as informações dos mapas geológicos de Hentges (2009), Maciel Filho et al. (2013) e da base de dados do SIAGAS. Por fim, os valores de C foram determinados no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, através do método também utilizado por Marques et al. (2008).

Tabela 1 - Parâmetros D, R e T do índice DRASTIC (ALLER et al., 1987) e suas respectivas pontuações. Fonte: Adaptado Aller et al. (1987).

Parâmetros					
D		R		T	
Profundidade (m)	Pontuação	Recarga (mm/ano)	Pontuação	Declividade (%)	Pontuação
< 1,5	10	< 51	1	0 - 1	10
1,5 - 4,5	9	21 - 102	3	1 - 6	9
4,5 - 9,0	7	102 - 178	6	6 - 12	5
9,0 - 15,0	5	178 - 254	8	12 - 18	3
15,0 - 22,5	3	< 254	9	> 18	1
22,5 - 30,0	2				
> 30,0	1				

Tabela 2 - Parâmetros A e S e suas respectivas pontuações. Fonte: Adaptado Aller et al. (1987).

Parâmetros				
A			S	
Natureza do aquífero	Pont.	Usual	Tipo de solo	Pont.
Folhelho maciço	1-3	2	Fino ou ausente	10
Rocha metamórfica/ígnea	2-5	3	Cascalho	10
Rocha metamórfica/ígnea intemperizadas	3-5	4	Arenoso	9
Till glacial	4-6	5	Turfoso	8
Arenito acamadado, calcário e folhelho sequencial	5-9	6	Argila agregada e/ou alterada	7
Arenito maciço	4-9	6	Marga arenosa	6
Calcário maciço	4-9	8	Marga	5
Areia e cascalho	4-9	8	Silte margoso	4
Basalto	2-10	9	Argila margosa	4
Calcário carsificado	9-10	10	Lixo/esterco	2

		Argila desagregada e não expansível	1
--	--	-------------------------------------	---

Tabela 3 - Parâmetro I e sua respectiva pontuação. Fonte: Adaptado Aller et al. (1987).

I		
Zona vadosa	Pont.	Usual
Camada confinante	1	1
Silte/argila	2-6	3
Folhelho	2-5	3
Calcário	2-7	6
Calcário acamadado, arenito e folhelho	4-8	6
Areia e cascalho com significativo silte e argila	4-8	6
Ígneas/metamórficas	4-9	6
Areia e cascalho	2-8	4
Areia e cascalho	6-9	8
Basalto	2-10	9
Calcário cárstico	8-10	10

Tabela 4 - Parâmetro C e sua respectiva pontuação. Fonte: Adaptado Aller et al. (1987).

Taxa de infiltração (mm/ano)	Pont.
< 51	1
51 - 102	3
102 - 178	6
178 - 254	8
>254	9

A partir da ponderação das variáveis conforme as tabelas ilustradas anteriormente, o índice DRASTIC é obtido a partir da equação 1. Onde as variáveis que seguem da letra p minúscula correspondem a nota conforme classificação ilustrada nas Tabelas 1 a 4.

$$\text{DRASTIC} = (Dp*5) + (Rp*4) + (Ap*3) + (Sp*2) + (Tp*1) + (Ip*5) + (Cp*3)$$

Assim, o índice de vulnerabilidade pelo método DRASTIC (Aller et al., 1987) é classificado como Baixa (valores entre 26 e 71), Média (71 a 126), Alta (126 a 180) e Muito Alta (180 a 226). A Figura 3 mostra um exemplo de aplicação do método DRASTIC (Aller et al., 1987) na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS.

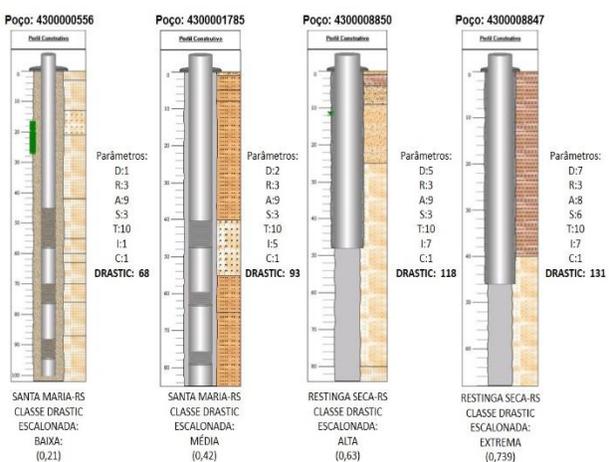


Figura 3 - Aplica o da metodologia DRASTIC (Aller et al., 1987) na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS. Fonte: Construido a partir de CPRM (2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 ilustra a espessura de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS. Como pode ser observado, as espessuras de solos variam desde solos pouco desenvolvidos, como os neossolos, até solos bem desenvolvidos com grandes espessuras de argila, como os argissolos (STRECK et al., 2008). A profundidade do solo na bacia hidrográfica variou desde 0 metros (aflorentos e/ou neossolos) até 162 metros com a presença de solos do tipo argilosos com média de 11,33 metros de espessura.

Os maiores valores de espessura concentram-se na parte central da bacia hidrográfica, onde as classes de vulnerabilidade foram assim classificadas: metodologia GOD: Variando de baixa a alta com a predominância da classe de vulnerabilidade média. Na Metodologia DRASTIC, as classes variaram de: Baixa a alta com predominância da alta. Cabe destacar que as duas metodologias aplicadas na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim apresentaram resultados semelhantes na região, porém com predom nios de classes diferentes. Nas menores profundidades do solo é coincidente com os maiores valores de vulnerabilidade GOD, já a DRASTIC ocorre predomínio das classes baixa e média.

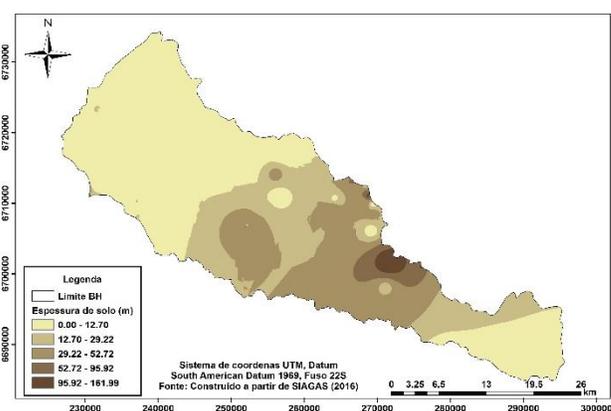


Figura 4 - Espessura da camada de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS. Fonte: Construido a partir de CPRM (2016).

Da  rea total da bacia hidrográfica (1.153,83 km²), 0,74 km² (0,06 %) foram classificados como área de vulnerabilidade insignificante, na região oeste, 197,21 km² (17,09 %) situam-se em área de vulnerabilidade baixa (regiões sul, central e oeste) 502,56 km² (43,56 %) encontram-se em área com vulnerabilidade considerada média (regiões sudeste, central e noroeste), 260,68 km² (22,59 %) situam-se em áreas com alta vulnerabilidade (regiões central e oeste) e 192,64 km² (16,70 %) foram classificados como de vulnerabilidade extrema, presente na região noroeste. Ocorreu predomínio das classes alta e média, as quais ocorreram em 66,15 % da  rea. A vulnerabilidade pelo método DRASTIC (Aller et al., 1987)   ilustrado na Figura 5.

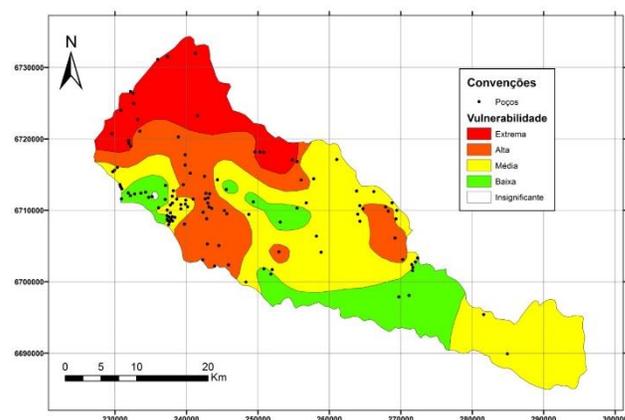


Figura 5 - Estimativa da vulnerabilidade pelo método DRASTIC (Aller et al., 1987). Fonte: Autores.

Em compara o com a metodologia GOD, foi possível observar que ocorreram aumento na porcentagem de áreas de vulnerabilidade insignificante, onde a GOD apresentou 1,24 % da área, baixa (5,04 %), já na vulnerabilidade média, ocorreu um acréscimo das porcentagens, onde a metodologia GOD apresentou 24,63 % de sua área nessa classifica o, já a vulnerabilidade baixa, ocorreu um decréscimo, onde a GOD apresentou 62,28 % da área em tal classifica o, o mesmo ocorreu

com a vulnerabilidade extrema (6,81 %), conforme ilustra a Tabela 1. A Figura 6 mostra a vulnerabilidade através do sistema GOD (Foster et al., 2002; 2006). A vulnerabilidade pelo método GOD apresentou predomínio das classes média e alta, semelhante ao método DRASTIC. Porém, o método GOD essas classes estiveram presentes em 89,91 % da área da bacia hidrográfica.

Os autores Borba et al. (2019) e Fernandes et al. (2019) encontraram em seus estudos na região sob a Formação Serra Geral um predomínio das classes de vulnerabilidade de insignificante a baixa para os municípios de Boa Vista das Missões e Marau respectivamente. Tal fato, pode estar relacionado com a presença de solo muito argiloso formando uma camada impermeável evitando e que contaminantes gerados na superfície atinjam a água subterrânea (Borba, 2019).

Por outro lado, no município de São Sepé pertencente a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí (FEPAM, 2005) limítrofe a área de estudo, os autores Terra et al. (2016) encontraram um predomínio das classes de baixa, média e alta vulnerabilidade, semelhantes a área de estudo onde a ocorrência das classes Média e Alta predominaram com a aplicação dos dois métodos.

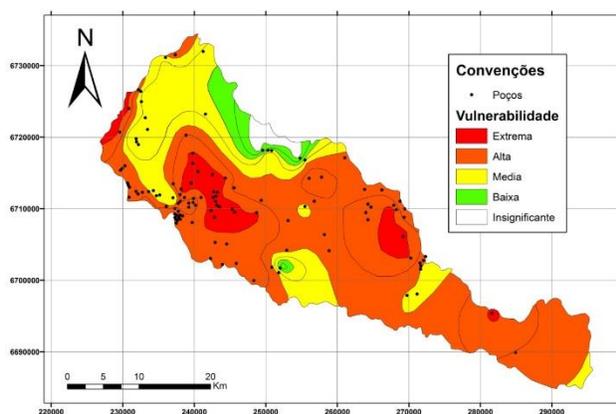


Figura 6 - Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea pelo método GOD (Foster et al., 2002; 2006). Fonte: Autores.

A Tabela 5 ilustra o comparativo entre a metodologia GOD e a DRASTIC na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.

Tabela 5 - Comparativo entre a metodologia GOD e a DRASTIC na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. Fonte: Autores.

Vulnerabilidades						
GOD (Foster et al., 2002; 2006)				DRASTIC (Aller et al., 1987)		
Classes	Áreas			Áreas		
	%	ha	km ²	%	ha	km ²
Extrema	6,81	7.860,00	78,60	16,70	19.264,46	192,64
Alta	62,28	71.855,00	718,55	22,59	26.067,61	260,68
Média	24,63	28.422,00	284,22	43,56	50.256,22	502,56

Baixa	5,04	5.814,00	58,14	17,09	19.720,97	197,21
Insignificante	1,24	1.432,00	14,32	0,06	74,04	0,74
Total	100,00	115.383,00	1.153,83	100,00	115.383,30	1.153,83

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos utilizando estes mesmos métodos para estudos realizados em outras regiões do Brasil.

Tabela 6 - Resultados obtidos por outros autores utilizando os métodos GOD (Foster et al., 2002; 2006) e DRASTIC (Aller et al., 1987). Fonte: Autores.

Bibliografia	Hidrogeologia	Classes de vulnerabilidade	
		DRASTIC	GOD
Cutrim e Campos (2010)	Aquiclude Ponta Grossa, Sistemas Aquíferos Furnas e Transição Furnas Ponta Grossa	-	Insignificante à alta
Medeiros et al. (2011)	Sistema Aquífero Pernambuco - Paraíba	-	Insignificante à extrema
Pinheiro et al. (2015)	Aquicludes, aquíferos porosos e fissurais	-	Insignificante à alta
Cardoso (2010)	Estudo realizado em Portugal	Baixo à alto	Insignificante à alta
Monteiro et al. (2008)	Aquífero Barreiras	Baixa e moderada	-
Duarte et al. (2014)	Estudo realizado em Portugal	Baixa a muito alto	-
Reginato e Alhert (2013)	Sistema Aquífero Serra Geral	Baixo a alto	Baixa a média
Zanetti et al. (2014)	Aquífero oriundo da Formação Rio Claro	Muito baixa a alta	Média a extrema
Alves et al. (2009)	Aquíferos livres e fraturados	Baixa a extrema	-
Rosenberger et al. (2013)	Aquífero Bauru, Serra Geral e Guarani	Baixa a alta	Baixa a alta

O método DRASTIC, por utilizar uma quantidade maiores de parâmetros que o GOD, apresentou um mapa com maior

variabilidade espacial, com alternâncias de classe de vulnerabilidade em áreas pequenas ou próximas (vizinhas). O método GOD, por necessitar uma quantidade menores de parâmetros, na área de estudo apresentou uma menor distribuição espacial das classes. Essa condição também foi encontrada por Siclerio e Verginatto (2011), onde a presença de condições uniformes na área de estudo, a representação do mapa também representou a ocorrência da mesma classe de vulnerabilidade em áreas expressivas. Foi possível observar que as classes de vulnerabilidade não variaram, porém o predomínio das maiores classes foi diferente, onde ambos os métodos apresentaram as mesmas classes, porém em porções diferentes da bacia hidrográfica.

Cabe salientar que a metodologia GOD (Foster et al., 2002; 2006) não necessita, necessariamente, de obtenção de informações à campo. Isso pode interferir na validação das informações. Já a partir do método DRASTIC (Aller et al., 1987), foram necessários o deslocamento e a obtenção de amostras em diversos pontos da bacia hidrográfica, muitos deles coletados e analisados em laboratório. Isso aumenta o tempo de realização e o incremento de custos financeiros, porém permite a observação local e regional de algumas variáveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a aplicação das metodologias DRASTIC e GOD foi possível estimar a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. O método DRASTIC mostrou-se mais confiável, onde ocorreu uma maior variabilidade espacial das classes na área da bacia, porém os parâmetros recarga e influência da zona vadosa, apresentam limitações nas estimativas, sendo necessário um rigoroso planejamento. Já o método GOD, se apresenta de forma mais simples, porém apresentou valores próximos a 90 % da área em apenas duas classes de vulnerabilidade (Alta e média). Ocorreu semelhança nos percentuais, em ambos os métodos, apenas na classe insignificante, mostrando que o DRASTIC é mais sensível as variáveis, em virtude da diferente ponderação e número de parâmetros necessários.

Os métodos utilizados na estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação mostraram-se uma importante ferramenta para auxiliar na gestão ambiental facilitando no processo de tomada de decisão. Cabe destacar a aplicação dessas metodologias como uma ferramenta visando o licenciamento para a instalação de empreendimentos com potencial de geração de contaminantes. Porém, sugere-se a execução de ensaios a campo objetivando a validação das informações encontradas para as classes de vulnerabilidade com a aplicação de diferentes métodos.

5. REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. *DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. US Environ. Protection Agency EPA/600/2-85-018, 1987.
- ALVES, M. da G.; RAMOS, I. D. S.; CORDIOLA, R. Metodologia DRASTIC na análise da vulnerabilidade dos aquíferos livres de Campos dos Goytacazes. In: *XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, Anais... São Jose dos Campos: INPE, 2009. p. 3433-3438.
- BORBA, W. F.; FERNANDES, G. D. A.; TERRA, L. G.; LOBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Assessment of the Intrinsic Vulnerability to Contamination of the Aquifer in River Basin Passo Fundo of Rio Grande do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso)*, Ano 2016, n. 39, p. 145-154. Rio de Janeiro: 2016 a.
- BORBA, W. F.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; ALLASIA, D. G.; ROSA, C. N.; FAVARETTO, J. R.; RIBEIRO, L. F. T. Geoprocessamento Aplicado à Determinação do Índice de Susceptibilidade das Captações por Poços Tubulares do Sistema Aquífero Serra Geral em Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso)*, Ano 2016, n. 39, p. 79-88. Rio de Janeiro: 2016b.
- BORBA, W. F.; FERNANDES, G. D.; SILVA, J. L. S.; FLORES, B. A.; PETRY, M. T.; TERRA, L. G. Estimativa da vulnerabilidade natural à contaminação do Aquífero Serra Geral em Boa Vista das Missões – RS. In *Educação, Meio Ambiente e Território 3*. 3 ed. Ponta Grossa: Editora Atena, 2019. 41 p.
- BORBA, W. F. de. *Avaliação da contaminação ambiental em um aterro sanitário de pequeno porte, sem utilização de geomembrana, na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul*. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. 170 p.
- CARDOSO, L. V. R. Q. *Estudo comparativo dos métodos DRASTIC E GOD na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição da Bacia Hidrográfica do Rio Cabril - Vila Real*. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010. 111 p.
- CASAGRANDE, L. *Avaliação do parâmetro da propagação de sedimentos do modelo de Williams (1975) na Bacia do Rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento*. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004. 226 p.
- CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Mapa Hidrogeológico: folha de Santa Maria. SH 22-V-C-IV. Escala 1:100.000. FTD: Porto Alegre, 1995.*
- CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Sistema de informações de águas subterrâneas.* Disponível em:

- <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 20/05/2015.
- CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Geociências (UNESP. Impresso)*, Ano 2010, v. 29, p. 401-411. São Paulo: 2010.
- DUARTE, L.; DIAS, A. J. G.; MARQUES, J. E.; TEODORO, A. C.; GONÇALVES, J. A.; CARVALHO, J. M. Avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea à poluição através do método DRASTIC - uma aplicação SIG open source. *Comunicações Geológicas*, Ano 2014, n. 101, p. 677-680. Amadora: 2014.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 841p.
- FAVARETTO, J. R.; ALLASIA, D. G.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; BORBA, W. F.; ROSA, C. N.; FERNANDES, G. D. A. Estimativa da Susceptibilidade à Contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral em Aratiba - RS por Diferentes Métodos. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, Ano 2020, v. 72, p. 1-18, 2020. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n1-47184>
- FERNANDES, G.D.; BORBA, W. F.; TERRA, L. G.; SILVÉRIO da SILVA, J. L.; SOUZA, E. E. B.; PETRY, M. T. Uso do sistema GOD para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação em Marau – RS. In *Aplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias 2*. 2 ed. Ponta Grossa: Editora Atena, 2019. 135 p.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER (FEPAM). *Arquivos digitais para o uso em SIG - Base cartográfica digital do RS 1:250.000, 2005*. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp> Acesso em: 06 mai. 2017.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. 1 ed. Washington: World Bank, 114 p. 2002.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. *Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*. Washington: World Bank, 114 p. 2006.
- GUO, M.; KUAI, Y.; LIU, X. Storck Market response to environmental policies: Evidence for heavily pollutants firms in China. *Economic Modelling*, Ano 2019, *in press*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2019.09.028>.
- HAUSMAM, A. *Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul*. 1 ed. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 1995.
- HENTGES, S. C. *Geologia da área da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim-RS*. Trabalho Final de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Ambiental do Centro Universitário Franciscano, 2009.
- KEMERICH, P. D. C.; MARTINS, S. R.; KOBAYAMA, M.; FLORES, C. E. B.; BORBA, W. F.; FERNANDES, G. D. A.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R. Infiltração e Escoamento Superficial Sob Diferentes Usos e Ocupação em uma Bacia Hidrográfica. *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso)*, Ano 2014, v. 37, n. 2. Rio de Janeiro: 2014.
- MACIEL FILHO, C. L.; SILVA, R. L. L.; HENTGES, S. C. *Geologia e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS*. 1 ed. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2013. 26 p.
- MARQUES, J. D.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JÚNIOR, O.; MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica saturada utilizando dois métodos de laboratório numa toposequência de solos amazônicos com diferentes coberturas vegetais. *Acta Amazônica*, Ano 2008, v. 38, n. 2. Manaus: 2008.
- MEDEIROS, C. M.; RIBEIRO, M. A. M.; BARBOSA, D. L.; RUFINO, I. A. A. Mapeamento da vulnerabilidade de parte da Bacia Sedimentar do Baixo Curso do rio Paraíba utilizando o método GOD. In *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Anais... Curitiba, XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011.
- MONTEIRO, A. B.; FREIRE, P. K. C.; BARBOSA, G. F.; CABRAL, J. J. S. P.; SILVA, S. R. da. DRASTIC: Vulnerabilidade do Aquífero Barreiras nos Bairros de Ibura e Jordão - Recife - Pernambuco. In *XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Anais... Natal, XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.
- NCIBI, K.; CHAAR, H.; HADJI, R.; BACCARI, N.; SEBEL, A.; KHELIFI, F.; ABBES, M.; HAMED, Y. A GIS-based statistical model for assessing groundwater susceptibility index in shallow aquifer in Central Tunisia (Sidi Bouzid basin). *Arabian Journal Geosciences*, Ano 2020, v. 13, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5112-7>
- PINHEIRO, R. J. B.; RAUBER, A. C. C.; NUMMER, A. V.; SILVA, J. L. S. Aplicação dos métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria-RS. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, Ano 2015, v. 12. Porto Alegre: 2015.
- REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, Ano 2013, v. 27, n. 2. São Paulo: 2013.

- RIBEIRO, L.; PINDOA, J. C.; DOMINGUEZ-GRANDAA, L. Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of The Total Environment*, Ano 2017, v. 574, p. 1674 - 1683. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.004>
- ROSA, C. N. ; TASSI, R. ; BORBA, W. F. ; FAVARETTO, J. R. ; FERNANDES, G. D. A. ; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. .Relação entre aquíferos susceptíveis à contaminação e Áreas de Preservação Permanente Hídrica em Ijuí, RS. *Pesquisas em Geociências (Online)*, Ano 2019, v. 46, p. 1 - 14. 2019. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.97674>
- ROSENBERGER, M.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; FERREIRA, L. M. R.; ODA, GERALDO H.; VIOTTI, M. Vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru na área urbana do município de Bauru (SP). *Revista do Instituto Geológico*, Ano 2013, v. 34. São Paulo: 2013.
- SEPLAN. SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. *Levantamento dos recursos naturais*. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.
- SILVA, M. P.; SILVA, L. R.; LIESENFELD, K. A.; MARTINI, L.; KEMERICH, P. D. C.; FILHO, L. L. V. D.; FERNANDES, G. D. Aquifer Vulnerability in the Proximity of the Municipal Cemetery Caçapava do Sul - Rio Grande do Sul, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, Ano 2017, v. 40. p. 206-216. Rio de Janeiro: 2017.
- TERRA, L. G.; SCHIAVO, B. N. V.; FERNANDES, G. D. A.; BORBA, W. F.; SILVÉRIO, J. L. S. Estimativa da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero no município de São Sepé – RS. *Revista Monografias Ambientais*, Ano 2016, v. 15, p. 85-93. 2016.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: EMATER/RS – ASCAR, 2008. 222 p.
- USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SERVEY. *Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second scene SRTM1S28W054V3, Unfilled Unfinished 2.0, Global Land Cover Facility, 2004*. Maryland: University of Maryland, 2015.
- ZANETTI, N.; BRAGA, A. C. O.; SANTOS, F. A. M. Estimativa da vulnerabilidade natural do Aquífero Livre no município de Rio Claro/SP. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)*, Ano 2014, v. 3. São Paulo: 2014.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores a CAPES/FAPERGS e CAPES/CNPq pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsas de Pós-Graduação do PPGEC/UFSM e PPGEF/UFSM.

Recebido em: 23/10/2019

Aceito para publicação em: 25/06/2020