



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea como alicerce na gestão do uso do solo em bacias de captação

Tiago De Vargas¹, Rossano Belladonna², Vinícius Sgorla³, Leonardo Crippa Sbabo⁴

¹Pesquisador e Geólogo, Divisão de Recursos Hídricos, Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, CEP: 95052-500, Caxias do Sul (RS), Brasil, tvargas@samaecaxias.com.br (autor correspondente). ²Pesquisador e Engº. Ambiental, Divisão de Recursos Hídricos, Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, rbelladonna@samaecaxias.com.br. ^{3,4}Estagiário em Recursos Hídricos, Divisão de Recursos Hídricos, Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto, v.sgorla@gmail.com e leosbabo1@hotmail.com.

Artigo recebido em 26/10/2021 e aceito em 13/02/2022

RESUMO

O desenvolvimento das cidades tem provocado discussões acerca da relação entre o abastecimento público de água e o uso do solo em bacias de captação. Nesse contexto, relacionar a vulnerabilidade intrínseca de águas subterrâneas com o uso do solo torna-se apreciável em escala municipal. A proposta deste estudo é caracterizar a vulnerabilidade da água subterrânea para utilizá-la como o primeiro alicerce metodológico na gestão do uso do solo em pequenas bacias de captação. Para atingir esse objetivo, utilizou-se o método DRASTIC-DL, em escala 1:30.000. O método foi testado em oito bacias de captação no município de Caxias do Sul, RS. A densidade de lineamentos sobre essas bacias desempenhou um papel categórico na delimitação do índice de vulnerabilidade, caracterizando-a como alta e muito alta. A classe alta foi predominante nas oito bacias. As classes de vulnerabilidade foram capazes de identificar os diferentes níveis de fragilidade do ambiente subterrâneo. Em uma segunda etapa de estudo nessas bacias, esses níveis de fragilidade serão combinados com as áreas potenciais de recarga. O conhecimento dessa vulnerabilidade pode contribuir para a gestão e o planejamento do uso do solo sobre bacias de captação, indicando áreas mais vulneráveis à contaminação da água subterrânea e áreas mais propícias à ocupação.

Palavras-Chave: Aquífero fraturado, DRASTIC, Fragilidade ambiental

Intrinsic groundwater vulnerability as the underlying basis for land use management in water supply catchments

ABSTRACT

Urban sprawling has been the major cause of debate between public water supply and land use at the catchment. In this context, relating the intrinsic groundwater vulnerability to land use becomes appreciable in a municipal scale. The purpose of this study is to characterize groundwater vulnerability to be used as an underlying method to land use management in small catchments. To achieve this goal, the DRASTIC-LD method was used in a 1:30.000 scale. The methodology was tested in eight catchments in the municipality of Caxias do Sul, RS. The lineament density on these catchments played a notable role on setting out the vulnerability index, categorizing it as high and very high. The high class was predominant in all eight areas. The vulnerability classes were capable of identifying the different fragility levels in the underground environment. In a follow up study, these fragility levels will be combined with the potential recharge zones. In conclusion, the intrinsic groundwater vulnerability can contribute to the management and planning of land use in catchments, indicating areas that are more vulnerable to groundwater contamination and the ones prone to urbanization and agricultural use.

Keywords: Fractured aquifer, DRASTIC, Environmental fragility

Introdução

A proteção dos recursos hídricos tem sido uma preocupação devido a sua relevância para o abastecimento de água e para o crescimento econômico das cidades (Sbabo et al., 2021). A gestão e o planejamento desses recursos abrangem o uso e ocupação do solo e as águas superficiais e

subterrâneas. As águas subterrâneas têm recebido atenção especial no cenário social e político brasileiro em razão de sua importância no abastecimento público, de tal forma que estudos que integram a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos e a gestão do uso do solo nas bacias hidrográficas, em escala municipal, tornam-se

significativos. Nesse contexto, estudos não são comumente encontrados na literatura especializada, evidenciando a necessidade de maior esforço científico para suprir essa falta.

A vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos é estudada em diferentes ambientes geológicos (Awawdeh & Jaradat, 2010; Fernandes et al., 2014; Mendoza & Barmen, 2006; Nugraha et al., 2020; Pochon et al., 2008; Sarikhani et al., 2014), com múltiplos objetivos de utilização (Barzegar et al., 2015; Cutrim et al., 2010; Francés et al., 2002; Jhariya et al., 2019; Khosravi et al., 2018; Linhares et al., 2014; Shouyu & Guangtao, 2003) e por diversos autores ao redor do mundo (Babiker et al., 2007; De Meneses et al., 2009; Huan et al., 2012; Hussain et al., 2017; Mondal et al., 2018; Panagopoulos et al., 2006). Instituições nacionais e internacionais também têm se dedicado a estudar o assunto para contribuir substancialmente na gestão global dos recursos hídricos (Foster et al., 2007; Liggett et al., 2011; Liggett & Gilchrist, 2010; Zaporozec et al., 2002). Esse tipo de avaliação é considerada qualitativa ou semiquantitativa (Albinet, 1970; Frind et al., 2006; Jenifer & Jha, 2018b) e contém incertezas acumuladas provenientes da integração de diferentes mapas paramétricos do meio físico, oriundos de modelagens geoespaciais (De Vargas, Ribeiro, et al., 2021).

Ao longo de décadas, diferentes propostas metodológicas de investigação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos foram apresentadas (Lubianetzky et al., 2015; Maria, 2018; Pochon et al., 2008). No entanto, o método DRASTIC (Aller et al., 1985; Aller, Bennet, et al., 1987) e suas modificações (Abdullah et al., 2015; Al-Rawabdeh et al., 2014; Alam et al., 2014; Awawdeh & Jaradat, 2010; Jenifer & Jha, 2018a, 2018b; Kumar & Pramod Krishna, 2019) são amplamente utilizados no mundo. Algumas dessas modificações consideraram a inserção do parâmetro densidade de lineamentos geológicos (*DL*) como necessária para diminuir as incertezas do método em aquíferos fraturados. Outra modificação importante está na substituição do parâmetro condutividade hidráulica pela transmissividade, devido a heterogeneidade e anisotropia observada em aquíferos fraturados (Borges et al., 2017; Maia & Cruz, 2011). Ribeiro et al., (2021), por exemplo, aplicaram essas modificações para demonstrar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação do Sistema Aquífero Fraturado Serra Geral na cidade de Caxias do Sul, apresentando a densidade de lineamentos em uma escala regional de 1:450.000.

Tabela 1. Bacias de captação do município de Caxias do Sul. Extraído de (SAMAE, 2021)

A escala regional utilizada por Ribeiro et al., (2021) não representa adequadamente a vulnerabilidade de um aquífero sob bacias de captação de pequeno porte, caso em que é necessário um refinamento do mapa de lineamentos que seja compatível com a escala local. Essa lacuna foi o que motivou a elaboração deste estudo, uma vez que a gestão do uso do solo em bacias de captação deste porte requer mapas em escalas que permita identificar em detalhe as peculiaridades do meio aquífero. Buscando preencher essa lacuna, este estudo objetiva gerar mapas de vulnerabilidade intrínseca do aquífero fraturado, *DL* em escala 1:30.000, para utilizá-la como alicerce metodológico na gestão destas áreas.

O uso do solo das bacias de captação destinadas ao abastecimento público de Caxias do Sul, cujas áreas variam entre 6 e 110 km², é regido pela Lei Complementar Municipal nº 246 de 6 de dezembro de 2005 (Lei Complementar Nº 246, de 6 de Dezembro de 2005, 2005). No entanto, essa lei não define um método para identificar as zonas de fragilidade dos ambientes hidrogeológicos. Com base no contexto local de Caxias do Sul, este estudo representa a primeira etapa metodológica para identificar essas fragilidades para, posteriormente, compor diferentes níveis de restrição quanto ao uso e a ocupação do solo nestas bacias.

Material e métodos

Área de estudo

O município de Caxias do Sul está localizado na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Esse município possui 1.644,29 km² (Belladonna et al., 2018) e uma população estimada de 523.716 habitantes (IBGE, 2021). A economia de Caxias do Sul é a terceira maior do Rio Grande do Sul, com Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 15,69 bilhões, possuindo um dos maiores PIBs agrícolas do Estado (Caxias do Sul, 2020). A área urbana é abastecida exclusivamente com águas superficiais proveniente das bacias de captação Samuara, Dal Bó, Maestra, Faxinal e Marrecas (SAMAE, 2021), que representam 99% do fornecimento de água potável do município. As localidades rurais são abastecidas através de poços tubulares (1% da população). Também existem as reservas hídricas superficiais do município, que são as bacias de captação sem barramento: Piaí, Sepultura e Mulada (SAMAE, 2021). As informações sobre as bacias de captação estão na Tabela 1.

Bacia de captação	Área da bacia (ha)	Área alagada (ha)	Volume (m ³)
Samuara	687,1	19,1	728.104,90
Dal Bó	642,8	45,9	1.903.893,50
Maestra	1.526,50	48,7	4.996.849,80
Faxinal	6.679,30	248	24.851.436,60
Marrecas	5.325,50	200,9	29.950.375,90
Piaí	5.855,50	Não explorada	
Sepultura	4.365,80	Não explorada	
Mulada	11.062,10	Não explorada	

O clima da região de Caxias do Sul é classificado como muito úmido, com uma média anual de temperatura entre 14°C e 17,2°C (Rossato, 2011) e a precipitação pluviométrica está entre 1.750 e 2.400 mm · ano⁻¹ (Belladonna & De Vargas, 2017). Conforme a classificação de climas Köppen, as bacias de captação estão inseridas no contexto climático temperado Cfb (Pidwimy, 2006). A área de estudo está na região geomorfológica do Planalto das Araucárias, com uma variação topográfica de 30 a 1.000 m em relação ao nível médio do mar (Belladonna & De Vargas, 2017).

Geologia e hidrogeologia

O Estado do Rio grande do Sul possui formações geológicas desde a era Neo-Arqueano até a era Cenozóico (Picada, 1972). Na região de estudo é identificado o Grupo São Bento, da Província Paraná. Esse Grupo é constituído pelas formações Guará, Botucatu e Serra Geral. A Formação Serra Geral é composta por basaltos tholeíticos, na base, enquanto que na parte superior são observados riolitos, riodacitos e dacitos (Bellieni et al., 1984, 1986; Roisenberg & Viero, 2000). Na cidade de Caxias do Sul há predominância de afloramentos dos derrames vulcânicos ácidos (Fácies Caxias), seguidos pelos derrames vulcânicos básicos (Fácies Gramado), vitrófiros Várzea do Cedro e, de forma subordinada, a Formação Botucatu (CPRM, 2011; Lisboa et al., 2003), Figura 1.

A geologia estrutural na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, demonstra direções predominantes N70-90E e secundárias N20-30W e N80-90W (Reginato & Strieder, 2006b, 2006a), além de falhas geológicas transcorrentes (destrais e sinistrais) com direções preferencias NE-SW, seguidas pelas orientações NW-SE e E-W (Nummer et al., 2014). Em Caxias do Sul os lineamentos NE-SW são predominantes, enquanto que as direções NW-SE e E-W são menos

significativos (Betiollo, 2006). Os lineamentos com orientação N40E estão relacionados ao modelo geológico dos padrões estruturais do Cinturão Móvel Dom Feliciano e com o sistema de falhas NE-SW (Frasca & Lisboa, 1993; Nummer et al., 2014), o qual a Falha Caxias está inserida.

O contexto hidrogeológico da região abrange os sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral. O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é do tipo granular e, regionalmente, sofre controle estrutural através dos principais depocentros da Bacia do Paraná, falhamentos regionais e locais, reativação dos arqueamentos e soerguimentos termiais (Lisboa et al., 2003), e está sotoposto ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). Por outro lado, o SASG é do tipo fraturado e está condicionado a Formação Serra Geral, apresentando circulação da água em estruturas tectônicas, que podem apresentar ou não influência das estruturas primárias. A circulação e armazenamento da água subterrânea nas rochas da Formação Serra Geral ocorrem nas fraturas oriundas das disjunções horizontais, dos contatos entre derrames e nas zonas vesiculares e amigdaloides, sendo as zonas de fraturas abertas (verticais e subverticais) que transpassam os diferentes derrames e permitem a percolação da água até a zona de saturação (Reginato et al., 2015).

Na área de estudo, o SASG possui as direções de lineamento NE-SW e NW-SE como as estruturas com maior produtividade hídrica subterrânea, as quais coincidem com as direções de fraturas subverticais NE-SW e NW-SE, que juntamente com as fraturas sub-horizontais, apresentam a maior circulação de água (De Vargas, Boff, et al., 2021). Também nessa área é reconhecido que o SASG possui 71% dos poços tubulares explotando vazões abaixo de 10 m³ · h⁻¹, 18% entre 10 e 20 m³ · h⁻¹ e 11 % superior a 20 m³ · h⁻¹ (De Vargas et al., 2018).

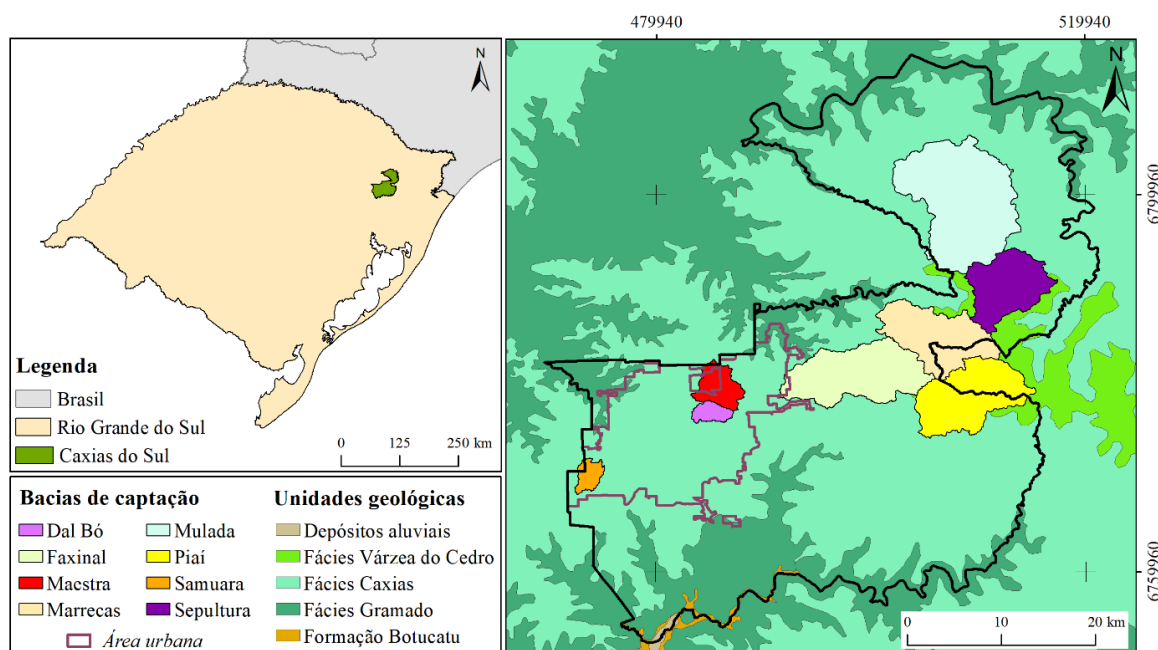


Figura 1. Localização e unidades geológicas (CPRM, 2011) da área de estudo.

Método DRASTIC-DL

O método aplicado para a estimativa da vulnerabilidade à contaminação do SASG, nas bacias de captação estudadas, foi o DRASTIC (Aller et al., 1985) e modificações (Borges et al., 2017; Jenifer & Jha, 2018a; Maia & Cruz, 2011). Esse método considera os parâmetros do meio físico como a profundidade no nível da água (D), recarga do aquífero (R), litologia do meio aquífero (A), tipo de solo (S), declividade (T), natureza da zona não saturada (I), condutividade hidráulica do aquífero (C) e densidade de lineamento (DL). O parâmetro C foi substituído pela transmissividade, devido a heterogeneidade das descontinuidades e forte anisotropia observada em aquíferos fraturados. Essa substituição é justificada pela forte correlação entre a condutividade hidráulica e a transmissividade (Borges et al., 2017; Maia & Cruz, 2011). Conforme Ribeiro et al., (2021), são atribuídos aos parâmetros pesos (w) entre 1 e 5 e cargas (r_j) entre 1 e 10, que ao serem multiplicados estabelecem um índice numérico (Equação 1).

$$VI = \sum_{j=1}^7 (w_j \square r_j) \quad (1)$$

Onde, w é o peso, r a classificação e j os sete parâmetros do DRASTIC.

As bases raster utilizadas nos parâmetros hidrogeológicos R , A , T , S e I foram obtidos em (Gomes et al., 2019), enquanto que o D e C foram extraídos de Ribeiro et al., (2021). Por outro lado, a DL foi determinada através dos mapas de

lineamentos geológicos. Esses mapas foram elaborados utilizando modelo digital de terreno *Light Detecting and Ranging* (LIDAR), com ângulo de sombreamento de 45° (Hillshade) para as direções NE e NW, e escala 1:30.000. A partir dos mapas de lineamentos geológicos foi calculada a densidade manipulando a ferramenta *LineDensity* do *Software ArcGIS 10.6*. Todas as bases raster utilizadas possuem resolução espacial igual a 1 metro.

Os pesos, cargas e intervalos (Borges et al., 2017; Gomes et al., 2021, 2019; Reginato, 2003; Reginato & Ahlert, 2013; Ribeiro et al., 2021) empregados no cálculo do índice de vulnerabilidade DRASTIC podem ser observados nos parâmetros D , R , A , S , T , I e C (Tabela 2). A definição do peso, cargas e intervalos utilizados no parâmetro DL foi fundamentada em Jenifer & Jha (2018) e Ribeiro et al., (2021). Contudo, a DL apresentou valores mais elevados que os observados pelos autores citados e tornou-se necessário empregar o ajuste da curva de tendência exponencial, atendendo a equação $y = 0,0005e^{0,968x}$ ($R^2 = 0,9905$), para definir os intervalos e cargas com densidades acima de $1,5 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ (Tabela 2). No *Software ArcGIS 10.6*, foi desenvolvida a álgebra de mapas para integrar os parâmetros e estabelecer a classificação do índice de vulnerabilidade. Esse índice pode ser rotulado como Insignificante (< 79), Muito Baixa (80 - 99), Baixa (100 - 119), Moderada (120 - 139), Alta (140 - 159), Muito Alta (160 - 179) e Extrema (> 180) (Aller, Bennett, et al., 1987).

Tabela 2. Pesos, cargas e intervalos atribuídos aos parâmetros hidrogeológicos método DRASTIC-DL.

Parâmetro	Símbolo	Peso	Intervalo	Cargas
Profundidade do nível da água (m)	D	5	0 – 2	10
			2 – 5	9
			5 - 10	7
			10 – 17	5
			17 – 26	3
			26 – 34	2
			> 34	1
Recarga (mm)	R	4	301,13	7
			354,90	8
Meio Aquífero	A	3	Arenito	6
			Basalto	8
Solo (taxa de infiltração)	S	2	Moderada	6
			Baixa	3
			Baixíssima	2
Declividade (%)	T	1	0 - 2	10
			2 – 6	9
			6 – 12	5
			12 – 18	3
			> 18	1
Material Zona Vadosa (aptidão para disposição de resíduos)	I	5	Adequada	1
			Regular	3
			Restrita	6
Transmissividade ($m^2 \cdot h^{-1}$)	C	3	0 – 0,133	1
			0,133 – 0,493	2
			0,493 – 1,458	4
			1,458 – 5	6
			> 5	8
¹ Densidade de Lineamento ($km \cdot km^{-2}$)	LD	5	0 – 0,15	6
			0,15 – 0,5	7
			0,5 – 1,0	8
			1,0 – 3,0	9
			3,0 – 8,0	10
			8,0 – 21,0	11
			21,0 – 55,0	12

Extraído de Gomes et al., (2021) e ¹modificado de Jenifer & Jha (2018) e Ribeiro et al., (2021)

Resultados e discussão

A análise da *DL* mostra intervalos consideravelmente discordantes entre as bacias de captação urbanas e rurais (Tabela 3). Nas bacias urbanas Samuara, Dal Bó e Maestra as maiores porcentagens de *DL* são identificadas nos intervalos 3-8 e 8-21 $km \cdot km^{-2}$. Essa peculiaridade ocorre devido ao contexto geomorfológico da área (Lisboa et al., 2003), que apresenta maior grau de dissecação de relevo do que nas áreas das bacias rurais Marrecas, Piaí, Sepultura e Mulada. As bacias rurais demonstram maior porcentagem de

DL nos intervalos 0-0,15 $km \cdot km^{-2}$, no entanto o intervalo 1-3 $km \cdot km^{-2}$ indica uma representatividade relevante. A bacia de captação Faxinal está em uma zona de transição geomorfológica entre as bacias urbanas e rurais, por esse motivo apresenta os maiores valores de porcentagem de *DL* entre os intervalos 1-3 e 3-8 $km \cdot km^{-2}$. A expressiva porcentagem de intervalos com valores elevados de *DL* pode ser atribuída a escala de mapeamento dos lineamentos geológicos 1:30.000 e aos diferentes graus de dissecação do relevo.

Tabela 3. Intervalos de densidade de lineamentos para as bacias de captação, representados em porcentagem.

km · km ⁻²	Bacias Urbanas (%)			Bacias Rurais (%)				
	Samuara	Dal Bó	Maestra	Faxinal	Marrecas	Piaí	Sepultura	Mulada
0 - 0,15	31,7	30,9	10,3	7,6	48,4	46,1	50,6	53,6
0,15 - 0,5	0,8	0,4	1,1	1,5	2,6	3,1	2,7	4,3
0,5 - 1	1,3	0,6	1,9	2,8	5,6	6,4	5,4	10,1
1 - 3	7,8	4,2	14,5	27,4	33,0	36,8	35,7	31,2
3 - 8	38,6	35,2	48,8	56,5	10,4	7,6	5,6	0,8
8 - 21	19,7	26,9	23,2	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0
21 - 55	0,0	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea delineada para as bacias de captação abrangeu desde a classe baixa até a extrema (Tabela 4). A classe baixa foi observada exclusivamente na bacia Maestra (0,4%), enquanto que a classe extrema foi identificada somente nas bacias Faxinal (0,4%) e Piaí (0,1%). Tanto a classe baixa quanto a extrema apresentam quantitativos insignificantes às áreas totais das bacias, desta forma não apresentando grande destaque para a gestão do uso do solo nas áreas de estudo (Tabela 1). O índice de vulnerabilidade com maior

relevância é a classe alta, que pode ser observado com elevadas porcentagens (> 55%) em todas as bacias de captação. Na bacia de captação Maestra a classe alta atingiu 80,1% da área, enquanto as demais mostram 60,6% (Samuara), 61% (Dal Bó), 69,4% (Faxinal), 57,9% (Marrecas), 55,4% (Piaí), 69,7% (Sepultura) e 62,6% (Mulada). As classes moderada e muito alta apresentam valores de porcentagem inferiores a 1/3 da área das bacias, porém mostram importante significância na gestão do solo.

Tabela 4. Quantitativos da classificação da vulnerabilidade das bacias de captação.

Classificação	Bacia de Captação								
		Samuara	Dal Bó	Maestra	Faxinal	Marrecas	Piaí	Sepultura	Mulada
Baixa (100-119)	km ²	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	%	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Moderada (120-139)	km ²	2,0	1,8	2,8	5,7	11,7	6,4	1,4	18,6
	%	29,3	28,6	18,5	8,5	21,9	10,9	3,2	16,9
Alta (140-159)	km ²	4,1	3,9	12,2	46,4	30,8	32,5	30,4	69,3
	%	60,6	61,0	80,1	69,4	57,9	55,4	69,7	62,6
Muito Alta (160-179)	km ²	0,7	0,7	0,2	14,6	10,7	19,7	11,9	22,7
	%	10,1	10,4	1,1	21,8	20,1	33,6	27,2	20,5
Extrema (>180)	km ²	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
	%	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0

Os mapas da vulnerabilidade intrínseca mostram a distribuição das classes dentro dos limites das bacias de captação avaliadas (Figura 2). A figura 2a mostra a vulnerabilidade identificada na bacia de captação Faxinal, onde é observada a concentração das classes muito alta e extrema na porção oeste e um domínio da classe alta nas demais partes da bacia. Na bacia de captação Dal Bó (Figura 2b) é identificado o domínio da classe alta, e de forma subordinada a classe muito alta, na parcela leste, enquanto que a classe moderada é constatada nas áreas centrais e oeste.

A bacia de captação Maestra apresenta a classe alta distribuída por toda sua área, sendo essa a classe dominante. De forma subordinada ocorre a classe moderada, muito alta e baixa (Figura 2c). A mesma predominância da classe alta é observada na bacia de captação Sepultura, seguida da classe muito alta que é verificada no setor oeste (Figura 2d). Por outro lado, a bacia de captação Mulada apresenta concentração da classe alta nas porções noroeste, sudeste e sul. A classe moderada está distribuída na região central e nordeste da bacia (Figura 2e).

Na figura 2f, a classe moderada está restrita a fração oeste da bacia de captação Piaí, enquanto que as classes alta e muito alta são identificadas nas demais áreas, mostrando uma ascendência da classe alta. A bacia de captação Marrecas sinaliza predomínio da classe moderada na região noroeste, em contrapartida no restante da bacia prevalece a classe alta, seguida da classe muito alta (Figura 2g). Por fim, a figura 2h demonstra a distribuição das classes de vulnerabilidade na bacia de captação Samuara. Essa distribuição, também, revela a classe alta como predominante e dispersa por toda a área da bacia, sendo o mesmo observado para a classe moderada. No entanto, a classe muito alta concentrou-se na parte sul.

A classificação da vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea gerada para todas as bacias de captação estudadas, mostra o evidente domínio da classe alta, apesar de estar concentrada em diferentes regiões das bacias. Também é notório a influência da densidade de lineamentos na manifestação das classes alta e muito alta, que são marcadas pelos delineamentos alongados e lineares provenientes dos lineamentos geológicos. Essa influência é oriunda do peso e das cargas atribuídas aos intervalos de densidade dos lineamentos. Por fim, o arranjo das classes de vulnerabilidade mostra os setores mais sensíveis às atividades antrópicas e que devem receber uma maior atenção na gestão do uso do solo.

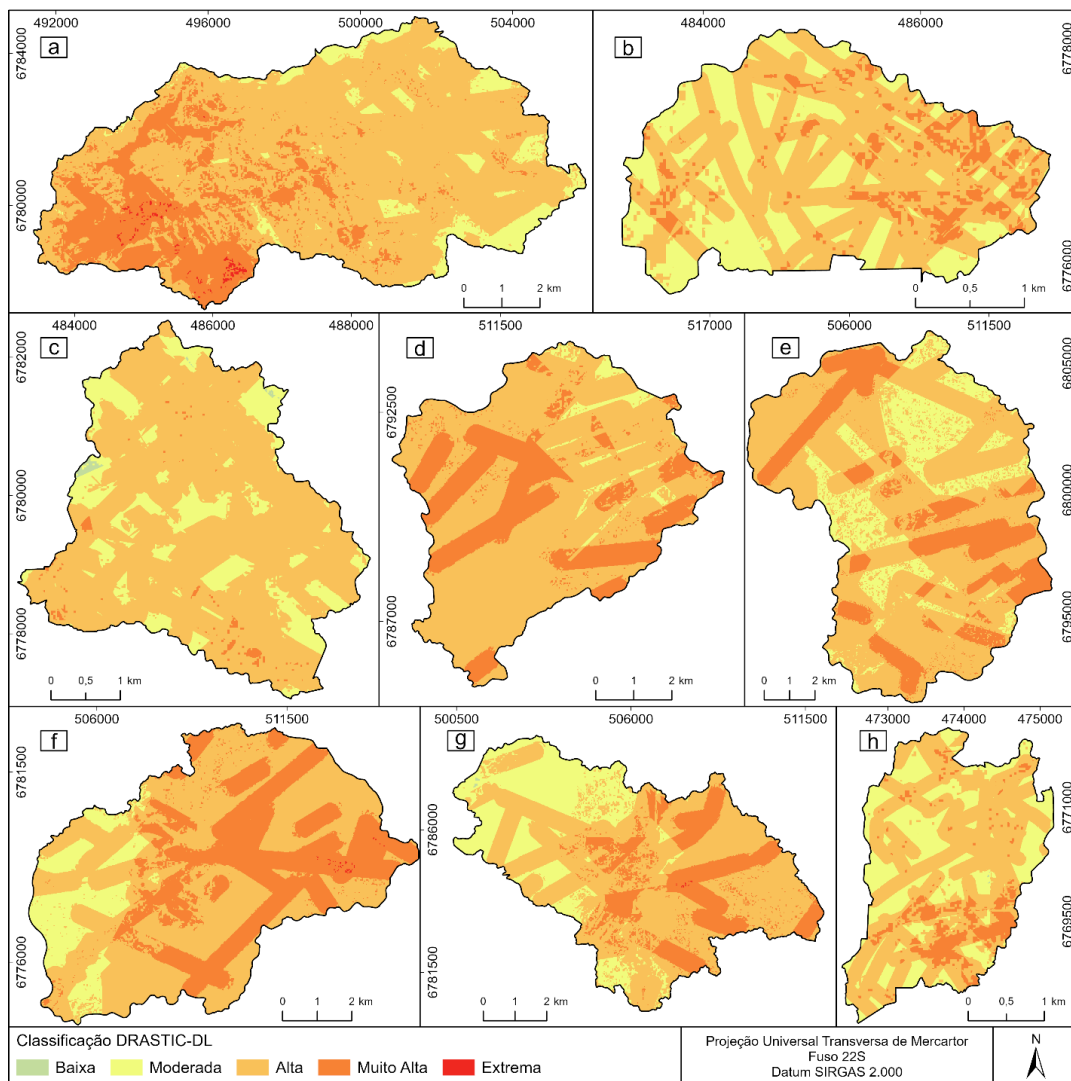


Figura 2. Mapas de vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea nas bacias de captação (a) Faxinal, (b) Dal Bó, (c) Maestra, (d) Sepultura, (e) Mulada, (f) Piaí, (g) Marrecas e (h) Samuara.

Conclusões

A densidade de lineamentos obtida para o estudo mostrou-se maior nas bacias de captação urbanas e na bacia Faxinal do que nas bacias rurais,

devido ao contexto geomorfológico de ambiente dissecado. A partir da classificação da vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea constatou-se predominância da classe alta em todas

as bacias de captação, com destaque para a bacia Maestra. As classes moderada e muito alta, também apresentaram porcentagens consideravelmente relevantes nas bacias. Por outro lado, as classes extrema e baixa ocuparam áreas ínfimas no mapa de vulnerabilidade. Nesse contexto, evidencia-se que a densidade de lineamentos, refinada na escala local 1:30.000, foi um parâmetro determinante para definir o índice de vulnerabilidade nas pequenas bacias de captação, apresentadas neste estudo.

Os mapas de vulnerabilidade desenvolvidos foram capazes de distinguir os setores das bacias de captação com maior fragilidade natural das águas subterrâneas, no Sistema Aquífero Fraturado Serra Geral, preenchendo os hiatos correspondentes a elaboração de mapas na escala local e a primeira parte metodológica necessária à gestão do uso do solo em bacias de captação de pequeno porte. Como estudo futuro, será realizada a segunda etapa, no qual serão identificadas as áreas com potencial de recarga subterrânea nas bacias de captação rurais Faxinal, Marrecas, Piaí, Sepultura e Mulada. A combinação matricial da vulnerabilidade intrínseca do aquífero com a potencialidade de recarga permitirá compor o zoneamento de níveis de restrição de uso e ocupação do solo, fundamental para a gestão dos recursos hídricos das municipalidades.

Referências

- Abdullah, T. O., Ali, S. S., Al-Ansari, N. A., & Knutsson, S. (2015). Groundwater Vulnerability Mapping Using Lineament Density on Standard DRASTIC Model: Case Study in Halabja Saidu Basin, Kurdistan Region, Iraq. *Engineering*, 07(10), 644–667. <https://doi.org/10.4236/eng.2015.710057>
- Al-Rawabdeh, A. M., Al-Ansari, N. A., Al-Taani, A. A., Al-Khateeb, F. L., & Knutsson, S. (2014). Modeling the risk of groundwater contamination using modified DRASTIC and GIS in Amman-Zerqa Basin, Jordan. *Central European Journal of Engineering*, 4(3), 264–280. <https://doi.org/10.2478/s13531-013-0163-0>
- Alam, F., Umar, R., Ahmed, S., & Dar, F. A. (2014). A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central Ganga Plain, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(3), 927–937. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0796-y>
- Albinet, M. (1970). *Les Cartes De Vulnérabilité Des Nappes* (Issue 38)
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., & Petty, R. J. (1985). *Drastic: a Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*
- Awawdeh, M. M., & Jaradat, R. A. (2010). Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences*, 3(3), 273–282. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0074-9>
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A. A., & Hiyama, T. (2007). Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21(4), 699–715. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9059-6>
- Barzegar, R., Moghaddam, A. A., & Baghban, H. (2015). A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz plain aquifer, Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(3), 883–899. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1088-3>
- Belladonna, R., & De Vargas, T. (2017). Space-time Precipitation Distribution and the Relevance of the Orography of Caxias do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69/3, 607–620.
- Belladonna, R., De Vargas, T., Vicente, M., & Adami, D. (2018). Cartografia como Ferramenta de Gestão Pública: Evolução Histórica do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul. In *6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente*.
- Bellieni, G., Comin-Chiaromonti, P., Marques, L., Melfi, A., Nardy, A. J., Papatrechas, C., Piccirillo, E., Roisenberg, A., & Stolfi, D. (1986). Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná Plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationship. *Journ. of Petrol*, 27 (4), 915–94
- Bellieni, G., Comin-Chiaromonti, P., Marques, L., Melfi, A., Piccirillo, E., Nardy, A. J., & Roisenberg, A. (1984). High- and low-Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil):

- petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *N. Jh. Miner.*, 150, 273–306.
- Betiollo, L. M. (2006). *Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil* [Federal University of Rio Grande do Sul]. <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8516/000578326.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Borges, V. M., Athayde, G. B., & Reginato, P. A. R. (2017). Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. *Águas Subterrâneas*, 31(4), 327. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i4.28857>
- Lei Complementar nº 246, de 6 de dezembro de 2005, 48 (2005). <http://hamurabi.camaracaxias.rs.gov.br/Hamurabi-faces/externo/exibicao.jsf?leiId=639&from=resultados>
- Caxias do Sul, (prefeitura municipal). (2020). *Perfil Socioeconômico - Caxias do Sul - RS*. <https://caxias.rs.gov.br/cidade/perfil-socioeconomico>
- CPRM, (Brazilian Geological Survey). (2011). *Projeto Geoparques: Geoparque caminhos dos cânions do sul*. https://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/geoparques/canions/creditos.html
- Cutrim, A. O., Eloi, J., & Campos, G. (2010). RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos Aplicação dos Métodos Drastic e Posh para a Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis-MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15(2), 127–142.
- De Meneses, L. F., Da Silva, T. C., Gadêlha, C. L. M., & De Figueiredo, E. C. T. P. (2009). Elaboração de Mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos Superiores no Município de João Pessoa – PB, Através de Técnicas de Geoprocessamento. *Rev. Tecnol*, 30(1), 123–132
- De Vargas, T., Boff, F. E., Belladonna, R., Faccioni, L. F., Reginato, P. A. R., & Carlos, F. S. (2021). Influence of geological discontinuities on the water flow of the Serra Geral Fractured Aquifer System. *Groundwater for Sustainable Development*, (under review).
- De Vargas, T., Gomes, M. G., Belladonna, R., & Adami, M. V. D. (2018). Aplicação do interpolador IDW para elaboração de mapas hidrogeológicos paramétricos na região da Serra Gaúcha. *Scientia Cum Industria*, 6(3), 38–43. <https://doi.org/10.18226/23185279.v6iss3p38>
- De Vargas, T., Ribeiro, M. E., Belladonna, R., & Gomes, M. G. (2021). Hydrogeology of fractured aquifers: application of consistency indexes for the validation of geospatial mathematical models. *Environmental Earth Sciences*, (under review).
- Fernandes, L. F. S., Cardoso, L. V. R. Q., Pacheco, F. A. L., Leitão, S., & Moura, J. P. (2014). DRASTIC and GOD vulnerability maps of the Cabril River Basin, Portugal. *Rem: Revista Escola de Minas*, 67(2), 133–142. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672014000200002>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., & Paris, M. (2007). *Groundwater quality protection-a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies (also in Spanish & Portuguese)*. <https://www.researchgate.net/publication/280493781>
- Francés, A. P., Fernandes, J., & Ribeiro, L. (2002). *Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: The susceptibility index Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo View project PLANAGEO View project*. <https://www.researchgate.net/publication/312890148>
- Frasca, A. A. S., & Lisboa, N. A. (1993). Contribuição do sensoriamento remoto na compartimentação morfotectônica e morfoestrutural da bacia do Paraná “Grupo São Bento”, RS, e suas relações com as estruturas regionais do embasamento. *VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 211–220.
- Frind, E. O., Molson, J. W., & Rudolph, D. L. (2006). Well vulnerability: A quantitative approach for source water protection. *Ground Water*, 44(5), 732–742. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00230.x>
- Gomes, M. G., De Vargas, T., Belladonna, R., Dal Bosco, V., De Araújo, B., & Bortolin, T. A. (2021). A vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados: avaliando os modelos DRASTIC e GOD, Originais e Adaptados. *Geociências*, 40(3)(1980-900X), 735–749. <https://www.revistageociencias.com.br/>
- Gomes, M. G., De Vargas, T., Bortolin, T. A., Belladonna, R., Dal Bosco, V., & Adami, M. V. D. (2019). Estudo de vulnerabilidade de aquíferos no município de Caxias do Sul/RS

- utilizando o método DRASTIC. In ABRHidro (Ed.), *XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Huan, H., Wang, J., & Teng, Y. (2012). Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. *Science of the Total Environment*, 440, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.037>
- Hussain, Y., Ullah, S. F., Hussain, M. B., Aslam, A. Q., Akhter, G., Martinez-Carvajal, H., & Cárdenas-Soto, M. (2017). Modelling the vulnerability of groundwater to contamination in an unconfined alluvial aquifer in Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 76(84). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6391-5>
- IBGE, (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). (2021). *Cidades e Estados: população estimada*. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/caxias-do-sul.html>
- Jenifer, M. A., & Jha, M. K. (2018a). Comparative evaluation of GIS-based models for mapping aquifer vulnerability in hard-rock terrains. *Environmental Earth Sciences*, 77(672). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7821-8>
- Jenifer, M. A., & Jha, M. K. (2018b). Comprehensive risk assessment of groundwater contamination in a weathered hard-rock aquifer system of India. *Journal of Cleaner Production*, 201, 853–868. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.005>
- Jhariya, D. C., Kumar, T., Pandey, H. K., Kumar, S., Kumar, D., Gautam, A. K., Baghel, V. S., & Kishore, N. (2019). Assessment of groundwater vulnerability to pollution by modified DRASTIC model and analytic hierarchy process. *Environmental Earth Sciences*, 78(610). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8608-2>
- Khosravi, K., Sartaj, M., Tsai, F. T. C., Singh, V. P., Kazakis, N., Melesse, A. M., Prakash, I., Tien Bui, D., & Pham, B. T. (2018). A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of the Total Environment*, 642, 1032–1049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.13>
- Kumar, A., & Pramod Krishna, A. (2019). Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in India. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557259>
- Liggett, J., Lapcevic, P., & Miller, K. (2011). A Guide to the Use of Intrinsic Aquifer Vulnerability Mapping. In *British Columbia Ministry of Foret, Lands and Natural Resouce Operations*
- Liggett, J. E., & Gilchrist, A. (2010). *Technical Summary of Intrinsic Vulnerability Mapping Methods in the Regional Districts of Nanaimo and Cowichan Valley* (Issue OPEN FILE 6168).
- Linhares, F. M., Almeida, C. das N., B. Passerat de Silans, A. M., & Coelho, V. H. R. (2014). Avaliação da vulnerabilidade e do risco à contaminação das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Gramame (PB). *Sociedade & Natureza*, 26(1), 139–157. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140110>
- Lisboa, N. A., Remus, M. V. D., & Dani, N. (2003). *Estudo geológico e hidrogeológico regional para o aproveitamento de água do aquífero Guarani no município de Caxias do Sul*.
- Lubianetzky, T. A., Dickson, S. E., & Guo, Y. (2015). Proposed method: incorporation of fractured rock in aquifer vulnerability assessments. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 4813–4825. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4471-y>
- Maia, P. H. P., & Cruz, M. J. M. (2011). Um novo método para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 15(2), 29–40. <https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/bjast/article/viewFile/2120/2097>
- Maria, R. (2018). Comparative studies of groundwater vulnerability assessment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012018>
- Mendoza, J. A., & Barmen, G. (2006). Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, 50(4), 569–580. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0233-1>
- Mondal, N. C., Adike, S., Anand Raj, P., Singh, V. S., Ahmed, S., & Jayakumar, K. V. (2018). Assessing Aquifer Vulnerability Using GIS-Based DRASTIC Model Coupling with Hydrochemical Parameters in Hard Rock Area from Southern India. *Groundwater*, 67–82. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5789-2_6
- Nugraha, G. U., Gaol, K. L., Hartanto, P., & Bakti, H. (2020). Aquifer Vulnerability: Its Protection and Management - A Case Study in Pangkalpinang City, Indonesia. *International*

- Journal of Geophysics*, 23. <https://doi.org/10.1155/2020/8887914>
- Nummer, A. R., Machado, R., & Jacques, P. D. (2014). Tectônica transcorrente mesozoica/cenozoica na porção leste do Planalto do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisa Em Geociências*, 41(2), 121–130. www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br
- Panagopoulos, G. P., Antonakos, A. K., & Lambrakis, N. J. (2006). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 894–911. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0008-x>
- Picada, R. S. (1972). Ensaio sobre a tectônica do escudo Sul – rio – grandense: caracterização dos sistemas de falha. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 167–191
- Pidwirny, M. (2006). Introduction to the Atmosphere. In *Fundamentals of Physical Geography* (2nd ed.). <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7d.html>
- Pochon, A., Tripet, J. P., Kozel, R., Meylan, B., Sinreich, M., & Zwahlen, F. (2008). Groundwater protection in fractured media: A vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. *Hydrogeology Journal*, 16(7), 1267–1281. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0323-0>
- Reginato, P. A. R. (2003). *Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da bacia hidrográfica Taquari-Antas (RS)* [Federal University of Rio Grande do Sul]. <http://hdl.handle.net/10183/117392>
- Reginato, P. A. R., & Ahlert, S. (2013). Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, 27(2), 32–46
- Reginato, P. A. R., Leão, M. I., Bortolin, T. A., Dutra, T. de O., Athayde, G. B., & Athayde, C. D. V. M. (2015). Circulação da água subterrânea nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 8. <http://cbge2015.hospedagemdesites.ws/trabalhos/trabalhos/207.pdf>
- Reginato, P. A. R., & Strieder, J. A. (2006a). Caracterização estrutural dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(1), 13–22. www.sbgeo.org.br
- Reginato, P. A. R., & Strieder, J. A. (2006b). Integration of geologic data in the prospection of fractured aquifer at the Serra Geral Formation. *Águas Subterrâneas*, 20(1), 1–14. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterranea/s/article/view/9713/6701>
- Ribeiro, M. E., De Vargas, T., & Belladona, R. (2021). Assessment of the vulnerability to contamination of fractured aquifers: the influence of the lineament density. In V. E. Schneider, T. A. Bortolin, & S. H. Z. Carra (Eds.), *Gestão e Tecnologias para Meio Ambiente: Visões e Ações Interdisciplinares* (Vol. 2). EDUCS
- Roisenberg, A., & Viero, A. P. O. (2000). Vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In M. Holz & F. De Ros (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul* (pp. 355–374). CIGO/UFRGS
- Rossato, M. S. (2011). *Os Climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- SAMAE. (2021). *Recursos Hídricos*. Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto. <https://samaecaxias.com.br/Pagina/Index/10044>
- Sarikhani, R., Kamali, Z., Dehnavi, A. G., & Sahamieh, R. Z. (2014). Correlation of lineaments and groundwater quality in Dasht-e-Arjan Fars, SW of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72(7), 2369–2387. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3146-4>
- Sbabo, L. C., De Vargas, T., & Belladona, R. (2021). The map of aquifers intrinsic vulnerability as a tool for the land use management of water catchments. *Groundwater World Congress (47th IAH Brazil Congress)*. <https://icongresso.abas.itarget.com.br/anais/index/index/cc/3>
- Shouyu, C., & Guangtao, F. (2003). A DRASTIC-based fuzzy pattern recognition methodology for groundwater vulnerability evaluation. *Hydrological Sciences Journal*, 48(2), 211–220. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.2.211.44700>
- Zaporozec, A., Conrad, J. E., Hirata, R., Johansson, P.-O., Nonner, J. C., Romijn, E., & Weaver, J. M. (2002). *Groundwater contamination inventory: A methodological guide*.