

Uso do SIG para estimativa do índice de susceptibilidade na Bacia do Rio Gravataí

Use of GIS to estimate the susceptibility index in the Gravataí River Basin

Tauani Borges^{*}, Willian Fernando de Borba^{**}, Cristiano Niederauer da Rosa^{***}, Sandro Luciano Fensterseifer^{****}

^{*}Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, tauanitb@hotmail.com; borbawf@gmail.com

^{**}Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, borbawf@gmail.com

^{***}Imagem Geossistemas, cristianoand@gmail.com

^{****}Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, sandrolbf@gmail.com

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v60i0.93801>

Resumo

A utilização dos mananciais subterrâneos tem se tornado uma importante alternativa para o abastecimento da população urbana e rural. Assim, esse estudo tem objetivo estimar a susceptibilidade à contaminação do aquífero na escala da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, região metropolitana de Porto Alegre. Para isso, foi criado um banco de informações hidrológicas e hidrogeológicas da área, e com auxílio de um sistema de informação geográfica, utilizou-se o método do índice de susceptibilidade. Os resultados indicaram que a área apresentou todas as classes de susceptibilidade, variando entre muito baixa (05,61 %) a muito elevada (00,08 % da área), com predomínio das classes moderada a baixa (37,02%), moderada a alta (28,04%) e baixa (22,72%), sendo que as demais classes (Muito elevada com 0,08 %; elevada 6,53% e muito baixa 5,61%) representaram 12,62 % da área. Nas áreas mais susceptíveis à contaminação são as que ocorrem maior demanda de atividades agrícolas, principalmente o cultivo de arroz, que é um ponto com grande influência para contaminação, por conta dos alagamentos das irrigações. Obteve-se também a ocorrência de áreas susceptíveis próximas à área urbana, que faz com que se leve em consideração a necessidade de uma rede de esgoto eficiente. Assim, conclui-se que o método se mostrou eficiente, sendo possível sua aplicação no planejamento ambiental da área, servindo como suporte em estudos ambientais e de planejamento dentro da área da bacia hidrográfica do Rio Gravataí.

Palavras-chave:

Águas subterrâneas, Contaminação, Geoprocessamento.

Abstract

The use of underground water sources has become an important alternative for supplying urban and rural populations. Therefore, this study aims to estimate the susceptibility to contamination of the aquifer at the scale of the Gravataí River Basin, metropolitan region of Porto Alegre. To this end, a database of hydrological and hydrogeological information was created for the area, and as an aid

to a geographic information system, the susceptibility index method was used. The results indicated that the area has susceptibility classes ranging from very low (05.61%) to very high (00.08% of the area), with a predominance of the moderate to low class (37.02%). Areas with a level more susceptible to contamination are those with greater demand for agricultural activities, especially rice cultivation, which is a point with great influence on contamination, due to flooding from irrigation. The occurrence of susceptible areas close to the urban area was also observed, which makes the need for an efficient sewage network taken into account. Thus, it is concluded that the tool proved to be efficient, making it possible to apply it in the environmental planning of the area.

Keywords:

Groundwater, Contamination, Geoprocessing.

I. INTRODUÇÃO

O uso de ferramentas geoespaciais está se tornando cada vez mais comum no meio científico, isso se dá pela facilidade e praticidade, desde a obtenção dos dados, os quais estão cada vez mais acessíveis até a apresentação dos resultados obtidos. No caso das águas subterrâneas, esse uso, dentre as mais variadas aplicações, destacam-se a estimativa da susceptibilidade/vulnerabilidade do meio as atividades antrópicas.

Dentre os mais variados métodos, três recebem destaque, sendo eles o GOD (G - Groundwater hydraulic confinement, O -Overlying Strata e D - Depth to groundwater table) desenvolvido por Foster et al. (2002; 2006), o DRASTIC (Depth to water table - D, Recharge - R, Aquifer media - A, Soil media - S, Topography - T, Impact of vadose zone - I e hydraulic Conductivity - C), descrito por Aller et al. 1987). Por fim, o método IS (Susceptibility Index), desenvolvido por Ribeiro (2005) simplificou o DRASTIC (ALLER et al., 1987) original, retirou as variáveis S e I e inseriu a variável LU (Land Use). Essa alteração facilitou a sua aplicação, visto que as variáveis alteradas eram de difícil obtenção, sendo necessárias coletas a campo.

A relevância dos métodos supracitados na organização territorial, tem cada vez mais notoriedade no meio científico (ROCHA; CRUZ 2018; FANNAKH; FARSANG, 2022; LIMA et al., 2022; KOESUMA et al., 2022; EMBERGA et al., 2022; MAHDID et al., 2022; SRESTO et al., 2022; CHAKRABORTY et al., 2022; LAKSHMINARAYANAN et al., 2022; BOUFEKANE et al., 2022). Pois ambos são muito úteis para evitar a ocupação de áreas potencialmente contaminadas, e manter a sustentabilidade das recargas dos aquífero e reservatórios (NASCIMENTO et. al., 2019). Nesse sentido, ferramentas geoespaciais são úteis no planejamento urbano, principalmente em grandes centros populacionais, pois auxiliam no processo de tomada de decisão e na preservação do meio ambiente.

Nesse sentido, esse estudo tem por objetivo estimar a susceptibilidade à contaminação do aquífero na escala da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí. Sendo essa, uma área que está próxima a região metropolitana de Porto Alegre - RS, com uma alta densidade populacional.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

CARATERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Gravataí (Figura 1) está inserida na Região Hidrográfica do Guaíba (U). A Bacia possui uma área de 2.015 quilômetros quadrados e uma população de 1.379.259 habitantes, nos quais 1.349,232 são residentes nas áreas urbanas e 30.027 no meio rural (SEMA, 2020). A bacia possui duas regiões distintas, sendo que na parte superior ocorrer o predomínio de atividades agropecuárias, já na região baixa da bacia (Inferior) abriga negócios urbano-industriais (Região populacional e indústrias) e áreas de banhados, devido ao seu acesso conveniente à água (FEPAM, 2020).

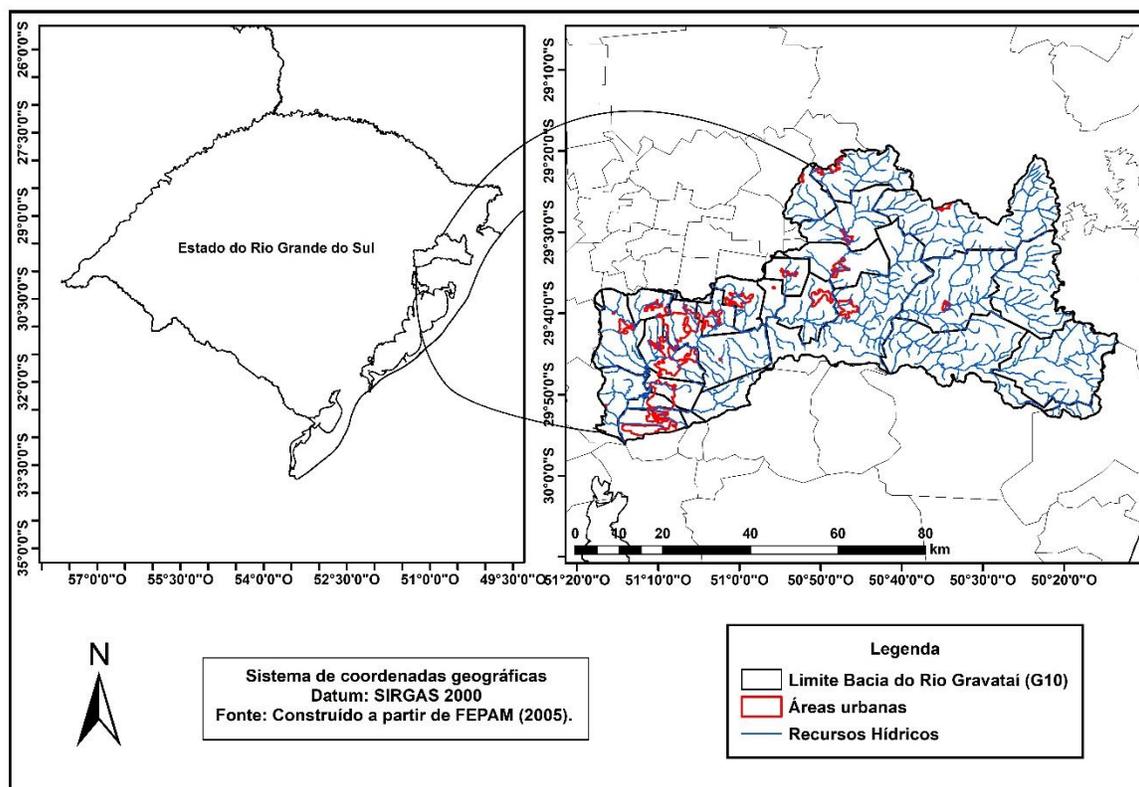


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de FEPAM (2005).

CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

Segundo Guasselli (2018) a formação geológica da Bacia do Gravataí, revela que o canal de ligação não possui bordas definidas. As formações implicam que as áreas pantanosas correspondem a depósitos pantanosos formados por areia acumulada, silte e argila plástica (RUBBO, 2004).

A Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), empresa responsável pelo abastecimento público de água, fornece água da bacia do rio Gravataí para a população urbana e os moradores da bacia têm acesso a essa água por meio de córregos superficiais e poços no município de Santo Antônio da Patrulha (RUBBO, 2004). Rubbo et. al. (2002) afirmam que a bacia hidrográfica do rio Gravataí apresenta inúmeras litologias (Figura 2).

Conforme Hausman (1995) reservatórios de água subterrânea são uma característica da massa de terra da bacia, o rio Gravataí corre entre as formações geográficas existentes no estado, sendo conseqüentemente, pertencente a muitas províncias hidrogeológicas estabelecidas. Assim, a Figura 3 ilustra a hidrogeologia presente na área da Bacia.

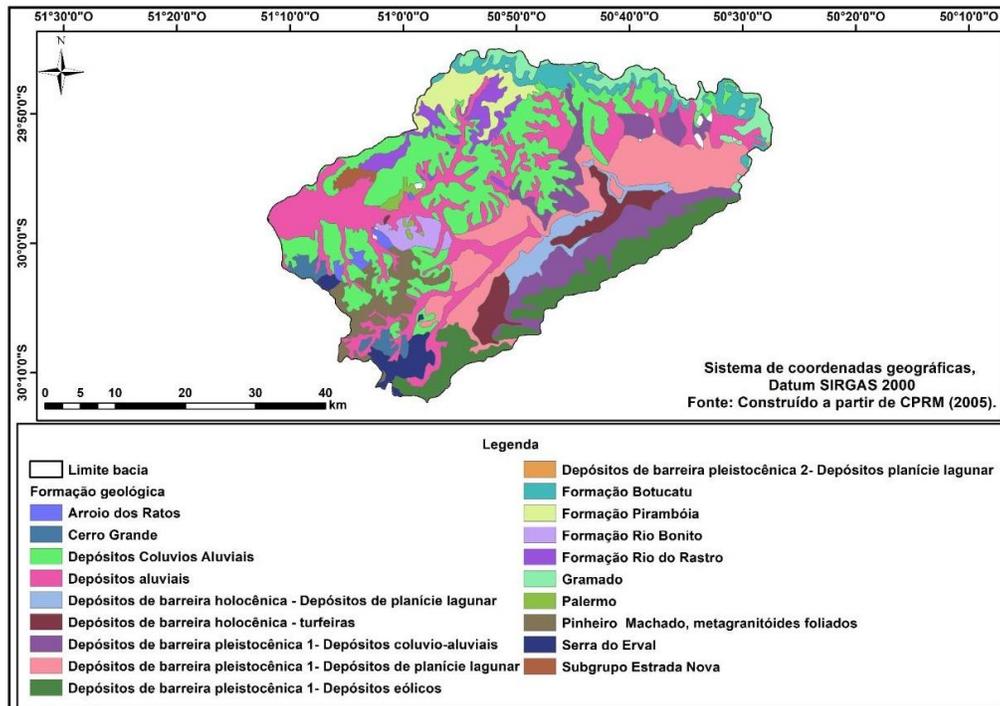


Figura 2 - Formações geológicas presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de CPRM (2006).

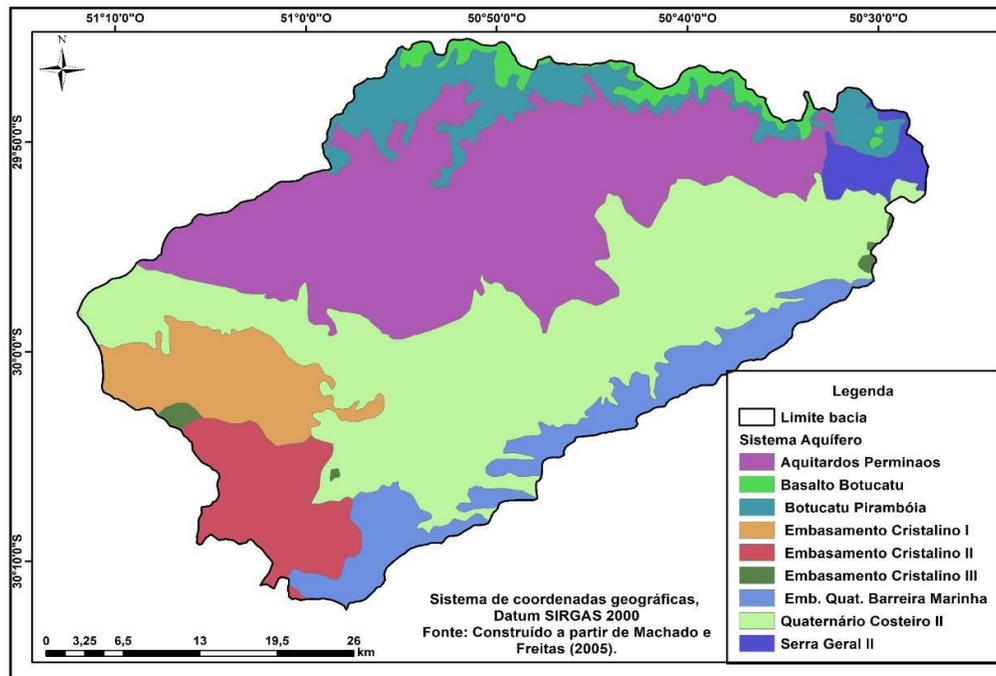


Figura 3 - Formações hidrogeológicas presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de Machado e Freitas (2005).

ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO

O banco de dados empregado é composto por imagens de satélite, dados vetoriais e planilhas eletrônicas. No referido banco, foram aplicadas as ferramentas de geoprocessamento a partir de um sistema de informações geográficas. Deste modo, conforme proposto por Veríssimo (2010), na álgebra de mapas a pontuação das variáveis D, R, A e T foram extrapoladas 10 vezes dos valores originais propostos por Ribeiro (2005). Isso ocorre devido a uma melhor comparação com a variável LU. Essa aplicação já foi utilizada com eficácia em estudos anteriores realizados por Favaretto et al. (2020) Lunardi et al. (2021) Borba et al. (2020; 2022).

Para o levantamento dos dados hidrogeológicos (Tanto da distância do nível freático - D quanto para o material do aquífero - A) foram colhidas as informações de um total de 1.425 poços através do portal do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php para a área de estudo, os quais apresentam datas de coletas variáveis.

Desses foram utilizadas as informações de 490 poços tubulares, pois apresentavam os dados necessários (Litologia, nível estático e perfil construtivo). O parâmetro D (profundidade do nível freático) foi pontuado de

acordo com a profundidade em metros, conforme a Tabela 1. Este parâmetro foi interpolado a partir do método Inverse Distance Weighting (IDW) com resolução de 30 metros.

Tabela 1 - Relação de pontuação de acordo com a profundidade do nível freático.

Profundidade (m)	Pontuação
<1,5	100
1,5 - 4,6	90
4,6 - 9,1	70
9,1 - 15,1	50
15,1 - 22,9	30
22,9 - 30,5	20
>30,5	10

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

Para o material do aquífero (Parâmetro A), os poços foram divididos por pontuações de acordo com o material encontrado (Tabela 2). A identificação desta variável foi a partir do cruzamento das informações de geologia local, conforme base de dados da CPRM (2006). Assim, foram identificados os materiais arenito e basalto como constituintes.

Tabela 2 - Classes do material do Aquífero (A) e suas respectivas notas

Natureza do aquífero	Pontuação	Usual
Xisto argiloso (Argilito)	1 - 3	20
Rocha metamórfica/ígnea	2 - 5	30
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3 - 5	40
Till glacial	4 - 6	50
Arenito, calcário e argilitos estratificados	5 - 9	60
Arenito maciço	4 - 9	60
Calcário maciço	4 - 9	80
Areia e basalto	4 - 9	80
Basalto	2 - 10	90
Calcário carsificado	9 - 10	100

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

No parâmetro R (recarga) a classificação segue os valores apresentados na Tabela 3. Na área de estudo, ocorreu a presença de arenito e basalto como formações geológicas. Assim, para o basalto foi utilizado o valor proposto por Hausmann (1995), o qual considera uma recarga média de 125 mm/ano, o que corresponde a uma nota 80. Já para o arenito, foi considerado uma recarga média anual de 222 mm/ano, segundo estudos desenvolvidos por De Melo et al. (2012), a qual corresponde a uma nota 60.

Tabela 3 - Classes de recarga do aquífero (R) e suas respectivas notas

Recarga (mm/ano)	Pontuação
< 51	1
21 - 102	3
102 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

Para a variável topografia (T) foi realizada através de um mosaico de cenas com imagens Shuttle Radar Topography Mission (SRTM/USGS, 2022), com resolução espacial de 30 m. Foram utilizadas as cenas denominadas SH-22-Z-A; SH-22-Y-B; SH-22-X-C e SH-22-V-D. As pontuações referentes a essa variável estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Classes de Topografia (T) uso do solo e suas respectivas notas

Declividade (%)	Pontuação
< 2	100
2 - 6	90
6 - 12	50
12 - 18	30
>18	10

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

Para o LU (Land use) empregou-se uma imagem multiespectral, sensor OLI, datada de 13/03/2021 com resolução espacial de 30 metros, sem nuvens (NASA, 2021). Na ferramenta Raster Classification realizou-se uma classificação automática da referida imagem, considerando as seguintes categorias: pastagens e áreas agrofloretais, Água, florestas e zonas seminaturais e áreas urbanas e suas respectivas pontuações (Tabela 5).

Tabela 5 - Classes de uso do solo e suas respectivas notas

Parâmetro LU	Pontuação
Ocupação do solo	
Áreas agrícolas	
Agroflorestais, áreas agrícolas heterogêneas	50
Áreas artificiais	
Áreas urbanas contínuas, aeroportos	75
Áreas naturais	
Ambientes aquáticos	50
Florestas e zonas seminaturais	0

Fonte: Adaptado Ribeiro (2005).

Conforme Ribeiro (2005), para o método IS, foi aplicada a equação 1, a partir da calculadora *raster* do SIG. Para finalizar, o resultado do IS, foi classificado conforme a Tabela 6. Deste modo, todas as informações cartográficas vetoriais, do tipo polígono, foram rasterizadas, na resolução espacial de 30 metros e sistema de coordenadas SIRGAS2000, assim como os resultados da interpolação de dados e da classificação de uso do solo.

$$IS = (0,186 * D) + (0,212 * R) + (0,256 * A) + (0,121 * T) + (0,222 * LU)$$

Equação 1

Tabela 6 - Classes de susceptibilidade à contaminação

Valores	Susceptibilidade
> 90	Extremamente vulnerável
80 - 90	Muito elevada
70 - 80	Elevada
60 - 70	Moderada a alta

50 - 60	Moderada a baixa
40 - 50	Baixa
30 - 40	Muito baixa
< 30	Extremamente baixa

Fonte: Adaptado de Stigter et al. (2006).

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

PROFUNDIDADE DO NÍVEL FREÁTICO

Na área avaliada, a profundidade do nível freático variou de valores menores que 1,5 m a superiores a 30,5 m (Figura 4). Quanto menos profundo o um reservatório subterrâneo, maior sua suscetibilidade à poluição. Isso ocorre devido à proximidade do contaminante com o fluxo subterrâneo de águas subterrâneas que facilita a passagem de contaminação para o aquífero (BORBA et al., 2016). Nas áreas mais claras da Figura 4, estão representados os pontos com menor profundidade, ou seja, com maior pontuação e susceptibilidade à contaminação. Isso se deve em virtude de uma menor profundidade do nível da água tornando o aquífero mais vulnerável a carga contaminante lançada na superfície.

Ribeiro et al. (2005) relata que a susceptibilidade própria do aquífero se define em dois fatores, como intrínseca (a qual leva em consideração somente características geológicas) e específica (leva em consideração o poluente em específico).

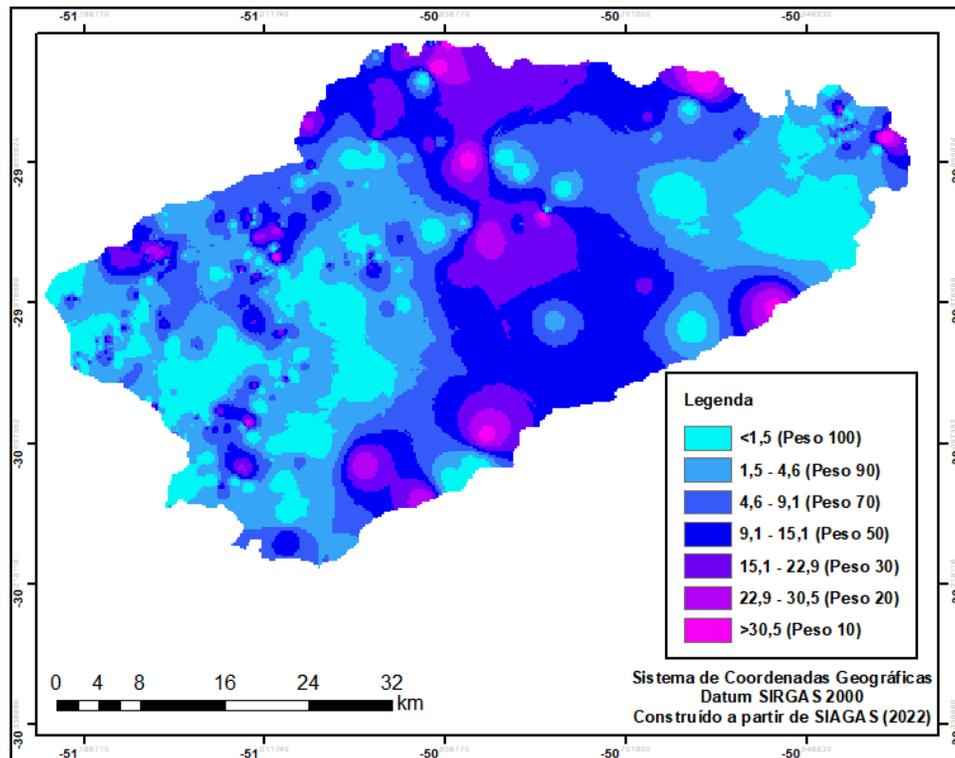


Figura 4 - Variação do nível freático na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de SIAGAS (2022).

RECARGA

Em um período específico, a quantidade de água que se infiltra na superfície e atravessa a área com zona não saturada é chamada de recarga, a água entra na terra através de fluxos diretos de precipitação, fluxo de águas subterrâneas e infiltração na superfície do solo (MCGUFF; MCMULLEN, 2004). Nesse caso, considerando que quanto maior é a recarga, maior o risco de contaminação do aquífero (LIMA et al., 2017), visto que o movimento de água é maior e conseqüentemente o de um possível contaminante.

Na Figura 5, observa-se na área estudada, onde foram encontrados dois valores para recarga. Sendo que, uma menor proporção da área ocupada pela bacia, apresenta valores de recarga de 125 mm/ano, isso indica que essa parcela da precipitação abastece o aquífero. Nessa área estão presentes as áreas de basalto da bacia. Já uma maior porção da bacia hidrográfica apresentou recarga de 222 mm/ano., sendo representadas pelas áreas de arenito.

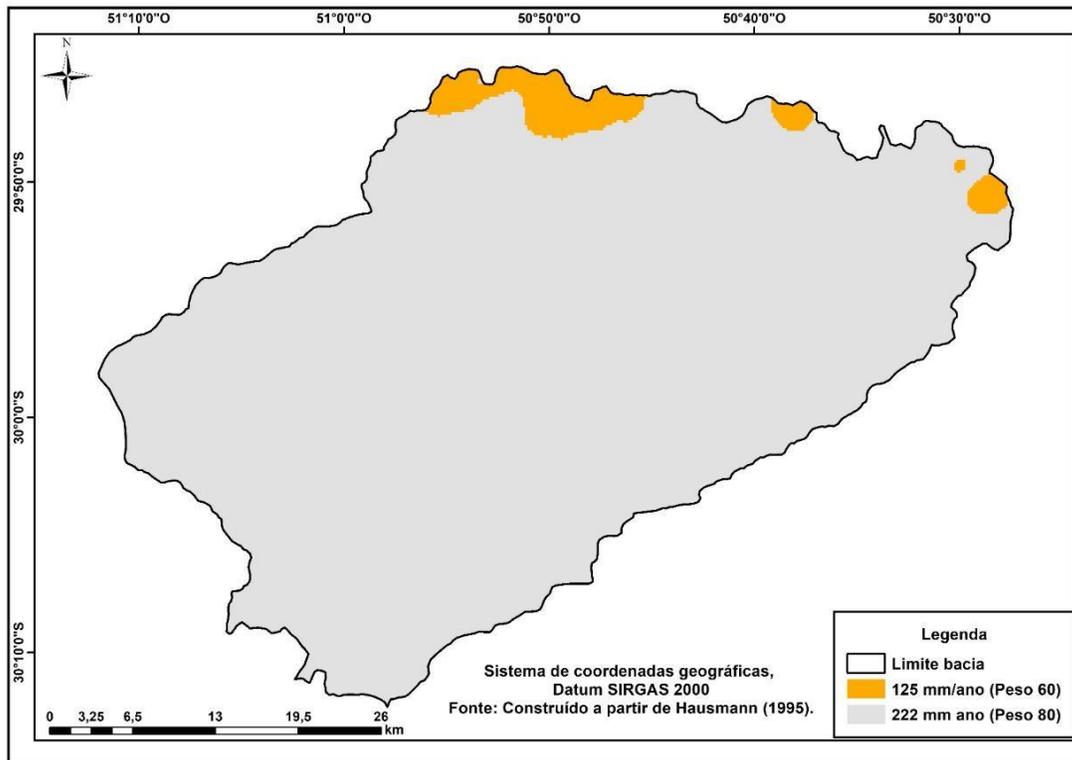


Figura 5 - Recarga na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de Hausmann (1995) e De Melo et al. (2012).

MATERIAL DO AQUÍFERO

Na Figura 6, está representado o material do aquífero, que na sua maior área se encontra o arenito, que por sua vez pode apresentar um menor índice de susceptibilidade à contaminação em relação ao basalto. Isso se deve em virtude de, embora o arenito ser mais permeável, podem ocorrer possíveis retenções de contaminantes pelo próprio solo ou seus argilominerais. Já o basalto, pode apresentar fraturas, o que representa um caminho direto entre o contaminante e o meio subterrâneo. Para McGuff e McMullen (2004) as características do material do aquífero tem uma grande importância em relação aos contaminantes, desde a sua absorção, reação e dispersão.

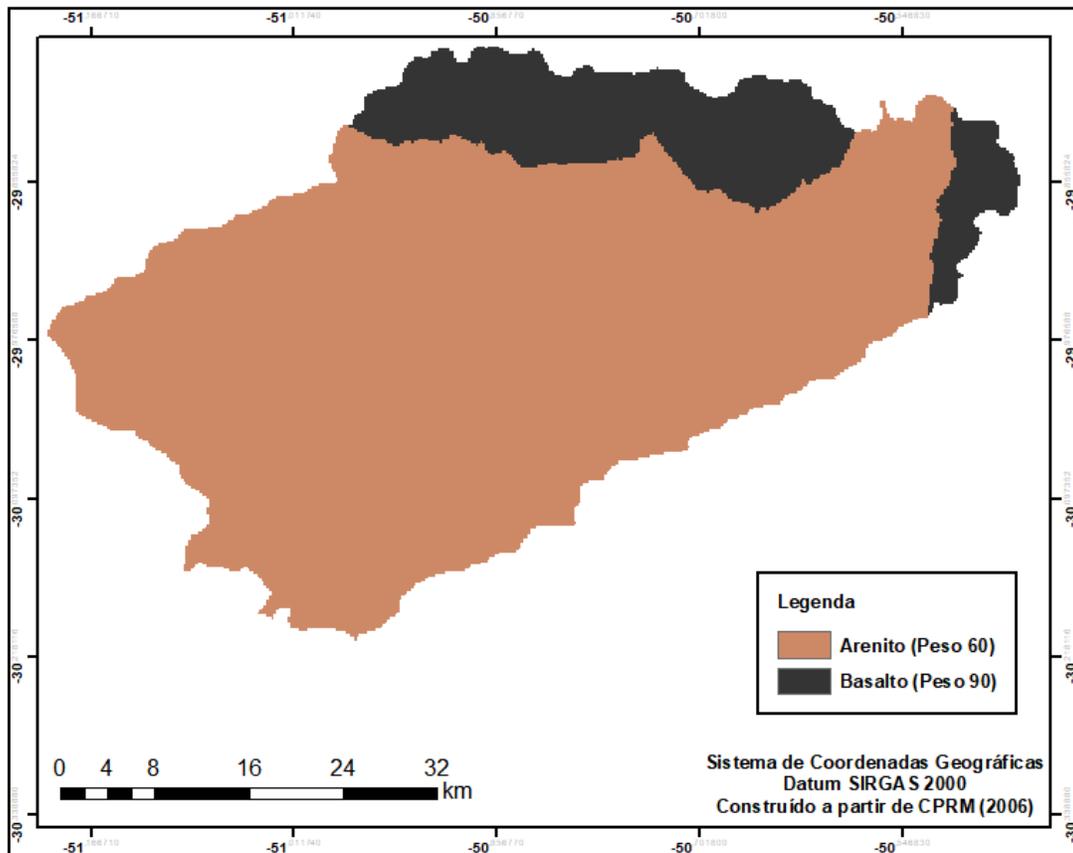


Figura 6 - Material do aquífero Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de CPRM (2006).

TOPOGRAFIA

No caso do parâmetro T, foi analisada através da declividade em porcentagem, como demonstra a Figura 7. Em algumas áreas com declividade menor as chances de susceptibilidade à contaminação são muito mais elevadas em relação a uma declividade maior. De acordo com Aller et al. (1987) e Lneq (2002) esse parâmetro e a inclinação do local determinam a probabilidade de poluentes permearem a superfície ou permanecerem nela. Isso torna mais provável que os poluentes se infiltrem na área circundante. Conforme a Figura 7, percebe-se que a área mais central da bacia do Rio Gravataí apresenta regiões mais onduladas (declividade maior que 18%), já no Norte estão presentes regiões de relevo plano.

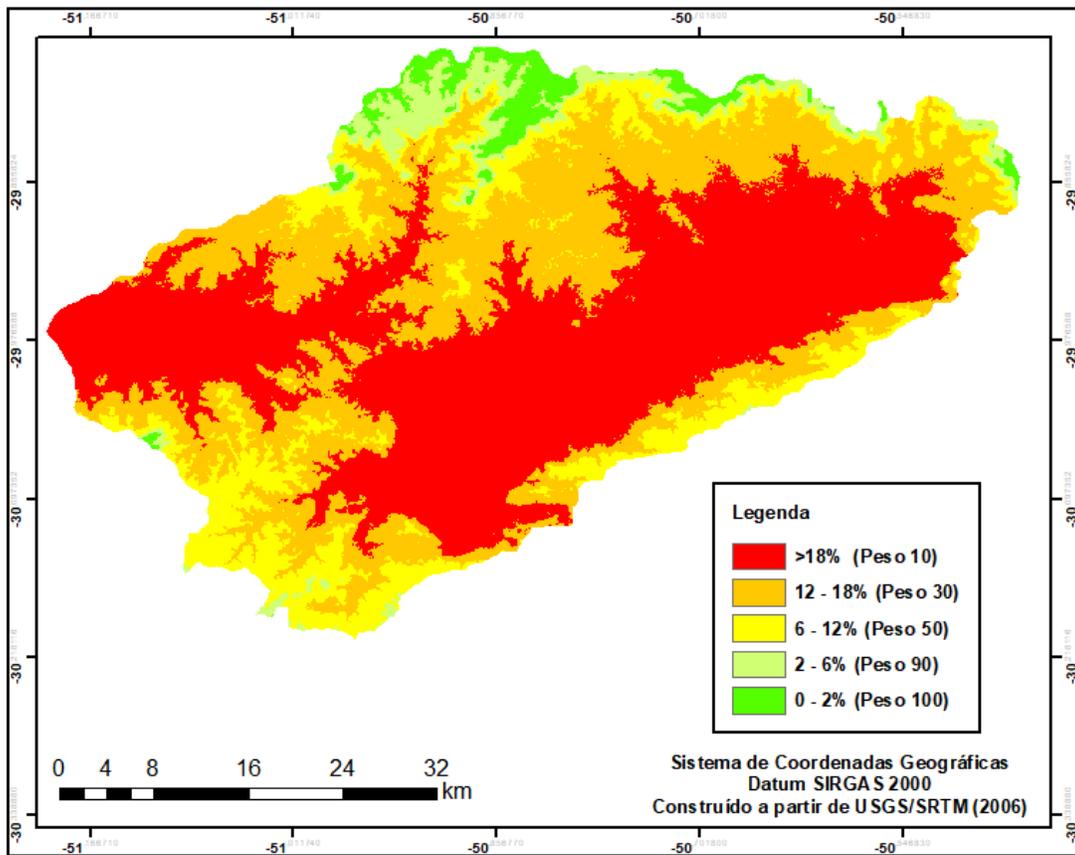


Figura 7 - Topografia da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de USGS/SRTM (2006).

USO DO SOLO (VARIÁVEL LU)

As classes de uso do solo presentes na Bacia do rio Gravataí (Figura 8), apresentaram uma grande parte de área alagada. De acordo com a FEPAM (2020) isso se dá por conta de uma demanda elevada de atividades agropecuárias, envolvendo a irrigação de lavouras de arroz. Sendo que, essas atividades localizam-se em uma região mais vulnerável da área (Norte).

As demais áreas classificadas através do uso e ocupação do solo se enquadram em florestas e zonas seminaturais, áreas urbanas descontínuas e em culturas anuais. Mas de acordo com Guasseli et al. (2012) atualmente, a classe do arroz no banhado grande é considerada a área mais problemática, isto devido ao arroz ser encontrado em áreas que cruzam entre o pântano e seus períodos de pico de inundação.

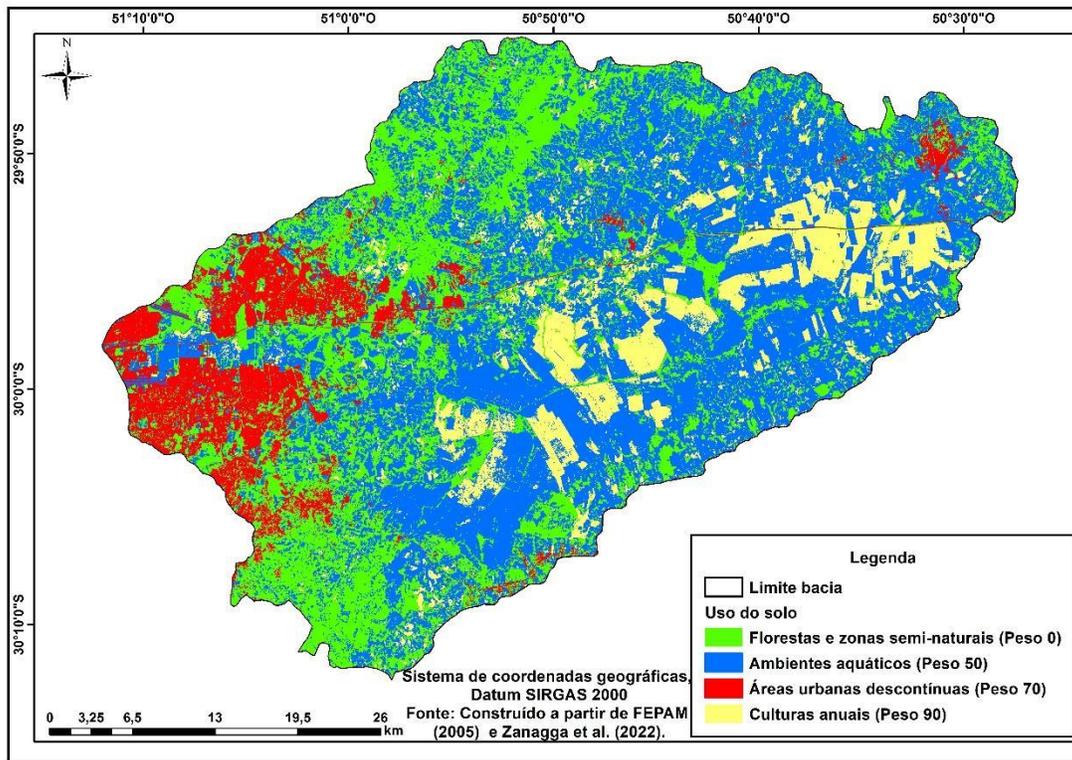


Figura 8 - Uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de Zanaga et al. (2021).

ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE

Na área analisada, o IS apresentou sete classes variando de muito baixa (05,61 %) a muito elevada (00,08 % da área), com predomínio da classe moderada a baixa (37,02 %). Os valores mais altos estão localizados na parte do leito do rio Gravataí, que foi alterado, para criar um trecho médio canalizado, projeto usado para aumentar a quantidade de produção de arroz (GUASSELLI et al., 2018). Na região alta e média do rio existe principalmente terra de cultivo, com plantações de arroz, já na outra região, a área é mais densamente povoada e possui áreas industriais e urbanas próximas à parte baixa do rio (GUASSELLI et al., 2018).

FEPAM (2016) afirma que a bacia G-010 é a área mais sensível da Região Hidrográfica do Guaíba, e isso ocorre porque as fazendas de arroz esgotaram a capacidade dos pântanos de regular o fluxo de água. Com base no estudo realizado por da Silva (2022), a várzea do rio Gravataí está muito próxima da Região Metropolitana de Porto Alegre, o que a torna mais suscetível aos danos ambientais causados pela atividade industrial na cidade. Assim, Foster et al. (2002; 2006) afirmam que áreas industriais apresentam potencial de gerar carga contaminante no solo entre moderado a elevado, dependendo o tipo de atividade realizada. Além disso, zonas urbanas sem sistemas de coleta e tratamento de esgoto doméstico, também podem contribuir com a

contaminação do aquífero. Analisando a Figura 9, percebe-se que essa área apresenta áreas com susceptibilidade entre moderada a alta e elevada, no cruzamento das informações do método IS.

Como pode-se observar na Tabela 7 e na Figura 9, as classificações dos níveis de susceptibilidade em porcentagem, resultou em aproximadamente 37,02% moderada baixa, 28,04% moderada a alta, 22,72% baixa, 06,53% levada, 05,61% muito baixa e 00,08 % muito elevada. A Tabela 8 ilustra os resultados obtidos em outras pesquisas relacionadas ao IS. Percebe-se que a maioria dos estudos realizados, apresentaram classes predominantes moderada a baixa.

Tabela 7 - Classes de índice de susceptibilidade

Classes	Área (ha)	Área (%)
Muito elevada	168,48	00,08
Elevada	13.114,50	06,53
Moderada a alta	56.274,93	28,04
Moderada a baixa	74.301,20	37,02
Baixa	45.595,01	22,72
Muito baixa	11.259,01	05,61
Total	200.713,47	100,00

Fonte: Autoria própria.

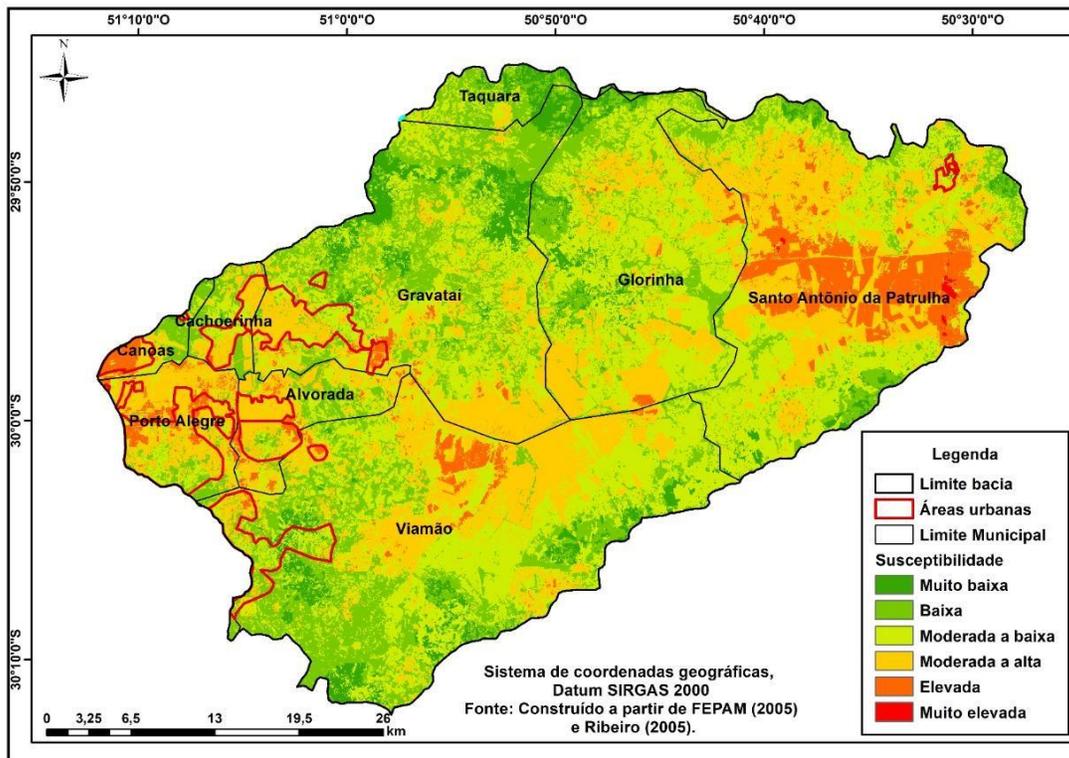


Figura 9 - Índice de susceptibilidade na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - G10. Fonte: Construído a partir de Ribeiro (2005).

Tabela 8 - Resultados obtidos em pesquisas envolvendo o IS.

Autores	Local	Classes de susceptibilidade	Classe predominante (Em relação a área de estudo)
Borba et al. (2016)	Frederico Westphalen - RS	Baixo e muito baixo	Moderada a baixa (55,00%)
Tassi et al. (2019)	Ijuí - RS	Muito baixa a elevada	Moderada a baixa (50,12 %)
Borba et al. (2020)	Bacia do Rio Turvo - RS	Muito baixo a muito elevado	Moderada a baixa (56,01%)
Favaretto et al. (2020)	Aratiba - RS	Baixo a elevado	Moderada a baixa (47,24%)
Coelho et al. (2022)	Jaú - SP	Muito baixa a muito elevado	Alta (57,91 %)
Toniolo, Ventura e Silva (2022)	Unidade de Negócio Oeste SABESP - SP	Extremamente baixo a moderado-alto	Muito baixo

Fonte: Autoria própria

IV. CONCLUSÕES

Essa pesquisa determinou a efetividade do método para estimativa da susceptibilidade da bacia hidrográfica do rio Gravataí, no estado do Rio Grande do Sul, que apresentou sete diferentes classes de suscetibilidade. Foi identificado com precisão zonas com suscetibilidade de baixa a alta à contaminação, sendo que variaram de muito baixa a muito alta. Esses resultados obtidos de alta a muito alta é a classificação mais comum.

Foram coletados dados sobre as variáveis do método, onde 37% da área apresentava o índice de suscetibilidade moderado abaixo. Nas áreas com maior suscetibilidade a contaminação, estão localizadas próximas as áreas urbanas da região metropolitana, juntamente com regiões de arenito e com nível freático mais raso. Pesquisas mais aprofundadas são necessárias quando se considera a localização do potencial contaminação e sua relação com o assunto pesquisado. Isso mostra quais áreas são ideais para o desenvolvimento futuro. Com isso pode-se compreender como os recursos hídricos são contaminados, sendo crucial para a criação de mapas de recursos hídricos. Considerando a localização de atividades agrícolas potencialmente contaminantes e como isso se cruza com os resultados do estudo.

V. REFERÊNCIAS

ALLER, L. et al. Drastic: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency (EPA Number: 600287035). USA. p.643, 1987. Disponível em: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=12693 3. Acesso em: 10 Dez. 2022.

BORBA, W. F. de et al. Geoprocessamento aplicado a estimativa da susceptibilidade à contaminação do Aquífero Serra Geral: escala da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea. GEOCIÊNCIAS (SÃO PAULO. ONLINE), v. 41, p. 405 415, 2022.

BORBA, W. F. de et al. Aplicação do método índice de susceptibilidade para estimativa da susceptibilidade à contaminação na Bacia hidrográfica dos rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo. Geologia USP. Série Científica, v.

20, p. 125-136, 2020.

BORBA, W. F. de et al. Geoprocessing applied to the determination of susceptibility index funding for tubular wells of the serra geral system in Frederico Westphalen - Rio Grande Do Sul. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 39, n. 3, p. 79, 2016. https://doi.org/10.11137/2016_3_79_88.

BOUFEKANE, A. et al. Modified DRASTIC index model for groundwater vulnerability mapping using geostatistic methods and GIS in the Mitidja plain area (Algeria). Environmental Forensics, v. 23, ed. 5-6, p. 539-556, 2022. <https://doi.org/10.1080/15275922.2021.1913674>.

CHAKRABORTY, B. et al. Groundwater vulnerability assessment using GISbased DRASTIC model in the upper catchment of Dwarakeshwar river basin, West Bengal, India. Environmental Earth Sciences. v. 81, n. 1, p. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10002-3>.

COELHO, B. S. R. et al. Análise da susceptibilidade à contaminação das unidades Aquíferas no Município de Jaú - SP. ACTA AMBIENTAL CATARINENSE, v. 19, p. 01-20, 2021.

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2006.

DA SILVA, M. V. et al. A geostatistical assessment of the natural and anthropogenic factors that influence groundwater quality in the Beberibe aquifer in northeastern Brazil. Environmental Earth Sciences, v. 81, n. 18, p. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10577-5>.

EMBERGA, T. et al. Groundwater risk assessment in imo river basin of southeast nigeria using gis-based DRASTIC and GOD. Research Square, 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2393590/v1>.

FANNAKH, A.; FARSANG, A. DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. Environmental Sciences Europe, v. 34, n. 77, p. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00646-8>.

FAVARETTO, J. R. et al. Estimativa da Susceptibilidade à Contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral em Aratiba - RS por Diferentes Métodos. RBC. Revista Brasileira de Cartografia (ONLINE), v. 72, p. 1-18, 2020.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL LUIZ CARLOS ROESSLER. Arquivo digital para uso em SIG - Base cartográfica digital do RS 1:250.000. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp>. Acesso em: 19 de dez. de 2022.

FEPAM / DPD, 1998. Qualidade dos recursos hídricos superficiais da bacia do Guaíba - subsídio para o processo de Enquadramento. Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos. Gramado.

FOSTER, S. et al. Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. Washington: DC, World Bank, 2002. 114p.

FOSTER, S. et al. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Washington: Groundwater Management Advisory GW.MATE WB, 2006. 114p.

HAUSMAN, A. Esboço Hidrogeológico do Rio Grande do Sul – Brasil. Acta Geologica Leopoldensia, p. 37-71, 1995.

GUASSELLI, L. A. (org). Áreas úmidas: questões ambientais. Porto Alegre: CAPES/UFRGS/Programa de Pós-graduação em Geografia/Imprensa Livre, 2018. 347p.

KOESUMA, S.; ROSIDAH, U.; RAMELAN, A. H. Groundwater Vulnerability Zones Mapping Using DRASTIC and GOD

Methods in Krendowahono Village, Karanganyar Regency. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science v. 989, n. 1, p. 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/989/1/012002>.

LAKSHMINARAYANAN, B. et al. New DRASTIC framework for groundwater vulnerability assessment: bivariate and multi-criteria decision-making approach coupled with metaheuristic algorithm. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, n. 3, p. 4474-4496, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15966-0>.

LIMA, G. F. C. et al. Intrinsic and specific groundwater vulnerability determination as a pre-operational baseline assessment of an unconventional hydrocarbon industry. International Journal of Environmental Science and Technology, p. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04551-8>.

LIMA, L. A. et al. Uso de sistema de informação geográfica para a determinação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos fraturados: Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos – São José de Ubá/RJ. Águas Subterrâneas, v. 31, n. 3, p. 181, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i3.28661>.

LNEC. LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Cartografia da Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do concelho de Montemor-o- Novo utilizando o método DRASTIC. LNEC: Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa, Proc.607/1/14252, Março 2002.

LUNARDI, S. et al. Contamination susceptibility of Serra Geral Aquifer at municipal scale in Brazil. Social Sciences & Humanities Open, v. 4, p. 100144, 2021.

MACADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. Projeto mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul: escala 1:750.000, relatório final. Porto Alegre: CPRM, 2005.

MAHDID, S. et al. Evaluation and comparison of groundwater vulnerability to pollution by the Drastic and God Methods: A Case Of Wadi Nil Alluvial Plain (Jijel, Ne Algeria). Food And Environment Safety Journal, v. 21, n. 1., 2022. <https://doi.org/10.4316/fens.2022.007>.

MCGUFF, H.; MCMULLEN, A. Exploring Aquifer Vulnerability for Hornby Island BC. In: GIS 470 term project, University of British Columbia. Canadá. Disponível em: <https://ibis.geog.ubc.ca/courses/klink/class04/hornby/home.htm> Acesso em: 10 jan. 2023.

MELO, J. G. de et al. Estimativa da recarga do sistema aquífero dunas/barreiras na bacia do Rio Pirangi, RN. Revista Águas Subterrâneas. v. 28, n. 2, p. 68 - 81, 2012.

RIBEIRO, L. F. Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos – formulações e aplicações. VII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Anais... Évora, APRH, p. 14.

ROCHA, R. O. F.; CRUZ, M. A. S. Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos presentes na região de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros, SE. Portal Embrapa. 2017. Disponível em: . Acesso em: 2 Jan. 2023.

RUBBO, M. et al. Diagnóstico Quali-Quantitativo do Aquífero Freático da Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - RS. In: XII Congresso brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, Florianópolis. Anais... Potencialidade dos Aquíferos, 2002.

RUBBO, M. Análise do potencial hidrogeológico do aquífero cenozóico da bacia hidrográfica do rio Gravataí - RS. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SEMA. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA. G010 - Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí. 2017. Disponível em: <sema.rs.gov.br/g010_bhgravatai>. Acesso em: 29 Nov. 2022.

SIAGAS. SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Pesquisa geral. Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php Acesso em: 10 nov. 2022.

SRESTO, M. A. et al. Groundwater vulnerability assessment in Khulna district of Bangladesh by integrating fuzzy algorithm and DRASTIC (DRASTIC-L) model. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 8, p. 3143-3157. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01270-w>.

TASSI, R. et al. Relação entre aquíferos susceptíveis à contaminação e áreas de preservação permanente hídrica em Ijuí, RS. *Pesquisas em geociências*, v. 46., n. 3, p. 0781, 2019. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.97674>.

TONIOLO, B. P.; VENTURA, K. S.; SILVA, D. C. da C. Identificação espacial da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação por meio de indicadores ambientais. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 7, n. 4, 18, p. 190 - 202, 2022. <https://doi.org/10.24221/jeap.7.4.2022.4158.190-202>.

NASA - LANDSAT PROGRAM. Landsat ETM+ cena LC82210812021072LGN00, L1T, USGS, Sioux Falls, 2019. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acessado em: 20mai2019.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second Scene Srtm1s28w054v3, Unfilled Unfinished 2.0, Global Land Cover Facility. Maryland: University of Maryland, 2006.

VERÍSSIMO, A. C. F. Hidroquímica, vulnerabilidade e protecção do aquífero de torres vedras. 2014. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 140 p.

ZANAGA, D. et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>.