

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Tauani Andrieli Souza Borges

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE NA BACIA DO RIO
GRAVATAI - RIO GRANDE DO SUL**

Frederico Westphalen, RS
2023

Tauani Andrieli Souza Borges

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE NA BACIA DO RIO
GRAVATAI - RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, da Universidade
Federal de Santa Maria, RS, campus
Frederico Westphalen, como requisito
parcial para obtenção do grau de
Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Willian Fernando de Borba

Frederico Westphalen, RS, Brasil
2023

Tauani Andrieli Souza Borges

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE NA BACIA DO RIO
GRAVATAI - RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, da Universidade
Federal de Santa Maria, RS, campus
Frederico Westphalen, como requisito
parcial para obtenção do grau de
Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 23 de janeiro de 2023:

Willian Fernando de Borba, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Paulo Roberto dos Santos Salbego, Dr. (UFSM)

Sandro Luciano Barreto FensterSeifer, Dr. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS, Brasil
2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, porque sem ele, nada seria possível.

A minha família, pois depositaram confiança no meu progresso e pelo apoio de sempre.

Ao meu orientador, que desde o início me incentivou e pela sua dedicação e tempo para me auxiliar em todo processo.

Aos meus amigos, pela oportunidade do convívio e cooperação durante todos esses anos.

DEDICATORIA

Este trabalho é dedicado especialmente a minha família e amigos, que tanto me apoiaram para que pudesse chegar até aqui.

RESUMO

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE NA BACIA DO RIO GRAVATAÍ - RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Tauani Andrieli Souza Borges
ORIENTADOR: Willian Fernando de Borba

O uso de ferramentas de geoprocessamento na área ambiental estão se tornando cada vez mais comum. Com base nisso, esse estudo teve como objetivo determinar o índice de susceptibilidade à contaminação do aquífero na bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, no estado do Rio Grande do Sul. Essa bacia hidrográfica está localizada na região hidrográfica do Guaíba, possuindo uma área total de 2.020 km². Assim, foi aplicado o método do índice de susceptibilidade para a área de estudo, utilizando fontes de informações de órgãos governamentais para todas as variáveis. Os resultados mostraram a susceptibilidade variou de muito baixa a muito elevada, com predomínio da classe moderada a baixa (37,00 % da área). Nas áreas com um nível mais susceptível a 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 a área urbana, que faz com que se leve em consideração a necessidade de uma rede de esgoto eficiente. Assim, conclui-se que a ferramenta se mostrou eficiente, sendo possível sua aplicação no planejamento ambiental da área.

Palavras-Chave: Aquíferos. Bacia G-010. Índice de susceptibilidade.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE SUSCEPTIBILITY INDEX IN THE GRAVATAÍ RIVER BASIN - RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Tauani Andrieli Souza Borges

ADVISOR: Willian Fernando de Borba

The use of geoprocessing tools in the environmental area is becoming more and more common. Based on this, this study aimed to determine the susceptibility index to aquifer contamination in the Gravataí River watershed, in the state of Rio Grande do Sul. This hydrographic basin is located in the Guaíba hydrographic region, with a total area of 2,020 km². Thus, the susceptibility index method was applied to the study area, using information sources from government agencies for all variables. The results appreciated the variable susceptibility from very low to very high, with moderate to low class dominance (37.00% of the area). In areas with a more susceptible level of contamination, there is a greater demand for agricultural activities, especially the cultivation of rice, which is a point with great influence for contamination, because of flooding from irrigation, because of flooding from irrigation. The occurrence of susceptible areas close to the urban area was also obtained, which takes into account the need for an efficient sewage network. Thus, it is concluded that the tool proved to be efficient, being possible its application in the environmental planning of the area.

Keywords: Aquifers. Basin G-010. Susceptibility index.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Perfil de usuários de água subterrânea no país.....	13
FIGURA 2 - Tipos de aquíferos.	16
FIGURA 3 - Principais fontes de contaminação do meio subterrâneo.....	17
FIGURA 4 - Sequência para aplicação do método GOD.....	19
FIGURA 5 - Sequência para aplicação do método DRASTIC.	20
FIGURA 6 - Sequência para aplicação do IS.....	21
FIGURA 7 - Localização da Bacia G - 010.	22
FIGURA 8 - Formações geológicas existentes na Bacia G-010.	23
FIGURA 9 - Hidrogeologia presente na Bacia G-010.	24
FIGURA 10 - Variação do nível freático na área de estudo.....	28
FIGURA 11 - Recarga do aquífero na área de estudo.....	29
FIGURA 12 - Material do aquífero presente na área de estudo	30
FIGURA 13 - Topografia existente na bacia G - 010.....	31
FIGURA 14 - Uso e ocupação do solo da BHRG	32
FIGURA 15 - Índice de susceptibilidade	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Relação de pontuação de acordo com a profundidade do nível freático. .	25
TABELA 2 - Classes do material do Aquífero (A) e suas respectivas notas	25
TABELA 3 - Classes de recarga do aquífero (R) e suas respectivas notas	26
TABELA 4 - Classes de Topografia (T) uso do solo e suas respectivas notas	26
TABELA 5 - Classes de uso do solo e suas respectivas notas	27
TABELA 6 - Classes de susceptibilidade à contaminação.....	27
TABELA 7 - Classes de índice de susceptibilidade.....	33
TABELA 8 - Resultados obtidos em pesquisas envolvendo o IS	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	11
1.1.1. Objetivo geral	11
1.1.2. Objetivos específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	12
2.1. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	12
2.2. AQUÍFEROS	14
2.3. CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	16
2.4. GEOPROCESSAMENTO APLICADO A HIDROGEOLOGIA.....	17
2.5. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE E SUSCEPTIBILIDADE DE AQUÍFEROS	18
2.5.1. Metodologia GOD	18
2.5.2. Metodologia DRASTIC	19
2.5.3. Índice de Suscptibilidade	20
3. METODOLOGIA	22
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	22
3.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA.....	23
3.3. ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE DO AQUÍFERO À CONTAMINAÇÃO	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1. Profundidade do nível freático	28
4.2. Recarga.....	29
4.3. Material do Aquífero.....	30
4.4. Topografia.....	31
4.5. Uso e ocupação do solo (variável LU).....	31
4.6. INDICE DE SUSCEPTIBILIDADE.....	32
5. CONCLUSÃO	35
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

A contaminação de aquíferos se deve a várias fontes, devido às suas propriedades físicas e sensibilidade aos impactos naturais, isso ocorre porque os sistemas de águas subterrâneas geralmente são protegidos por seus arredores físicos (GUIGUER; KOHNKE, 2002).

Coletar e tratar a água subterrânea tem um custo muito baixo, tornando-a uma opção economicamente viável para usar a água subterrânea como um recurso (CETESB, 2013). Antes de avaliar o risco de fontes contaminantes, é necessário conhecer a localização e os perímetros de proteção dos recursos hídricos disponíveis. Isso permitirá um planejamento adequado na exploração dos recursos hídricos (GUIGUER; KOHNKE, 2002). Assim, os aquíferos são reservatórios geológicos subterrâneos que acumulam e cedem água (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011).

Diante disso, as ferramentas de geoprocessamento aplicado a área ambiental desempenham uma importante ferramenta de auxílio e gestão dos recursos naturais. Os métodos que visam estimar a vulnerabilidade à contaminação dos recursos subterrâneos. O Estado do Rio Grande do Sul, possui 25 bacias hidrográficas, sendo a do Gravataí, localizada na região hidrográfica do Guaíba (G), sob código G - 010 (GOVERNO DO RIO GRANDE DO SUL, 2021), correspondente a 30,00 % da área Estadual (RIO GRANDE DO SUL, 2021).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Determinar o índice de susceptibilidade da bacia do Rio Gravataí, no estado do Rio Grande do Sul.

1.1.2. Objetivos específicos

- Aplicar o índice de susceptibilidade na escala da bacia hidrográfica;
- Identificar quais áreas são mais susceptíveis à contaminação; e
- Gerar resultados de apoio a tomada de decisão por órgãos gestores.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Nesta revisão bibliográfica, será tratado sobre as principais questões referentes ao índice de susceptibilidade.

2.1. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Entende-se por águas subterrâneas, toda a água que ocorre abaixo da superfície terrestre, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, as fraturas, falhas e fissuras das rochas basálticas (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). Esse recurso, representando 97,00 % das águas doces e líquidas do planeta (HIRATA et al., 2019).

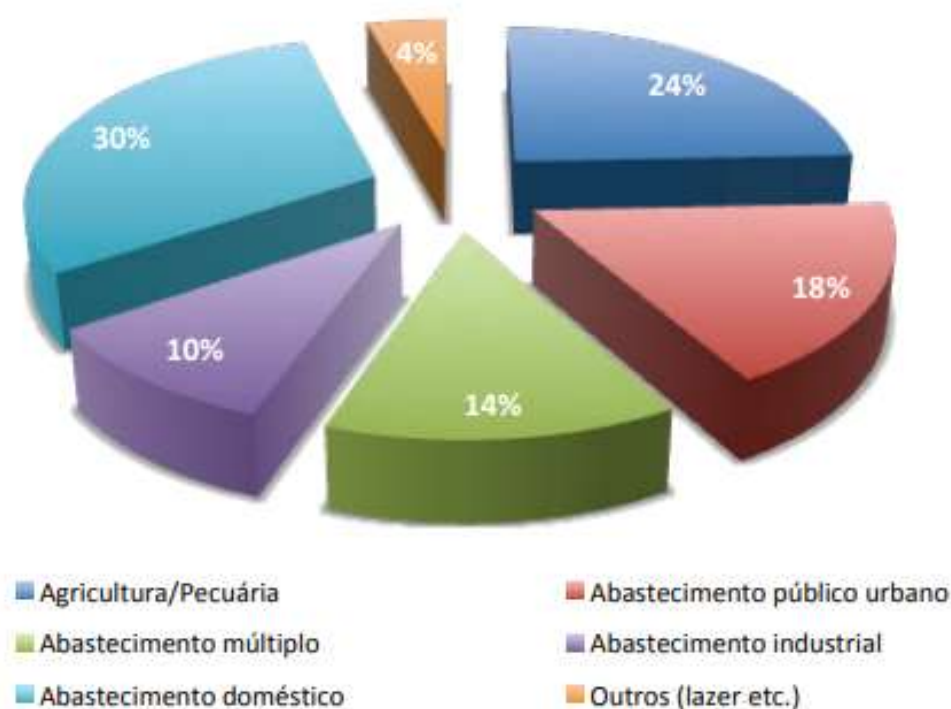
Nos aquíferos o que irá definir a velocidade que a água entra em seu meio são a porosidade e/ou permeabilidade intergranular ou de fissuras, também a sua qualidade tanto da água quanto do reservatório (ABAS, 2021). Isso ocorre por conta da sua origem geológica, que essa pode vir ser fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial, assim determinando em vários tipos de aquíferos (ABAS, 2021). As mesmas são de suma importância para todos, pois suprem diversas necessidades, tanto do campo quanto das cidades, pois as áreas de clima seco ou tropical não perdurariam por muito tempo sem as águas subterrâneas (HIRATA et al., 2019).

Hirata et al. (2019) relatam que no Brasil as águas subterrâneas por poços tubulares ou mais conhecidos como poços tubulares, mas nestes casos os números reais existentes destes poços são baixos, apesar das leis existentes.

Os registros, no caso as outorgas, são instrumentos que definem os prazos, condições e duração do uso dos recursos hídricos. Como as águas subterrâneas são território nacional, a perfuração de poços e o uso de aquíferos são autorizados pelos órgãos e entidades nacionais que gerenciam os recursos hídricos (FUNDAJ, 2019).

Observa-se na Figura 1 que se tem vários meios que utilizam as águas subterrâneas, mas um principal uso é no âmbito doméstico que chega a utilizar até 30,00%, agropecuário 24,00%, abastecimento público urbano 18,00% e abastecimento múltiplo 14,00%, industrial 10,00% e outros 4,00% para lazer (FUNDAJ, 2021).

Figura 1 - Perfil de usuários de água subterrânea no país.



Fonte: CPRM (2018 *apud* FUNDAJ, 2019).

Na maior parte das vezes optam pela utilização da água subterrânea por ter uma qualidade melhor do que a da rede pública, assim se justificam os utilizadores deste meio, sendo eles desde residenciais e/ou industriais (HIRATA et al., 2019).

Acredita-se que é preferível usar águas subterrâneas pelo fato de que as mesmas realizem uma filtração e purificação natural através da percolação em relação às águas dos rios, fazendo com que a qualidade aumente e que não seja necessário usar outros tipos de tratamento (ABAS, 2015). Diversas pesquisas têm por objetivo analisar alterações na qualidade das águas subterrâneas (AL-HASHIMI et al., 2021; HUANG et al., 2021; LI et al., 2021; MORRISSY et al., 2021; ADIMALLA; QIAN, 2022; PANNEERSELVAM et al., 2021; FAN et al., 2022; WANG et al., 2022).

No entanto, manter-se limpo da poluição é importante para a saúde da comunidade (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). A Organização Mundial da Saúde estabelece padrões de potabilidade para a água potável em todo o mundo, sendo que cada processo industrial exige uma qualidade de água diversa (CPRM, 2008).

2.2. AQUÍFEROS

A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente nº 396/2008 (CONAMA, 2008, p. 2.), define aquífero como um “Corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos”. Nesse contexto, os aquíferos desempenham o papel de armazenar e transmitir água (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011).

Para se considerar aquífero, a formação geológica precisa envolver espaços abertos, poros com água e também é necessário que contenha uma mobilidade no seu interior, fazendo com que se movimente naturalmente, temos como exemplo o arenito e as areias (CPRM, 2008). Em relação a porosidade, existem três tipos de aquíferos (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011): Aquíferos porosos (Formado por rochas sedimentares consolidadas); Aquífero fissural ou fraturado (Formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas) e os aquíferos cársticos (Formado por rochas calcáreas ou carbonáticas).

Já em relação à pressão, pode ocorrer a formação de aquíferos livres ou freáticos, confinados ou artesianos e aquíferos semiconfinados (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011), conforme Figura 2. Assim, define-se como (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011 p. 135; ABAS, 2022, p. 5):

Aquífero livre ou freático – é aquele constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta. Em aquíferos livres o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação.

Aquífero confinado ou artesiano – é aquele constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda no poço para além da zona aquífera. O seu reabastecimento ou recarga, através das chuvas, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Neles, o nível da água encontra-se sob pressão, podendo causar artesianismo nos poços que captam suas águas. Os aquíferos confinados têm a chamada recarga indireta e quase sempre estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas (bacias sedimentares).

O aquífero semi-confinado que é aquele que se encontra limitado na base, no topo, ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do aquífero em si. O fluxo preferencial da água se dá ao longo da camada aquífera. Secundariamente, esse fluxo se dá através das camadas semi-confinantes, à medida que haja uma diferença de pressão hidrostática entre a camada aquífera e as camadas subjacentes ou sobrejacentes. Em certas circunstâncias, um

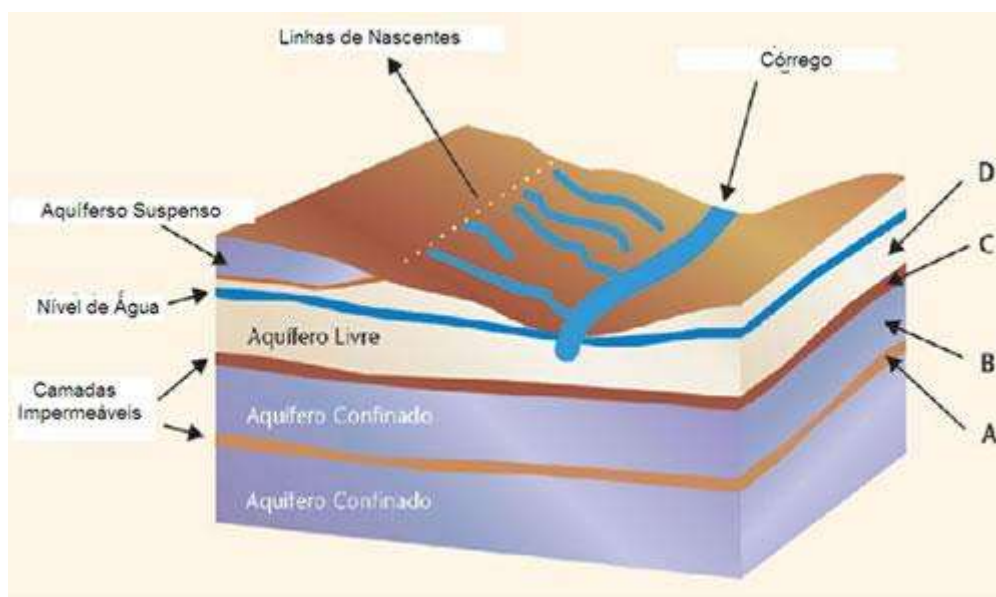
aquífero livre poderá ser abastecido por água oriunda de camadas semi-confinadas subjacentes, ou vice-versa. Zonas de fraturas ou falhas geológicas poderão, também, constituir-se em pontos de fuga ou recarga da água da camada confinada. (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011 p. 135; ABAS, 2022, p. 5).

Silva Júnior (2010) retrata que podem ocorrer casos isolados de aquíferos livres formados embaixo de uma camada impermeável ou semipermeável que não vai realizar absorção nem lançamento de água. Assim, pode-se formar um aquífero livre suspenso temporário.

Nos aquíferos confinados, ocorre uma pressão de água na superfície e que acaba sendo maior que a própria pressão atmosférica, isso acontece por conta das camadas limítrofes, e se acaba gerando os confinados, não drenantes e confinados drenantes (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). Em relação aos confinados não drenantes, pode se dizer que é quando ocorre a impermeabilidade nas camadas limítrofes, tanto inferiores quanto superiores, a água sai de modo natural e sem precisar ser bombeada, declara Silva Júnior (2010).

Já os confinados drenantes, se enquadram por serem semipermeáveis em pelo menos uma das suas camadas limítrofes, ocorrendo então a entrada e saída de fluxo de água (BORGHETTI, BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). Assim, Silva Júnior (2010) afirma que no caso dos aquíferos não confinados, a água preenche parcialmente o aquífero, já nos confinados ocorre o preenchimento total. A Figura 2 ilustra os tipos de aquíferos.

Figura 2 - Tipos de aquíferos.



Fonte: CPRM (2010).

Conforme Hirata (2019) um papel também importante das águas subterrâneas é a escoação delas para o oceano, pois o fluxo de águas subterrâneas impede que a água do mar entre no continente, portanto, além de regular a salinidade dos manguezais, a salinização dos aquíferos costeiros.

2.3. CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Uma característica bastante importante dos aquíferos é a possibilidade de diluir e degradar compostos contaminantes, grandes plumas de contaminantes dissolvidos que se infiltram no solo para aproveitar as características hidrogeológicas e geoquímicas e da própria natureza (HIRATA, 2019). Um ponto que vale mencionar é que por conta da falta de redes de esgotamento sanitário e condições defasadas existe a degradação de aquíferos e é uma pauta ambiental preocupante, pois nessas falhas entram as maiores contaminações.

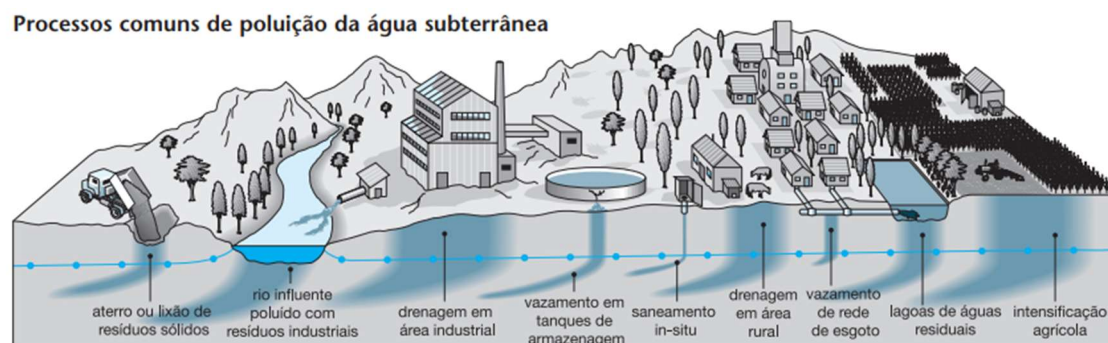
Corrêa (2019) menciona que aquíferos se contaminam e há diversas causas para isso, pois há a interferência no seu modo de uso, como o consumo humano, animal, vegetal industrial e entre vários outros. As maneiras de contaminação podem ser divididas em três partes, em pontual, que se trata de quando existe concentração em uma parte pequena da superfície, como pode-se exemplificar um poço tubular ou escavado

(CORRÊA, 2019). Acontecem mais em áreas urbanas, por conta das cargas poluidoras nas localidades residenciais que não possuem esgotamento sanitário, e essas cargas acabam tendo nutrientes que se trata de (nitrogênio e enxofre), sais como o cloreto, diversas bactérias, compostos orgânicos e também vírus (OLIVEIRA, 2016).

Além dessas citadas anteriormente, Corrêa (2019), menciona as contaminações lineares, que tem como fonte de contaminação rios ou canais. O transporte de contaminantes em meios fraturados ou granulares, pode ocorrer por meio da advecção, dispersão mecânica, difusão molecular e reações químicas, ou ainda, no caso de meios fraturados pela porosidade do material (CORRÊA, 2019)

Nota-se nas zonas agrícolas, algumas práticas que não são próprias para se manejar o solo, causando então grandes problemas de poluição dos aquíferos, elevando bruscamente as taxas de nitrato (OLIVEIRA, 2016). Assim, a Figura 3 ilustra as principais fontes de contaminação do meio subterrâneo.

Figura 3 - Principais fontes de contaminação do meio subterrâneo.



Fonte: Foster et al. (2003; 2006).

2.4. GEOPROCESSAMENTO APLICADO A HIDROGEOLOGIA

Conforme Silva (2013) o geoprocessamento usa técnicas e procedimentos matemáticos como ferramentas de cálculo para processamento de informações espaciais e temporais. Esta ferramenta é usada para os mais variados usos, dentre eles destaca-se a área de meio ambiente.

Dados de sensoriamento remoto são usados para monitorar mudanças ambientais e avaliar seus efeitos sobre os recursos naturais. Esses dados podem ser coletados e analisados rapidamente a baixo custo para produzir resultados importantes. (MATRICARDI, 2018). Esses estudos podem usar informações da prática para prever a

possível trajetória do impacto ambiental (MATRICARDI, 2018). Aliado a isso, Carelli e Lopes (2011) afirmam que o geoprocessamento tem sido uma das ferramentas mais utilizadas na área ambiental, pois permitem uma avaliação integrada dos sistemas naturais.

Nesse mesmo sentido, a utilização de imagens de satélite, fotografias aéreas, mapas, banco de dados ou ainda softwares específicos de geoprocessamento, permitem uma melhor manipulação dos dados, evidenciando as informações de interesse (IBRAHIN, 2014). Estudos que aplicam técnicas de geoprocessamento em águas subterrâneas, estão cada vez mais comuns (LIMA et al., 2022; RAMAKRISHNA et al., 2022; da SILVA et al., 2022; BAILEY et al., 2023), tanto no cenário nacional quanto internacional.

2.5. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE E SUSCEPTIBILIDADE DE AQUÍFEROS

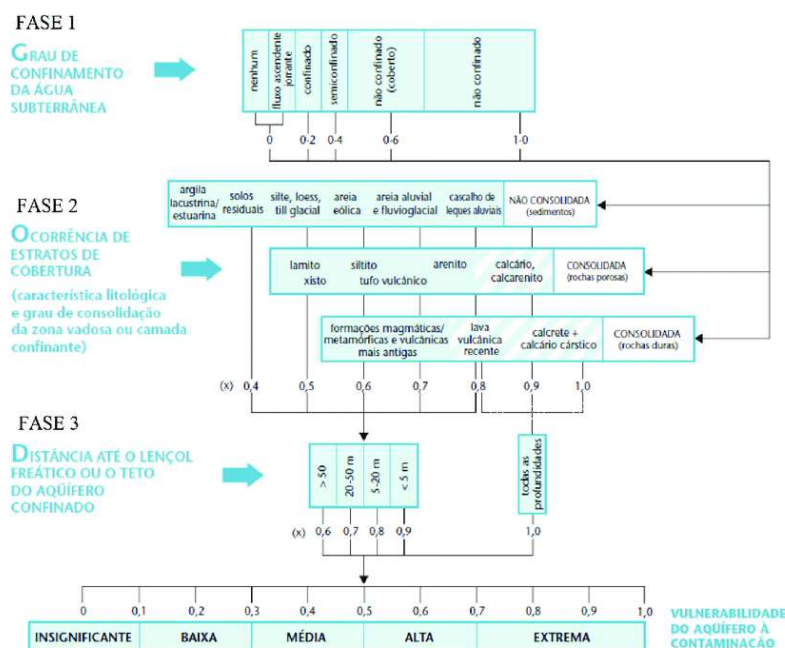
Esse item irá apresentar os principais métodos de estimativa da susceptibilidade à contaminação de aquíferos.

2.5.1. Metodologia GOD

Conforme Nascimento et al. (2019) os métodos de estimativa de contaminação ou susceptibilidade, tornaram-se populares graças ao seu uso generalizado, evitando áreas potencialmente contaminadas para servir de guia para a ocupação, mantendo os reservatórios cheios e sob controle. O método G (Groundwater hydraulic confinement) O (Overlaying Strata) D (Depth to groundwater table) foi desenvolvido por Foster et al. (2003; 2006).

Esse sistema, considera três fases de uma determinada situação (Figura 4): o grau de confinamento do lençol freático (Variável G), a espessura da camada de cobertura do aquífero (Variável O) e a profundidade do lençol freático, representada pela variável D (NASCIMENTO et al., 2019).

Figura 4 - Sequência para aplicação do método GOD.



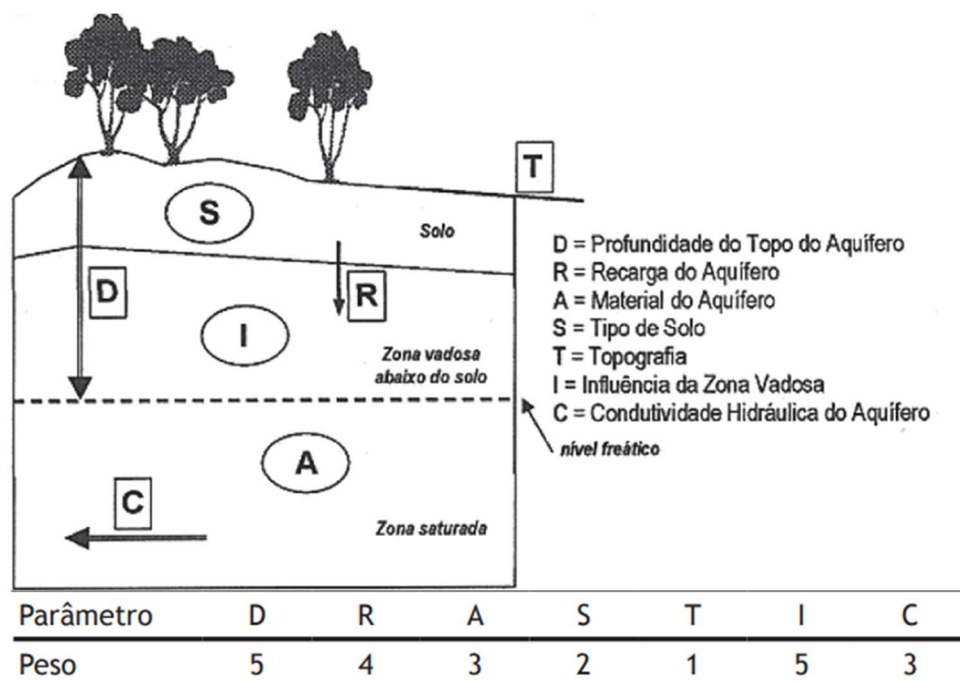
Fonte: Foster et. al. (2002; 2006)

Com base em Rocha e Cruz (2018), o método GOD requer apenas três pontos de dados para determinar a suscetibilidade de um indivíduo à contaminação das águas subterrâneas, é um dos métodos mais usados em estudos e análises para determinar um resultado específico. Por ser um método simples, com poucas variáveis, se torna um dos métodos mais utilizados (FANNAKH; FARSANG, 2022; LIMA et al., 2022; KOESUMA; ROSIDAH; ROMELAN; 2022; EMBERGA et al., 2022; MAHDID et al., 2022).

2.5.2. Metodologia DRASTIC

De acordo com Foster et al. (2002; 2006), esse é um método que tenta quantificar a vulnerabilidade relativa através da soma dos índices de ponderação obtidos pelas variáveis hidrogeológicas (Figura 5). O principal objetivo do método DRASTIC (**D**epth to water table - **D**, **R**echarge - **R**, **A**quifer media - **A**, **S**oil media - **S**, **T**opography - **T**, **I**mpact of vadose zone - **I** e **h**draulic **C**onductivity - **C**) é ajudar a decidir como os recursos devem ser alocados e quais atividades priorizar quando se trabalha com águas subterrâneas (GUIGUER; KOHNKE, 2002).

Figura 5 - Sequência para aplicação do método DRASTIC.



Fonte: Aller et al. (1987) e Lneq (2002).

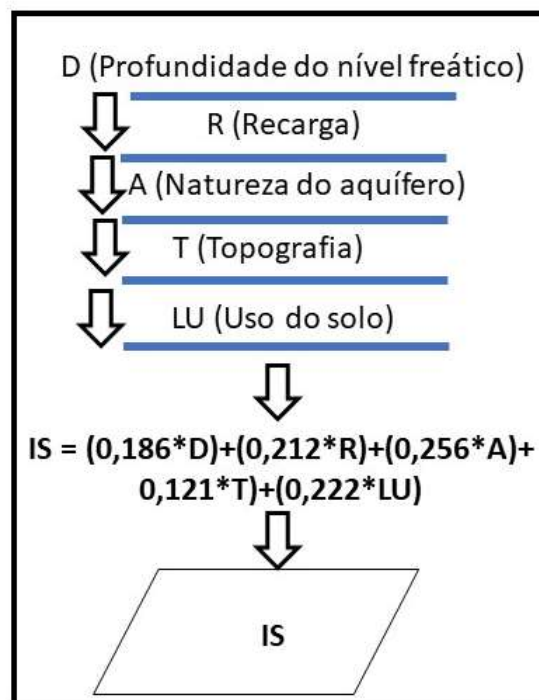
Assim, esse método foi proposto por Aller et al. (1987), onde a estimativa se dá pela utilização das variáveis descritas na Figura 5. O método DRASTIC (ALLER et al., 1987) é amplamente utilizado, nas mais variadas áreas (SRESTO et al., 2022; CHAKRABORTY et al., 2022; LAKSHMINARAYANAN et al., 2022; BOUFEKANE et al., 2022). Todas as pesquisas, apontam a importância do mapeamento de áreas vulneráveis, principalmente como método de auxílio no processo de tomada de decisão por órgãos gestores.

2.5.3. Índice de Susceptibilidade

O método IS (*Susceptibility Index*) proposto por Ribeiro (2005) modificou o DRASTIC (ALLER et al., 1987) inicial, alterando algumas variáveis. Assim, o autor retirou as variáveis S e I, e inseriu a variável LU (Land Use).

Esse método, embora recente, já foi utilizado em estudos nacionais e internacionais (ROSA et al., 2019; BORBA et al., 2020; JENIFER; JHA, 2022; PAL et al., 2022). A Figura 6 ilustra de maneira simplificada a aplicação do método.

Figura 6 - Sequência para aplicação do IS



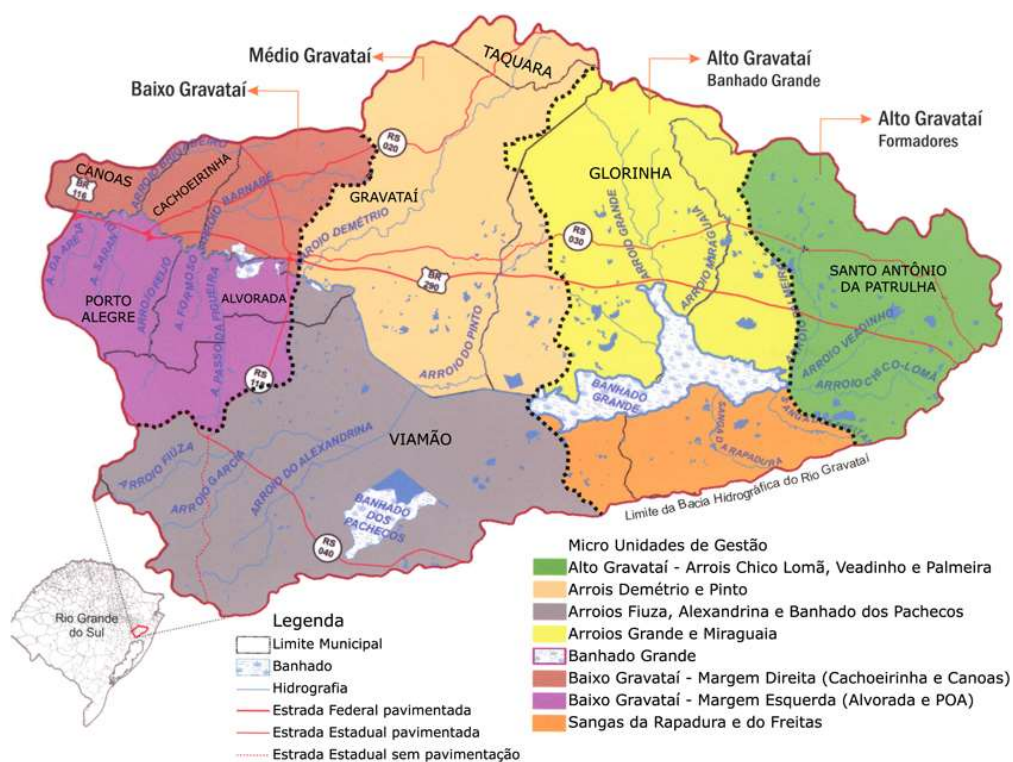
Fonte: Construído a partir de Ribeiro (2005).

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Gravataí (Figura 7) está inserida na Região Hidrográfica do Guaíba. A Bacia possui uma área de 2.015 quilômetros quadrados e uma população de 1.379.259 habitantes (SEMA, 2017). Segundo FEPAM (1998) a região abriga a bacia hidrográfica e áreas adjacentes; estima-se que mais de 1.350.000 habitantes vivam lá, até 2020 cerca de 1.349.232 pessoas viviam em áreas urbanas e 30.027 viviam em áreas rurais. A bacia do Rio Gravataí possui duas regiões distintas. A zona alta é predominantemente agrícola com sapais próximos ao rio, no entanto, a área baixa da bacia abriga negócios urbano-industriais devido ao seu acesso conveniente à água (FEPAM, 1998).

Figura 7 - Localização da Bacia G - 010.



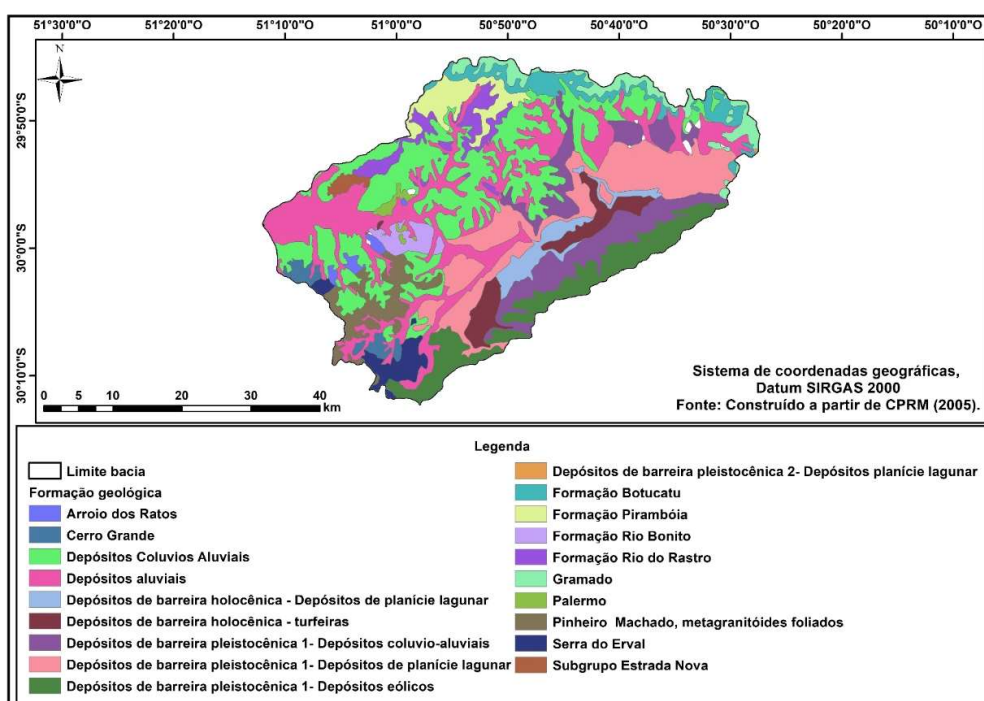
Fonte: Comitê de gerenciamento da bacia do rio Gravataí (2021).

3.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

Segundo Guasselli (2018) a formação geológica da Bacia do Gravataí, revela que o canal de ligação não possui bordas definidas, observa-se que a barreira IV exibe as seguintes formações: areias argilosas siltosas de cor clara com laminação plano-paralela; Laminações planos-paralelas incipientes de argila siltosa mal selecionada e de cor clara; e Turfa heterogênea intercalada com silte e argila plástica. Estas formações implicam que as áreas pantanosas correspondem a depósitos pantanosos formados por areia acumulada, silte e argila plástica (RUBBO, 2002).

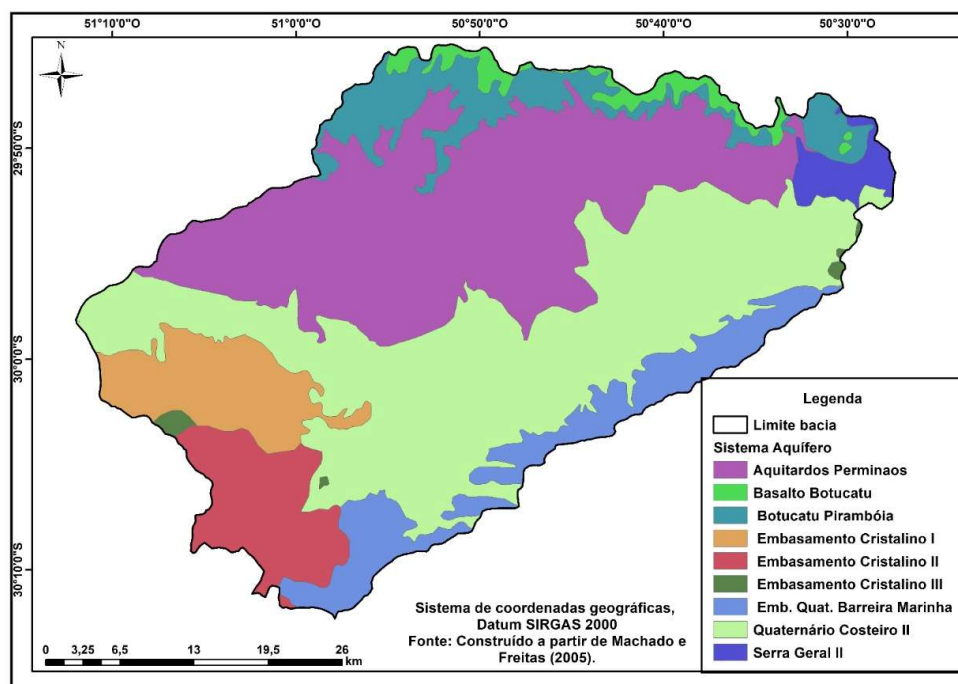
A CORSAN, empresa responsável pelo abastecimento público de água, fornece água da bacia do rio Gravataí para a população urbana e os moradores da bacia têm acesso a essa água por meio de córregos superficiais e poços no município de Santo Antônio da Patrulha (RUBBO, 2004). Rubbo (2002) afirmam que a bacia hidrográfica do rio Gravataí se trata de uma bacia um pouco difícil do ponto de vista geológico, por conta de suas litologias. 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 consequentemente, pertencente a muitas províncias hidrogeológicas estabelecidas. No que se refere a geologia, a Figura 8 mostra as formações existentes, já a Figura 9 mostra a hidrogeologia presente.

Figura 8 - Formações geológicas existentes na Bacia G-010.



Fonte: Construído a partir de CPRM (2006).

Figura 9 - Hidrogeologia presente na Bacia G-010.



Fonte: Construído a partir de Machado e Freitas (2005).

3.3. ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE DO AQUÍFERO À CONTAMINAÇÃO

Dar cada passo da pesquisa em ordem cronológica fornece uma compreensão mais clara dos métodos utilizados. Algumas das ferramentas e procedimentos utilizados foram sensoriamento remoto, imagens de satélite e geoprocessamento, além de planilhas eletrônicas com as informações. Conforme proposto por Veríssimo (2010), 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.

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.

Desses foram utilizadas as informações de 490, pois apresentavam os dados necessários. O parâmetro D (profundidade do nível freático) foi pontuado de acordo com a profundidade em metros, conforme a Tabela 1.

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, como pode se ver na 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 Melo et al. (2014), 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*, 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) foi encontrado analisando uma imagem coletada em 2021 por meio de um método multiespectral com resolução espacial de 30 metros, disponível em: <https://worldcover2021.esa.int/> (ESA, 2021). Nenhuma nuvem estava presente quando a imagem foi tirada e a ferramenta *Raster Classification* foi usada para analisar a imagem automaticamente. Foi classificado em 4 categorias: pastagens e áreas agroflorestais, água, florestas e zonas seminaturais e áreas urbanas.

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

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

Fonte: Adaptado Ribeiro (2005).

Conforme Ribeiro (2005), para o método IS, foi utilizado a equação 1, na própria calculadora *raster* do SIG. Para finalizar foi classificado conforme a Tabela 6.

$$IS = (0,186 * D) + (0,212 * R) + (0,256 * A) + (0,121 * T) + (0,222 * LU) \quad \text{Equação 1}$$

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)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

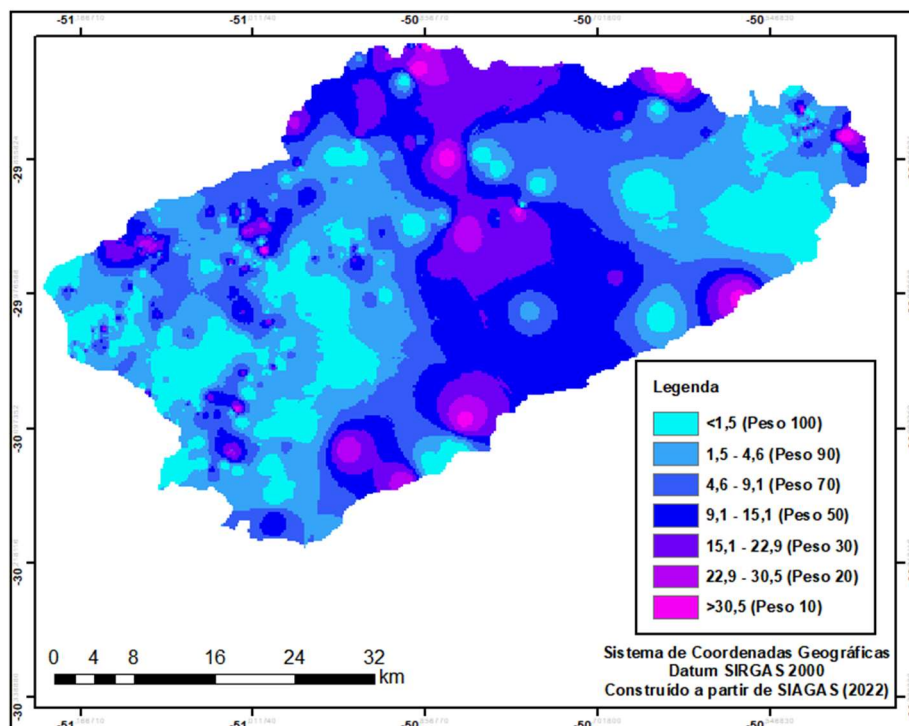
A bacia estudada (G - 010) apresentou um total de seis classes de susceptibilidade, totalizando aproximadamente 90,00 % da bacia com níveis que variam de muito baixa a muito elevada.

4.1. PROFUNDIDADE DO NÍVEL FREÁTICO

Na área avaliada, a profundidade do nível freático variou de <1,5 a >30,5 (Figura 10). 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 facilita a passagem de contaminação para o aquífero. Nas áreas mais claras, estão representados os pontos com menor profundidade, ou seja, com maior pontuação e susceptibilidade à contaminação.

Ribeiro et al. (2007) relatam 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 10 - Variação do nível freático na área de estuda

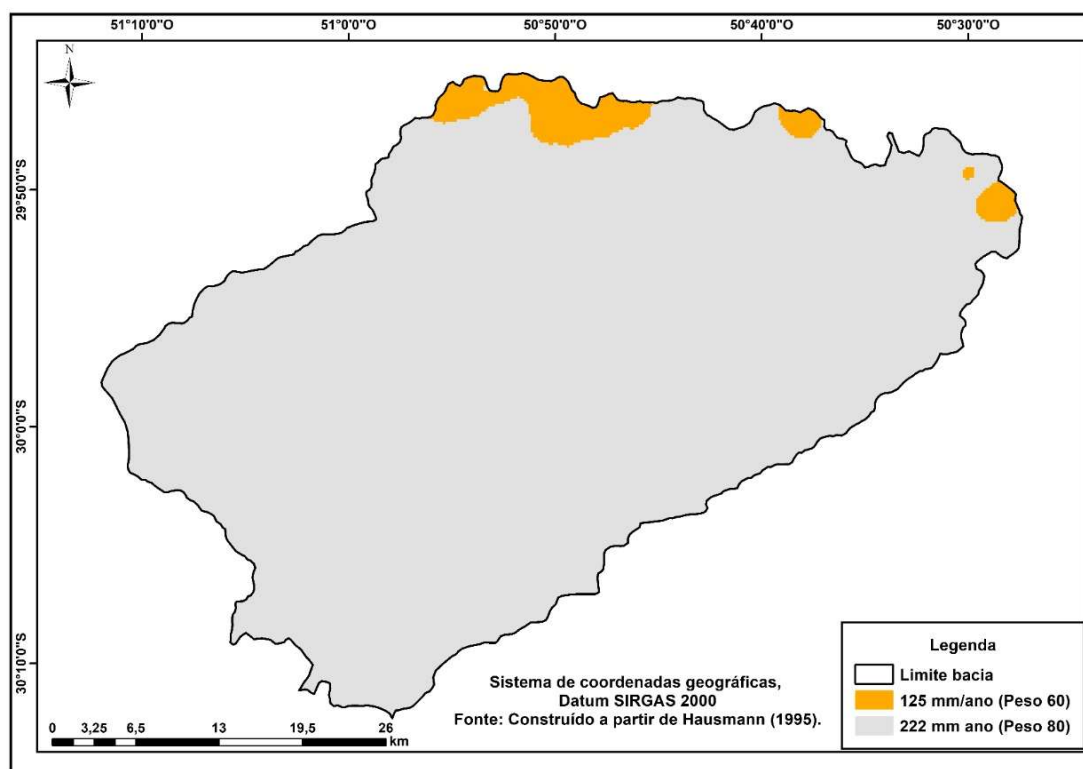


4.2. RECARGA

Em um período de tempo 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 consequentemente o de um possível contaminante.

Na Figura 11, observa-se na área estudada, onde foram encontrados dois valores para recarga. Sendo que na menor área se relacionou a precipitação e a taxa de infiltração com contaminação, já na maior parte da área obteve uma recarga de $222 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$,

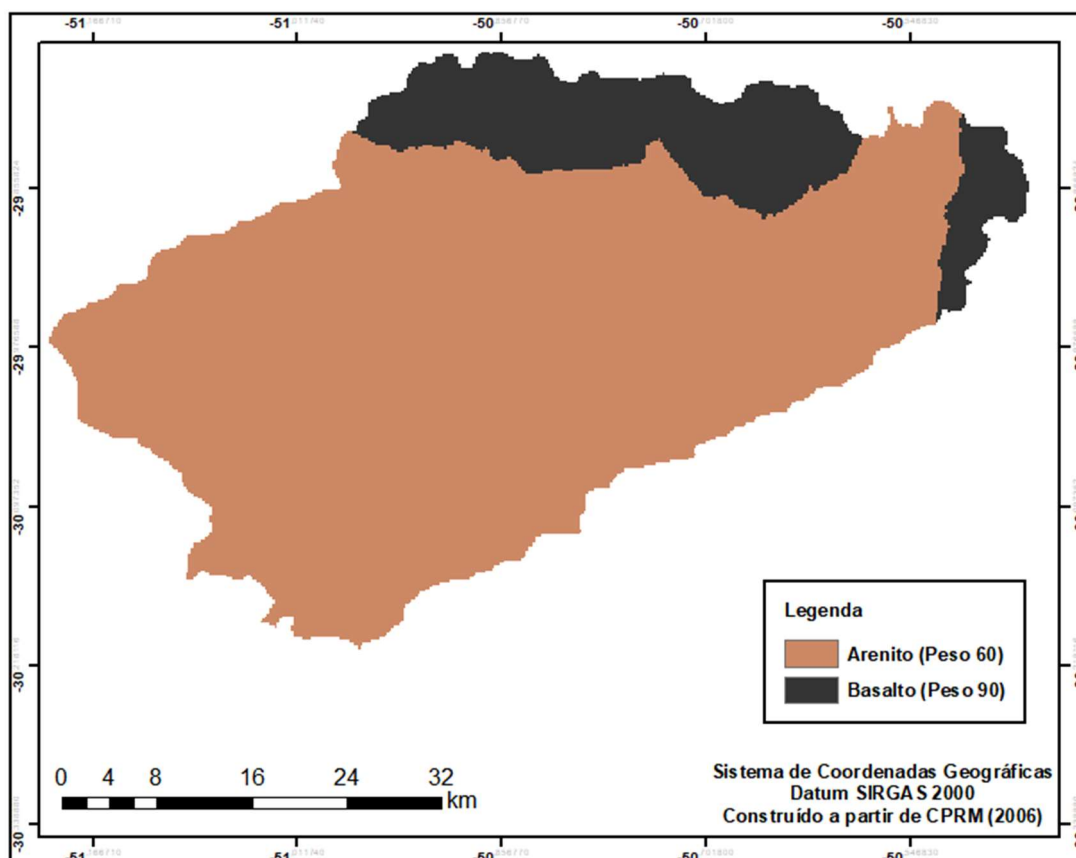
Figura 11 - Recarga do aquífero na área de estudo



4.3. MATERIAL DO AQUÍFERO

Na Figura 12, está representado o material do aquífero, que na sua maior área se encontra o arenito, que por sua vez tem um índice menor em relação à susceptibilidade à contaminação em relação ao basalto. Isso se deve em virtude de, embora o arenito seja mais permeável, pode 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 12 - Material do aquífero presente na área de estudo

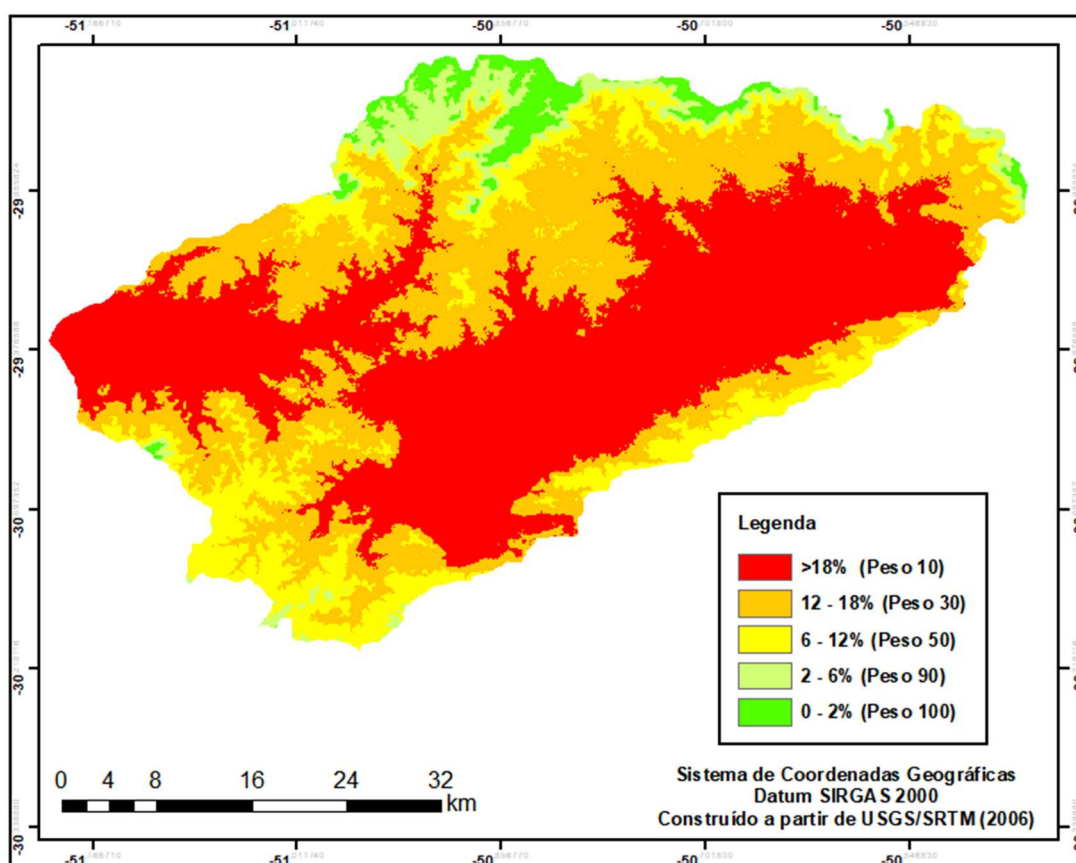


4.4. TOPOGRAFIA

No caso do parâmetro T, foi analisada através da declividade em porcentagem, como demonstra a Figura 13. 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 LNEC (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.

Figura 13 - Topografia existente na bacia G - 010.



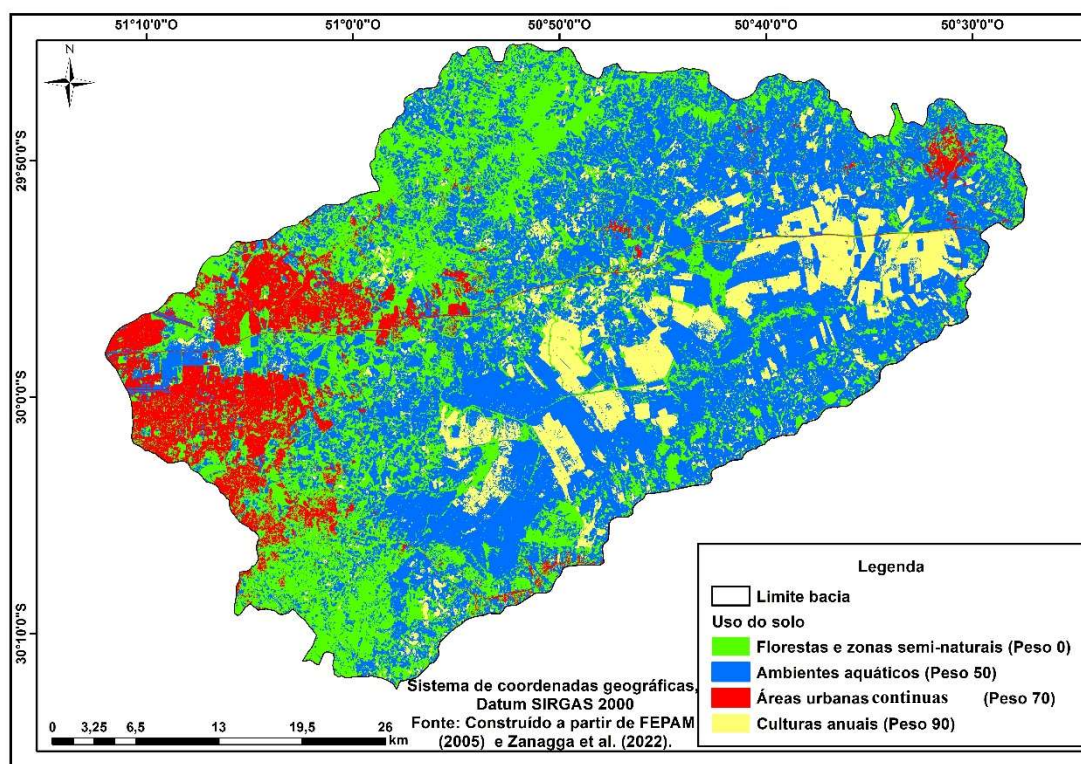
4.5. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO (VARIÁVEL LU)

As classes de uso do solo presentes a Bacia do rio Gravataí, apresentaram uma grande parte de área alagada. De acordo com a FEPAM (2020) isso se dá por conta de uma

demanda bastante elevada de atividades agropecuárias, envolvendo a irrigação de lavouras de arroz.

As demais áreas classificadas através do uso e ocupação do solo se enquadram em florestas e zonas seminaturais, áreas urbanas descontínuas e também 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 14 - Uso e ocupação do solo da BHRG



4.6. ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE

No presente estudo, a classificação 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 %). Ribeiro (2007) desenvolveu o método IS, para determinar a ameaça de poluição agrícola pelo nitrogênio que é uma preocupação prioritária para as águas subterrâneas.

Nessa área de estudo, os valores mais altos estão localizados onde parte do leito do rio Gravataí foi alterado para criar um trecho médio canalizado, projeto usado para aumentar a quantidade de produção de arroz (GUASSELI et al., 2018). Na região alta e

média do rio existe principalmente terra de cultivo, com plantações de arroz nas partes, já na outra região, a área é mais densamente povoada e possui áreas industriais e urbanas próximas à parte baixa do rio (GUASSELI 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.

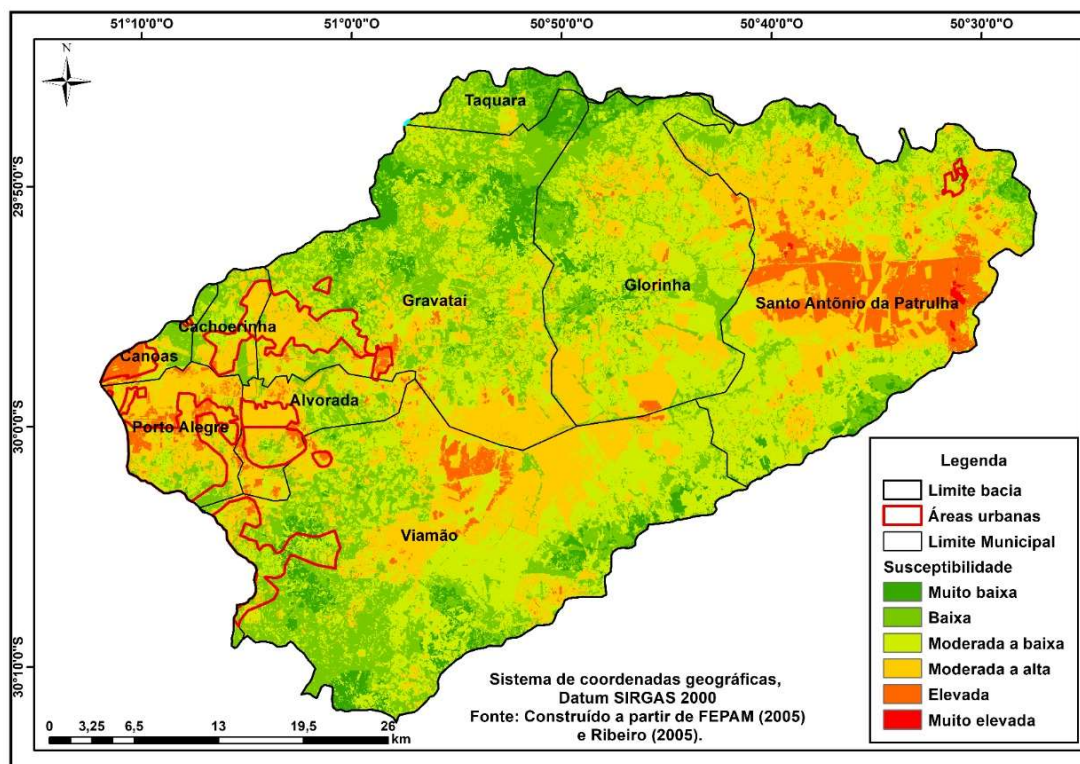
Como pode-se observar na Tabela 7 e na Figura 15, as classificações dos níveis de vulnerabilidade em porcentagem, resultou em aproximadamente 37,02 % moderada baixa, 28,04% moderada a alta, 22,72 % baixa, 06,53 % levada, 05,61 % muito baixa e 00,08 % muito elevada.

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 15 - Índice de susceptibilidade



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 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

5. CONCLUSÃO

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 IS. Sendo que, 37 % da área apresentava o índice de suscetibilidade moderado abaixo. Nas áreas com um nível mais susceptível a 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 a área urbana, que faz com que se leve em consideração a necessidade de uma rede de esgoto eficiente.

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.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Águas subterrâneas**. 2022. Disponível em: <www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>. Acesso em: 10 Dez. 2022.

ADIMALLA, Narsimha; QIAN, Hui. Evaluation of Non-Carcinogenic Causing Health Risks (NCHR) Associated with Exposure of Fluoride and Nitrate Contaminated Groundwater from a Semi-Arid Region of South India. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21771-0>

AL-HASHIMI, Osamah, *et al.* A comprehensive review for groundwater contamination and remediation: occurrence, migration and adsorption modelling. **Molecules**, v. 26, n. 19, p. 5913, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26195913>

ALLER, Linda *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.

BAILEY, Rian *et al.* Augmenting the national agroecosystem model with physically based spatially distributed groundwater modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 160, 105589, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105589>

BORBA, Willian Fernando 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.

BORBA, Willian Fernando de *et al.* Aplicação do método índice de susceptibilidade para estimativa da susceptibilidade à contaminação na bacia hidrográfica dos rios Turvo, Santa Sosa e Santo Cristo. **Geologia USP. Série Científica**, v. 20, n. 1, p. 125–136, 2020. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v20-160797>

BORGHETTI, Nadia Rita Boscardin; BORGHETTI, José Roberto; ROSA FILHO, Ernani Francisco da. **A integração das águas: revelando o verdadeiro Aquífero Guarani**. Curitiba: Edição da Autora, 2011. 276p.

BOUFEKANE, Abdelmadjid *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>

CARELLI, Liamara; LOPES, Priscila Paixão. Caracterização fisiográfica da bacia Olhos D'água em Feira de Santana/BA: Geoprocessamento aplicado à análise ambiental. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 43-54, 2011.
<https://doi.org/10.5216/bgg.v31i2.16844>

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Águas subterrâneas: importância**. 2013. Disponível em: <cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/>. Acesso em: 10 dez. 2022

CHAKRABORTY, Baisakhi *et al.* Groundwater vulnerability assessment using GIS-based 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>.

COMITÊ DE GERENCIAMENTO DA BACIA DO RIO GRAVATAÍ. **Plano de Bacia**. 2021. Disponível em: <www.riogravatai.com.br/index.php/plano-da-bacia>. Acesso em: 4 Jan. 2023.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008 Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, páginas 64-68 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Brasília: CONAMA, 2008. 11p.

CORRÊA, Amanda. **Fontes de contaminação em aquíferos**. Igeológico. 2019.

Disponível em: <igeologico.com.br/fontes-de-contaminacao-em-aquiferos/>. Acesso em: 20 Nov. 2022.

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

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Monitoramento hídrico da bacia do rio Gravataí-RS**. Porto Alegre: CPRM, 2008.

DA SILVA, Marcos Vinícius *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, Terhemba *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>.

ESA. **WorldCover 2021 - Global land cover product at 10 m resolution for 2021 based on Sentinel-1 and 2 data**. Disponível em: <<https://worldcover2021.esa.int/>> Acesso em: Acesso em: 30 Nov. 2022.

FAN, Tingting *et al.* A New Insight into the Influencing Factors of Natural Attenuation of Chlorinated Hydrocarbons Contaminated Groundwater: A Long-Term Field Study of a Retired Pesticide Site. **Journal of Hazardous Materials**, v. 439, p. 129595, 2022.: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129595>.

FANNAKH, Abdelouahed; FARSANG, Andrea. 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, Jean Ricardo *et al.* Estimativa da susceptibilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral em Aratiba-RS por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 72, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n1-47184>.

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

FOSTER, Stephen *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.

FUNDAJ. FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO BRASIL. **Águas Subterrâneas: o que é e qual a importância?** 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/revitalizacao-de-bacias/aguas-subterraneas-o-que-e-e-qual-a-importancia>. Acesso em: 12 dez. 2022.

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

GUIGUER, Nilson; HORVATH, Monalisa. **Desenvolvimento e Implementação de Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas**. Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22309>. Acesso em: 10 Jan. 2023.

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

HEATH, Ralph. **Basic ground-water hidrology**. Denver: Water supply paper 2240 USGS, 1982. 86p.

HIRATA, Ricardo *et al.* As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. **Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 1-66, jan. 2019.

HUANG, Haiying *et al.* Btex biodegradation is linked to bacterial community assembly patterns in contaminated groundwater ecosystem. **Journal of Hazardous Materials**, v. 419, p. 126205, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126205>

IBRAHIM, F.I.D., 2014. Introdução ao geoprocessamento ambiental. Erica, São Paulo.

JENIFER, M Annie; JHA, Madan Kumar. A Novel GIS-Based Modeling Approach for Evaluating Aquifer Susceptibility to Anthropogenic Contamination. **Sustainability**, v.14, n. 8, p. 4538. <https://doi.org/10.3390/su14084538>

KOESUMA, Sorja; ROSIDAH, Umi; RAMELAN, Ari Handono. 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, Balaji *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, Gustavo Filemon Costa *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, Luana Alves *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>

LI, Rui *et al.* **Systematic Study on the Removal of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from Contaminated Groundwater Using Metal–Organic Frameworks**. New York: American Chemical Society, 2021. 15171 p.

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.

MACHADO, José Luiz Flores; FREITAS, Marcos Alexandre de. **Projeto mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul: escala 1:750.000, relatório final**. Porto Alegre: CPRM, 2005.

MAHDID, Souhil *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>

MATRICARDI, Eraldo Aparecido Trondoli *et al.* Modelagem do desmatamento na região do Matopiba. **Nativa**, v. 6, n. 2, 26 Mar. 2018, p. 198. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i2.5092>.

MCGUFF, Heather; MCMULLEN, Adriana. **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, José Geraldo 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, 2014.

MORRISSY, Justin *et al.* Nitrogen Contamination and Bioremediation in Groundwater and the Environment: A Review. **Earth-Science Reviews**, v. 222, Nov. 2021, p. 103816. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103816>.

NASCIMENTO, Yuri dos Santos *et al.* Vulnerabilidade das águas subterrâneas na região semiárida da Bahia, Município de Tucano, pelo método GOD. **Revista Agrogeoambiental**, v. 11, n. 1, p. 31, 2019, <https://doi.org/10.18406/2316-1817v11n120191260>

OLIVEIRA, Everton de. Hidrogeologia ambiental: contaminação de solo e águas subterrâneas. **Hidroplan**, Sao Paulo, v. 1, n. 1, p. 1-155, jan. 2016.

PAL, Subodh Chandra *et al.* Application of novel data-mining technique-based nitrate concentration susceptibility prediction approach for coastal aquifers in India. **Journal of Cleaner Production**, v. 346, p. 131205, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131205>

PANNEERSELVAM, Balamurugan *et al.* Geochemical Evaluation and Human Health Risk Assessment of Nitrate-Contaminated Groundwater in an Industrial Area of South India. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 57, 8 Nov. 2021, pp. 86202–86219. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17281-0>

RAMAKRISHNA, CH *et al.* Assessment of Remote Sensing and Geoprocessing Use for Water Resources Monitoring of Granulite Dome and River Basin from Eastern Ghats, India. **Current Advances in Geography, Environment and Earth Sciences**, v. 3, p. 12-19, 2022. <https://doi.org/10.9734/bpi/cagees/v3/1947A>

RIBEIRO, Luís Fernando. 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.

RIBEIRO, Maria Lúcia *et al.* Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: Avaliação preliminar. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 688 - 694, 2007.

RIO GRANDE DO SUL. SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão/Departamento de Planejamento Governamental, 2021. 203p.

ROCHA, Rafael Oliveira Franca; CRUZ, Marcus Aurélio Soares. **Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos presentes na região de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros, SE**. Portal Embrapa. 2017. Disponível em: <www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1099434/avaliacao-da-vulnerabilidade-de-aquiferos-presentes-na-regiao-de-atuacao-da-embrapa-tabuleiros-costeiros-se>. Acesso em: 2 Jan. 2023.

ROSA, Cristiano Niederauer da *et al.* Relação Entre aquíferos susceptíveis à contaminação e áreas de preservação permanente hídrica em Ijuí, RS. **Pesquisas em Geociências**, v. 46, n. 3, 2019. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.97674>.

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

RUBBO, Marta. **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-bh-gravatai>. 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.

SILVA, Bernardo Barbosa da. **Aplicações Ambientais Brasileiras de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**. Campina Grande: EDUFCG, 2013. 215p.

SILVA JÚNIOR, Lauro de Oliveira; CAETANO, Lucio Carramillo. **Aquíferos: tipos de aquíferos**. 2010. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Aquiferos-1377.html>. Acesso em: 1 nov. 2022.

SRESTO, Mizbah Ahmed *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>

STIGTER, Tibor Yvan *et al.* Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. **Hydrogeology journal**, v. 14, p. 79-99, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>

TASSI, Rutineia *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, Bruno Pereira; VENTURA, Katia Sakihama; SILVA, Darllan Collins da Cunha. Identificação espacial da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação por meio de indicadores ambientais. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 7, n. 4, p. 190 - 202, 2022. <https://doi.org/10.24221/jeap.7.4.2022.4158.190-202>

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, Ana Carina Ferreira. **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.

WANG, Qing *et al.* In Situ Remediation of Cr (VI) Contaminated Groundwater by ZVI-PRB and the Corresponding Indigenous Microbial Community Responses: A Field-

Scale Study. **Science of the Total Environment**, v. 805, p. 150260, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150260>.