



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

PRISCILA DA SILVA DOS SANTOS

VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DO
AQUÍFERO ALUVIONAR NO TRECHO DO PERÍMETRO IRRIGADO DE
MORADA NOVA E LIMOEIRO DO NORTE - CE

FORTALEZA

2021

PRISCILA DA SILVA DOS SANTOS

VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO
ALUVIONAR NO TRECHO DO PERÍMETRO IRRIGADO DE MORADA NOVA E
LIMOEIRO DO NORTE – CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus Fortaleza*, como requisito parcial para obtenção de Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: *estão e Saneamento Ambiental*.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação
na Publicação Instituto Federal
do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados
fornecidos pelo(a) autor(a)

S237v Santos, Priscila Silva.

Vulnerabilidade Intrínseca e Risco De Contaminação do Aquífero Aluvionar no
Trecho do Perímetro Irrigado de Morada Nova e Limoeiro Do Norte - Ce / Priscila
Silva Santos. - 2021.

86 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia
e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto.

1. Águas Subterrâneas. 2. Uso e ocupação do solo. 3. Vulnerabilidade. I. Título.

CDD 628

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.009355/2021-09

Interessado: Priscila da Silva dos Santos

PRISCILA DA SILVA DOS SANTOS

VULNERABILIDADE INTRÍNSECA E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO ALUVIONAR NO TRECHO DO PERÍMETRO IRRIGADO DE MORADA NOVA E LIMOEIRO DO NORTE - CE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Sistemas de Monitoramento e Tratamento Ambiental.

Aprovada em: 29/10/2021



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Mauricio de Sa Barreto, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 30/10/2021, às 14:37, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waleska Martins Eloi, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 30/10/2021, às 15:02, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Guimaraes Costa Saboia, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 03/11/2021, às 11:33, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIA TELIS DE VILELA ARAÚJO, Usuário Externo**, em 05/11/2021, às 16:36, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3101988** e o código CRC **FEEC7D77**.

A Deus.

Aos meus pais.

As minhas Imãs.

As minhas sobrinhas.

Ao meu noivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A minha família, pelo incentivo.

Ao meu noivo Wilkinson por ter ficado ao meu lado em todos os momentos, inclusive nos difíceis, pelo apoio e ajuda para ir a campo quando foi necessário, sua ajuda foi essencial para a conclusão desse trabalho.

A Débora Danna pelo apoio e ajuda em muitos momentos.

A todos os professores do IFCE que fazem parte do PGTGA, em especial meu orientador conhecimento repassada e pelos direcionamentos necessários para concluir a pesquisa.

Ao CNPq pelo financiamento da bolsa.

RESUMO

O estudo de vulnerabilidade de aquíferos surge para auxiliar no gerenciamento do uso e ocupação do solo, identificando áreas que possam ser caracterizadas como capazes ou não de lidar com interferências externas. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade intrínseca e o risco de contaminação do aquífero aluvionar do rio Banabuiú no trecho do Perímetro Irrigado de Morada Nova (PIMN). A pesquisa foi realizada a partir da utilização do modelo DRASTIC e o DRASTIC modificado. Foi realizada a construção de 7 mapas que correspondem aos parâmetros representados no modelo DRASTIC, seguindo do mapa de vulnerabilidade da área e do mapa de risco de poluição. Para compor a modelo DRASTIC tradicional foram utilizados dados de 43 poços monitorados na área e dos dados referentes as características naturais do aquífero. A vulnerabilidade da área foi dividida em duas classes (baixa e moderada vulnerabilidade), tanto para o período chuvoso como para o período de estiagem. Para o período chuvoso a vulnerabilidade variou entre 134 (valor mínimo) e 145 (valor máximo). A vulnerabilidade moderada está representada em maior extensão na área de estudo com 80,53% da área total. Para o período de estiagem a vulnerabilidade variou de 132 a 145. Nesse período a vulnerabilidade moderada está presente em 63,50% da área, uma redução diante dos resultados observados no período chuvoso, decorrente do aumento da profundidade do topo do aquífero, devido à falta de recarga hídrica e devido as retiradas de água. A análise de sensibilidade de remoção de mapa demonstrou a remoção das camadas zona de vadosa (variação de 2,40%), profundidade do topo do aquífero (variação de 1,56%) e material do aquífero (variação de 0,49%) representando maior variação no índice de vulnerabilidade, caso fossem removidas. Para a análise de sensibilidade de parâmetro único, os parâmetros que se mostraram mais representativos para o cálculo de vulnerabilidade foram zona de vadosa, material do aquífero e material do solo por apresentarem pesos médios efetivos (28,7%, 11,5%, 17,2% respectivamente) muito superiores aos seus respectivos pesos teóricos. O DRASTIC modificado foi utilizado para a elaboração do mapa de risco de contaminação. Com o novo parâmetro foi possível observar a variação das classes de vulnerabilidade, para risco moderada, risco alto e risco muito alto. A partir das variações observadas na vulnerabilidade, pode-se concluir que a modificação do modelo DRASTIC se mostrou adequada para indicar as áreas que apresentam maior risco de contaminação no aquífero aluvionar no rio Banabuiú no trecho do PIMN.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas. Uso e ocupação do solo. .

ABSTRACT

The study of aquifer vulnerability arises to assist in the management of land use and occupation, identifying areas that can be characterized as capable or not of dealing with external interferences. Thus, the present study aims to evaluate the intrinsic vulnerability and the risk of contamination of the alluvial aquifer of the Banabuiú River in the stretch of the Irrigated Perimeter of Morada Nova (PIMN). The research was carried out using the DRASTIC model and the modified DRASTIC. It was carried out the construction of 7 maps that correspond to the parameters represented in the DRASTIC model, following the vulnerability map of the area and the pollution risk map. To make up the traditional DRASTIC model, data from 43 wells monitored in the area and data regarding the natural characteristics of the aquifer were used. The vulnerability of the area was divided into two classes (low and moderate vulnerability), both for the rainy season and for the dry season. For the rainy season, vulnerability varied between 134 (minimum value) and 145 (maximum value). Moderate vulnerability is represented to a greater extent in the study area with 80.53% of the total area. For the dry season, vulnerability ranged from 132 to 145. In this period, moderate vulnerability is present in 63.50% of the area, a reduction in the results observed in the rainy season, resulting from the increase in the depth of the aquifer top, due to the lack of water recharge and water withdrawals. The map removal sensitivity analysis demonstrated the removal of the vadosa zone layers (variation of 2.40%), depth of the aquifer top (variation of 1.56%) and aquifer material (0.49% variation), representing greater variation in vulnerability index if removed. For the sensitivity analysis of a single parameter, the parameters that were most representative for the vulnerability calculation were vadosa zone, aquifer material and soil material because they presented effective average weights (28.7%, 11.5%, 17.2% respectively) much higher than their respective theoretical weights. The modified DRASTIC was used to draw up the contamination risk map. With the new parameter it was possible to observe the variation of vulnerability classes, for moderate risk, high risk and very high risk. From the variations observed in vulnerability, it can be concluded that the modification of the DRASTIC model proved to be adequate to indicate the areas that present the highest risk of contamination in the alluvial aquifer in the Banabuiú River in the PIMN stretch.

Keywords: Groundwater. Land use and occupation. DRASTIC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de aquífero de acordo com a porosidade.	11
Figura 2: Localização da área de estudo com a distribuição dos poços de água subterrânea, trecho PIMN.	24
Figura 3: Tipos de Solos.	26
Figura 4: Precipitação média mensal do período de 2000 a 2020 do município de Morada Nova.	27
Figura 5: Esquema de construção de poços no aluvião do rio Banabuiú.	28
Figura 6: Poço do aluvião do rio Banabuiú, no trecho do PIMN.	28
Figura 7: Área de vegetação de pastagem (a), (b), (c), (d).	30
Figura 8: Tanques de cultivo de Camarão (a), (b).	31
Figura 9: Plantação de arroz.	31
Figura 10: Representação dos parâmetros DRASTIC.	34
Figura 11: Distribuição espacial dos poços.	36
Figura 12: Mapa de profundidade do topo do aquífero do Perímetro Irrigado de Morada Nova no período chuvoso.	48
Figura 13: Mapa de profundidade do topo do aquífero do PIMN no período chuvoso.	49
Figura 14: Mapa de Recarga do Aquífero no trecho do PIMN.	52
Figura 15: Mapa Material do Aquífero no trecho do PIMN.	53
Figura 16: Mapa Material do Solo no trecho do PIMN.	54
Figura 17: Mapa de declividade do trecho do PIMN.	56
Figura 18: Mapa de condutividade hidráulica do trecho do PIMN.	58
Figura 19: Mapa de vulnerabilidade do PIMN no período chuvoso, de janeiro a junho.	59
Figura 20: Mapa de vulnerabilidade do PIMN no período de estiagem, de julho a dezembro.	60
Figura 21: Vulnerabilidade do PIMN nos períodos de estiagem e chuvoso.	62
Figura 22: Mapa de Uso de Ocupação do solo do aquífero livre no trecho do PIMN.	67
Figura 23: Mapa de Risco de Contaminação do aquífero livre no trecho do PIMN.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis de vulnerabilidade.	35
Tabela 2: Valores dos índices associados a parâmetro D.	36
Tabela 3: Parâmetro recarga do aquífero.	37
Tabela 4: Parâmetro material do aquíferos.	38
Tabela 5: Parâmetro dos tipos de solos.	39
Tabela 6: Parâmetro topografia.	40
Tabela 7: Parâmetro materiais da zona vadosa.	41
Tabela 8: Intervalos de condutividade hidráulica e seus índices de avaliação.	41
Tabela 9: Usos e ocupações do solo e seus índices.	44
Tabela 10: Informações dos poços monitorado no PIMN de 2016 a 2020.	46
Tabela 11: Profundidade do topo do aquífero do PIMN com seus intervalos, pesos e áreas no período chuvoso (de janeiro a junho).	48
Tabela 12: Profundidade do topo do aquífero do PIMN com seus intervalos, pesos e áreas no período de estiagem (de julho a dezembro).	50
Tabela 13: Dados utilizados para o cálculo da recarga direta do aquífero, no trecho estudado.	51
Tabela 14: Dados utilizados para o cálculo da taxa de infiltração.	51
Tabela 15: Recarga do PIMN, intervalo, peso e área.	52
Tabela 16: Material do aquífero, índice, peso e área.	54
Tabela 17: Solos com seus índices, peso e áreas.	55
Tabela 18: Declividade do PIMN com intervalos, pesos e áreas.	56
Tabela 19: Condutividade hidráulica do PIMN com intervalos, pesos e áreas.	58
Tabela 20: Vulnerabilidade do PIMN no período chuvoso.	60
Tabela 21: Vulnerabilidade do PIMN no período de estiagem.	61
Tabela 22: Comparação da Vulnerabilidade do PIMN no período chuvoso e de estiagem.	61
Tabela 23: Análise de sensibilidade de remoção de mapas.	63
Tabela 24: Análise de sensibilidade de parâmetro único.	65
Tabela 25: Uso e ocupação do solo com relativos pesos e índices.	67
Tabela 26: Áreas de risco de contaminação do aquífero livre do PIMN.	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Causas de problemas relacionados a contaminação das águas subterrâneas.....	13
Quadro 2: Métodos de avaliação de vulnerabilidade.....	15
Quadro 3: Aspectos físicos, morfológicos e hidrogeológicos do DRASTIC e suas descrições.	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Justificativa.....	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	Objetivo Geral.....	9
2.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	9
3	REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1	Importância das águas subterrâneas	10
3.2	Aquíferos.....	11
3.3	Vulnerabilidade dos aquíferos	14
3.3.1	<i>Risco de contaminação</i>	17
3.4	Trabalhos relacionados.....	18
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
4.1	Localização e acesso	24
4.2	Geomorfologia	25
4.3	Solos.....	25
4.4	Precipitação	27
4.5	Recursos hídricos.	27
4.6	Aspectos Socioeconômicos.....	29
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
5.1	Modelo DRASTIC.....	32
5.1.1	<i>D – Profundidade do topo do aquífero</i>.....	35
5.1.2	<i>R – Recarga do aquífero</i>.....	37
5.1.3	<i>A – Material do aquífero</i>	38
5.1.4	<i>S – Material do Solo</i>	39
5.1.5	<i>T – Topografia</i>	40
5.1.7	<i>C – Condutividade Hidráulica</i>	41

5.2	Análise de sensibilidade	42
5.3	DRASTIC modificado	43
5.3.1	<i>L - Parâmetro Uso e ocupação do solo</i>	44
5.4	Levantamento dos dados e geoprocessamento	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6.1	Mapas dos parâmetros DRASTIC	46
6.1.1	<i>Profundidade do topo do aquífero (D)</i>	47
6.1.2	<i>Parâmetro Recarga (R)</i>	50
6.1.3	<i>Parâmetro Material do Aquífero (A)</i>	53
6.1.4	<i>Parâmetro Material do Solo (S)</i>	54
6.1.5	<i>Parâmetro Topografia (T)</i>	55
6.1.6	<i>Influência da zona de vadosa (I)</i>	57
6.1.7	<i>Condutividade hidráulica (C)</i>	57
6.1.8	<i>Mapa de Vulnerabilidade intrínseca</i>	59
6.2	Método de validação	63
6.2.1	<i>Análise de sensibilidade de remoção de mapa</i>	63
6.2.2	<i>Análise de sensibilidade de parâmetro único</i>	65
6.3	Mapa de risco de contaminação	66
7	CONCLUSÕES	71
7.1	RECOMENDAÇÕES	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para o desenvolvimento humano. Reconhecido também como um recurso vulnerável, finito e que apresenta uma escassez em qualidade e quantidade em diversas regiões mundiais. (BORGES; ATHAYDE; REGINATO, 2017)

Com a expansão populacional e o aumento na ocupação territorial, as águas superficiais por muitas vezes não são suficientes para suprir todas as necessidades das localidades e os recursos hídricos subterrâneos se tornam uma opção, se tornando em muitos casos as principais fontes de abastecimento de água (SOUSA, 2016).

Associado ao crescimento populacional, ocorre uma maior urbanização, bem como uma expansão do desenvolvimento industrial e da agricultura, processos que podem interferir qualitativamente nos aquíferos, causando uma maior exposição diante de agentes poluidores (BORGES; ATHAYDE; REGINATO, 2017).

As águas subterrâneas podem apresentar qualidade superior as águas superficiais, principalmente em relação ao uso para abastecimento humano, requerendo em alguns casos apenas um processo preventivo de desinfecção. Desta forma a utilização sustentável dessas águas requer medidas que promovam uma gestão adequada e que possam evitar a degradação desse recurso e permitir sua proteção, principalmente em locais que apresentam um maior risco a contaminação (COSTA et al., 2012).

Nesse contexto, o estudo de mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas surge como uma forma de orientação das medidas de proteção, através de um mapeamento relacionado às próprias características naturais do aquífero ou mesmo de vulnerabilidade relacionada a determinados contaminantes. Esse tipo de estudo pode ser utilizado como subsídio para os gestores de recursos hídricos para auxiliar no monitoramento de atividades que são desenvolvidas em áreas vulneráveis (AQUINO et al., 2017).

A vulnerabilidade de aquíferos é determinada por meio de inúmeros métodos, dentre os mais utilizados destaca-se o método DRASTIC que indica a vulnerabilidade intrínseca do aquífero. É um índice formado a partir de parâmetros que levam em consideração as características físicas, hidrogeológica e morfológica dos aquíferos (ALLER et al., 1987).

Inúmeros autores defendem uma variação dos índices aplicados aos parâmetros do DRASTIC, assim também como a adição parâmetros que possam auxiliar em uma maior representatividade quanto a vulnerabilidade de um determinado local, como é o caso da adição de parâmetro uso e ocupação, que permite identificar fontes de poluição antrópica,

principalmente quando se relacionam com atividades agropecuárias, domésticas e industriais (CARVALHO, 2013).

Nessa pesquisa a região estudada está localizada no interior do Ceará em um trecho do aquífero aluvionar do rio Banabuiú, entre os municípios de Morada Nova e Limoeiro do Norte, o Perímetro Irrigado de Morada Nova (PIMN). A área caracteriza-se pelas atividades de agropecuária, sendo a fonte de água utilizada na região derivada de águas subterrâneas. Desta forma, levando em consideração a importância da área para o desenvolvimento local, a análise de vulnerabilidade do aquífero possibilita um maior conhecimento por parte dos gestores diante do planejamento de medidas, corretivas e preventivas, eficientes de uso e ocupação do solo.

1.1 Justificativa

O Perímetro Irrigado de Morada Nova, localizado entre os municípios de Morada Nova e Limoeiro do Norte, na porção centro/leste do estado, foi pioneiro e o mais moderno projeto de irrigação implantado no Ceará (TAVARES et al., 2014).

Levando em consideração a predominância da atividade agrícola da área de estudo, e a utilização de poços para auxiliar na irrigação nos períodos de estiagem, além do uso para abastecimento humano, esse trabalho se justifica pelo número incipiente de trabalhos científicos sobre a área, tendo em vista que a região necessita de uma atenção voltada para a preservação dos recursos subterrâneos, devido a interferência das ações antrópicas atuantes no local.

Desta forma, acredita-se que essa pesquisa possa contribuir significativamente com os resultados obtidos, contribuindo na elaboração de medidas de gerenciamento junto a órgãos competentes para uma gestão adequada dos usos da terra e preservação das águas subterrâneas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a vulnerabilidade intrínseca e o risco de contaminação do aquífero aluvionar do rio Banabuiú no trecho do PIMN, utilizando o método DRASTIC.

2.1.1 *Objetivos específicos*

- Fragmentar os dados de monitoramento dos níveis dos poços em período chuvoso e de estiagem;
- Elaborar o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero no trecho estudado empregando o modelo DRASTIC;
- Realizar análise de sensibilidade para validação do método;
- Identificar as áreas com risco de contaminação por meio do DRASTIC modificado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Importância das águas subterrâneas

Os recursos hídricos subterrâneos constituem uma importante fonte de abastecimento, sendo por muitas vezes o único recurso disponível para o consumo de diversas populações em todo o mundo (BORGES; ATHAYDE; REGINATO, 2017). É um recurso que representa grande relevância nas estratégias de assistência hídrica em períodos de estiagem (SILVEIRA et al., 2016). Assim, deve ser bem gerenciado, de modo a não comprometer os usos futuros por perda de qualidade. Tornando-se imprescindível o monitoramento da qualidade dos recursos hídricos, para viabilizar o reconhecimento de alterações no decorrer do tempo e do espaço em função das ações antrópicas no meio ambiente (LOPES et al., 2014).

Segundo Hirata et al. (2019), a água subterrânea é o recurso hídrico mais explorado do subsolo brasileiro. Somam mais de 2,5 milhões de poços tubulares, superando mais de 17.580 Mm³/ano (557 m³/s), significando um volume suficiente para suprir as necessidades de abastecimento da população brasileira inteira no ano de 2019, ou ainda um total de 10 regiões metropolitanas nas dimensões de São Paulo, correspondendo a 217 milhões de pessoas.

No Brasil o uso das águas subterrâneas é dividido em inúmeras atividades econômicas, sendo cerca de 30% é destinado a uso doméstico, 24% a agropecuária, o abastecimento público urbano com 18% dos recursos subterrâneos e 14% é destinado o para abastecimento múltiplo, utilizado em grande maioria para suprir as necessidades dos serviços urbanos. Entre os Estados brasileiros que apresentam maior dependência do uso de água subterrânea estão, São Paulo, Piauí, Ceará, Rio Grande do Sul, Bahia e Paraná (HIRATA et al., 2019).

O semiárido brasileiro é uma das principais regiões do país que passa por situações críticas de insuficiência hídrica, devido aos longos períodos secos. A escassez de água nos reservatórios utilizados para suprir as necessidades da população é contornada pela inclusão do uso de águas subterrâneas.

O Estado Do Ceará foi responsável por perfurar mais de 3 mil poços entre os anos de 2016 e 2019, destinados exclusivamente para o abastecimento dos centros urbanos e da zona rural, decorrente dos vários anos de seca que atingiram o estado (TEIXEIRA, 2018 *Apud* HIRATA, 2019).

3.2 Aquíferos

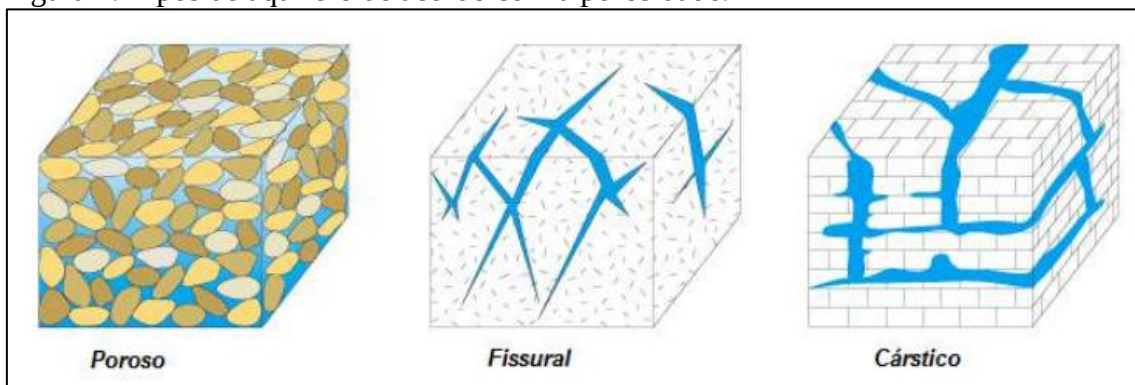
Os aquíferos podem ser definidos como toda formação rochosas capaz de conter e transmitir água. Essas características dependem unicamente do tipo de litologia, resultante da sua formação por meio da interação dos fatores geológicos com o corpo rochoso. Com isso cada formação de rocha irá apresentar suas próprias características hidrogeológicas, apresentando reações específicas diante dos elementos atuantes no meio (SANTOS; CRUS; NASCIMENTO, 2010).

A classificação dos aquíferos é baseada em relação a porosidade das rochas e ou depósitos sedimentares e conforme sua posição geológica. De acordo com a posição da geologia dos aquíferos esses podem ser classificados como livre, semiconfinado e confinados (CPRM, 2010).

Os aquíferos livres, conhecidos como aquíferos freáticos, possuem porosidade e permeabilidade na zona saturada capaz de armazenar e transmitir água sob condições de pressão atmosférica. Os semiconfinados são constituídos na parte superior de camadas não totalmente impermeáveis capazes de armazenar e transmitir água lentamente, na parte inferior possui camadas com capacidade de acúmulo de água sendo capaz ou não de transmiti-la. Já os confinados conhecidos por serem aquíferos sob pressão, possuem pressão interior superior do que a pressão atmosférica (ALVES, 2016).

Os aquíferos também podem ser classificados (Figura 1) de acordo com o tipo de porosidade que a rocha apresenta, podendo ser: poroso, fissural e cárstico (SINGUI, 2017).

Figura 1: Tipos de aquífero de acordo com a porosidade.



Fonte: Singui, 2017.

i. Aquíferos Porosos

São formados a partir da circulação da água pelos grãos de rochas sedimentares ou sedimentos e pelos poros do solo. É um dos sistemas de aquíferos mais importantes por ser possível a cobertura de grandes áreas e devido ao elevado volume de água capaz de ser armazenada.

ii. Aquíferos Fissurais

Esse tipo de aquífero ocorre a partir do acúmulo de água nas rochas que apresentam descontinuidades como fissuras e fendas. Aquíferos fissurais ocorrem em rochas ígneas e metamórficas.

iii. Aquíferos Cársticos

São formados a partir do armazenamento da água em cavidades ou espaços abertos decorrentes de dissolução da rocha. A ocorrência desse tipo de aquífero é principalmente em rochas calcárias.

3.2.1 Contaminação das águas subterrâneas

Para o consumo humano seria preferível a utilização de água subterrânea, é preferível em virtude de sua boa qualidade microbiológica em estado natural. Essa boa qualidade deve-se ao fluxo lento, a propriedade de absorção do solo e de seus pequenos poros, resultando em períodos prolongados para ocorrer claras manifestações de contaminação. Os aquíferos são formações geológicas que possuem menos vulnerabilidade à contaminação quando comparado às águas superficiais. No entanto, se contaminados, pode ser inviável economicamente realizar um processo de recuperação, a depender do poluente encontrado (MANOEL FILHO, 2008).

Devido as características naturais das águas subterrâneas, ocorre um crescimento acelerado de atividades que fazem uso desse recurso, não ocorrendo na mesma proporção em medidas de preservação e uma boa gestão (VOUDOURIS et al., 2010). Os principais riscos que os recursos hídricos sofrem, são decorrentes do aumento da demanda por água, do rápido crescimento populacional, expansão urbana e econômica, aumento das atividades agropecuárias e pelos diversos produtos químicos apresentados pelas indústrias nas últimas décadas, que apresentam elevado potencial de contaminação (SHIRAZI; IMRAN; AKIB, 2012).

Foster et al. (2006) classificam as possíveis causas que podem levar a deterioração da qualidade da água subterrânea (Quadro 1).

Quadro 1: Causas de problemas relacionados a contaminação das águas subterrâneas.

TIPO DE PROBLEMA	CAUSA SUBJACENTE	CONTAMINANTES PRINCIPAIS
CONTAMINAÇÃO DO AQUIFERO	Proteção inadequada de aquíferos vulneráveis contra emissões e lixiviados provenientes de atividades urbanas/industriais e intensificação do cultivo agrícola.	Microrganismos patógenos, nitrato, cloreto, sulfato, boro, arsênico, metais pesados, carbono orgânico dissolvido, hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, certos pesticidas, como: Atrazina, Imidaclopride e Difenconazol. .
CONTAMINAÇÃO NO PRÓPRIO POÇO OU CAPTAÇÃO	Poço ou captação cuja construção/projeto inadequado permite o ingresso direto de água superficial ou água subterrânea rasa poluída.	Principalmente microrganismos patógenos.
INTRUSÃO SALINA	Água subterrânea salina (e às vezes poluída) que, por excesso de extração, é induzida a fluir para o aquífero de água doce.	Principalmente cloreto de sódio, mas pode incluir também contaminantes persistentes produzidos antropicamente.
CONTAMINAÇÃO NATURAL	Relacionada com a evolução química da água subterrâneas e a dissolução de minerais (pode ser agravada pela poluição ocasionada pela atividade humana e/ou extração excessiva)	Principalmente fluoreto e ferro solúvel, às vezes sulfato de magnésio, arsênio, manganês, selênio, cromo e outras espécies inorgânicas.

Fonte: Foster et al (2006).

Para Hirata (1997), deve-se permanecer com maiores cuidados em relação a degradação da qualidade das águas subterrâneas, principalmente nas proximidades de grandes centros urbanos, devido à disposição inadequada de efluentes domésticos e industriais lançados em larga escala sobre os solos e drenagens superficiais.

No Brasil, a média da população atendida pela rede de coleta de esgoto em 2019 foi de 54,1%, e em relação ao tratamento do esgoto gerado o percentual não chega a 50% (SNIS, 2019). Esses dados são preocupantes por apontar um quadro deficitário que não apresenta impactos apenas sobre os rios, mas sobretudo, incidem na qualidade da água subterrânea, em particular nos aquíferos que ficam próximos das áreas urbanas. A falta de saneamento demonstra risco eminente para as águas subterrâneas, devido a infiltração pelo uso de fossas negras e por vazamentos em redes de esgoto. Cenários como esses são mais agravantes

quando analisados em cidades que apresentam altos índices de densidade populacional (SOUSA et al., 2018).

A má gestão dos resíduos sólidos é outro problema, derivado da expansão populacional. Sua disposição inadequada permite a decomposição desses resíduos em contato direto com o solo, causando a contaminação do solo e das águas subterrâneas, através de lixiviados que possuem alto índice de poluição (SANTOS FILHO et al., 2017).

Em relação à agricultura um dos setores que mais utiliza água subterrânea, faz uso de produtos como fertilizantes e agrotóxicos, que podem contaminar o solo e os recursos hídricos, além da degradação ambiental, traz danos para a saúde e mudanças consideráveis nos ecossistemas (SOARES, FARIA, ROSA; 2016).

3.3 Vulnerabilidade dos aquíferos

O uso do termo vulnerabilidade natural dos aquíferos foi citado pela primeira vez na década de 70 (ALBINET; MARGAT, 1970) e posteriormente na década de 80 como objetivo de estudo da Agência de Proteção Ambiental do EUA (EPA) através do método DRASTIC proposto por Aller *et al.* (1987).

A definição de vulnerabilidade pode ser interpretada diferentemente por alguns autores, sendo considerada por uns as características intrínsecas do aquífero relacionada ao próprio ambiente (ALLER et al., 1987; FOSTER; HIRATA, 1988) e considerada por outros, como dependente das propriedades específicas dos próprios contaminantes que independem do uso do solo (FRANCÉS et al, 2001).

Para Vrba e Zaporezec (1994) a vulnerabilidade pode ser dividida em vulnerabilidade *natural* (intrínseca), dependente das características do aquífero (fatores hidrogeológicos do próprio aquífero), e em vulnerabilidade *específica*, a qual está associada a possíveis impactos gerados pelo emprego de contaminantes relacionados a usos específicos do solo.

Hirata (2001), cita que a vulnerabilidade pode ser utilizada para expressar características intrínsecas, que indiquem a sensibilidade de um aquífero ser atingido de forma indireta por uma carga poluente vinda de ações antropogênicas.

Existem inúmeros métodos que podem avaliar a vulnerabilidade de aquíferos. O Quadro 2, ilustrado a seguir, traz diferentes métodos de vulnerabilidade com seus objetivos principais e os parâmetros analisados. Para elaboração do quadro foram utilizadas como fontes: Hirata e Rebouças (1999) *apud* Crispim (2016).

Quadro 2: Métodos de avaliação de vulnerabilidade.

MÉTODO	AVALIAÇÃO	PARÂMETROS	REFERÊNCIA
Avaliação de Diques de contenção (Surface Impoundment Assessment)	Sistemas de disposição de águas servidas; vulnerabilidade específica	• Zona não saturada; • Importância do recurso; • Qualidade das águas subterrâneas; • Periculosidades do material.	Le Grand (1964)
Poluição dos Lençóis Aquíferos	Vulnerabilidade Geral	• Geologia (litologia e estrutura)	Taltasse (1972)
Sistema de Classificação de “Sites” Site Ranking System	Disposição de produtos químicos, novos e em operação	• Solo, caract. Hidráulica, sorção e tamponamento químico; • Hidrodinâmica do aquífero; • Ar; • População próxima	Hagerty et al. (1973)
Matriz de Interação Solo-Resíduo Waste-Soil Interaction Matrix	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	• Efeitos na saúde; • Características do produto químico; • Comportamento do produto; • Capacidade do solo/atenuação; • Hidrogeologia; • Características do local.	Philips et al. (1977)
Metodologia de Classificação de “Sites” Site Ranking Methodology	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	• Receptor-população/ uso da água/ uso local/ degradação ambiental; • Caminhos, nível e tipo de contaminação. Profundidade do nível d’água, pluviometria, permeabilidade do solo; • Característica do resíduo-toxicidade, persistência; • Prática de manejo-aspectos operacionais e construtivos.	Kulfs et al. (1977)
Mapa de Vulnerabilidade	Vulnerabilidade geral	• Característica litológicas; • Áreas de recarga e descarga.	Duarte (1980)
Sistema de Classificação de Ameaças Hazard Ranking System	Áreas prioritárias para limpeza do aquífero	• Migração-característica do meio e resíduo. Quantidade de produto, população próxima; • Exploração e fogo; • Contato direto	Caldwell et al. (1981)
(Classificação de “sites” para aterro) (Landfill Site Ranking) (Método Le Grand-Brown)	Aterros sanitários para limpeza do aquífero	• Distância aterro e poços produtores; • Profundidade do nível d’água; • Gradiente do aquífero; • Permeabilidade e capacidade de atenuação.	Le Grand (1983)
Índice de Pesticidas (Pesticide Index)	Pesticidas, uso normal	• Características físico-química de pesticidas; • Clima; • Perfil do solo;	Rao et al. (1985)

MÉTODO	AVALIAÇÃO	• Cultura. • PARÂMETROS	REFERÊNCIA
IPN	Vulnerabilidade	• F – Fertilizante com azoto (nitrogênio); • R – Recarga; • S – Textura do solo; • P – Profundidade do nível freático.	Ramolino (1986)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	• D – Profundidade da água subterrânea; • R – Recarga; • A – Meio aquífero; • S – Solo; • T – Topografia; • I – Impacto no aquífero; • C – Condutividade hidráulica.	Aller et al. (1987)
Groundwater Vulnerability Map For Nitrate (Mapa de vulnerabilidade da água subterrânea para nitrato)	Potencial de lixiviação de nitrato	• Tipo de solo; • Característica hidráulica e litológica do aquífero	Carter et al. (1987)
DRASTIC Pesticide	Passeado na vulnerabilidade específica para um tipo de poluente: os pesticidas. Alterado unicamente os ponderadores	• D – Profundidade água subterrânea; • R – Recarga; • A – Material do aquífero; • S – Tipo de solo; • T – Topografia; • I – Impacto da zona vadosa; • C – Condutividade hidráulica.	Aller et al. (1987)
GOD	Vulnerabilidade geral	• G – Tipo de aquíferos; • O – Litologia zona vadosa; • D – Profundidade da água.	Foster & Hirata (1990)
Sintacs	Vulnerabilidade geral	• Semelhante ao método DRASTIC, com pesos diferentes.	CIVITA et al. (1990)
AVI	Vulnerabilidade geral	• Ei: espessura da camada litológica acima do aquífero superior; • Ki: condutividade hidráulica estimada em cada uma das camadas	Van Stempvoort et al. (1993)
EPPNA	Vulnerabilidade geral	• Características litológicas • Hidrogeológicas do sistema de aquífero	Plano Nacional da Água (1998); Artuso et al. (2004)
IS (Índice de Susceptibilidade)	Vulnerabilidade Específica	• D – Profundidade água subterrânea • R – Recarga • A – Tipo de aquífero • T – Topografia • Lu – Ocupação do solo	Ribeiro (2005)

Fonte: adaptado de Hirata e Rebouças, 1999 *Apud* Chrispim 2016.

Os métodos são baseados na interação criada a partir da elaboração dos mapas de cada parâmetro estudado. Por esse motivo o estudo da vulnerabilidade de aquífero à contaminação é considerada uma ferramenta valiosa nas mãos dos gestores responsáveis pelo monitoramento dos recursos hídricos, para auxiliar na melhoria do planejamento de uso e ocupação do solo (CAMPOS, 2015).

Os mapas de vulnerabilidade elaborados com o auxílio das ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilitam fornecer informações importantes para a proteção de águas subterrâneas, viabilizando melhoria na qualidade dessas águas a partir de modificações nas atividades agrícolas e na distribuição do uso e ocupação do solo (LINHARES, 2012).

O mapa de vulnerabilidade busca mostrar de forma clara as áreas do aquífero que estão mais propícias à contaminação. É necessário salientar que os estudos de vulnerabilidade são apenas o primeiro passo para a observação de maiores problemas ambientais em escala local e regional, não substituindo os estudos detalhados (HUDAK; THAPINTA, 2003).

3.3.1 Risco de contaminação

Ferreira e Oliveira (2004) enfatizam a importância de diferenciar a vulnerabilidade e o risco de contaminação, considerando que além das características intrínsecas do aquífero o risco de contaminação depende também da presença de cargas poluentes significativas que possam chegar até as águas subterrâneas.

Para Foster, Hirata e Rocha (1988) a ideia que mais se adequa quando se trata do risco de poluição de água subterrânea é a relação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante lançada à superfície. Neste contexto, é importante destacar a existência de aquíferos que apresentem alto índice de vulnerabilidade, mas, não possui carga expressiva de poluente que caracterize um risco de poluição (BÓS; THOMÉ, 2012).

A análise do risco de poluição das águas subterrâneas é utilizada sobretudo para identificar aquíferos ou partes deles que apresentam fragilidades a atividades antrópicas, bem como, identificar quais atividades são capazes de oferecer maior contribuição de poluentes para a área (SANTOS; CRUS; NASCIMENTO, 2010).

3.4 Trabalhos relacionados

Inúmeros trabalhos de vulnerabilidade de água subterrânea utilizam o modelo DRASTIC para avaliar as fragilidades da área no que se refere aos aspectos hidrogeológicos, morfológicos e físicos do aquífero.

A seguir serão apresentados alguns trabalhos que utilizaram essa ferramenta para obter o índice de vulnerabilidade.

Barreto (2006) realizou um estudo sobre a contaminação da água subterrânea por pesticida e por nitrato no município de Tianguá, no Ceará. Na pesquisa o autor avaliou a vulnerabilidade do aquífero aplicando os índices DRASTIC e DRASTIC pesticidas. Com a aplicação do método DRASTIC foi agrupado quatro classes de vulnerabilidade: insignificante, muito baixa, baixa e moderada, predominando a classe muito baixa, com 628,7 km² ou 67,2% da área de estudo. Com a aplicação do DRASTIC pesticidas foram identificadas cinco classes de vulnerabilidade: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta, com predominância da classe moderada representando 553,2 km² ou 59,1%. Em relação a presença de nitrato e pesticida na água subterrânea o autor constatou que houve correlação aceitável entre as contaminações baixa e moderada, em relação as classes de vulnerabilidade onde os mesmos se encontram.

Guerra *et al.* (2010) realizaram um estudo de vulnerabilidade da área do Perímetro Irrigado de Morada Nova, utilizando o modelo DRASTIC, com informações de 36 poços de monitoramento presente na área. De acordo com o mapa de vulnerabilidade, os autores classificaram a área em sete classes de vulnerabilidade, insignificante, muito baixa, moderada, alta, muito alta e extrema, com variações de valores de 0 a 315. Sendo a classe insignificante a que mais se destacou, ocupando 30% da área de estudo, enquanto que a classe moderada com 11% e as classes alta a extrema ocuparam 17%, respectivamente. Os autores concluíram que os órgãos responsáveis devem apresentar um monitoramento adequado nas áreas que indicam níveis mais elevados de vulnerabilidade, para minimizar os riscos de contaminação do aquífero.

Santos, Marques e Sturaro (2016) utilizaram o geoprocessamento aplicado à análise do índice de vulnerabilidade DRASTIC no sistema aquífero guarani (SAG) em Ribeirão Bonito – SP. O estudo teve como objetivo elaborar o mapeamento e análise da vulnerabilidade do SAG utilizando o método DRASTIC, com a finalidade de contribuir na elaboração de medidas mitigadoras para melhorar a proteção do aquífero e do gerenciamento dos recursos hídricos. Após verificar os pesos e os índices de cada parâmetro, o índice DRASTIC variou entre 26 –

137,1, o que corresponde uma baixa, média e alta vulnerabilidade. A área de estudo está localizada em local onde a maioria das atividades realizadas são de uso agrícola, portanto se apresentando como sendo a principal fonte de poluição. O DRASTIC *pesticida* apresentou índice de vulnerabilidade entre 25 – 151,6 sendo baixa, média e alta vulnerabilidade. A alta vulnerabilidade foi indicada em mais de 50% da área do município (ou, 262,4 km²), e quando aplicado o DRASTIC *pesticida* as áreas com alta vulnerabilidade aumentaram para 284,5 km², correspondendo à 60,3% do município. As áreas com média vulnerabilidade corresponderam a 35,6% da área do município, reduzindo para 30,2% quando aplicado o DRASTIC *pesticida*. A presença de áreas altamente vulneráveis corresponde às áreas de afloramento do sistema do aquífero guarani.

Tanajura e Leite (2016) realizaram um estudo de vulnerabilidade na sub-bacia hidrográfica de Jacaré-Pepira/SP, objetivando quantificar e mapear a região quanto à vulnerabilidade das águas subterrâneas. Para realização do trabalho foi aplicado as duas variações do DRASTIC, sendo a padrão e o *pesticida*. Após identificação dos sete parâmetros DRASTIC e DRASTIC *pesticida*, quanto aos índices e pesos, foi verificado valores para o DRASTIC padrão de vulnerabilidade variando de 81 a 189, indo de vulnerabilidade baixa a alta, predominando a classe de vulnerabilidade moderada (48,96% da área) e baixa (44,14%), o índice de vulnerabilidade alta foi de 6,90%, portanto, sendo observado índices de vulnerabilidade muito elevada. Os índices obtidos para o DRASTIC *pesticida* variaram entre 81 e 226, englobando classes de vulnerabilidade baixa a muito alta, novamente a predominância foi de vulnerabilidade moderada, representando 53,55% da área de estudo, enquanto o índice de vulnerabilidade alta aumentou para 37,27%. Os valores de vulnerabilidade alta identificados para as duas variações do DRASTIC foram observados em áreas que apresentaram menores profundidades quanto ao nível d'água, mostrando que as águas subterrâneas apresentam maiores vulnerabilidades quanto mais próximas à superfície do terreno, portanto ficando mais vulneráveis às fontes de poluição.

Inserir um novo parâmetro ao método DRASTIC pode representar uma melhor forma de avaliar a vulnerabilidade de uma determinada área. Nesse cenário, Pacheco *et al.* (2018) realizaram um estudo de modificação da estrutura do DRASTIC para avaliar o risco de contaminação das águas subterrâneas de bacias montanhosas rurais, com o objetivo de relacionar o risco de contaminação das águas subterrâneas com a concentração de nitrato em águas subterrâneas rasas. Além da análise com os valores originais do modelo DRASTIC, foi realizada uma modificação nos pesos, e a inserção de um novo fator para verificação da vulnerabilidade específica (contaminação por nitrato, fator L), com o intuito de ajustar o

método às características locais. Os autores relacionaram L com o uso e ocupação do solo, e perceberam que o risco de contaminação por nitrato foi maior quando utilizado o DRASTIC original. Classificado como moderado e alto para o DRASTIC original e risco moderado quando utilizado o modelo com os pesos modificados. Os parâmetros relatados pelos autores que apresentam maior relevância diante do risco de contaminação, são: recarga do aquífero, zona vadosa, a topografia e o uso do solo.

Hasan *et al.* (2019) utilizando a modelagem DRASTIC baseada em georreferenciamento baseado em GIS avaliaram a vulnerabilidade das águas subterrâneas em Savar upazila distrito de Dhaka em Bangladesh, objetivando identificar os aquíferos vulneráveis, visando fornecer informações atuais a respeito dos recursos hídricos subterrâneos. A área de estudo foi equivalente a 280 km². Foram analisadas 42 amostras de água coletadas de poços de tubos manuais, poços de tubos rasos e poços de monitoramento, foram monitorados também as concentrações de nitrato (NO₃⁻) e cromo. Os intervalos de vulnerabilidade obtidos no estudo variaram de 79 a 137, englobando as classes de vulnerabilidade baixa, moderada e alta. De acordo com os mapas gerados com o modelo DRASTIC, as áreas menos vulneráveis foram aquelas que estavam inseridas em ambiente com espessa cobertura de solo e profundidade superior a 15 metros. Após análise dos mapas foi verificado uma maior ocorrência de vulnerabilidade moderada, representando 45% da área de estudo; as áreas classificadas com baixa e alta vulnerabilidade totalizaram, respectivamente 34% e 21% da área estudada. Estas áreas caracterizam-se, principalmente, por planícies inundadas, sendo importante destacar que as áreas de menor vulnerabilidade não estão totalmente livres de apresentar contaminação das águas subterrâneas. A ocorrência de nitrato em águas subterrâneas comumente é apresentada em pequenas quantidades, sendo o aumento dessas concentrações decorrentes de atividades antrópicas, e quanto a concentração de cromo normalmente se faz presente em águas subterrâneas através de atividades como mineração, atividade que era comum na região de estudo. Desta forma, as variações nas concentrações de nitrato e cromo foi de, respectivamente 0,02 a 5,55 mg/l e 3,5 a 35 µg/l. Para ambas, as maiores concentrações foram identificadas nas áreas que apresentaram maior vulnerabilidade.

O modelo DRASTIC pode ser utilizado para verificar a influência de diferentes fontes de poluição de águas subterrâneas. Gad e El-Hattab (2019), avaliaram a qualidade da água subterrânea da depressão de El Fayoum no Egito usando índices de poluição da água e o modelo DRASTIC. A área de estudo foi uma região semiárida com 1200 km². Para as análises da qualidade das amostras de água dos 27 poços monitorados os seguintes parâmetros: metais pesados, materiais dissolvidos na água e pH. De acordo com o Índice de avaliação de metais

pesado (HEI) aplicados pelos autores, as amostras de águas subterrâneas variam de fortemente afetadas (31,5%) a gravemente afetadas (68,5%) por metais pesados; o índice de poluição de metais pesados (HPI) indicou que 74% das amostras de água subterrânea apresentaram índice crítico de poluição. O modelo DRASTIC utilizado mostrou que as áreas com maior vulnerabilidade aumentam radialmente em direção às áreas periféricas da área de estudo, locais onde os índices de qualidade da água apresentaram níveis mais elevados de presença de metais pesados, indicando assim áreas do aquífero mais susceptíveis à contaminação. O estudo indicou que a área de estudo necessita de um controle e uma redução nos níveis de uso de fertilizantes agroquímicos e agrotóxicos.

Jaunat *et al.* (2019) utilizaram métodos de análises de vulnerabilidade para identificar a existência de nitrato antropogênico no aquífero da lagoa Biguglia, localizada na ilha de Córsega (França). O intuito do trabalho foi de comparar os efeitos do uso agrícola atual com o antigo, na vulnerabilidade hidrogeológica em relação às concentrações de nitrato. A lagoa possui uma área de 14,5 km² com um aquífero freático de, aproximadamente 80 km², sendo o principal aquífero da região utilizado para fins de irrigação e abastecimento humano. Os métodos utilizados no estudo para identificar as vulnerabilidades intrínsecas e específicas foram o DRASTIC, SI, SINTACS e uma variação do DRASTIC, onde foi inserido o parâmetro de uso do solo. Para validar os testes foram realizadas coletas de água totalizando 48 amostras, cobrindo ao máximo a área de estudo. Foi observado que as classes de vulnerabilidade alta e muito alta se sobressaíram sobre as demais. Em relação às concentrações de nitrato os autores identificaram valores elevados superiores aos estabelecidos nos padrões de água potável e acima das concentrações naturais geradas pelo próprio ambiente, indicando que as atividades antrópicas contribuíram para a degradação da qualidade das águas subterrâneas. As elevadas concentrações também apresentam relação com as classes alta e muito alta de vulnerabilidade indicadas pelos mapas. Para os autores a presença de concentrações ainda superiores ao normal nas águas subterrâneas mais antigas indica uma baixa capacidade de auto remediação do sistema aquífero da região.

Jia *et al.* (2019) avaliaram a vulnerabilidade das águas subterrâneas ao nitrato de um aquífero poroso utilizando o método DRASTIC original, o DRASTIC modificado com a adição do uso do solo (L) e um novo método substituindo os parâmetros originais. O estudo foi desenvolvido na província de Jilin Ocidental na China. Os autores montaram um novo sistema de parâmetros. Assim, como os parâmetros foram alterados, o valor de cada parâmetro foi analisado e determinado novos pesos. A área de estudo é relatada pelos autores como sendo caracterizada pelo uso excessivo de fertilizantes na agricultura, o que

potencializou o aumento da concentração de nitrato nas águas subterrâneas. Os autores concluíram que os métodos DRASTIC original e DRASTICL (método modificado) não foram suficientes para representar a real vulnerabilidade da água subterrânea ao nitrato, mas obtiveram resultados favoráveis quando aplicaram o novo método DRANTHVP, com uma distribuição mais uniforme das classes de vulnerabilidade. Concluíram ainda o método forneceu uma abordagem completa para estimar a vulnerabilidade da água subterrânea de aquíferos porosos ao nitrato.

Tomer, Katyal e Joshi (2019), analisaram a vulnerabilidade das águas subterrâneas da cidade de Delhi na Índia utilizando o modelo DRASTIC. A área de estudo foi de 1483 km², com 38% utilizada para agricultura. Após elaboração dos mapas individuais e o mapa geral do índice de vulnerabilidade, os autores verificaram que 45% da área de Delhi está sob risco muito alto a alto, a parte sul da área de estudo apresentou níveis mais baixos de vulnerabilidade, atribuído pelos autores ao alto declive e ao aquífero mais profundo na região, reduzindo as chances de poluição do lençol freático, a área com maiores valores de vulnerabilidade estão localizadas na parte oriental da cidade, onde a litologia presente é areia e cascalho, caracterizada por possuir alta permeabilidade, possibilitando o acesso mais fácil dos poluentes. Os autores relataram que o cenário da qualidade das águas subterrâneas de Delhi é grave, exigindo ações corretivas urgentes.

Asfaw, Mengistu (2020) realizou o estudo da vulnerabilidade do aquífero usando o modelo DRASTIC modificado para a gestão sustentável de águas subterrâneas no noroeste da Etiópia em uma área de 664,74 km². Parâmetros de uso do solo foram incorporados pelos autores, pois a área de vegetação natural passou a ser utilizada para atividade agrícola, atividade industrial e assentamentos. Após analisar as classes de vulnerabilidade, foi observado que apresentaram risco de vulnerabilidade alto (5,74%) nas áreas construídas (assentamentos), enquanto maior parte da bacia hidrográfica do estudo foi caracterizada como moderadamente vulnerável (81,24%) estando associada principalmente, com as terras cultivadas. Os autores indicaram a necessidade de delinear a área vulnerável e identificar os contaminantes para auxiliar no planejamento adequado e direcionamento para esforços ligados a gestão das águas subterrâneas.

Voutchkova *et al.* (2020) estudaram a vulnerabilidade ao nitrato de aquíferos arenosos na Dinamarca em uma área de 293 km², com 80% da área composta por terras aráveis, utilizadas para agricultura intensiva. O objetivo do estudo foi desenvolver ainda mais o método DRASTIC (DRASTIC-N), com base na integração de geologia 3D detalhada e condições redox de subsuperfície com base nos pesos e classificações dos parâmetros

ajustados às condições europeias. O novo parâmetro inserido pelos autores reflete o estado de oxidação e redução das águas subterrâneas, assim, refletindo o potencial de poluição de nitrato. Com a análise do novo parâmetro os autores verificaram que 74% das áreas de estudo apresentavam condições de redução, ou seja, um aumento no índice de nitrato. Quando analisados os dados do DRASTIC sem adição do novo parâmetro foi verificado que, mais da metade da área de estudo estava classificada com uma vulnerabilidade intrínseca alta ou muito alta e o restante com vulnerabilidade moderada. Quando os dados do DRASTIC-N foram analisados, os autores identificaram que 61% da área estava classificada com vulnerabilidade alta e 31% como moderada. Os autores concluíram, que às áreas com alto índice de vulnerabilidade foram maiores no mapa DRASTIC-N comparado ao DRASTIC convencional, o que demonstrou a influência do novo parâmetro.

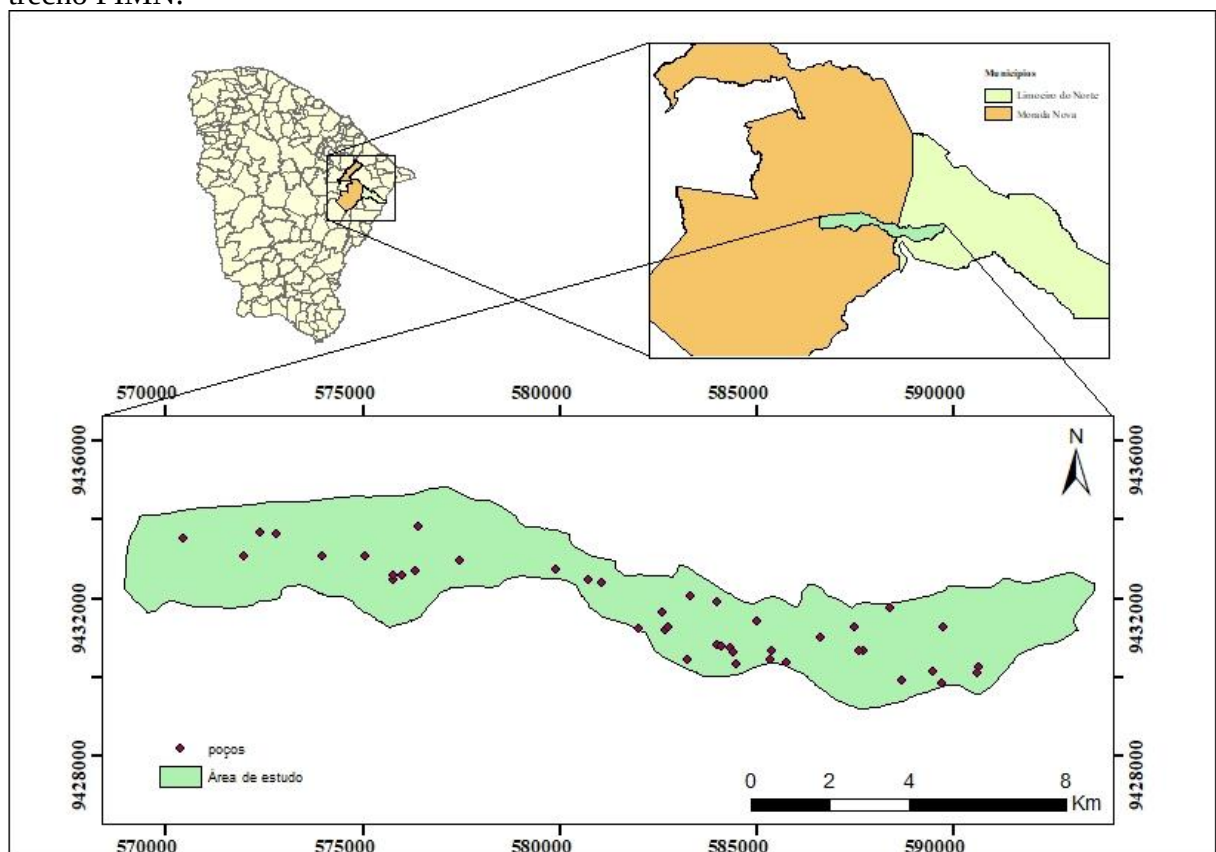
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e acesso

O local de realização dessa pesquisa é o perímetro irrigado de Morada Nova (PIMN) que está localizado entre os municípios de Morada Nova e Limoeiro do Norte, no Estado do Ceará (Figura 2), a 170 km da capital Fortaleza. O PIMN está inserido na microrregião do Baixo Jaguaribe, no sub vale da bacia do Rio Banabuiú (TAVARES *et al.*, 2014).

O IPMN começou a ser implantado no ano de 1968 com início dos serviços de operação no ano de 1970. O acesso ao perímetro pode ser realizado pela Rodovia BR – 116 até o km 90 e seguindo pela Rodovia CE – 138 (DNOCS, 2004 *Apud* ROLIM, 2006).

Figura 2: Localização da área de estudo com a distribuição dos poços de água subterrânea, trecho PIMN.



Fonte: Autor, (2021).

4.2 Geomorfologia

O município de Morada Nova possui relevo de formas planas em maior dominância, possui poucas depressões sertanejas e apresenta significativas áreas de planícies fluviais. Na extensão do município é observado predomínio de rochas de embasamento cristalino (CPRM, 1998a).

Limoeiro do Norte apresenta formas de relevo mais variadas, com superfícies rebaixadas da Chapada do Apodi, planícies e terraços fluviais próximos ao Rio Jaguaribe e formas suaves de depressão sertaneja (CPRM, 1998b).

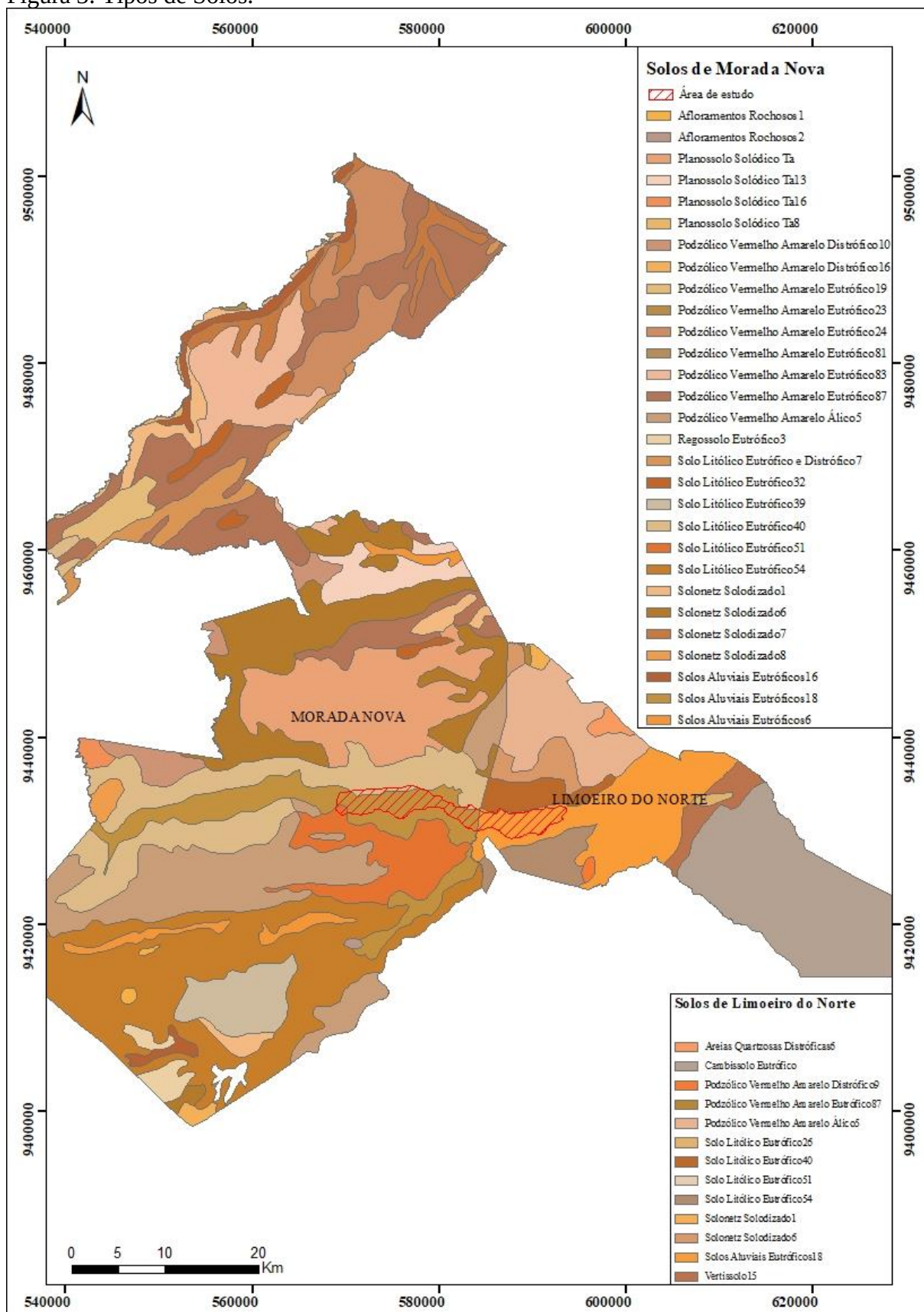
4.3 Solos

Na área de estudo está inserida dois tipos de solos: aluvial eutrófico e Neossolo Litólico (Figura 3), descritos abaixo:

Solo aluvial eutrófico (Neossolo flúvico): Solo com maior predominância na área de estudo, caracterizado por ser um solo mineral não hidromórfo, formado a partir de camadas sobrepostas de sedimentos aluviais recentes sem relações pedogenéticas entre as camadas. Decorrente das formas de deposição do material de origem, ao longo de seu perfil o solo apresenta uma granulometria bastante diversificada (EMBRAPA, 2020a).

Neossolo Litólico: Solo com pouca representação na área de estudo. É caracterizado por ser considerado raso devido a presença de rochas. A profundidade realizada a partir da soma de seus horizontes geralmente não ultrapassa 50 cm. É um solo de área com declives pouco acentuados (EMBRAPA, 2020b).

Figura 3: Tipos de Solos.



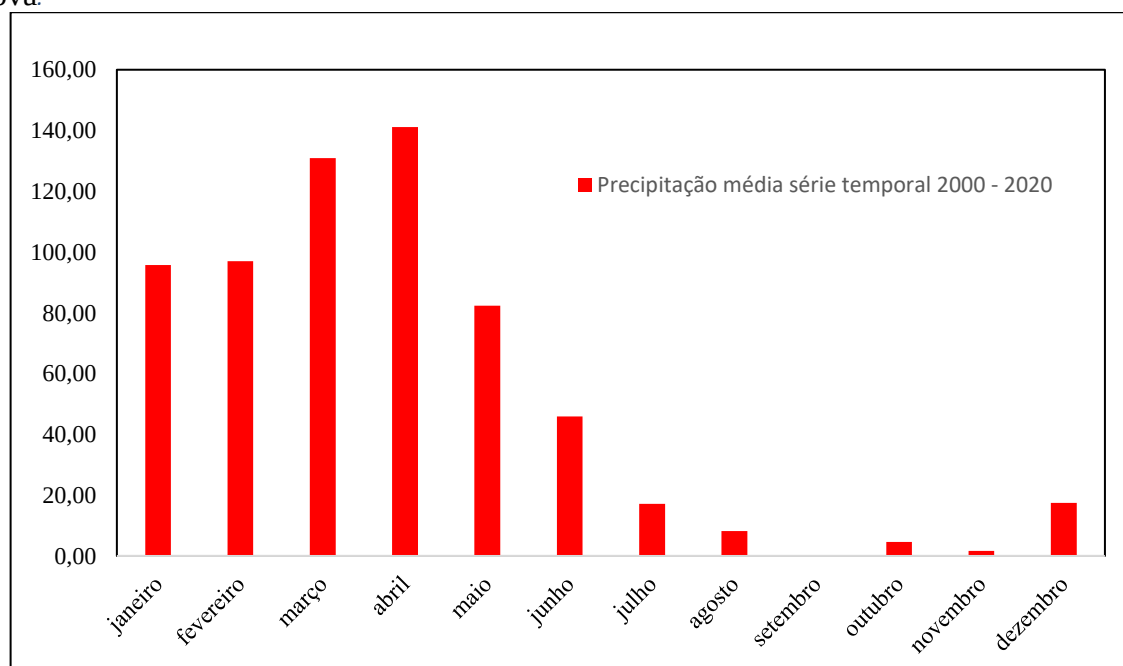
Fonte: Autora (2021).

4.4 Precipitação

O regime de chuvas no Estado do Ceará pode ocorrer de dezembro a julho, com as chuvas mais intensas na quadra chuvosa de fevereiro a maio (FUNCEME, 2019).

A área de estudo possui média anual de precipitação em torno de 660 mm (ADECE, 2011). De acordo com os dados obtidos da base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) na série histórica de 2000 a 2020, os meses que apresentam maior precipitação são os de fevereiro a maio, apresentando uma intensificação no mês de março. Os meses entre julho a novembro são representados pelo período de estiagem (Figura 4).

Figura 4: Precipitação média mensal do período de 2000 a 2020 do município de Morada Nova.



Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA), (2018).

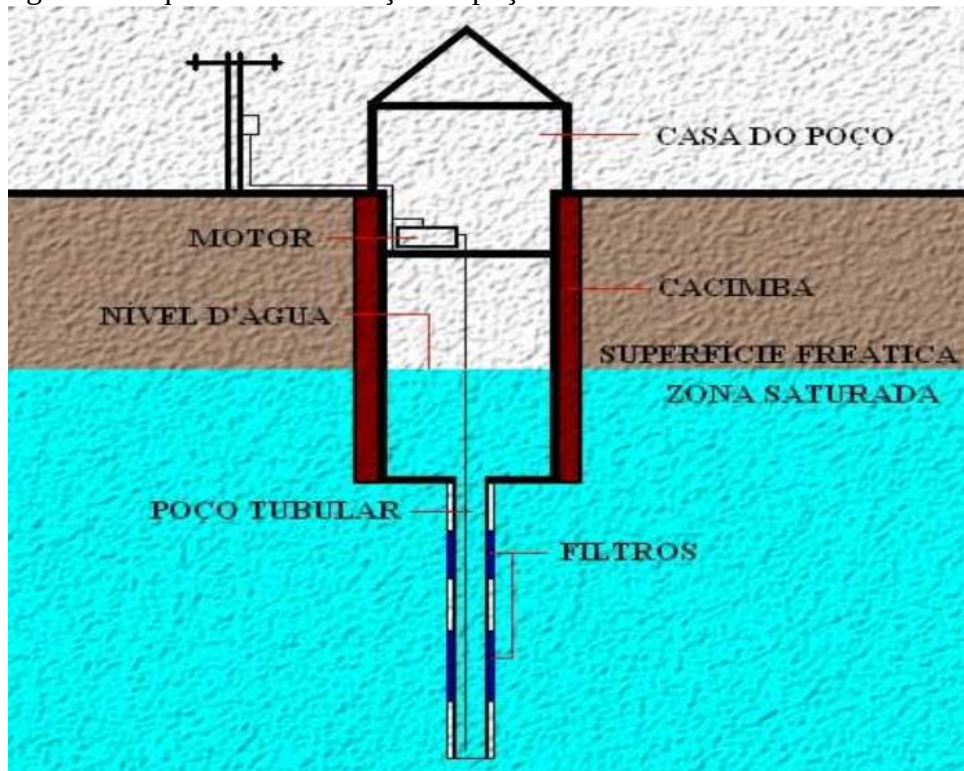
4.5 Recursos hídricos.

As águas subterrâneas do Estado do Ceará são monitoradas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), realizando o acompanhamento quanto ao nível dos lençóis freáticos e quanto à qualidade das águas em determinados casos. A área de estudo faz parte do aquífero aluvionar do rio Banabuiú, trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte. O trecho em estudo corresponde uma área de 53,64 km².

A COGERH iniciou no ano de 2001 o monitoramento dos poços localizados no PIMN. A área do PIMN está inserida nos sedimentos aluviais do Rio Banabuiú. A princípio, eram

monitorados 52 poços, mas atualmente esse número foi reduzido para 43 poços (CEARÁ, 2018). As Figuras 5 e 6 mostram os sistemas comum de construção dos poços do PIMN.

Figura 5: Esquema de construção de poços no aluvião do rio Banabuiú.



Fonte: Moura, 2008.

Figura 6: Poço do aluvião do rio Banabuiú, no trecho do PIMN.



Fonte: Moura, 2008.

4.6 Aspectos Socioeconômicos

A Sub-bacia hidrográfica do rio Banabuiú é composta por 13 municípios, localizada no Sertão Central do estado do Ceará em uma região de semiaridez em sua totalidade. O rio principal da sub-bacia é o rio Banabuiú com uma área de drenagem de 19.810 km², que representa 13,37% do território cearense. O rio deságua no rio Jaguaribe no sentido oeste-leste, após percorrer uma distância de 314 km (SILVA, 2017).

A economia da região gira em torno da pecuária e da agricultura temporária, com destaque de produção para o município de Morada Nova nas culturas de arroz e feijão, decorrente do projeto de irrigação de Morada Nova (SILVA, 2017).

Em decorrência da atuação da agricultura irrigada, principalmente na região do município de Morada Nova, o uso de produtos como agrotóxicos também é presente na região, potencializando a contaminação dos solos e dos recursos hídricos da área.

Devido aos inúmeros anos de seca que atingiram o estado, a região do PIMN foi perdendo seu poder produtivo. Atualmente, compõe a área vegetação de pastagem, plantação de arroz e cultivo de camarão que é uma atividade que apresenta elevado crescimento na região. Os proprietários estão substituindo os lotes que utilizavam para agricultura por tanques voltados à criação de camarão. No entanto, essa atividade pode apresentar um problema ambiental para as águas superficiais e subterrâneas, resultante da liberação dos rejeitos gerados por essa atividade. Os efluentes são lançados no ambiente, não sendo realizado nenhum tipo de tratamento. As figuras 7, 8 e 9 a seguir ilustram as atividades presentes na área.

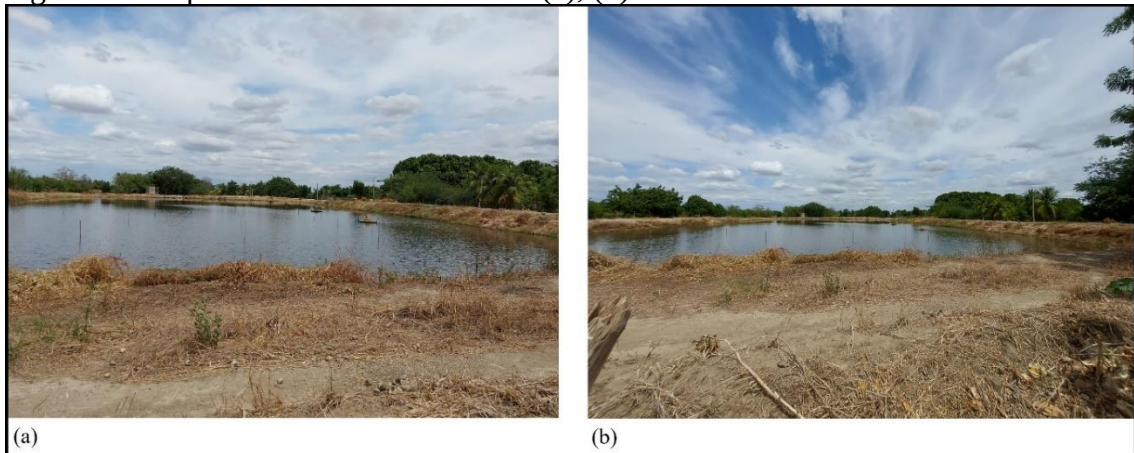
Figura 7: Área de vegetação de pastagem (a), (b), (c), (d).



Fonte: Autora, (2021).

A Figura 7 mostra os tipos de áreas de pastagem existentes no PIMN, algumas áreas encontram-se com pastagem seca por não está fazendo uso de irrigação (imagem d), enquanto outros campos de pastagem utilizam o processo de irrigação de forma contínua, como nas imagens a, b e c.

Figura 8: Tanques de cultivo de Camarão (a), (b).



Fonte: Autora, (2021).

Figura 9: Plantação de arroz.



Fonte: Autora, (2021).

Nas Figuras 8a e 8b pode-se observar os tanques utilizados para cultivo de camarão e na Figura 9 as plantações de arroz que ainda são realizadas na área, respectivamente.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção apresenta-se a metodologia do modelo DRASTIC, o cálculo da análise de sensibilidade e o DRASTIC modificado, modificação realizada para se obter o risco de contaminação das águas subterrâneas do aquífero no trecho do PIMN.

Os dados coletados referentes às características hidrogeológicas e naturais da área de estudo, foram organizados e direcionados para os respectivos parâmetros de acordo com método DRASTIC, afim de possibilitar um melhor desenvolvimento dos resultados da pesquisa.

5.1 Modelo DRASTIC

O DRASTIC pode ser entendido como sendo uma técnica de sobreposição baseada em GIS utilizada para estimar a sensibilidade das águas subterrâneas à contaminação (HASAN *et al.*, 2019). O modelo de cálculo de vulnerabilidade DRASTIC foi utilizado pela primeira vez nos Estados Unidos pela Environmental Protection Agency (EPA) proposto por Aller *et al.* (1987) para avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas e cargas de poluentes empregando variáveis hidrogeológicas.

De acordo com Aller *et al.* (1987), para ser aplicado o método DRASTIC para cálculo da vulnerabilidade de água, é necessário que alguns quesitos sejam respeitados:

- o contaminante é introduzido à superfície do terreno;
- o contaminante é conduzido ao aquífero de forma vertical pela água de infiltração;
- o contaminante apresenta mobilidade à água;
- a área de estudo avaliada pelo DRASTIC deve possuir um valor mínimo de 0,4 km².

O método é baseado em análise de fatores que agregam características relevantes no controle de uma possível contaminação das águas subterrâneas. O nome DRASTIC que é um acrônimo, é formado por 7 parâmetros relacionados aos aspectos hidrogeológicos, morfológicos e físicos do aquífero. O cálculo da vulnerabilidade é obtido por meio da soma e multiplicação desses 7 fatores. São eles:

- **D** – Depth to groundwater (Profundidade do topo do aquífero);
- **R** – Recharge rate (Recarga do aquífero);
- **A** – Aquifer material (Material do aquífero);

- **S** – Soil material (Material do solo);
- **T** – Topography (Topografia);
- **I** – Impact of the vadoze zone (Influência da zona vadosa);
- **C** – Hydraulic Conductivity of the aquifer (Condutividade hidráulica do aquífero).

Os parâmetros utilizados no DRASTIC são analisados e comparados entre si, para estabelecer o nível de importância de cada parâmetro para a vulnerabilidade. Os indicadores recebem pesos que variam numa escala de 1 a 5, onde os que apresentam maior significância recebem peso 5 e os de menor importância recebe peso 1. Os parâmetros apresentam divisões em intervalos ou classes de feições, que representam alguma consequência no potencial de contaminação. Para estes são conferidos índices que oscilam de 1 para atributos menos significativo e elevando-se na escala até 10 de acordo com o nível de significância considerado. O Quadro 3 associa os pesos referentes a cada parâmetro DRASTIC com uma breve definição de cada um.

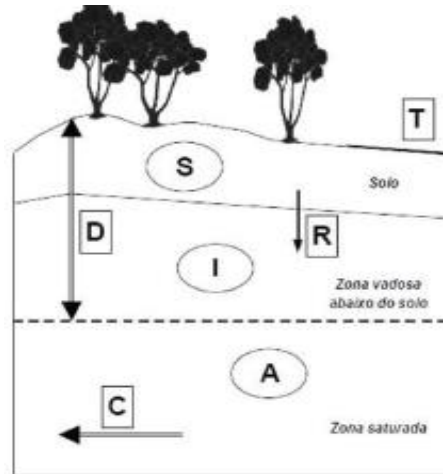
Quadro 3: Aspectos físicos, morfológicos e hidrogeológicos do DRASTIC e suas descrições.

ASPECTOS FÍSICOS, MORFOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS	PESO	DEFINIÇÃO
Profundidade do topo do aquífero (Depth to groundwater)	5	Distância entre o nível do aquífero até a superfície do solo (em metros). Influência no tempo de movimentação do contaminante até o aquífero.
Recarga (Recharge rate)	4	Recarga do aquífero (numérico), também influencia na movimentação do poluente.
Material do aquífero (Aquifer material)	3	Estrutura do material do aquífero, analisada por categoria.
Material do solo (Soil material)	2	Material do solo (por categoria). Influência no transporte dos contaminantes.
Topografia (Topography)	1	Declividades do terreno. Influência na movimentação do contaminante por meio do escoamento superficial e subsuperficial.
Impacto da zona não-saturada (Impact of the vadoze)	5	Natureza da zona não saturada. Atua na movimentação do contaminante.
Condutividade hidráulica (Hydraulic Conductivity)	3	Condutividades hidráulica (permeabilidade). Movimentação da água no próprio aquífero.

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

A Figura 10 mostra um exemplo esquemático dos parâmetros DRASTIC no perfil de um aquífero. É possível identificar como são analisados cada fator.

Figura 10: Representação dos parâmetros DRASTIC.



Fonte: Ferreira; Oliveira (2004).

O valor do potencial de vulnerabilidade é calculado pela multiplicação dos pesos correspondentes a cada parâmetro e os índices estabelecidos nos intervalos e as classes. No final é realizado uma soma de todas as multiplicações. O índice de vulnerabilidade DRASTIC é obtido a partir da seguinte expressão (equação 1):

$$\text{DRASTIC} = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i. \quad (1)$$

Em que:

$D_p \times D_i$ = multiplicação entre o peso (D_p) e o índice (D_i) relativo aos intervalos de profundidade existentes para o parâmetro profundidade do topo do aquífero.

$R_p \times R_i$ = multiplicação entre o peso (R_p) e o índice (R_i) relativo aos valores de recarga do aquífero.

$A_p \times A_i$ = multiplicação entre o peso (A_p) e o índice (A_i) relativo as categorias de material do aquífero.

$S_p \times S_i$ = multiplicação entre o peso (S_p) e o índice (S_i) relativo as categorias de material do solo.

$T_p \times T_i$ = multiplicação entre o peso (T_p) e o índice (T_i) relativo aos valores de declividade apresentado no terreno.

$I_p \times I_i$ = multiplicação entre o peso (I_p) e o índice (I_i) relativo as categorias de material da zona não-saturada.

$C_p \times C_i$ = multiplicação entre o peso (C_p) e o índice (C_i) relativo aos valores de condutividade hidráulica.

A variação de vulnerabilidade ocorre entre os intervalos, mínimo de 23 e máximo de 226. A Tabela 1 mostra os intervalos relacionados a cada nível respectivo ao índice de vulnerabilidade.

Tabela 1: Níveis de vulnerabilidade.

INTERVALOS DE VALORES DO ÍNDICE DRASTIC	NÍVEL DE VULNERABILIDADE
<100	Vulnerabilidade insignificante
101 – 119	Vulnerabilidade muito baixa
120 -139	Vulnerabilidade baixa
140 – 159	Vulnerabilidade moderada
160 – 179	Vulnerabilidade alta
180 – 199	Vulnerabilidade muito alta
>200	Vulnerabilidade extrema

Fonte: Aller et al. (1987).

A vulnerabilidade DRASTIC é demonstrada em forma de mapa, que possibilita a classificação de áreas com maior ou menor potencial de vulnerabilidade, ou seja, propensas, ou não, à contaminação das águas subterrâneas.

A seguir serão descritos os parâmetros necessários para obtenção do índice de vulnerabilidade DRASTIC.

5.1.1 D – Profundidade do topo do aquífero

A profundidade do topo do aquífero representa a distância entre o nível do aquífero até a superfície do solo, ou seja, a profundidade que um poluente precisa percorrer para atingir a água subterrânea. A profundidade está diretamente interligada com a velocidade que a água pode entrar em contato com o contaminante, pois quanto mais profundo for o aquífero menor serão as chances do mesmo ser contaminado (DUARTE *et al.*, 2014). A Tabela 02 apresenta os índices adotados de acordo com a faixa do nível de profundidade.

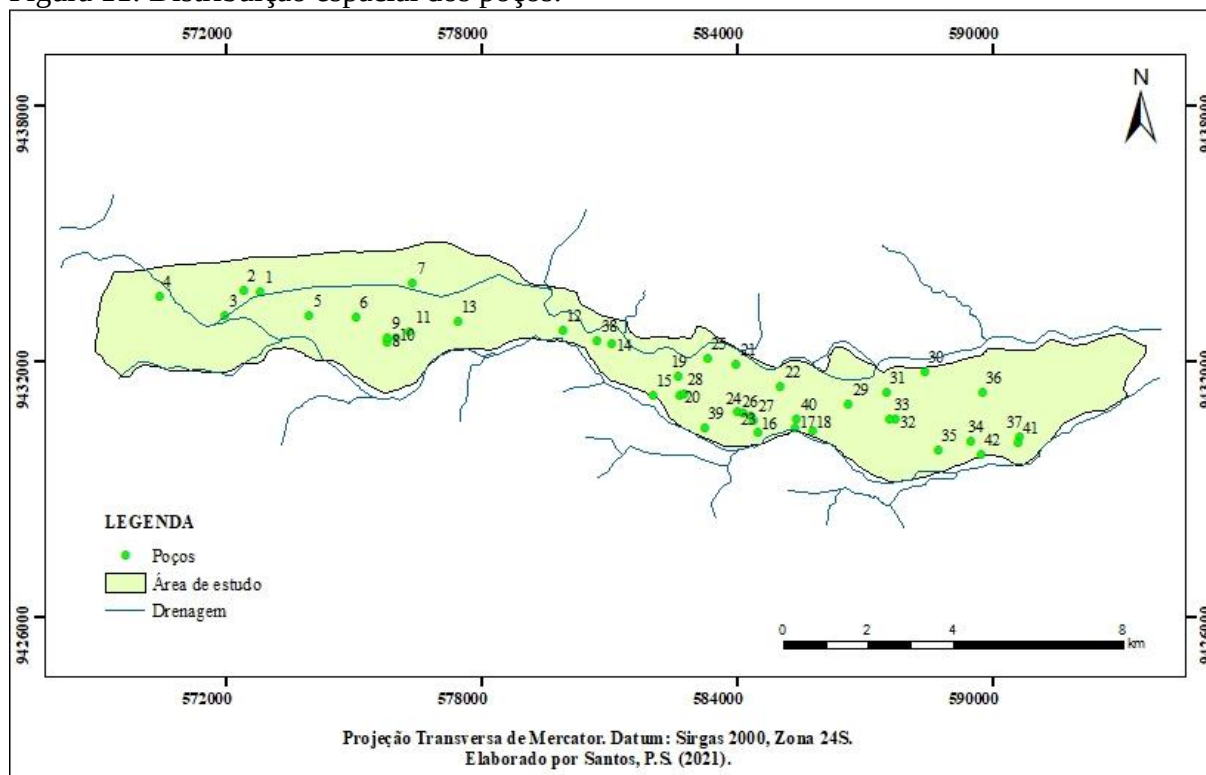
Tabela 2: Valores dos índices associados a parâmetro D.

PROFUNDIDADE DO TOPO DE AQUÍFERO(m)	PESO (p)	ÍNDICE
0 – 1,5	5	10
1,5 – 4,6	5	9
4,6 – 9,1	5	7
9,1 – 15,2	5	5
15,2 – 22,9	5	3
29,9 – 30,5	5	2
>30,5	5	1

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

No presente estudo, os níveis estáticos do aquífero livre do trecho do PIMN foram obtidos a partir da utilização dos dados de 42 poços monitorados pela COGERH. A Figura 11 mostra a distribuição espacial dos poços de monitoramento.

Figura 11: Distribuição espacial dos poços.



Fonte: autor (2021).

Os dados de profundidade foram solicitados à COGERH, correspondente aos anos de 2017 a 2020. A periodização das coletas realizadas pelo órgão é de forma mensal, tanto no período chuvoso como no período de estiagem. De acordo com a análise dos dados foram divididos o período chuvoso entre os meses de janeiro a junho e de estiagem entre os meses de julho a dezembro. Após a organização, dos dois períodos foi realizado a média anual e depois a média geral de cada poço referente a cada período.

Inicialmente, para a elaboração dos mapas de profundidade, foi realizado a interpolação dos dados de profundidade do topo do aquífero utilizado o método de krigagem. Após a interpolação a imagem matricial gerada foi transformada em *Shapefile*, para posterior classificação de acordo com os intervalos indicados no índice DRASTIC. Com as áreas do mapa divididas de acordo com as classes de profundidades indicadas no método, o passo seguinte foi reclassificar as classes de profundidades de acordo com os respectivos índices estabelecidos para cada intervalo de profundidade.

5.1.2 R – Recarga do aquífero

A recarga é um parâmetro que indica a disponibilidade de água que pode atuar como dispersante, diluidora e meio de transporte de poluentes verticalmente para o aquífero e horizontalmente quando atinge a zona saturada. A ideia geral do parâmetro recarga é a relação em que, quanto maior a recarga maior o potencial de poluição de água subterrânea. Sendo importante destacar um ponto relevante de que quanto maior a recarga, a diluição de contaminantes presentes na água também será maior. Na Tabela 3, pode ser observado os índices utilizados de acordo com os intervalos de recarga do aquífero (Aller *et al.*, 1987).

Tabela 3: Parâmetro recarga do aquífero.

RECARGA DO AQUÍFERO (mm/ano)	PESO (p)	ÍNDICE
<51	4	1
51 – 102	4	3
102 – 178	4	6
178 – 254	4	8
>254	4	9

Fonte: Aller et al. (1987).

A estimativa de recarga anual foi calculada pelo método da variação do nível potenciométrico. O método é baseado no pressuposto de que a elevação do nível do aquífero é decorrente da entrada da recarga no aquífero (VASCONCELOS, 1999). Para calcular a recarga foi utilizada a seguinte equação:

$$R = A \times \Delta h \times S_y \quad (2)$$

Sendo, A a área do trecho estudado (m^2), Δh a variação do nível estático (m) e S_y a porosidade efetiva.

A variação do nível da água foi realizada a partir da diferença do período seco e do período chuvoso, e obtido uma média da variação de nível da água. Os dados utilizados foram referentes aos anos de 2017 a 2020.

Com o valor da recarga anual foi calculada a taxa de infiltração a partir da equação 3, proposta por Silva (2008) *Apud* Guerra (2010).

$$R_i = \left(\frac{R}{P \times A} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde, R_i é a taxa de recarga infiltrada (%); R a recarga anual (m^3/ano), P a precipitação anual (m/ano) e A refere-se área do trecho analisado (m^2).

5.1.3 A – Material do aquífero

O material do aquífero é um dos responsáveis pelo abrandamento dos efeitos dos poluentes na zona saturada. A dispersão e o transporte de poluentes podem ser controlados a partir de alguns fatores, como dimensão de partículas, porosidade, teor de argila e espessura da zona saturada. Juntamente com a condutividade hidráulica o meio geológico é responsável pelo escoamento da água subterrânea no interior do aquífero.

Aller *et al* (1987), listaram os materiais que podem constituir um aquífero de acordo com o potencial de atenuação de poluentes (Tabela 04). Para cada material existe os intervalos dos índices e o índice usual aplicado. Em casos de não possuir informações mais específicas em relação ao material que constitui o aquífero, utiliza-se o valor de índice usual específico para cada material.

Tabela 4: Parâmetro material do aquíferos.

MATERIAL DO AQUIFERO	PESO (P)	ÍNDICE
Xisto argiloso; argilito	3	1-3 (2)
Rochas metamórfica e ígnea	3	2-5 (3)
Rochas metamórfica e ígnea alteradas	3	3-5 (4)
Arenito, calcário e argilito estratificado	3	5-9 (6)
Arenito maciço	3	4-9 (6)
Calcário maciço	3	4-9 (6)
Areia e cascalho	3	4-9 (8)
Basalto	3	2-10 (9)
Calcário calcificado	3	9-10 (10)

Fonte: Aller et al. (1987).

Para elaborar o mapa do material do aquífero foram considerados as informações de acordo com MOURA (2013), onde o mesmo cita que o material geológico de aluvião do rio

Banabuiú no trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte é composto por classes de cascalho, areia cascalhosa e areia.

5.1.4 S – Material do Solo

O material do solo apresenta ligação direta com infiltração de água no solo, consequentemente afetando a entrada de poluentes. É analisada a camada mais superficial do terreno, apresentando uma espessura de aproximadamente 2 metros. O solo possui propriedades que podem condicionar o potencial de poluição, como a textura do solo, o teor de matéria orgânica e a espessura. Com isso, foram avaliados 11 materiais que podem constituir os tipos de solos, os quais apresentam índices variando de 1 a 10 (ALLER *et al.*, 1987). A Tabela 5 apresenta os pesos e os índices referentes a esse parâmetro.

Tabela 5: Parâmetro dos tipos de solos.

MATERIAL DO SOLO	PESO (p)	ÍNDICE
Fino ou ausente	2	10
Cascalho	2	10
Areia	2	9
Turfa	2	8
Argila agregada ou expansível	2	7
Franco arenoso	2	6
Franco	2	5
Franco siltoso	2	4
“Muck”	2	2
Argila não agregado e não expansível	2	1

Fonte: Aller et al. (1987).

As informações para elaboração do mapa de solo da área de estudo foram extraídas do mapa de solo do Brasil da base de dados do IBGE (2019), sendo compilado as informações de solo dos municípios de Morada Nova e Limoeiro do Norte. Sendo observado que a área de estudo apresenta solos rasos do tipo Neossolo flúvico e Neossolo Litólico, com predominância de Neossolo flúvico.

Os neossolos de origem fluvial apresentam em sua maioria classes texturais distintas que dependem do material aluvionar depositado. Enquanto os neossolos litólicos podem apresentar textura, siltosa, arenosa, média ou argilosa (EMBRAPA, 2005).

Assim, levando-se em consideração a composição aluvionar na área de estudo, a textura de solo determinada para a área foi de franco arenosa, uma composição que apresenta predominância de areia, mas também apresenta porções de silte e argila.

Para elaboração do mapa de solo levando em consideração a textura do solo, o índice atribuído foi 6 de acordo com Aller et al., (1987).

5.1.5 T – Topografia

A topografia influencia no tempo em que o poluente vai ficar em contato com o solo. Pouca declividade indica maior possibilidade de infiltração e ocorre lixiviação para o aquífero, enquanto uma maior inclinação indica um maior volume de escoamento superficial. Aller et al. (1987) apresentaram faixas de declividades que podem influenciar na contaminação dos aquíferos e seus respectivos índices de avaliação, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetro topografia.

TOPOGRAFIA (%)	PESO (p)	ÍNDICE
<2	1	10
2 – 6	1	9
6 – 12	1	5
12 – 18	1	3
>18	1	1

Fonte: Aller et al., 1987.

A elaboração do mapa de declividade da área de estudo foi realizada a partir de imagens TOPODATA, do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, identificadas as imagens que estavam inseridos os municípios de Morada Nova e Limoeiro do Norte.

Com o modelo digital de elevação da área do PIMN foram geradas as curvas de níveis da área de estudo, para isso foi utilizado a ferramenta do Arcmap *Slope (Spatial Analyst)*, sendo possível observar os intervalos de declividade da área em %. Com os valores de declividade, os mesmos foram readequados de acordo com os intervalos apresentados na Tabela 6.

5.1.6 I – Influência da zona vadosa (camada não saturada)

Para Aller et al. (1987) a zona vadosa está inserida entre o nível freático e o solo, sendo um ambiente também responsável pela atenuação de poluentes, ela inclui o horizonte de transição do solo e a rocha acima do nível freático. Quando o estudo é realizado em aquíferos livres, costuma-se admitir que a zona não saturada possui a mesma estrutura litológica do material do aquífero, ou seja a zona saturada tem contato direto com a zona não saturada, e toda água que passa pelo solo chega diretamente ao aquífero (FRANCISCO, 2013).

O material que constitui essa zona pode minimizar o potencial de poluição através de alguns processos como biodegradação, filtração mecânica, reações químicas, volatilização e dispersão. A Tabela 7 apresenta de acordo com Aller et al. (1987), os tipos de materiais que podem formar a zona vadosa e que apresentam relevância no processo de atenuação da capacidade de contaminação dos poluentes. A avaliação quanto a escolha do índice usual para o material da zona vadosa se baseia nos mesmos critérios utilizados no parâmetro material do aquífero.

Tabela 7: Parâmetro materiais da zona vadosa.

INFLUÊNCIA DA ZONA VADOSA	PESO (p)	ÍNDICE
Camada confinante	5	1
Argila/silte	5	2-6 (3)
Xisto	5	2-5 (3)
Calcário	5	4-8 (6)
Arenito	5	4-8 (6)
Arenito, calcário e argilito estratificado	5	4-8 (6)
Areia e pedregulhos siltosos e argilosos	5	4-8 (6)
Rochas metamórficas e ígneas	5	2-8 (4)
Areia e cascalho	5	6-9 (8)
Basalto	5	2-10 (9)
Calcário calcificado	5	8-10 (10)

Fonte: Aller et al., 1987.

5.1.7 C – Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica está relacionada com a capacidade do aquífero de conduzir água sob a influência de um gradiente de hidráulico. Em relação a movimentação de poluentes que chegaram à zona saturada, a taxa de transporte de poluentes é maior quando a condutividade hidráulica do aquífero apresenta valores elevados (AL-RAWABDEH et al. 2013). De acordo com a Tabela 8, Aller et al. (1987) dividiram a condutividade hidráulica em 6 intervalos numerados com índices variando de 1 a 10.

Tabela 8: Intervalos de condutividade hidráulica e seus índices de avaliação.

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO AQUÍFERO (m/d)	PESO (p)	ÍNDICE
<4,1	3	1
4,1 – 12,2	3	2
12,2 – 28,5	3	4
28,5 – 40,7	3	6
40,7 – 81,5	3	8
>81,5	3	10

Fonte: Aller et al., 1987.

O valor utilizado para construção do mapa de condutividade hidráulica foi consultado na literatura, pois não foi possível realizar testes no local para calcular a condutividade hidráulica do aquífero. Desta forma, foi utilizado o valor médio de 19,35 m/d de condutividade, de acordo com Maia (2009), verificado em sua pesquisa sobre a caracterização hidrogeológica do aluvião do rio Banabuiú.

5.2 Análise de sensibilidade

Alguns autores acreditam que a vulnerabilidade baseada no modelo DRASTIC pode ser realizada sem o uso de todos os seus parâmetros (NEH et al., 2015; BARTZAS et al., 2015; MFONKA et al., 2018). Para alguns autores a falta de evidências experimentais podem acarretar dúvidas diante dos resultados apresentado pelo modelo (ATIQUR, 2008; MFONKA et al., 2018).

A fim de esclarecer as dúvidas como essas, nessa pesquisa foram realizadas duas análises de sensibilidade do modelo. Sendo, à análise de sensibilidade de remoção de mapa (LODWICK, MONSON, W; SVOBODA, L, 1990) e a análise de sensibilidade do parâmetro único (NAPOLITANO E FABBRI, 1996).

A sensibilidade de remoção de mapa, expressa o grau de importância a partir da remoção de uma ou mais camadas utilizadas para a elaboração do mapa de vulnerabilidade. Essa sensibilidade é calculada usando a seguinte equação (5):

$$S = \left[\frac{\frac{V - V'}{N - n}}{V} \right] * 100 \quad (5)$$

Em que:

S: medida de sensibilidade;

V: índice de vulnerabilidade real, obtido usando todos os sete parâmetros;

V': índice de vulnerabilidade calculado com base em um número menor de parâmetros;

N e n: número de camadas de dados utilizados para calcular V e V'.

A análise de sensibilidade de parâmetro único, indica a influência de cada um dos sete parâmetros diante da medida de vulnerabilidade. Para essa análise é realizada uma comparação entre o peso real ou efetivo de cada parâmetro com o peso atribuído ou teórico. O peso efetivo de um parâmetro é calculado a partir da seguinte equação (6):

$$W = \left(Pr * \frac{Pw}{V} \right) * 100 \quad (6)$$

Em que:

W: peso efetivo de cada parâmetro;

Pr: índice atribuído a cada parâmetro de acordo com o modelo DRASTIC;

Pw: peso atribuído a cada parâmetro de acordo com o modelo DRASTIC;

V: índice de vulnerabilidade geral.

5.3 DRASTIC modificado

O DRASTIC modificado representa um reajuste dos índices e os pesos dos parâmetros que compõem o DRASTIC original. O parâmetro inserido no modelo DRASTIC foi baseado em artigos que utilizaram a variação do método em suas pesquisas. A variação inclui, além dos sete parâmetros já mencionados na metodologia DRASTIC, mais o fator de uso de ocupação do solo.

O uso do solo expressa a vulnerabilidade específica do local, pois permite identificar fontes de poluição antrópicas potencialmente poluidoras que podem ou não atingir as águas subterrâneas (LINHARES et al., 2014). O novo parâmetro é dividido em 11 classes significativas que condicionam o risco de contaminação do aquífero. Para cada classe é atribuído índices que variam na escala de 1 a 10, onde as atividades que representam maiores riscos para as águas subterrâneas recebem valores de índices mais elevados (Antonakos; Lambrakis, 2007 e Pacheco et al., 2018).

Assim como no método DRASTIC original, o parâmetro uso e ocupação do solo recebe uma ponderação, atribuída em função do risco aplicado pelas ações antrópicas. Neste trabalho, adotou-se para o parâmetro o peso 4 de acordo com ANTONAKOS; LAMBRAKIS, 2007. O risco de contaminação foi obtido mediante o somatório do produto entre os pesos atribuídos aos parâmetros e os índices considerados a cada parâmetro (equação 4).

DRASTIC modificado =

$$\mathbf{Dp \times Di + Rp \times Ri + Ap \times Ai + Sp \times Si + Tp \times Ti + Ip \times Ii + Cp \times Ci + Lp \times Li} \quad (4)$$

Onde:

$Lp \times Li$ = multiplicação entre o peso (Lp) e o índice (Li) relativo as classes do parâmetro uso e ocupação do solo.

Os sete primeiros parâmetros da equação (3) são os mesmos já citados na equação (1). Para a aplicação do novo parâmetro junto ao DRASTIC foram realizados os passos descritos a seguir.

5.3.1 L - Parâmetro Uso e ocupação do solo

O parâmetro uso e ocupação do solo está relacionado às atividades que ocorrem na superfície do terreno e que possuem um potencial poluidor. Exemplo dessas atividades são as áreas agrícolas, que se utilizam de nutrientes e que podem infiltrar no solo em concentrações mais elevadas do que em áreas não agricultáveis. Para essa pesquisa foram utilizadas classes de uso e ocupação do solo (Tabela 9) de acordo com os autores ANTONAKOS; LAMBRAKIS, 2007 e Pacheco et al. (2018).

Tabela 9: Usos e ocupações do solo e seus índices.

USO OU OCUPAÇÃO DO SOLO	PESO (P)	ÍNDICE
Florestas de madeira dura	4	1
Áreas de floresta degradadas	4	4
Vegetação esparsa e áreas florestais degradadas	4	4
Sistemas agroflorestais	4	5
Culturas anuais e permanentes associadas	4	5
Pastagens	4	5
Olivais	4	6
Sistemas culturais e parciais complexos	4	9
Áreas agrícolas	4	9
Áreas residenciais	4	8
Solo com pouca vegetação	4	7

Fonte: Adaptado de Antonakos; Lambrakis, 2007 e Pacheco et al., 2018.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir do *Google Earth*, utilizando a imagem da área de estudo do ano atual (2021). Depois de uma visita na área de estudo, foram construídos polígonos de acordo com as áreas e atividades existentes no local. Após identificar todas as classes de Uso, gerou-se um arquivo KMZ para o mesmo ser aberto no *ArcMap*. No programa *ArcMap*, as classes foram transformadas em *Shapefile* e, em seguida, foram reclassificadas de acordo com os índices indicados para cada classe.

5.4 Levantamento dos dados e geoprocessamento

Para a realização deste trabalho, foram utilizados dados obtidos a partir de alguns trabalhos encontrados na literatura sobre a área de estudo e bancos de dados dos seguintes órgãos:

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) dos anos de 2001 e 2017;
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2020);
- Portal de metadados da Agência Nacional de Águas (ANA);
- Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH).

Para elaboração dos mapas foi utilizado o programa de geoprocessamento *ArcGis* 10.6. Onde foi possível realizar toda manipulação dos dados por meios de extensões.

Inicialmente, foram elaborados os arquivos *Shapefile* para todos os parâmetros aplicáveis no método. Após a criação dos mapas foi utilizado a ferramenta *Reclassify* para relacionar os índices de cada parâmetro de acordo com os dados estabelecidos no mapa. No momento de reclassificar os mapas é gerado um arquivo *raster*, o qual foi utilizado posteriormente para sobreposição das camadas e elaboração do mapa de vulnerabilidade.

Para criação do mapa de vulnerabilidade intrínseca foram sobrepostas 7 imagens, referentes aos 7 parâmetros iniciais do método. Para resolução da equação DRASTIC foi utilizada a função *Weighted sum*, onde se insere o *raster* de cada parâmetro e indica o fator de multiplicação (peso) referente a cada parâmetro, desta forma o fator de ponderação será multiplicado pelos índices estabelecidos nos *raster*.

No mapa de risco de contaminação foram realizados os mesmos passos, sendo adicionado mais um parâmetro na função e atribuído seu peso.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes à pesquisa. Inicialmente com os mapas relativos aos parâmetros DRASTIC, depois os mapas de vulnerabilidade intrínseca nos períodos chuvoso e de estiagem. Após a elaboração dos mapas de vulnerabilidade foram realizadas duas análises de sensibilidade. Por último, o mapa de risco de contaminação, baseado na modificação do *modelo* DRASTIC, a partir da inclusão do parâmetro *uso do solo*.

6.1 Mapas dos parâmetros DRASTIC

Para análise dos dados dos níveis estáticos dos poços do Perímetro Irrigado optou-se por dividir em dois períodos: chuvoso e estiagem (seco). Em que, o chuvoso corresponde aos meses de janeiro a junho. Os dados para esses meses foram organizados e agrupados para se obter a média das profundidades dos poços monitorados, referente ao período chuvoso. O período de estiagem que englobou os meses julho e dezembro. Os dados referentes a esses meses foram organizados e calculado a média do nível estático para o período de estiagem.

A Tabela 10 mostra as informações fornecidas pela COGERH sobre os poços de monitoramento, como: identificação, proprietário dos poços, localização e médias dos níveis estáticos entre os períodos chuvoso e o de estiagem.

Tabela 10: Informações dos poços monitorado no PIMN de 2016 a 2020.

Poço	Proprietário	Localização UTM		Médias dos níveis estáticos (m)	
		Latitude (m)	Longitude (m)	Período chuvoso	Período de estiagem
1	Raimundo José Bezerra (Nenê)	9433648	572793	7,84	8,35
2	José Celestino (Zé pequeno)	9433671	572389	6,93	6,65
3	Raimundo Osterne Bezerra	9.433076	571962	7,91	7,79
4	José Ricardo Cavalcante	9.433540	570411	6,01	6,87
5	José Moacir de Lima	9433066	573940	7,15	7,45
6	Francisco Welligton	9433061	575032	5,63	6,03
7	Artur Raulino Filho	9433840	576378	7,10	7,82
8	Francisco Luciano B. Cavalcante	9432470	575767	10,76	11,35
9	João Carlos de Lima	9432565	575767	10,71	11,57
10	Antônio Lins da Silva	9432565	575965	11,13	11,62
11	Manoel Simião Neto	9432705	576304	11,48	11,52
12	José Lúcio da Silva	9432751	579900	5,60	7,83
13	João Oliveira da Silva (Loão Grilo)	9432940	577434	10,36	10,95
14	Maria de Fátima Girão Gomes	9432413	581055	10,11	11,03
15	José Pinheiro da Silva	9431209	582009	9,90	10,62

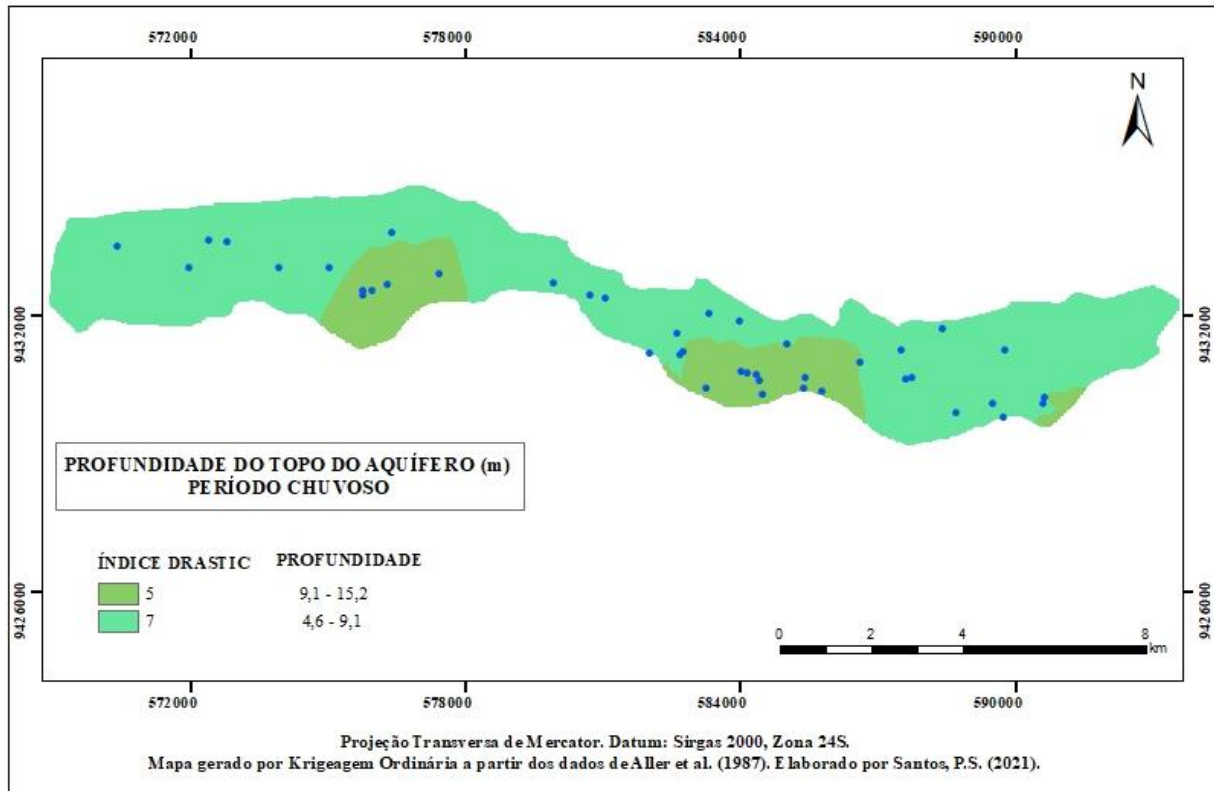
16	Otávio Rosa dos Santos	9430323	584477	8,76	8,84
17	Francisco Castro Freitas	9430446	585368	11,50	11,57
18	Raimundo Hélio Fernandes Moura	9430367	585768	10,53	10,92
19	Celso de Souza Moura	9431655	582614	7,71	7,81
20	Maria José da Silva Gomes	9431189	582665	5,83	6,06
21	Josimiro da Silva	9431920	583984	7,09	7,00
22	Disliane Bezerra Lima	9431427	585020	6,92	6,83
23	Erivan Moura Fernandes	9430819	584000	10,43	10,75
24	Elcir Rodrigues de Lima	9430780	584127	10,38	10,53
25	Geralda Bezerra Lima (Neudo)	9432072	583305	10,27	10,97
26	Raimundo Sérgio Cavalcante	9430737	584330	7,66	10,04
27	Raimundo Nonato de Castro (Monó)	9430624	584402	9,92	10,40
28	Francisco Heliton da Silva	9431256	582752	10,37	10,45
29	Luíz Coelho do Nascimento	9431011	586617	9,36	9,70
30	Lazaro Castro Alves	9431751	588397	9,14	9,76
31	Lazaro Castro Alves (poço Pequeno)	9431265	587507	10,61	11,11
32	José Oristácio Bezerra	9430665	587736	6,63	6,49
33	Dedé do Otávio Ferreira	9430652	587592	6,37	6,24
34	Francisco A... (Novo Poço)	9430119	589506	10,25	10,77
35	Francisco Belmiro de Araújo	9429915	588715	7,64	7,73
36	Raimundo José Araújo Costa	9431266	589757	6,22	7,77
37	Francisco Ivan da Silva	9430248	590650	8,37	8,67
38	Manoel Messias Plácido de Sales	9432476	580707	5,24	7,68
39	Vicente Anástacio Filho	9430431	583239	10,79	10,16
40	Francisco das Chagas Chaves	9430665	585399	9,56	11,23
41	Raimundo Vieira Almeida (Rdo Siri)	9430104	590609	10,47	11,79
42	Acácio Rabelo	9429827	589733	9,60	9,26

Fonte: autora (2021).

6.1.1 Profundidade do topo do aquífero (D)

Para os dados referentes ao período chuvoso, foram analisados 42 poços, onde observou-se uma variação entre 5,24 a 11,50 m (Figura 12). A partir desses dados foram gerados dois intervalos de profundidade do topo do aquífero para a área de estudo de acordo com o índice DRASTIC. As classes de intervalos gerados foram 4,6 – 9,1 m e 9,1 – 15,2 m (Tabela 11).

Figura 12: Mapa de profundidade do topo do aquífero do Perímetro Irrigado de Morada Nova no período chuvoso.



Fonte: autora (2021).

Tabela 11: Profundidade do topo do aquífero do PIMN com seus intervalos, pesos e áreas no período chuvoso (de janeiro a junho).

Intervalos da profundidade do topo do aquífero (m)	Dp*	Dp x Di(5)**	Área	
			(Km²)	(%)
4,6 – 9,1	7	35	41,23	76,88
9,1 – 15,2	5	25	12,40	23,12

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Dp – Pesos correspondentes as classes do parâmetro profundidade.

**Dp x Di – Valor da vulnerabilidade referente ao parâmetro profundidade no período chuvoso.

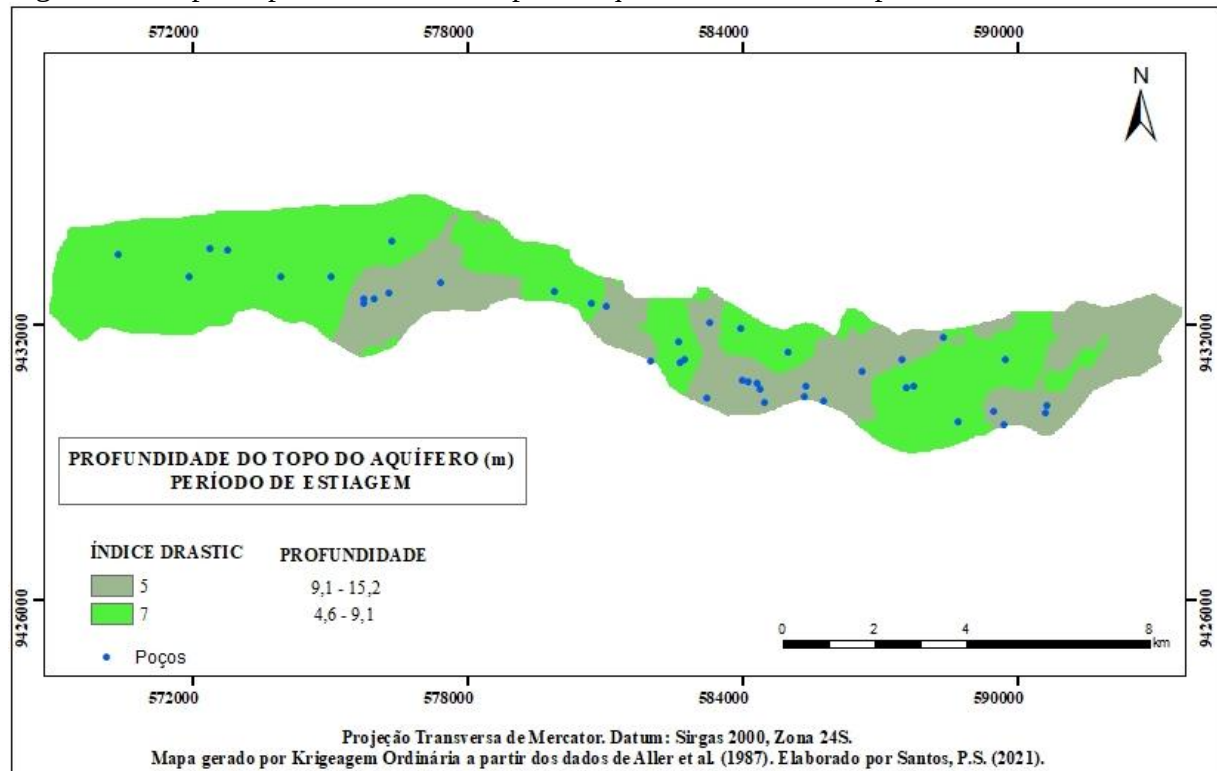
De acordo com a Figura 12 e a tabela 11, pode-se constatar que a área de 41,23 km² do PIMN está inserida no intervalo de profundidade do topo do aquífero entre 4,6 – 9,1 m, o que corresponde a 76,88% da área de estudo. Isso indica que nessas áreas existe uma maior vulnerabilidade à contaminação, devido a menor espessura da camada de proteção da água subterrânea.

Observa-se que 23,12% (ou 12,4 km²) da área estudada encontra-se no intervalo de profundidade do topo do aquífero entre 9,1 – 15,2 m, o que indica uma melhor proteção das

águas subterrâneas em relação à possível presença de contaminantes oriundos de atividades antrópicas, devido à profundidade ser superior a 9,1 m.

Em relação ao período de estiagem, a profundidade do topo do aquífero (D) nos 42 poços variou entre 6,03 a 11,79 m. Os dados foram divididos em dois intervalos de profundidade, ou seja: 4,6 – 9,1 m e 9,1 – 15,2 m (Figura 13). Os intervalos se mantiveram os mesmos encontrados no período chuvoso.

Figura 13: Mapa de profundidade do topo do aquífero do PIMN no período chuvoso.



Fonte: autora (2021).

De acordo com a Figura 13 e a Tabela 12, a área estudada apresenta 69,61% do aquífero com profundidade inferior a 9,1 m, correspondendo a 37,34 km², indicando que mesmo durante o período de estiagem as águas subterrâneas encontram-se suscetíveis a contaminação por fontes antrópicas.

Tabela 12: Profundidade do topo do aquífero do PIMN com seus intervalos, pesos e áreas no período de estiagem (de julho a dezembro).

Intervalos da profundidade do topo do aquífero (m)	Dp*	Dp x Di(5)**	Área	
			(Km ²)	(%)
4,6 – 9,1	7	35	37,34	69,61
9,1 – 15,2	5	25	16,30	30,39

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Dp – Pesos correspondentes as classes do parâmetro profundidade.

**Dp x Di – Valor da vulnerabilidade referente ao parâmetro profundidade no período de estiagem.

Verifica-se que houve um aumento nas áreas com profundidades superiores a 9,1 m, em comparação a período chuvoso, representando 30,39% da área. O aumento da profundidade do topo do aquífero justifica-se devido o bombeamento de água e da ausência de recarga do aquífero, por se tratar do período sem chuvas. A maior profundidade do nível estático no período de estiagem favorece, de certa forma, a proteção do aquífero, possibilitando retardar o contato de possíveis contaminantes lançados na superfície.

Magalhães (2021) realizou um estudo de caso do PIMN afim de verificar o comportamento da recuperação dos poços, no período de 2014 a 2019. De acordo com os dados apresentados pelo autor no decorrer dos anos houve, gradualmente um aumento do nível estático dos poços. Entre os anos de 2017 a 2019 as médias no período chuvoso apresentaram-se superior a 8 m e no período de estiagem superior a 9 m de profundidade. Os resultados são semelhantes aos demonstrados nesta pesquisa, ou seja, níveis estáticos mais distantes da superfície no período de estiagem, mas que ainda se encontram em faixas de profundidades que podem ser de fácil acesso para fontes contaminantes.

6.1.2 Parâmetro Recarga (R)

O parâmetro recarga é relativo à quantidade de água que atinge a zona saturada, isto é, a recarga condiciona o transporte dos contaminantes que, eventualmente, poderão atingir as águas do aquífero.

O mapa de recarga do aquífero foi construído a partir dos dados de chuvas dos de 2017 e 2020. Decorrente do período de dados utilizados corresponderem a um período de baixa precipitação e quase nenhuma chuva no período entre os meses de julho a dezembro (período de estiagem), optou-se pela construção do mapa de recarga referente a precipitação anual da área de estudo.

Para o cálculo da recarga foi utilizado o método de variação do nível potenciométrico, como citado na sessão 5.1.2. A Tabela 13 mostra os dados utilizados para o cálculo da recarga direta, aplicados na Equação 2.

Tabela 13: Dados utilizados para o cálculo da recarga direta do aquífero, no trecho estudado.

Área do aquífero no trecho estudado (km²)	Porosidade efetiva	Variação do nível estático (m)
53,64	0,178	0,51

Fonte: Autora, (2021).

A porosidade efetiva representa o volume de poros do solo no qual a água se movimenta livremente (SOBRINDO et al., 2018). A porosidade efetiva foi calculada a partir da equação (4) de Bieciniski (Pazdro, 1983, In: Alvarez e Niedzielski, 1996):

$$S_y = 0,117 \times \sqrt[3]{K} \quad (4)$$

A condutividade hidráulica (K) é expressa em m/dia, e o valor adotado nesta pesquisa foi de 19,35 m/dia determinado por Maia (2009). Com o valor dessa variável calculou-se a porosidade efetiva que resultou em 0,178 ou 17,8%.

A variação do nível estático foi calculada a partir da média dos períodos chuvoso e de estiagem, resultando em uma variação de 0,51 m, de acordo com a Tabela 13. A partir dessa variação foi possível calcular a recarga do aquífero aluvionar no trecho estudado, que resultou numa recarga anual de $4,97 \times 10^6$ m³/ano, de acordo com o método de variação do nível potenciométrico.

Finalmente, para calcular a taxa de recarga infiltrada foi utilizada a equação (3) e os dados utilizados encontram-se apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Dados utilizados para o cálculo da taxa de infiltração.

Recarga (m³/ano)	Precipitação (m/ano)	Área (m²)
$4,97 \times 10^6$	0,673	$53,64 \times 10^6$

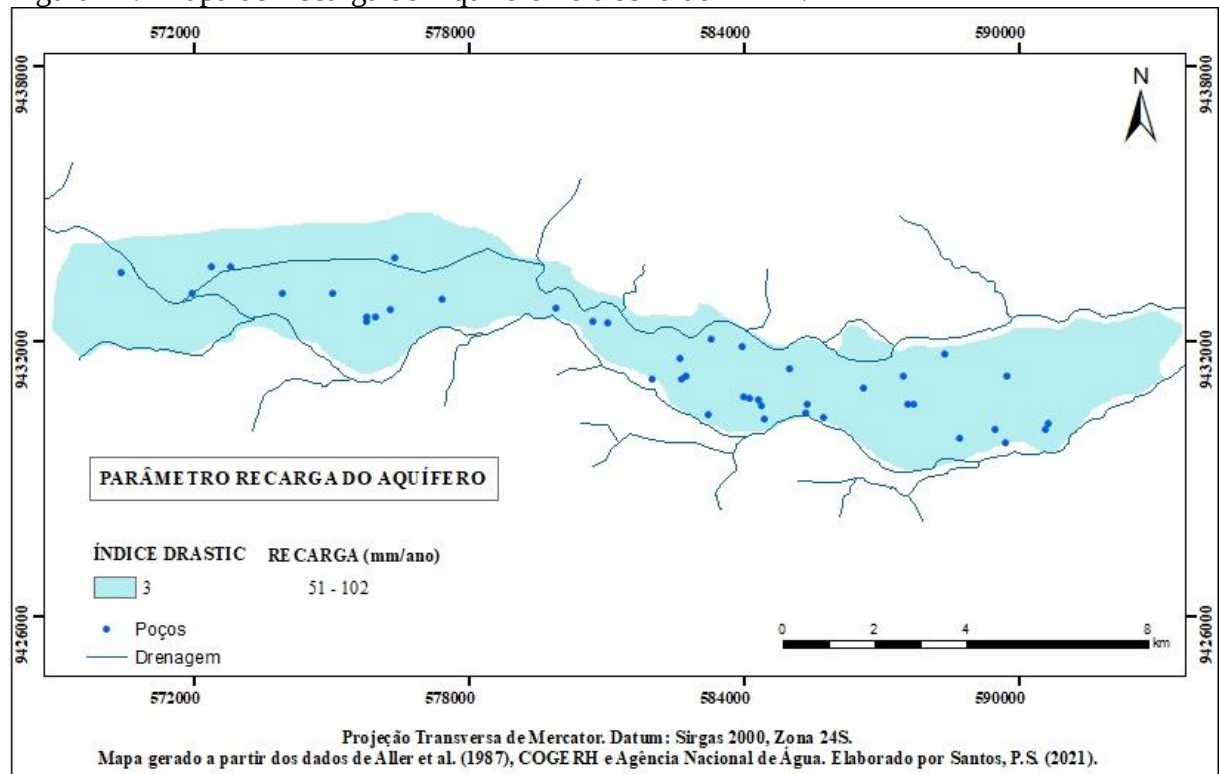
Fonte: Autora, (2021).

A precipitação anual foi calculada a partir da média da precipitação entre os anos de 2017 e 2020, que resultou no valor de 673 mm/ano.

O valor da taxa de infiltração para a área estudada foi de 13,8%, ou seja, indicando que a recarga do aquífero é 13,8% da precipitação média anual (P), que representa 92,87 mm/ano.

De acordo com método DRASTIC, a recarga do aquífero no trecho estudado está inserida no intervalo de 51 – 102 mm/ano. A Figura 14 e a Tabela 15 mostram, respectivamente, os dados referentes ao parâmetro recarga.

Figura 14: Mapa de Recarga do Aquífero no trecho do PIMN.



Fonte: autora (2021).

Tabela 15: Recarga do PIMN, intervalo, peso e área.

Recarga mm/ano	Rp*	Rp x Ri(4)**	Área	
			(Km²)	(%)
51 – 102	4	16	53,64	100

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Rp – Pesos correspondentes as classes do parâmetro Recarga.

**Rp x Ri – Valor da vulnerabilidade referente ao parâmetro Recarga.

A recarga do aquífero é um dos parâmetros do DRASTIC que condiciona o transporte do contaminantes que provavelmente, atingirão o aquífero. O volume de recarga é determinante para indicar o potencial de poluição do aquífero. O valor desse parâmetro para o

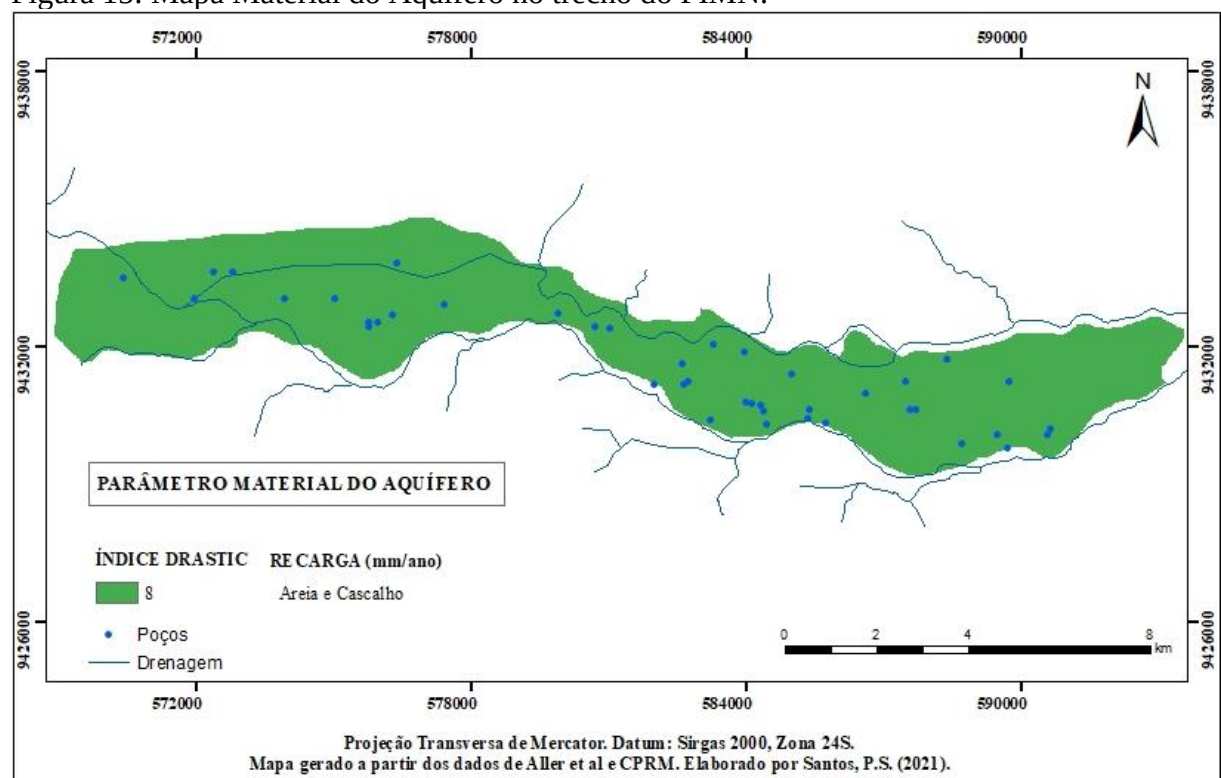
trecho estudado foi de 92,87 mm/ano, que enquadra no intervalo de 51 – 102 mm/ano de acordo com o modelo DRASTIC. Valores que inseridos nesse intervalo são considerados valores baixos, indicando baixa vulnerabilidade para a área estudada.

Guerra (2010) em seu trabalho sobre a vulnerabilidade da área do PIMN, encontrou um valor de recarga para a área de 70,27 mm/ano, valor que se enquadra no mesmo intervalo DRASTIC dessa pesquisa. No entanto, a recarga encontrada pelo autor foi inferior ao identificado nesta pesquisa, possivelmente decorrente das diferenças de valor em relação ao tamanho da área de estudo.

6.1.3 Parâmetro Material do Aquífero (A)

O material do aquífero caracteriza-se tanto para proteger as águas subterrâneas da presença de contaminante, como para favorecer a presença dos mesmos. Na área estudada, foi indicado uma classe de material do aquífero, como mostram a Figura 15 e na Tabela 16. O material do aquífero foi classificado de acordo com o trabalho de Moura (2008), em sua pesquisa realizada no PIMN.

Figura 15: Mapa Material do Aquífero no trecho do PIMN.



Fonte: autora (2021).

Tabela 16: Material do aquífero, índice, peso e área.

Material do aquífero	Ap*	Ap x Ai(3)**	Área	
			(Km ²)	(%)
Areia e Cascalho	8	16	53,64	100

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Ap – Pesos correspondentes as classes do parâmetro Recarga.

**Ap x Ai – Valor da vulnerabilidade referente ao parâmetro Recarga.

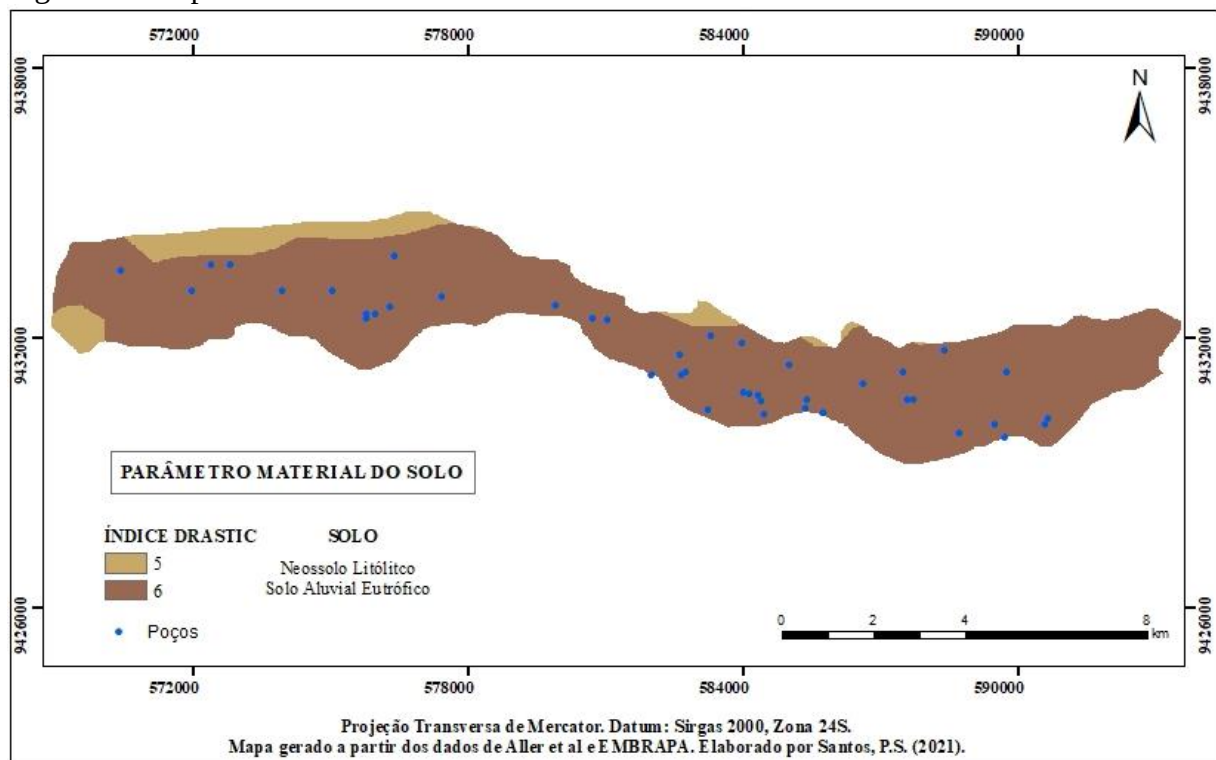
A área estudada está inserida na aluvião do rio Banabuiú, composta predominantemente por areia e cascalho. De acordo com o modelo DRASTIC o índice atribuído a esse material é 8, um valor elevado, indicando que o material do aquífero pode contribuir para elevar a vulnerabilidade do trecho estudado.

6.1.4 Parâmetro Material do Solo (S)

A vulnerabilidade das águas subterrâneas está estreitamente relacionada com os tipos de solos que estão presentes na área e o potencial de infiltração da água no solo.

Foram identificados dois tipos de solo na área estudada: Neossolo Litólico e Solo Aluvial Eutrófico, este último predomina na área da pesquisa, (Figura 16).

Figura 16: Mapa Material do Solo no trecho do PIMN.



Fonte: autora (2021).

Para o modelo DRASTIC, os índices que podem ser atribuídos para os tipos de solos dependem do tipo de material que compõe o respectivo solo. Desta forma, foi atribuído o índice 6 para o Neossolo Litólico, composição “franco arenosa”, decorrente das características desses tipos de solos que podem apresentar textura siltosa, arenosa, média ou argilosa (EMBRAPA, 2006). Para o solo Aluvial foi atribuído o índice 5, pois, a composição desses solos apresenta em sua maioria classes texturais distintas que dependem do material aluvionar depositado (EMBRAPA, 2006). Assim, foi considerado uma composição “franco”, de acordo com o método DRASTIC. A Tabela 17 mostra os tipos de solos com seus índices, o percentual de área onde os mesmos estão presentes e o peso relacionado ao parâmetro DRASTIC.

Tabela 17: Solos com seus índices, peso e áreas.

Solos	Dp*	Sp x Si(2)**	Área	
			(Km²)	(%)
Solo Fluvial Eutrófico	5	10	44,70	83,33
Neossolo Litólico	6	12	8,94	16,67

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Sp – Pesos correspondentes as classes do parâmetro material do solo.

**Sr x Si – Valor da vulnerabilidade referente ao parâmetro material do solo.

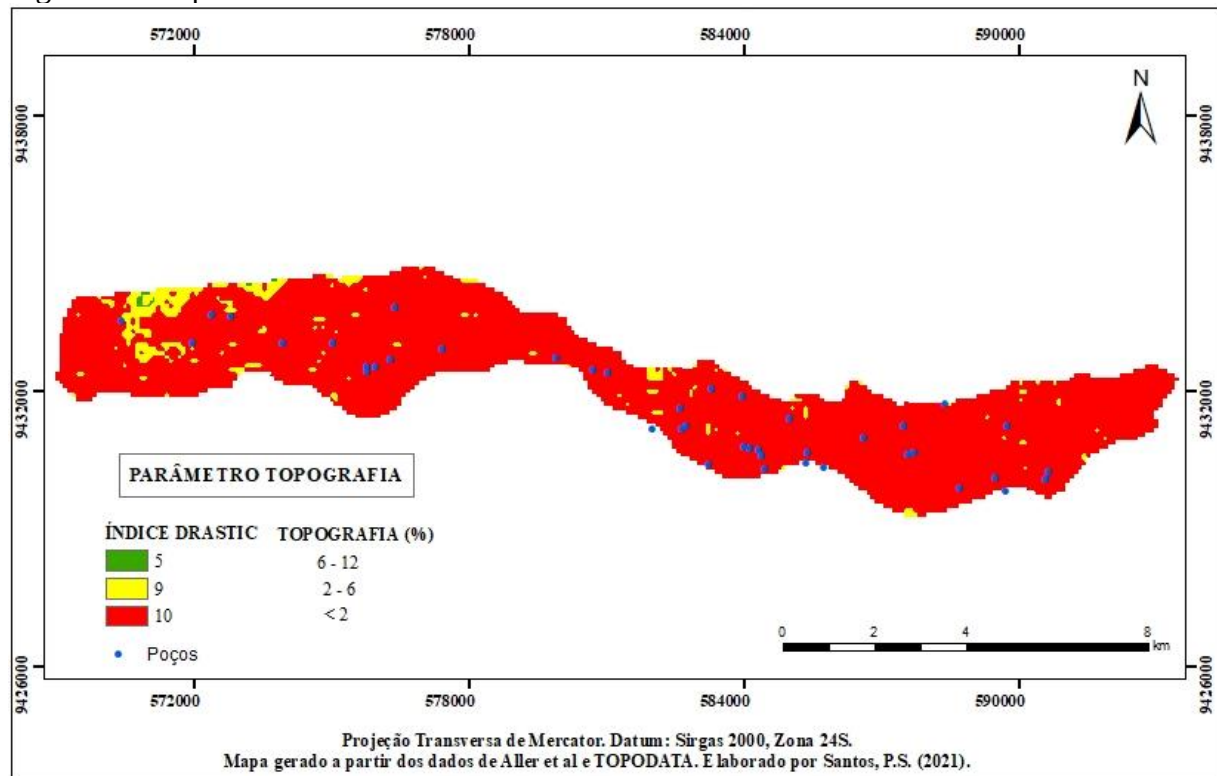
O Solo Aluvial Eutrófico está presente em praticamente todo o trecho estudado, com 83,33%. Pode-se observar que todos os poços de monitoramento estão inseridos na área que corresponde a esse tipo de solo. A vulnerabilidade apresentada por esse solo apresentou valor inferior à das pequenas áreas onde estão presentes o Neossolo Litólico.

O Neossolo Litólico está presente em uma pequena porção de área estudada, representando apenas 16,67%. São solos que podem apresentar alta vulnerabilidade, decorrente da baixa profundidade (solos rasos) e muitas vezes não apresentarem um horizonte subsuperficial bem consolidado (LIMA, 2007).

6.1.5 Parâmetro Topografia (T)

O quinto parâmetro do modelo DRASTIC é a topografia, que está representado no mapa da Figura 17 e na Tabela 18. Para o trecho estudado foram determinados 3 intervalos de declividade em porcentagem. Pode-se observar que a área é bastante plana, com maior parte da declividade inferior a 2%.

Figura 17: Mapa de declividade do trecho do PIMN.



Fonte: autora (2021).

Tabela 18: Declividade do PIMN com intervalos, pesos e áreas.

Intervalos de Declividade (%)	Tp*	Tp x Ti(1)**	Área	
			(Km²)	(%)
6 – 12	5	5	0,17	0,31
2 – 6	9	9	2,82	5,25
< 2	10	10	50,65	94,43

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Tp – Pesos correspondentes as classes do parâmetro topografia.

**Tp x Ti – Valor da vulnerabilidade referente ao parâmetro topografia.

Os dados apresentados na Tabela 18 indica que as áreas com declividade menores do que 2% representa 94,43% da área total, e no intervalo de 2 – 6% ocupa uma área de 5,25%. A partir das declividades observadas a área foi considerada, do ponto de vista geomorfológico, como de relevo plano, ou com pequenas ondulações. A vulnerabilidade nessas áreas em relação a águas subterrâneas é considerada elevada, devido ao escoamento superficial da água ser reduzido, permitindo que a água passe mais tempo em contato com o solo e possibilite a infiltração de contaminantes para a zona saturada.

A declividade no intervalo de 6 – 12% correspondeu somente a 0,31% da área. Em áreas como essa a vulnerabilidade é avaliada como baixa, tendo em vista que o aumento da declividade aumenta o escoamento superficial da água e diminui a capacidade de infiltração de contaminantes que possam está sendo carregados pela água.

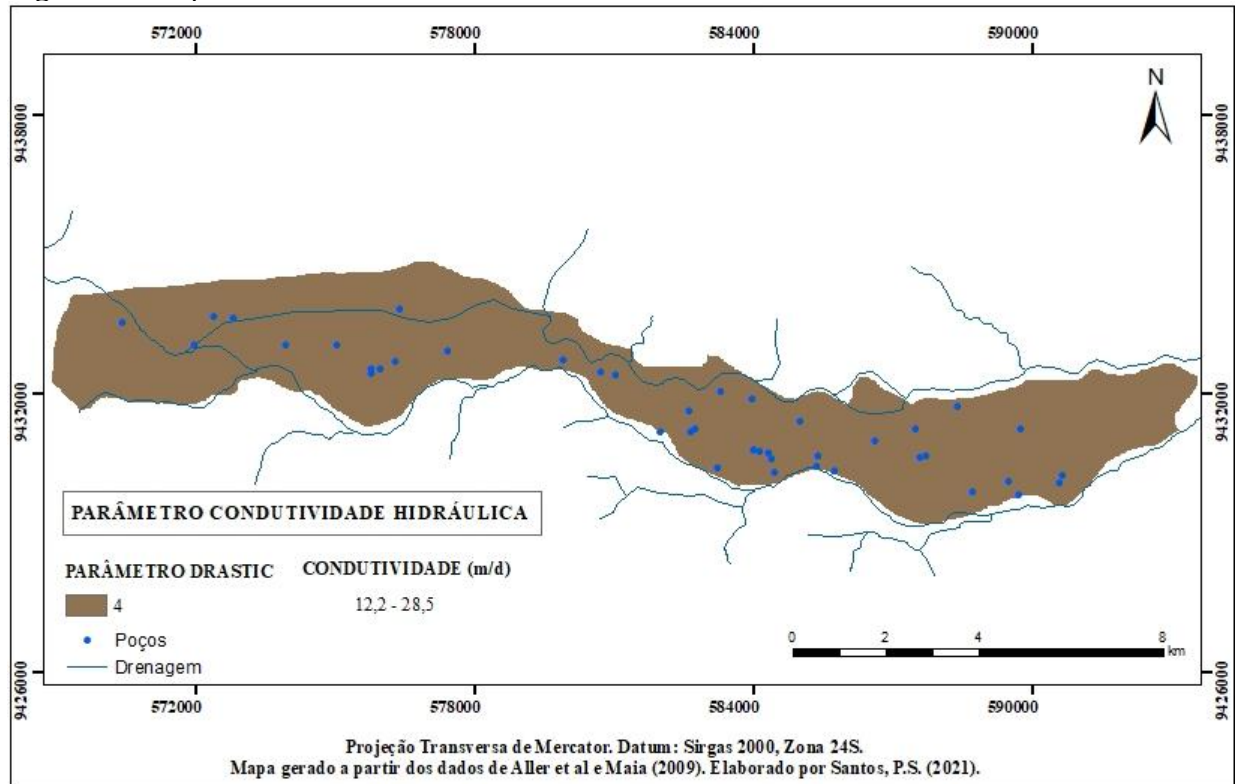
6.1.6 *Influência da zona de vadosa (I)*

O sexto parâmetro DRASTIC corresponde a influência da zona vadosa. Para esse fator foi considerado as mesmas condições adotadas para o parâmetro material do aquífero (A), pois, como o aquífero é livre, o mesmo não apresenta diferença entre a constituição geológica e hidrogeológica no trecho estudado. Sendo assim não será apresentado um novo mapa, já que, corresponde as mesmas informações apresentadas na seção 6.1.3.

6.1.7 *Condutividade hidráulica (C)*

O último parâmetro DRASTIC refere-se à condutividade hidráulica (C). Para a área estudada adotou-se para esse parâmetro o valor calculado por Maia (2009) em seu trabalho, que, estudou a caracterização hidrogeológica da aluvião do rio Banabuiú. O valor encontrado pelo autor foi de 19,35 m/d. Esse valor está inserido no intervalo de 12,2 a 28,5 m/d de acordo com o modelo DRASTIC. Os dados correspondentes são mostrados na Figura 18 e Tabela 19.

Figura 18: Mapa de condutividade hidráulica do trecho do PIMN.



Fonte: Autora, (2021).

Tabela 19: Condutividade hidráulica do PIMN com intervalos, pesos e áreas.

Condutividade Hidráulica (m/d)	Cp*	Cp x Ci(3)**	Área	
			(Km²)	(%)
19,35	4	12	53,64	100

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Cp – Pesos correspondentes as classes do parâmetro condutividade hidráulica.

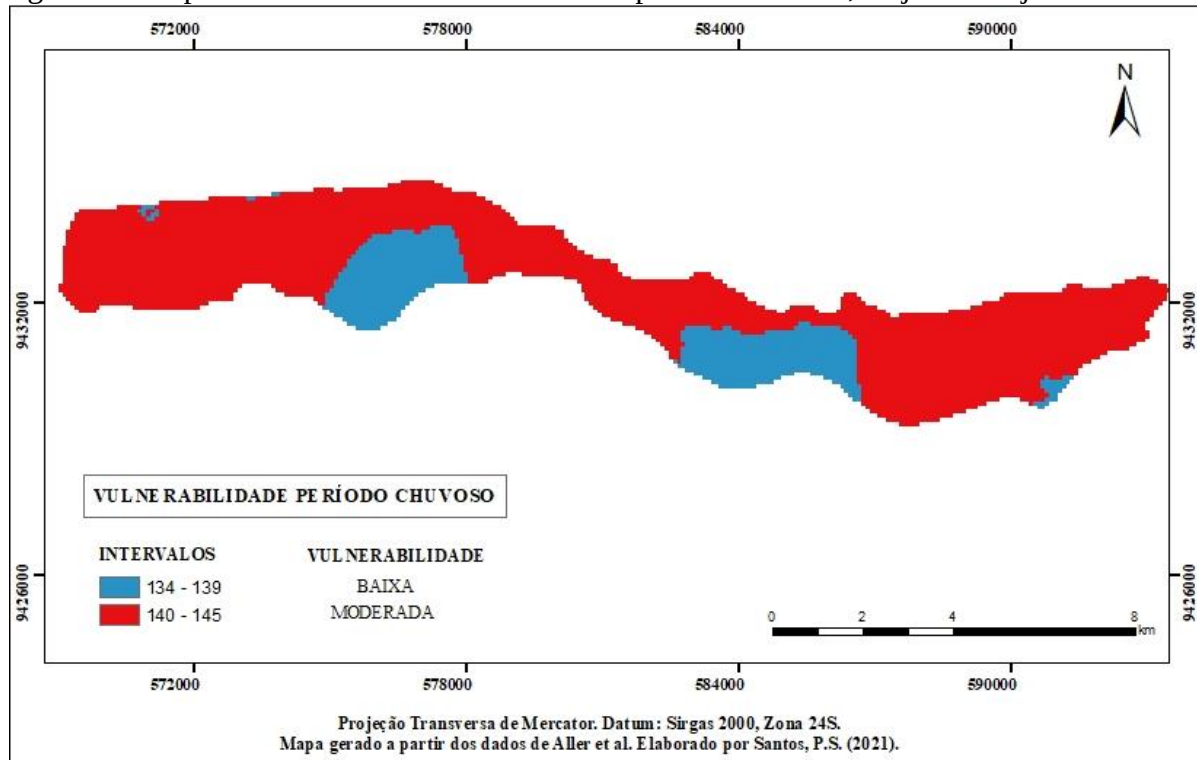
**Cp x Ci – Valor da vulnerabilidade referente ao parâmetro condutividade hidráulica.

O valor de condutividade hidráulica foi utilizado para 100% da área de estudo. As águas subterrâneas que possuem condutividade no intervalo de 12,2 – 28,5 estão inseridas em áreas que apresentam vulnerabilidade moderada, levando em consideração o valor mediano da condutividade hidráulica. Ressaltando-se a importância desse parâmetro, considerando a possibilidade de transporte de contaminantes, a partir da velocidade da água subterrânea pelos interstícios (poros) da matriz rochosa do aquífero.

6.1.8 Mapa de Vulnerabilidade intrínseca

A partir dos resultados obtidos pelos sete parâmetros do modelo DRASTIC, foi possível construir os mapas de vulnerabilidade intrínseca do aquífero livre do trecho do PIMN no período chuvoso (Figura 19) e no período de estiagem (Figura 20).

Figura 19: Mapa de vulnerabilidade do PIMN no período chuvoso, de janeiro a junho.



Fonte: autora (2021).

Os índices de vulnerabilidade intrínseca do aquífero livre do trecho do PIMN para o período chuvoso variaram entre 134 (valor mínimo) e 145 (valor máximo), mantendo-se dentro dos intervalos apresentados pelo DRASTIC, que varia entre 100 para vulnerabilidades insignificantes e 200 para vulnerabilidades extremas. Com os dados obtidos, foram definidas duas classes de vulnerabilidade: baixa e moderada. Pode-se observar na Figura 20 que, a vulnerabilidade moderada está representada em maior extensão na área de estudo. As águas subterrâneas presentes nessas áreas apresentam moderada vulnerabilidade devido as alturas do topo do aquífero apresentarem valores superiores a 5 metros. De acordo com o modelo DRASTIC vulnerabilidades mais elevadas estão presentes em profundidades do topo do aquífero inferiores a 4,6 metros.

Na Tabela 20, pode-se observar as porcentagens referentes a cada classe de vulnerabilidade. 19,47% da área estudada compreende as áreas com baixa vulnerabilidade, enquanto que 80,53% estão inseridas em áreas com vulnerabilidade moderada.

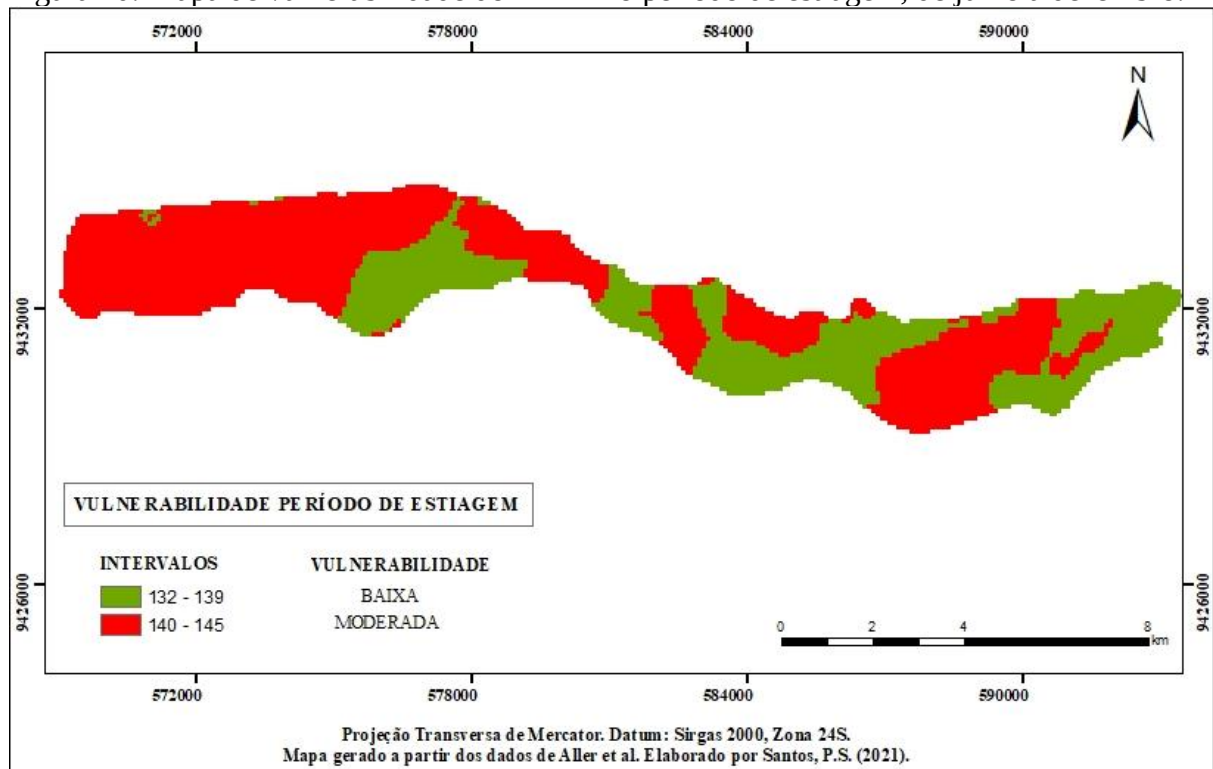
Tabela 20: Vulnerabilidade do PIMN no período chuvoso.

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade	Área	
		(Km ²)	(%)
134 - 139	Baixa	10,44	19,47%
140 - 145	Moderada	43,20	80,53%

Fonte: autora (2021).

Os valores de vulnerabilidade nos dois períodos foram basicamente os mesmos. No período de estiagem a vulnerabilidade variou entre 132 a 145, sendo também definidos duas classes de vulnerabilidade de acordo com o método, baixa e moderada vulnerabilidade, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20: Mapa de vulnerabilidade do PIMN no período de estiagem, de julho a dezembro.



Fonte: autora (2021).

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que, os dois períodos permaneceram com as mesmas classes de vulnerabilidade, diferenciando-se na porcentagem das classes de vulnerabilidade na área de estudo. Essa variação da vulnerabilidade é devido ao aumento da

profundidade do topo do aquífero, ocorrência natural no período de estiagem, sendo uma estação que não contribui para a recarga do aquífero. Como pode ser observado na Tabela 21, 36,50% da área apresenta baixa vulnerabilidade à poluição, mostrando um aumento quando comparado à baixa vulnerabilidade no período chuvoso. Enquanto a vulnerabilidade moderada teve uma redução em relação à período de estiagem, ficando em 63,50% da área estudada.

Tabela 21: Vulnerabilidade do PIMN no período de estiagem.

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade	Área	
		(Km ²)	(%)
132 - 139	Baixa	10,44	36,50%
140 - 145	Moderada	43,20	63,50%

Fonte: autora (2021).

A comparação entre os resultados obtidos da vulnerabilidade intrínseca dos dois períodos pode ser observada na Tabela 22. Nota-se que, apesar dos dois períodos apresentarem as mesmas classes de vulnerabilidade, o período chuvoso apresenta-se com uma vulnerabilidade mais elevada, em relação ao de estiagem. Essa diferença é devido a redução da profundidade do topo do aquífero na estação chuvosa, decorrente da recarga recebida.

Tabela 22: Comparação da Vulnerabilidade do PIMN no período chuvoso e de estiagem.

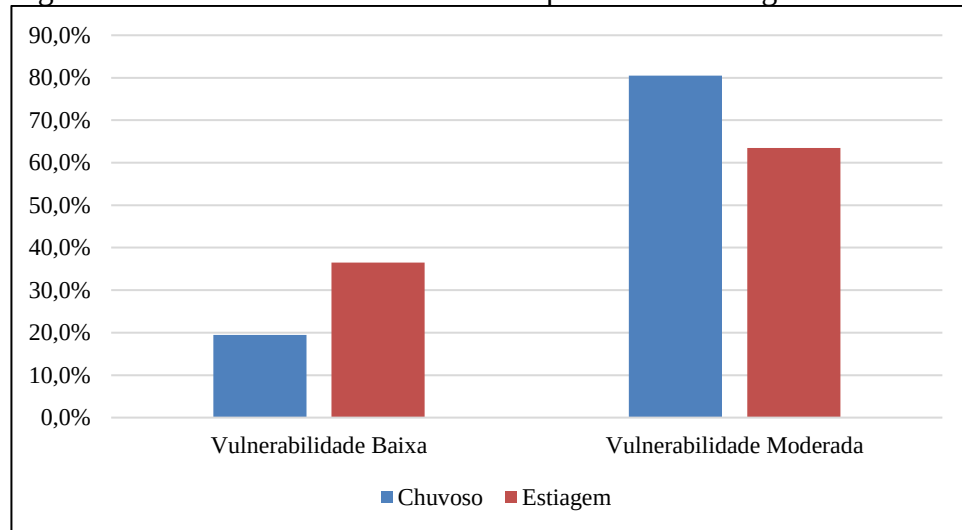
DRASTIC período chuvoso	DRASTIC período de estiagem	Vulnerabilidade	Área (km ²)		Área (%)	
			Chuvoso	Estiagem	Chuvoso	Estiagem
134 - 139	132 - 139	Baixa	10,44	19,58	19,47%	36,50%
140 - 145	140 - 145	Moderada	43,20	34,06	80,53%	63,50%

Fonte: autora (2021).

Dentre os parâmetros utilizados no método DRASTIC o fator que apresentou maior variação foi o parâmetro D. Sendo um dos parâmetros que apresenta maior influência na variação da vulnerabilidade da área.

No período chuvoso, o aquífero no trecho do PIMN tem 80,53% da sua área com vulnerabilidade moderada. Já no período de estiagem ocorre uma redução para 63,50%. Enquanto a vulnerabilidade baixa, no período chuvoso está presente em 19,58% do total da área de estudo, ocorrendo um aumento no período de estiagem, correspondendo a 36,50% da área do trecho estudado, como ilustrado na Figura 21.

Figura 21: Vulnerabilidade do PIMN nos períodos de estiagem e chuvoso.



Fonte: Autora (2021).

Hasan et al. (2019) relata que a alta vulnerabilidade de aquíferos com configurações geomorfológicas semelhantes como: profundidades rasas, topografia plana e presença de sedimentos não consolidados (areia) na zona não saturada aumenta a possibilidade à contaminação. Sendo importante levar em consideração que a faixa do índice de vulnerabilidade é relativo, de modo que as águas subterrâneas presentes em áreas que apresentam baixa vulnerabilidade não estão totalmente isentas de ameaças de contaminação, são apenas menos passíveis quando comparado com áreas de vulnerabilidade mais elevadas.

Guerra et al (2010) em sua análise da vulnerabilidade na área do aquífero aluvionar no trecho do PIMN, delineou cinco classes de vulnerabilidade variando de insignificante a extrema, com predominância da vulnerabilidade insignificante. O presente trabalho apresentou diferenças em relação ao referido trabalho. A diferença pode ser entendida pela variação da profundidade do aquífero ao longo dos anos, decorrente das alterações das estações chuvosas e do aumento de demanda pela água.

A baixa variação na vulnerabilidade observada no período chuvoso e no período seco, se assemelham aos resultados obtidos na pesquisa de Mfonka et al. (2018). Os autores estudaram a vulnerabilidade dos aquíferos de três bacias hidrográficas experimentais em Fouban (oeste-Camarões), no período chuvoso e de estiagem. Após realizar a elaboração dos mapas para os dois períodos, os autores verificaram que não ocorreu variação significativa na vulnerabilidade durante a estações seca e chuvosa. A vulnerabilidade da área foi classificada pelos autores em baixa e moderada para os dois períodos analisados. As

mesmas classes de vulnerabilidade foram consideradas para o trecho do PIMN. No entanto, ocorre uma diferença entre os índices de vulnerabilidade apresentados pelo autor e os apresentados nessa pesquisa. Essa diferença entre os índices de vulnerabilidade deve estar relacionada às características dos parâmetros DRASTIC, decorrente da diferença entre os ambientes. Na pesquisa de Mfonka et al. (2018) foi analisado uma área com dois aquíferos, sendo um aquífero raso sedimentar e um aquífero mais profundo, localizado em zonas de fraturas. Já o trecho do aquífero estudado no PIMN está todo localizado em um ambiente de depósitos aluviais, sendo um aquífero raso.

6.2 Método de validação

A análise de sensibilidade aplicada nessa pesquisa foi conduzida pelos dois métodos descritos na sessão 5.2 dos materiais e métodos. A utilização desses métodos busca analisar a confiabilidade dos critérios de vulnerabilidade e validar os mapas de vulnerabilidade construídos.

6.2.1 Análise de sensibilidade de remoção de mapa

O primeiro método utilizado foi a análise de sensibilidade de remoção de mapa. Esse método requer a remoção individual de cada camada DRASTIC e em seguida a realização do cálculo do índice de variação. O índice gerado representa a variação que a retirada da camada de avaliação causa no índice de vulnerabilidade. Os resultados obtidos com a remoção das camadas estão demonstrados na Tabela 23. Para o cálculo foi utilizado o valor máximo, mínimo e a média da vulnerabilidade encontrada na área de estudo, assim como indicado na Tabela 23.

Tabela 23: Análise de sensibilidade de remoção de mapas.

Parâmetro Removido	Índice de Variação (%)				Vulnerabilidade		
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	min	máx	média
D	1,56	0,55	0,71	0,11	103	110	106,5
R	-0,95	-1,98	-2,13	0,11	122	133	127,5
A	0,49	-0,38	-0,65	0,19	110	121	115,5
S	-0,95	-1,98	-2,13	0,11	122	133	127,5
T	-1,25	-2,38	-2,38	0,00	125	135	130
I	2,40	1,75	1,32	0,30	94	105	99,5
C	-0,95	-1,98	-2,13	0,11	122	133	127,5

Fonte: Autora (2021).

De acordo com a Tabela 23, os parâmetros que apresentaram variação após sua retirada, foram: profundidade do topo do aquífero (D), material do aquífero (A) e o de influência da zona de vadosa (I). O valor mais elevado foi a camada I com 2,40%, seguido da camada D com 1,56% e da camada A com 0,49%. A remoção dessas camadas contribuiu de forma significativa na variação do índice de vulnerabilidade. Essas variações podem ser atribuídas devido aos altos valores do peso utilizado por cada parâmetro (TOMER; KATYAL; JOSHI, 2019). Vale ressaltar que, o trecho do aquífero estudado se encontra em um trecho de aluvião, portanto, não apresenta a camada de zona de vadosa, por ser um aquífero livre. Assim, as características geológicas desse parâmetro foram as mesmas consideradas para o parâmetro material do aquífero, no entanto, os valores dos pesos para ambos os parâmetros são diferentes, o que possibilita uma maior variação no índice de vulnerabilidade, quando se remove a camada da zona de vadosa, conforme constatado pela análise de sensibilidade. Para os demais parâmetros, sua remoção envolve uma variação negativa no índice de vulnerabilidade médio.

Em relação aos valores negativos que podem aparecer na análise de sensibilidade, não foi encontrado respostas que mostrem um significado de sensibilidade para esses valores. Pois os valores de sensibilidade são expressos a partir dos valores positivos. Diversos autores que utilizam esse método não conseguem explicar o significado dos valores negativos. (NEH et al., 2015; BARTZAS et al., 2015; ZGHIBI et al., 2016; MFONKA et al., 2018; PACHECO et al., 2018; HASAN et al., 2019; TOMER; KATYAL; JOSHI, 2019; NAZZAL et al., 2019; PAUL; DAS, 2021; MENDOZA; HANSON; VILLALOBOS, 2021)

Tomer, Katyal e Joshi (2019), realizaram uma pesquisa a respeito da análise de sensibilidade da vulnerabilidade das águas subterrâneas usando o método DRASTIC, na região de Delhi na Índia. Dentre as análises foi realizada a análise de sensibilidade de remoção de mapa. Após a remoção individual das setes camadas do método DRASTIC, os autores observaram para os parâmetros profundidade do lençol freático e camada da zona vadosa (sensibilidade, respectivamente de, 5,55 % e 5,5), indicando que foram os parâmetros que apresentam maior variação para o índice de vulnerabilidade, ficando atrás apenas do parâmetro recarga do aquífero (sensibilidade de 6,23%). Os resultados obtidos pelos presentes autores foram semelhantes aos observados nesta pesquisa, onde a remoção dos mapas dos parâmetros zona de vadosa, profundidade do topo do aquífero e material do aquífero apresentaram maiores interferências para o cálculo da vulnerabilidade, com 2,40%, 1,56%, e 0,49 respectivamente.

6.2.2 Análise de sensibilidade de parâmetro único

O grau de importância dos sete parâmetros para a avaliação do índice de vulnerabilidade DRASTIC foi estabelecido a partir da análise de remoção do mapa, descrita no item anterior. Enquanto que a análise de sensibilidade de parâmetro único é utilizada para comparar os pesos “teóricos” com os pesos “efetivos”. O peso efetivo é uma função do valor de um único parâmetro em relação aos outros seis parâmetros, bem como do peso atribuído à ele pelo modelo DRASTIC. Na Tabela 24 podem ser observados os resultados da análise de sensibilidade por parâmetro único.

Tabela 24: Análise de sensibilidade de parâmetro único.

Parâmetro	Peso Teórico	Peso efetivo (%)				
		Peso Teórico (%)	Média	Mínimo	Máximo	Des. Padrão
D	5	21,7	21,5	20,0	25,9	0,042
R	4	17,4	11,5	12,8	11,9	0,0067
A	3	13,0	17,2	19,2	17,8	0,01
S	2	8,7	15,8	16,0	17,8	0,013
T	1	4,3	5,4	4,0	7,4	0,025
I	5	21,7	28,7	32,0	29,6	0,017
C	3	13,0	8,6	9,6	8,9	0,005

Forte: Autora (2021).

Percebe-se, a partir dos valores encontrados, que, os parâmetros zona de vadosa, material do aquífero e tipo do solo tendem a ser os parâmetros mais eficazes na avaliação da vulnerabilidade, pois, apresentam pesos médios efetivos bem superiores aos seus respectivos pesos teóricos (%), com valores de 28,7%, 11,5%, 17,2% respectivamente. As camadas profundidade do topo do aquífero (22%) e topografia (5%), foram ligeiramente superiores aos seus respectivos pesos teóricos. Os parâmetros recarga do aquífero e condutividade hidráulica, apresentaram peso efetivo médio inferior ao seu peso teórico.

Os resultados observados nessa pesquisa em relação as análises de sensibilidade de remoção de mapas e de parâmetro único, se mostraram semelhantes aos resultados obtidos por NEH et al, (2015), em sua pesquisa utilizando o modelo DRASTIC-GIS para avaliar a vulnerabilidade à poluição das formações freáticas em Douala-Camarões. Na análise de sensibilidade de remoção de mapa, foi observado pelos autores que, as camadas zona de vadosa, material do aquífero e profundidade do topo do aquífero estão entre os parâmetros que apresentam mais variação na vulnerabilidade da área, se fossem retirados do cálculo da

vulnerabilidade, com uma variação de 1,34%, 0,59% e 0,08%, respectivamente. Na presente pesquisa, foram observados os mesmos parâmetros com maior variação no índice de vulnerabilidade, após realizar a análise de sensibilidade de remoção de mapa, com variações de 2,4% para o parâmetro zona de vadosa, 1,56% para a profundidade do topo do aquífero e 0,49% para o parâmetro material do aquífero.

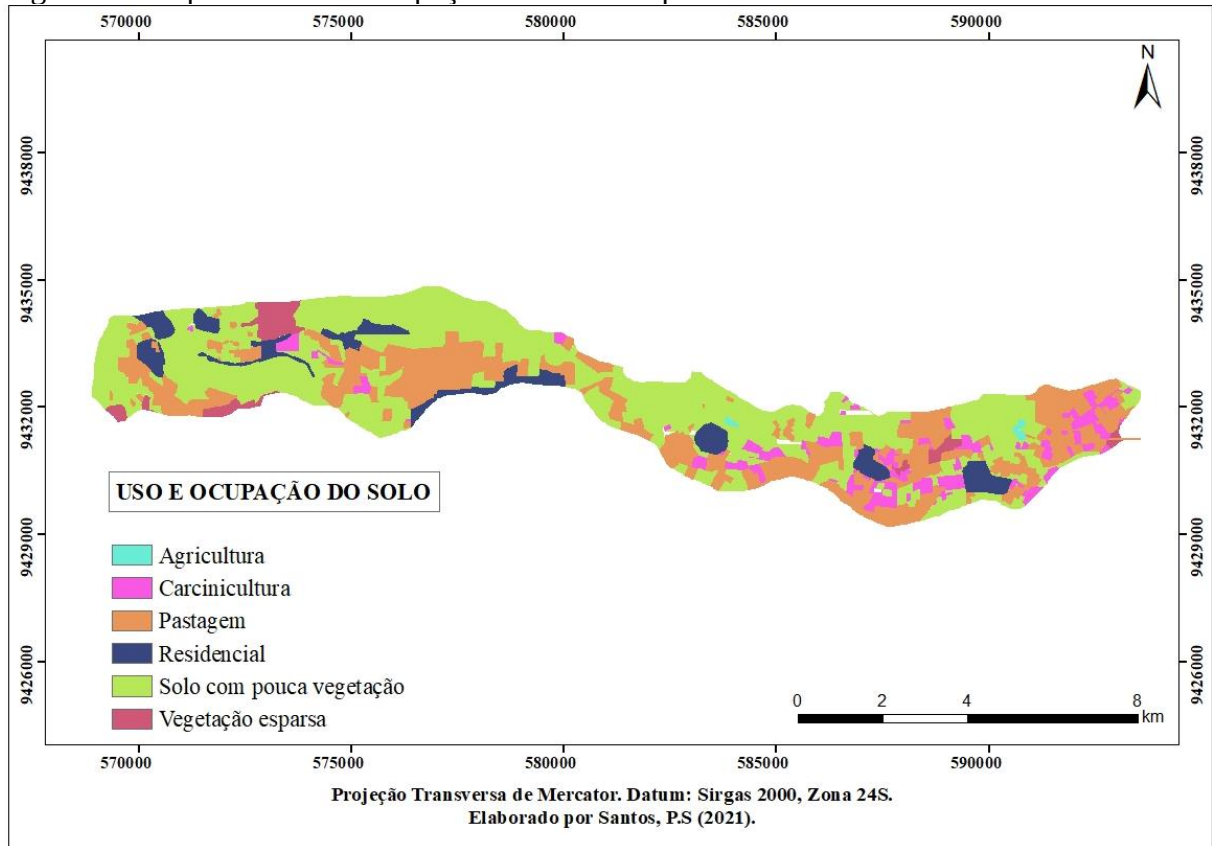
Em relação a análise de sensibilidade de parâmetro único, os autores observaram que as camadas, material do aquífero e material do solo apresentam pesos efetivos muito superiores aos seus pesos teóricos, com pesos efetivos de 17,84% e 13,38%, respectivamente. Resultados semelhantes ao desta pesquisa, onde esses três parâmetros apresentaram valores efetivos superiores aos pesos teóricos, sendo: zona de vadosa (variação de 28,7%), material do solo (variação de 15,8%) e material do aquífero (variação de 17,5%). Para Neh et al, (2015) e Nazzal et al, (2019) esses resultados indicam elevada importância para obtenção do índice de vulnerabilidade, devido ao grau de significância observado a partir dos pesos efetivos obtidos com a análise de sensibilidade. O que indica a necessidade de obter dados mais precisos, bem como informações mais detalhadas a respeito desses parâmetros.

6.3 Mapa de risco de contaminação

Para a elaboração do mapa de risco de contaminação é necessário levar em consideração as interferências antrópicas na área estudada. Na área da pesquisa (trecho do PIMN) foram investigadas as atividades que possam causar impactos no aquífero livre derivadas do uso e ocupação do solo, da utilização de agrotóxicos aplicados nos cultivos, a falta de saneamento, bem como outros fatores que podem intensificar o risco de poluição/contaminação das águas subterrâneas. Esses fatores são fortalecidos pelas condições naturais do aquífero, como baixa profundidade do lençol freático, geologia e topografia da área.

Na área estudada, foram observadas diferentes atividades de ocupação do solo, que são potenciais fontes de contaminação das águas subterrâneas. As atividades agrícolas como plantio de arroz, cultivo de camarão e áreas residenciais sem saneamento básico, podem contribuir para a infiltração de contaminantes para o aquífero. Na área existe predominância de solo com pouco vegetação e áreas de pastagens. A Figura 22 mostra a distribuição espacial da cobertura e uso do solo. A Tabela 25 mostra os índices relativos a cada uso e ocupação do solo e o quanto cada classe utilizada representa em termos de área do trecho estudado.

Figura 22: Mapa de Uso de Ocupação do solo do aquífero livre no trecho do PIMN.



Fonte: autora (2021).

Tabela 25: Uso e ocupação do solo com relativos pesos e índices.

Uso e Ocupação do Solo	Lp*	Lp x Li(4)**	Área	
			(Km²)	(%)
Agricultura	9	36	0,15	0,27
Carcinicultura	9	36	3,70	6,90
Pastagem	5	20	16,13	30,08
Residencial	8	32	4,20	7,83
Solo com pouca vegetação	7	28	27,73	51,7
Vegetação esparsa	4	16	1,73	3,23

Fonte: autora (2021).

Legenda:

*Lp – Pesos correspondentes as classes do parâmetro Uso e ocupação do solo.

**Lp x Li – Valor da vulnerabilidade referente ao Uso e ocupação do solo.

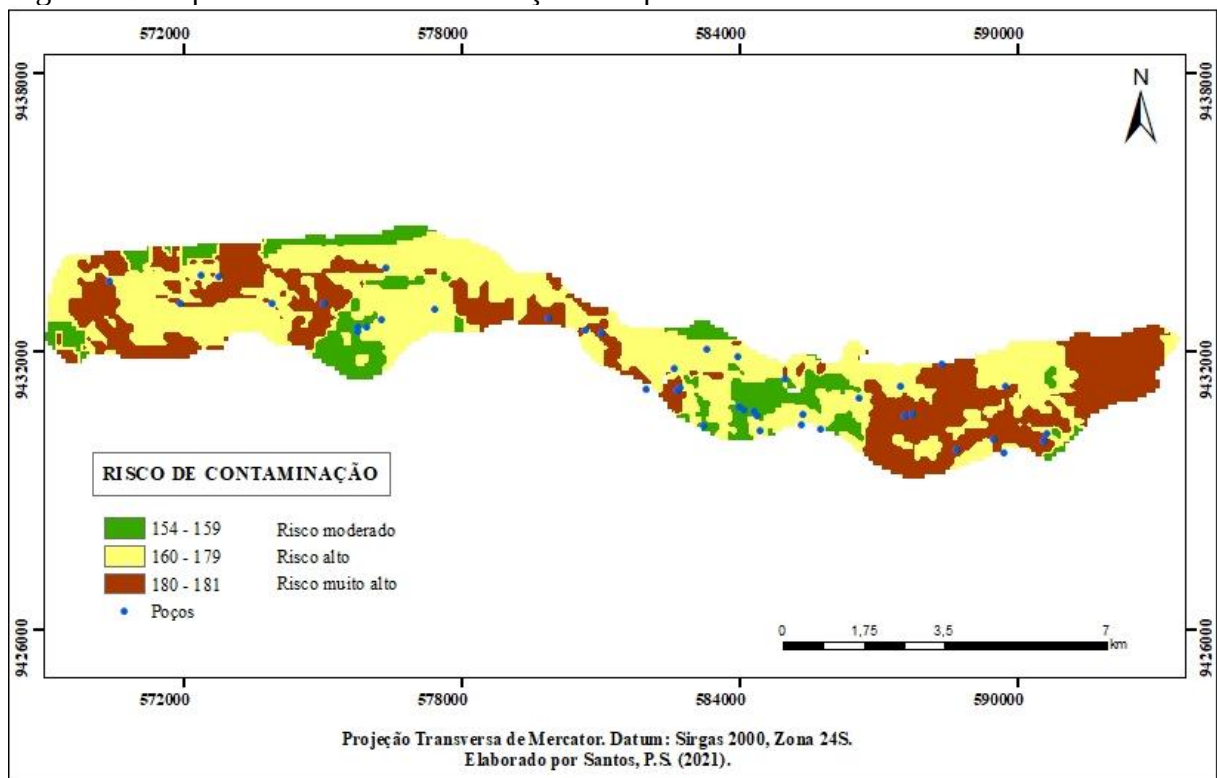
As áreas de agricultura, carcinicultura e residencial, juntas somam 15% da área total do trecho estudado, que foram classificadas como de alto risco de contaminação, devido a geração de contaminantes que podem atingir por percolação as águas subterrâneas. A carcinicultura pode gerar diversos impactos durante sua etapa de cultivo. O lançamento dos efluentes salinos e ricos em nutrientes dos viveiros, geram assoreamento, aumento de turbidez, eutrofização e redução de biodiversidade, podendo causar salinização do solo e de

águas subterrâneas, além da lixiviação desses nutrientes (especialmente nitrogênio e fósforo) até as águas subterrâneas (TANCREDO et al., 2011; RAKIB et al., 2020). Em consequência dos impactos causados pelo cultivo de camarão, foi estabelecido o mesmo índice de risco determinado para a agricultura.

Para construir o mapa de risco de contaminação optou-se pela profundidade do topo do aquífero no período chuvoso, pois, foi o período em que apresentou maior variação na porcentagem das classes de vulnerabilidade baixa e moderada.

A Figura 23 permite visualizar o mapa de risco obtido a partir modificação do DRASTIC, utilizando o parâmetro uso e ocupação do solo. O mapa identificou três classes de risco de contaminação do aquífero livre no trecho PIMN, sendo: risco moderado, risco alto e risco muito alto. Os intervalos de risco de contaminação foram organizados de acordo com os intervalos utilizados por Linhares (2012) em sua pesquisa.

Figura 23: Mapa de Risco de Contaminação do aquífero livre no trecho do PIMN.



Fonte: autora (2021).

Pode-se observar na Figura 23 que as áreas que apresentam atividades antrópicas indicaram risco de contaminação de alto a muito alto. Os elevados índices de risco de contaminação podem ser atribuído ao pouco cultivo de arroz ainda existente e ao cultivo de camarão, além dos espaços residenciais dispersos na área que não apresentam saneamento

básico. Esses fatores são associados as condições naturais do aquífero, como a geologia, a topografia e profundidade do topo do aquífero, sendo capazes de atribuir níveis de riscos a contaminação mais elevados para a área. A categoria de risco muito alto representa a segunda maior classe estabelecida para o trecho analisado. A Tabela 24 exibe as classes e as áreas de risco de contaminação do PIMN.

Tabela 26: Áreas de risco de contaminação do aquífero livre do PIMN.

Índice DRASTIC modificado	Risco de contaminação	Área	
		(Km²)	(%)
154 – 159	Moderado	3,85	7,18%
0160 – 179	Alto	37,54	69,98%
180 – 181	Muito alto	12,25	22,84%

Fonte: autora (2021).

Observa-se na Tabela 24 que 92,82% da área estudada apresenta risco de contaminação alto a muito alto. Nessas áreas estão presentes as atividades agrícolas de carcinicultura, áreas residenciais, áreas de pastagem e ambientes que apresentam pouca vegetação.

O risco moderado está em 7,18% da área, composto por regiões que apresentam profundidade do topo do aquífero entre 9,1 a 15,2 metros e alguns pontos com presença de pouca vegetação.

Toda área do aquífero livre do trecho estudado no PIMN é predominantemente plana e composta por Neossolo, fatores que facilita o processo de infiltração. Segundo Linhares et al (2014) os Neossolos não apresentam características naturais que possam barrar os contaminantes, contribuindo para a infiltração no solo e atingir as águas subterrâneas.

Agossou, Yang, Juoh; (2021), realizaram um estudo comparativo, sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas na bacia sedimentar costeira do Sul do Benin. Com a aplicação do modelo DRASTIC tradicional os autores dividiram os intervalos de vulnerabilidade em: vulnerabilidade muito baixa (0,48%), baixa vulnerabilidade (68,75%), média e alta vulnerabilidade com 19,08% e 11,7%, respectivamente. Para analisar as condições antrópicas do local os autores adicionaram ao DRASTIC a camada de uso e ocupação do solo. Após a adição da nova camada ao DRASTIC, os quais verificaram que as faixas de vulnerabilidade passaram a variar de baixa a vulnerabilidade muito alta, diferente das classes apresentadas com a utilização do DRASTIC tradicional, que apresentava áreas com baixíssima vulnerabilidade e não apresentava áreas com vulnerabilidade muito elevada. Os resultados observados por Agossou, Yang, Juoh; (2021) com a utilização do parâmetro uso

e ocupação do solo, foram semelhantes ao analisado pela presente pesquisa, ao adicionar o mapa de uso e ocupação do solo no trecho do PIMN, pode-se perceber que houve uma variação na vulnerabilidade da área, as classes passaram de baixa e moderada, para vulnerabilidade moderada (7,18%), vulnerabilidade alta (69,98) e vulnerabilidade muito alta (22,84).

O mapa de contaminação criado pode contribuir para delimitar e identificar com mais precisão as áreas que necessitam de maior proteção. Bem como, auxiliar aos órgãos de gerenciamento competentes como uma ferramenta de tomada de decisão, na elaboração de medidas, ações, projetos e programas que possibilitam a segurança e a qualidade ambiental das águas subterrâneas.

Em regiões semiáridas, a gestão dos aquíferos exerce um papel importante diante da saúde humana, indicando a necessidade de gerenciamento baseado na utilização de ferramentas mais proativas baseadas em índices de vulnerabilidade, visando sua proteção contra fontes de contaminação antrópica.

7 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos com a análise da vulnerabilidade do aquífero rio Banabuiú no trecho do PIMN permitiram-se concluir que:

- A divisão dos dados referentes aos níveis estáticos em períodos chuvoso e de estiagem, contribuíram para uma análise mais detalhada da área do PIMN. Onde pode-se observar os locais mais ou menos vulneráveis durante os dois períodos;
- A partir da criação dos dois mapas de vulnerabilidade pelo método DRASTIC, pode-se concluir que os mapas se mostraram semelhantes. No período chuvoso a vulnerabilidade variou entre 134 (valor mínimo) e 145 (valor máximo), e no período de estiagem a vulnerabilidade variou entre 132 a 145. O mapa de vulnerabilidade do período chuvoso apresentou maior vulnerabilidade, devido a redução da profundidade do topo do aquífero durante as chuvas, decorrente da recarga. Pode-se concluir também que o parâmetro que apresentou maior influência na variação da vulnerabilidade do trecho foi o parâmetro D.
- Com a análise de sensibilidade de remoção de mapa, as camadas que demonstraram apresentar maior variação no índice de vulnerabilidade foram respectivamente: zona de vadosa (com variação de 2,40%), profundidade do topo do aquífero (com variação de 1,56%) e material do aquífero (com variação de 0,49%). Esses parâmetros se destacaram devido aos altos valores do peso indicado para cada parâmetro. Já para a análise de sensibilidade de parâmetro único, os parâmetros que se mostraram mais eficazes para avaliação da vulnerabilidade foram: zona de vadosa, material do aquífero e material do solo, por apresentarem pesos médios efetivos (28,7%, 11,5%, 17,2% respectivamente) muito superiores aos seus respectivos pesos teóricos.
- A modificação do modelo DRASTIC com a introdução do parâmetro uso e ocupação do solo possibilitou a criação do mapa de risco de contaminação da área. Com a análise do mapa de contaminação é possível perceber as áreas que apresentam risco alto e muito alto à contaminação, representando 69,98% e 22,84% respectivamente. Nessas áreas estão inseridas as atividades agrícolas, áreas residenciais, lotes de pastagens e locais com pouca vegetação.

7.1 RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa é importante que sejam realizadas algumas recomendações a serem utilizadas em futuros trabalhos, com o intuito de melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos do aquífero no trecho do PIMN, sendo elas:

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa é importante levar em consideração algumas recomendações que podem ser utilizadas em trabalhos futuros, com o intuito de melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos do aquífero no trecho do PIMN, sendo elas:

- 1 Monitoramento do nível estático dos poços utilizando um período de tempo mais curto.
- 2 Realizar testes em campo para determinar a condutividade hidráulica do aquífero.
- 3 Realizar um estudo de avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas, a partir do detalhamento da atividade de carcinicultura, pois apresenta elevado crescimento na área e nenhum tratamento para seus rejeitos.

REFERÊNCIAS

- AL-RAWABDEH, A. M. et al. A GIS-based drastic model for assessing aquifer vulnerability in Amman-Zerqa groundwater basin, Jordan. **Engineering**, n. 5, p. 490-504, 2013.
- Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará – ADECE. **Perímetros Públicos Irrigados do Ceará**, 2011. Disponível em: <https://www.adece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/98/2012/10/perimetros_publicos_do_ceara_sb-7>. Acesso em: 19 set. 2021.
- AGOSSOU, Amos; YANG, Jeong-Seok. Comparative study of groundwater vulnerability to contamination assessment methods applied to the southern coastal sedimentary basin of Benin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 35, p. 100803, 2021.
- ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. **Bull. BRGM**, v. 2, n. 3, p. 4, 1970.
- ALLER, L. et al. DRASTIC: A Standalized System for Evaluating Groundwater Using Hydrological Settings. **US EPA Office of Research and Development**, Ada, USA, 1987.
- ALVES, P. A. T. **Aquíferos sob Ameaça: Estudo Sobre a Contaminação por Agrotóxicos em uma Área de Recarga do Aquífero Guarani**. 2016. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2016.
- ANTONAKOS, A. K.; LAMBRAKIS, N. J. (2007). Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 288-304, 2007.
- AQUINO, A. R. et al. "Vulnerabilidade ambiental", p. 15 -28. In: **Vulnerabilidade ambiental**. São Paulo: Blucher, 2017.
- ASFAW, D; AYALEW, D. Modeling megech watershed aquifer vulnerability to pollution using modified DRASTIC model for sustainable groundwater management, Northwestern Ethiopia. **Groundwater for Sustainable Development**, p. 100375, 2020.
- BARTZAS, Georgios et al. Assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area in north Italy. **Information Processing in Agriculture**, v. 2, n. 2, p. 109-129, 2015.
- BORGES, V. M; ATHAYDE, G. B; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná–Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 327-337, 2017.
- BÓS, S. M.; THOMÉ, A. (2012). Métodos para Avaliar Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas. Porto Alegre, RS:POA Comunicação, 82p. 2012.
- CAMPOS, R. F. **Análise da Qualidade das Águas Subterrâneas e Determinação do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero Serra Geral no Município de Medianeira – PR**. 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, PR, 2015.

CARVALHO, G. Vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas: comparação de modelos baseados no método DRASTIC. **Cadernos de Geografia**, n. 32, p. 289-299, 2013.

CEARÁ. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará**, 2018. Disponível em: https://www.srh.ce.gov.br/plano-de-acoes-estrategicas-de-recursos-hidricos-do-ceara-pae-rh/plano-de-acoes-estrategicas-de-recursos-hidricos-ce_2018/. Acessado em: 06 jul. 2020.

CHRISPIM, Z. M. P. **Análise da Vulnerabilidade e Caracterização Hidrogeoquímica dos Aquíferos Livre Rasos da Parte Emersa da Bacia Sedimentar de Campos**. 2016. 350 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.

COSTA, A. F. S. et al. Recursos hídricos. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - **UNIT - SERGIPE**, v. 1, n. 1, p. 67-73, 1 out. 2012.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil: **Aquíferos** (2010). Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Aquiferos-1377.html>. acessado em 10 de nov. 2020.

CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais). **Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no Estado do Ceará: Diagnóstico do Município de Morada Nova**, 1998a. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/16600/1/Rel_Morada%20Nova.pdf. Acesso em: 06 jul. 2020.

CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais). **Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no Estado do Ceará: Diagnóstico do Município de Limoeiro do Norte**, 1998b. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16447/Rel_Limoeiro%20do%20Norte.pdf?sequence=1. Acesso em: 06 jul. 2020.

DUARTE, L. et al. Avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea à poluição através do método DRASTIC-uma aplicação SIG open source. **IX CNG, Comunicações Geológicas**, v. 101, p. 677-680, 2014.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Descrição das principais classes de solos**. 2006. Disponível em <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/157911/descricao-das-principais-classes-de-solos>>. Acesso em 24 mar. 2021.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Árvore do conhecimento território mata Sul Pernambucana – Neossolos Flúvicos**. 2020a. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz246ynf0t.html. Acesso em: 02 jul. 2020.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Árvore do conhecimento solos tropicais – Neossolos Litólicos**. 2020b. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn230xho02wx5ok0liq1mqxhk6vk7.html. Acesso em: 02 jul. 2020.

FERREIRA, J.P. L; OLIVEIRA, M. M. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. **Geofísica internacional**, v. 43, n. 4, p. 541-550, 2004.

FOSTER, S. et al. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agencias ambientais. Groundwater management advisory team em parceria com a global water partnership copatrocínio da Oms-OPAS-CEPIS & UNESCO ROSTLAS – OHI, world bank group, Washington DC., edição brasileira Sevmar – Serviços técnicos ambientais LTDA, 2006, 114p.

FOSTER, S. S. D; HIRATA, R. C; ROCHA, G. A. Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. **Águas Subterrâneas**, 1988.

FRANCÉS, A. et al. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index. Lisboa, Geosystem Center IST, Third International Conference on Future Groundwater Resources at Risk, June, 2001.

FRANCISCO, Richard Fonseca. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Bauru, na região centro-sul do estado de São Paulo**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro – SP, 2013.

FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). **Pré-Estação: entenda o período que antecede a quadra chuvosa do Ceará**, 2019. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=5963>. Acesso em: 06 jul. 2020.

GAD, M; EL-HATTAB, M. Integration of water pollution indices and DRASTIC model for assessment of groundwater quality in El Fayoum depression, western desert, Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, v. 158, p. 103554, 2019.

GUERRA, J. P. M. et al. Vulnerabilidade da água subterrânea de uma área localizada entre os municípios de Limoeiro do Norte e Morada Nova (Ceará), a partir do índice DRASTIC. In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (2010). **Anais eletrônicos ABES**. p. 99-145. Disponível em: < <http://abes-dn.org.br/analeletronicos/trabalhos.php?evento=19&grupo=1&pagina=99>>. Acessado em 22 set. 2020.

HASAN, M. et al. Groundwater vulnerability assessment in Savar upazila of Dhaka district, Bangladesh—A GIS-based DRASTIC modeling. **Groundwater for sustainable development**, 2019.

HIRATA, R. C. A. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade a poluição de aquíferos. **Anais..** Toluca: [s.n.], 2001.

HIRATA, R. et al. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. **SP: Instituto Trata Brasil**, 2019.

HIRATA, R. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas do estado de São Paulo. São Paulo: Instituto Geológico, CETESB, 2V, 1997.

HUDAK, P; THAPINTA, A. Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides um Central Thailand. *Environmental International*, v, 29, 2003, p. 87-93.

JAUNAT, J. et al. Combinations of geoenvironmental data underline coastal aquifer anthropogenic nitrate legacy through groundwater vulnerability mapping methods. **Science of The Total Environment**, v. 658, p. 1390-1403, 2019.

JIA, Z. et al. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate in porous aquifers based on a DRASTIC method modified by projection pursuit dynamic clustering model. **Journal of contaminant hydrology**, v. 226, p. 103522, 2019.

LIMA, C. E. P. **Produção de Mapas de Vulnerabilidade de Solos e Aquíferos à Contaminação por Metais Pesados para o Estado de Minas Gerais**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2007.

LINHARES, F. M. **Vulnerabilidade Intrínseca e Risco de Contaminação do Aquífero Livre da Bacia Hidrográfica do Rio Gramame – PB**. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2012.

LINHARES, Franklin Mendonça et al. Avaliação da vulnerabilidade e do risco à contaminação das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do Rio Gramame (PB). **Sociedade & Natureza**, v. 26, p. 139-157, 2014.

LODWICK, W. A.; MONSON, W; SVOBODA, La. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: suitability analysis. **International Journal of Geographical Information System**, v. 4, n. 4, p. 413-428, 1990.

LOPES, F. B. et al. Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 437-445, 2014.

MAGALHÃES, J. W. O. **Recursos Hídricos Subterrâneos em Aluvião no Semiárido Nordeste: Estudo de Caso no Perímetro Irrigado Morada Nova, CE**. 2021. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2021.

MAIA, J. T.V. Caracterização Hidrogeológica do Aluvião do rio Banabuiú – Ceará. Dissertação de Mestrado. 2009. Curso de Pós- Graduação em Geologia. Centro de Ciências. Universidade Federal do Ceará. 2009.

MANOEL FILHO, J. **Contaminação das águas subterrâneas In: hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Org. por Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J.; Feitosa, E. C.; Demetrio, J. G. A.; CPRM: LABHID, Rio de Janeiro – RJ, 2008, p. 381-403.

MENDIETA-MENDOZA, Aurora; HANSON, R. T.; RENTERIA-VILLALOBOS, Marusia. Potential adverse impacts on vulnerability and availability of groundwater from climate-change and land use. **Journal of Hydrology**, v. 594, p. 125978, 2021

MFONKA, Z. et al. A GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Foumban (Western-Cameroon). **Groundwater for Sustainable Development**, v. 7, p. 250-264, 2018.

MOURA, I. B. M. **Aspectos Hidrogeológicos do Aluvião do Rio Banabuiú no Trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte – CE. 2008.** 155 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE, 2008.

NAPOLITANO, P.; FABBRI, A. G. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. **IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences**, v. 235, p. 559-566, 1996.

NAZZAL, Y et al. Investigating aquifer vulnerability and pollution risk employing modified DRASTIC model and GIS techniques in Liwa area, United Arab Emirates. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 8, p. 567-578, 2019.

NEH, A. V et al. DRASTIC-GIS model for assessing vulnerability to pollution of the phreatic aquiferous formations in Douala–Cameroon. **Journal of African Earth Sciences**, v. 102, p. 180-190, 2015.

PACHECO, F. A. L. et al. Modification to the DRASTIC framework to assess groundwater contaminant risk in rural mountainous catchments. **Journal of Hydrology**. V. 566, p. 175-191, 2018.

PAUL, Swapan; DAS, Chandan Surabhi. An investigation of groundwater vulnerability in the North 24 parganas district using DRASTIC and hybrid-DRASTIC models: A case study. **Environmental Advances**, v. 5, p. 100093, 2021.

RAKIB, M. A. et al. Groundwater salinization and associated co-contamination risk increase severe drinking water vulnerabilities in the southwestern coast of Bangladesh. **Chemosphere**, v. 246, p. 125646, 2020.

ROLIM, J. B. S. **Sistemas Técnicos e Sustentabilidade: Desafios no Perímetro Irrigado de Morada Nova (PIMN), Ceará.** 2004. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, 2006.

SANTOS FILHO, M. G. et al. Solo e águas subterrâneas contaminadas pela deposição de resíduos sólidos urbanos: o caso do Vazadouro de Tatuí (SP). **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 1, p. 31-47, 2017.

SANTOS, R. A.; CRUS, M, J. M.; NASCIMENTO, S A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Cadernos de Geociências**, n. 7, p. 54 – 62, 2010.

SANTOS, R. G; MARQUES, L. M; STURARO. Geoprocessamento aplicado a análise do índice de vulnerabilidade DRASTIC no sistema aquífero Guarani em Ribeirão Bonito-SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 2, 2016.

SHIRAZI, S. M; IMRAN, H. M.; AKIB, S. GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: a review. **Journal of Risk Research**, v. 15, n. 8, p. 991-1011, 2012.

SILVA, L. **Índice de Sustentabilidade ambiental integrado a sub-bacia hidrográfica do Rio Banabuiú, CE**. 2017. 174 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB. 2017.

SILVEIRA, R. N. C. M. et al. Reservas hídricas subterrâneas e contribuição à gestão dos recursos hídricos em aluviões no semiárido. **Geociências (São Paulo)**, v. 35, n. 4, p. 642-651, 2016.

SINGUI, V. S. **Estudo Sobre o Fluxo Subterrâneo e Percolação de Poluentes em um Cemitério na Cidade de Campos dos Goytacazes-RJ**. 2017. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. 2017.

SOARES, D. F; FARIA, A. M; ROSA, A. H. Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas por resíduos de agrotóxicos no município de Campo Novo do Parecis (MT), Brasil. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 22, p. 277-284, 2016.

SOUSA, E. et al. Panorama Situacional do Serviço de Esgotamento Sanitário e sua Relação com Doenças de Veiculação Hídrica na Região Metropolitana De Belém-Pará. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 487-503, 2018.

SOUSA, R R. **Estudo comparativo entre métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero, aplicado na porção oriental da bacia sedimentar do Parnaíba no município de Tinguá, Ceará**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 2016.

TANAJURA, D. S; LEITE, C. B. B. Quantificação da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas da sub-bacia hidrográfica Jacaré-Pepira/SP. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 3, p. 306-325, 2016.

TANCREDO, K. R. et al. Impactos ambientais da carcinicultura brasileira. In: **International Workshop Advances in Cleaner Production**. 2011.

TAVARES, J. C. S. et al. Sede por Sustentabilidade no Sertão Cearense: uma Análise do Perímetro Irrigado Morada Nova. In: XVII Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (2015). **Anais eletrônicos ENGEMA**. n. 407. Disponível em: < <https://www.engema.org.br/17/>>. Acessado em 14 de dez. 2020.

TOMER, T; KATYAL, D; JOSHI, V. Sensitivity analysis of groundwater vulnerability using DRASTIC method: A case study of National Capital Territory, Delhi, India. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, p. 100271, 2019.

VASCONCELOS, S. M. S. **Recarga do Aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza-CE**. 1999. 122 f. Tese (Doutorado em Geologia Econômica e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo – SP, 1999.

VOUDOURIS, K. et al. Assessment of Intrinsic Vulnerability Using the DRASTIC Model and GIS in the Kiti Aquifer, Cyprus. **European Water**, 30: 13-24, 2010.

VOUTCHKOVA, D. D. et al. A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111330, 2021.
VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. Guidebook on mapping groundwater Vulnerability. **Hannover: Heinz Heise Veriag**. v. 16, 131p. 1994.

ZGHIBI, Adel et al. Groundwater vulnerability analysis of Tunisian coastal aquifer: an application of DRASTIC index method in GIS environment. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 2, p. 169-181, 2016.