



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

THALES MAMEDE GALVÃO DE OLIVEIRA

**SISTEMAS SUBTERRÂNEOS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM UM
CONTEXTO DE SEGURANÇA HÍDRICA E VULNERABILIDADE À
CONTAMINAÇÃO**

ARARUNA – PB

2022

THALES MAMEDE GALVÃO DE OLIVEIRA

**SISTEMAS SUBTERRÂNEOS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM UM
CONTEXTO DE SEGURANÇA HÍDRICA E VULNERABILIDADE À
CONTAMINAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, com requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Profa. Dra. Maria José de Sousa
Cordão

ARARUNA – PB

2022

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48s Oliveira, Thales Mamede Galvao de.

Sistemas subterrâneos para abastecimento de água em um contexto de segurança hídrica e vulnerabilidade à contaminação [manuscrito] / Thales Mamede Galvao de Oliveira. - 2022.

54 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2023.

"Orientação : Prof. Dr. Maria José de Sousa Cordão, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Recurso hídrico. 2. Segurança hídrica. 3. Abastecimento de água. I. Título

21. ed. CDD 333.91

THALES MAMEDE GALVÃO DE OLIVEIRA

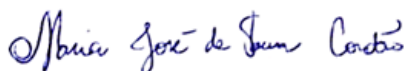
SISTEMAS SUBTERRÂNEOS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM UM
CONTEXTO DE SEGURANÇA HÍDRICA E VULNERABILIDADE À
CONTAMINAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, com requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

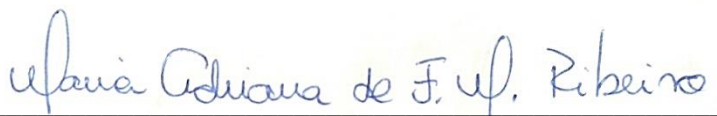
Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovado em: 12/12/2022.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Maria José de Sousa Cordão (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Yáscara Maia Araújo de Brito
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

“Conheces teu inimigo e conhece-te a ti mesmo; se tiveres cem combates a travar, cem vezes serás vitorioso.”

Sun Tzu

Minha vida acadêmica sempre contou com o apoio dos meus amigos e familiares, e é por essa razão que dedico todo meu agradecimento a vocês!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por trilhar meus caminhos e me fornecer forças para enfrentar e superar todos os obstáculos que estiveram diante de mim e enfim vencê-los.

Aos meus pais, Geraldo e Edineide pela dedicação, esforço e sacrifícios feitos. O amor que sinto por vocês é indescritível; cada gota de suor derramado será recompensada.

À minha orientadora, Maria José de Sousa Cordão pelo apoio, dedicação e paciência que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares que sempre me apoiaram tanto, financeiramente e psicologicamente, por não me deixarem desistir e sempre me mostrarem como seguir em frente. Toda minha gratidão.

Aos meus amigos que posso chamá-los de irmãos, obrigado por todos os momentos que vivenciamos nestes anos, por todas as histórias construídas, agradeço por sempre me apoiarem e acreditarem no meu potencial. Amo infinitamente cada um de vocês, Adson, Alberto, Automar, Bárbarah, Evandro, Lettycia e Thomaz.

RESUMO

Águas subterrâneas fornecem quase 50% do abastecimento de água urbana em todo o mundo. O aumento da demanda, devido ao crescimento das cidades e as mudanças climáticas na região semiárida do Brasil ocasionou o aumento da utilização das águas subterrâneas para o abastecimento, com isso surge a necessidade de proteção desse recurso. Apesar de possuírem maior capacidade de proteção natural de contaminantes, uma vez contaminadas, o tratamento das águas subterrâneas é uma tarefa complexa e de alto custo. Este estudo teve como principal objetivo o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação natural das águas subterrâneas do município de Mãe D'água-PB, uma pequena cidade localizada no alto sertão paraibano. A metodologia fundamentou-se na aplicação do Método GOD, por meio da iteração de parâmetros do grau de confinamento da água subterrânea, da ocorrência dos estratos de cobertura e do nível do lençol freático. O estudo também discutiu a relação entre segurança hídrica e águas subterrâneas, além de analisar dados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica. O principal resultado revela a vulnerabilidade classificada em cinco classes: desprezível, baixa, moderada, alta e extrema. Portanto, foi elaborado o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação no município de Mãe D'água-PB e verificou-se conveniente a utilização desse método, revelando a predominância da vulnerabilidade para a classe média, totalizando 58% da área de estudo. Estes resultados poderão apoiar a criação de mecanismos de gestão, e proteção dos aquíferos do município.

Palavras-Chave: Segurança Hídrica. Recursos Hídricos Subterrâneos. Índice de Vulnerabilidade. GOD.

ABSTRACT

Groundwater supplies nearly 50% of urban water supplies worldwide. The increase in demand, due to the growth of cities and climate change in the semi-arid region of Brazil, has led to an increase in the use of groundwater for supply, with this arises the need to protect this resource. Despite having greater natural protection capacity from contaminants, once contaminated, the treatment of groundwater is a complex and costly task. The main objective of this study was to map the vulnerability to natural contamination of groundwater in the municipality of Mãe D'água-PB, a small town located in the high hinterland of Paraíba. The methodology was based on the application of the GOD Method, through the iteration of parameters of the groundwater confinement degree, the occurrence of cover strata and the water table level. The study also discussed the relationship between water security and groundwater, in addition to analyzing data in a Geographic Information Systems environment. The main result reveals vulnerability classified into five classes: negligible, low, moderate, high and extreme. Therefore, a mapping of vulnerability to contamination in the municipality of Mãe D'água-PB was prepared and the use of this method was found to be convenient, revealing the predominance of vulnerability for the middle class, totaling 58% of the study area. These results may support the creation of management mechanisms and protection of the municipality's aquifers.

Keywords: Water Security. Groundwater Resources. Vulnerability Index. GOD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Índice de Segurança Hídrica para o Brasil (2035)	15
Figura 2 - Evolução da quantidade de poços de monitoramento ao longo dos anos da RIMAS	20
Figura 3 - Relação entre vulnerabilidade e carga contaminante	23
Figura 4 - Fluxo de contaminantes em aquíferos	26
Figura 5 - Fontes de contaminação das águas subterrâneas	26
Figura 6 - Localização do município de Mãe D'água - PB	32
Figura 7 - Bacia hidrográfica Piranhas-Açu e suas sub-bacias	34
Figura 8 - Municípios paraibanos inseridos na SBHE	35
Figura 9 - Sistemas aquíferos do estado da Paraíba	36
Figura 10 - Litologia no município de Mãe D'água - PB	37
Figura 11 - Procedimentos metodológicos para obtenção do mapa de vulnerabilidade natural do aquífero	38
Figura 12 - Localização dos poços no município de Mãe D'água - PB	39
Figura 13 - Mapa de caracterização quanto ao grau de confinamento hidráulico (G)	44
Figura 14 - Mapa de caracterização quanto aos extratos de cobertura da litologia (O) .	44
Figura 15 - Mapa de caracterização quanto ao nível estático do lençol freático (D)	45
Figura 16 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos do município de Mãe D'água - PB	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais usos de águas subterrâneas	16
Tabela 2 - Sub-bacias componentes da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu	34
Tabela 3 - Valores dos critérios definidos para o método GOD do município de Mãe D'água - PB	40
Tabela 4 - Caracterização dos parâmetros e índices do método GOD	42
Tabela 5 - Definição de classe de vulnerabilidade do método GOD	43
Tabela 6 - Metadados do mapa de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos do município de Mãe D'água - PB	46
Tabela 7 - Porcentagem das classes de vulnerabilidade.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Segurança hídrica nas cidades: a importância dos recursos subterrâneos	14
3.2	Sistemas subterrâneos para abastecimento urbano de água	16
3.3	Fontes de contaminação e vulnerabilidade das águas subterrâneas	22
3.4	Mapeamento de índices de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos	28
4	ÁREA DE ESTUDO	32
4.1	Bacias hidrográficas	33
4.2	Litologia	35
5	ÁREA DE ESTUDO	38
5.1	Levantamento de dados e processamento cartográfico	38
5.2	Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
7	CONCLUSÕES	49

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas fornecem quase 50% do abastecimento de água urbana em todo o mundo e provavelmente uma proporção maior em épocas de crise hídrica, contudo este recurso ainda é mal administrado e inadequadamente protegido (FOSTER, 2022).

Informações da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) revelam fenômenos de seca e colapso de sistemas de abastecimento de água. Por exemplo, em dezembro de 2016, 132 cidades do Nordeste Setentrional, com uma população total de 1,5 milhões de habitantes encontravam-se em colapso de abastecimento e 812 municípios eram abastecidos por carros-pipa (ANA, 2019). Eventos de restrição hídrica como este, associados à ausência de planejamento e de investimentos em infraestrutura e saneamento geram grandes desequilíbrios na segurança hídrica. Estes desequilíbrios são ainda maiores em pequenos municípios, em razão dos menores esforços de investimento em saneamento básico (SANTOS *et al.*, 2018). No estado da Paraíba, dados do Atlas Água (2021)¹, mostram que 36% dos municípios possuem valores entre baixo e mínimo para o Índice de Segurança Hídrica Urbana (ISH-U). Em razão da ausência de continuidade no atendimento pelo sistema público de abastecimento de água, soluções individuais são comumente utilizadas, dentre elas, a captação de água em mananciais subterrâneos.

As águas subterrâneas é o recurso natural mais extraído no subsolo brasileiro (CASTRO, 2022) e constituem uma fonte de abastecimento de água segura e importante para as necessidades humanas, contudo, as políticas públicas, muitas vezes negligenciam essa fonte hídrica e sua conexão com as águas superficiais. Sua natureza oculta esconde sua importância socioeconômica e ambiental, além disso, dificulta sua adequada gestão. Uma preocupação relacionada ao seu uso é a vulnerabilidade à contaminação, decorrente de cargas poluidoras de atividades humanas. Inclusivamente, o crescimento da exploração de águas subterrâneas foi acompanhado da proliferação de poços construídos sem critérios técnicos adequados, com locações sub-ótimas e sujeitas a ações antrópicas que colocam em risco a qualidade e o uso dessas águas (HIRATA *et al.*, 2019).

Vulnerabilidade é a susceptibilidade hidrogeológica da água de ser afetada por contaminantes (DA COSTA *et al.*, 2022). Estudos sobre vulnerabilidade são determinantes para

¹ <https://portal1.snirh.gov.br/ana>

a proteção dos aquíferos, uma vez que sua contaminação não é prontamente detectada e sua remediação é frequentemente dispendiosa e impraticável.

Segundo Tavares (2009), a avaliação da vulnerabilidade de um aquífero, pode ser dividido em três conjuntos de métodos : i) Métodos que empregam modelos de simulação, que quantificam a concentração do contaminante no tempo e no espaço por meio da solução de equações do escoamento e transporte de soluto em meio subterrâneo; ii) Métodos estatísticos ou de monitoramento, a determinação é desenvolvida a partir de cálculos probabilísticos entre eles a poluição e condições ambientais observadas; iii) Métodos de índices e superposição, que correlacionam parâmetros segundo cada característica, de acordo com faixas de valores e índices de ponderação; quando distribuídos espacialmente auxiliam na composição de mapa um geral de vulnerabilidade, incluem como exemplo, a metodologia GOD, o qual constitui a combinação de três parâmetros, do inglês, *Groundwater Overall* (Confinamento do aquífero), *Overall aquifer class* (Grau de faturamento) e a *Depth to groundwater* (profundidade do nível D'água) para obtenção da vulnerabilidade natural de aquíferos.

Em razão dos avanços tecnológicos, o estudo da vulnerabilidade de aquíferos se associou à técnicas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Estes sistemas permitem a ampliação da capacidade de análise espacial, a redução do tempo de trabalho e o aumento da precisão das informações (DA COSTA *et al.*, 2022)

Neste sentido, este estudo apoia-se na discussão sobre a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas à contaminação, em razão da sua relação direta com a segurança hídrica; notadamente poços presentes em municípios do semiárido do Estado da Paraíba como alternativa individual para abastecimento humano. Desta forma, o intuito deste estudo é obter o mapa de vulnerabilidade natural de um aquífero à contaminação através do índice GOD que considera as características do ambiente que naturalmente possibilitam a modificação da qualidade das águas subterrâneas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é: Avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas para compreender o *status* do potencial de risco à contaminação em um município do semiárido do Brasil em um contexto de segurança hídrica.

2.2 Objetivos específicos

Configuram-se como objetivos específicos, os seguintes:

- Discutir, em um contexto de segurança hídrica, os fatores determinantes da importância da água subterrânea para o abastecimento de água das cidades;
- Identificar sistemas de informações disponíveis para apoiar inferências e análises espaciais;
- Obter o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos para diagnosticar o status atual do potencial de contaminação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Segurança hídrica nas cidades: a importância dos recursos subterrâneos

A segurança hídrica é condição indispensável para o desenvolvimento social e econômico, especialmente quando se verificam os impactos causados pelos eventos hidrológicos extremos. Em regiões nas quais a disponibilidade hídrica é reduzida por natureza, como é o caso do semiárido, as restrições hídricas têm ocorrido por períodos mais prolongados. Essas restrições se manifestam nos sistemas de abastecimento público de água das cidades através da intermitência no fornecimento de água, afetando grande contingente populacional.

O principal objetivo de um sistema público de abastecimento de água de uma cidade é fornecer água de boa qualidade e quantidade adequada aos usuários (HLLER e PÁDUA, 2016). A continuidade e equidade do serviço público de água reflete imediatamente na saúde da população, proporcionando maior conforto e bem-estar a todos. Nas regiões que enfrentam restrições hídricas, um importante e permanente desafio relacionado com as questões ambientais é referente ao balanço entre demanda de água (necessidades) para consumo humano e a oferta (disponibilidade).

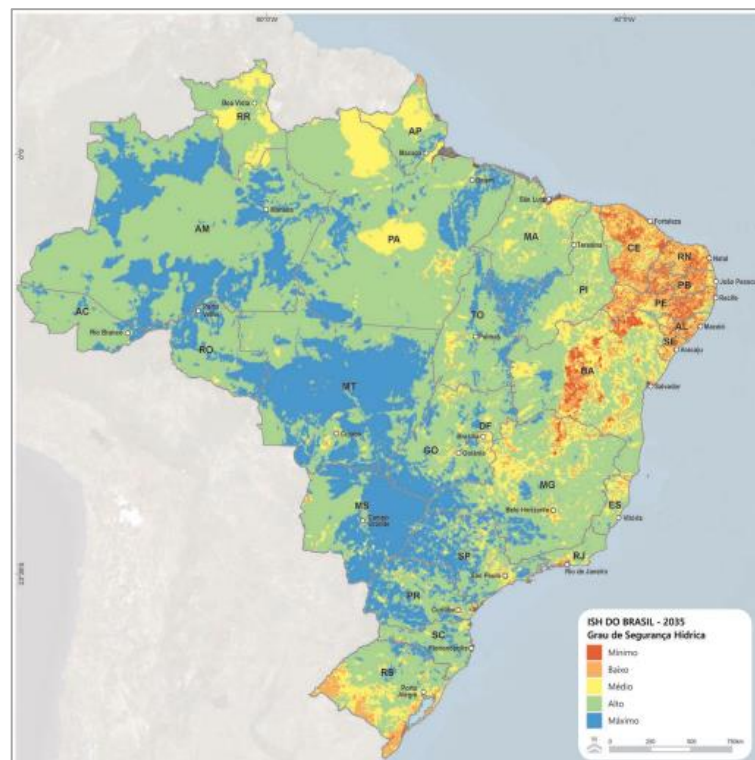
Neste contexto, contribuem para a segurança hídrica urbana, não somente os mananciais superficiais, mas também mananciais subterrâneos. As águas subterrâneas no Brasil atendem variados fins e sua exploração somam 2,5 milhões de poços tubulares, totalizando 17.580 mm³/ano (557m³/s), volume suficiente para abastecer toda a população brasileira (SILVA e WANKLER, 2022).

O Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) concebe o Índice de Segurança Hídrica (ISH), observado na Figura 1, o qual revela quatro diferentes dimensões da segurança hídrica para o Brasil, descrita, sumariamente, a seguir (ANA, 019):

- A dimensão humana avalia a garantia da oferta de água para o abastecimento de todas as cidades. As previsões revelam que em 2035 a população total urbana em risco de insegurança hídrica será de 73,7 milhões de pessoas;
- A dimensão econômica mede a garantia de água para os setores agropecuário e industrial;

- A dimensão ecossistêmica sinaliza a vulnerabilidade de mananciais para abastecimento humano e usos múltiplos, derivada da capacidade de manutenção de um estoque de água para usos naturais e da exposição desse estoque natural a riscos ambientais, originados, por exemplo, de fontes poluidoras de esgotos domésticos;
- A dimensão resiliência que expressa o potencial dos estoques de água naturais (superficiais e subterrâneos) e artificiais para suprimento de demandas a múltiplos usuários em situações de restrição hídrica que podem ser agravadas pelas mudanças climáticas. A análise dessa dimensão permite identificar as áreas com menor grau de resiliência, em que um balanço hídrico deficitário é mais crítico devido à alta variabilidade pluviométrica somada à ausência de reservatórios ou de águas subterrâneas.

Figura 1 - Índice de Segurança Hídrica para o Brasil (2035)



Fonte: ANA (2021).

Desta forma, o fortalecimento da infraestrutura hídrica das regiões semiáridas para a convivência com as secas tem sido praticado com a adoção de mananciais alternativos de

abastecimento para aumentar da disponibilidade de água nessa região, incluindo mananciais subterrâneos (SILVA et al., 2019).

A gestão adequada dos recursos subterrâneos possui um papel estruturante na segurança hídrica no semiárido do Brasil. As crises recentes de abastecimento de água nas cidades entre os anos de 2012 e 2017, marcada pelas imagens de reservatórios em níveis críticos contribuíram para elevar o tema do uso dos aquíferos. Além disso, as águas subterrâneas, embora consideradas fontes suplementares do abastecimento público, atendem total ou parcialmente mais de 51% dos núcleos urbanos brasileiros, isto equivale a mais de 89 milhões de habitantes (VILLAR, 2016).

3.2 Sistemas subterrâneos para abastecimento urbano de água

Em geral, o aumento no consumo da água subterrânea está relacionado com o crescimento populacional, a expansão das grandes cidades, a expansão de atividades produtivas e, mais recentemente, em função das mudanças climáticas globais, com incidência de períodos de seca persistentes que geraram crises de água nos sistemas convencionais de águas superficiais. Em outras palavras, quando ocorrem restrições qualitativas ou quantitativas da disponibilidade hídrica superficial, os consumidores buscam as águas subterrâneas para garantir seu abastecimento. A dependência da água subterrânea de inúmeras áreas urbanas parece estar se intensificando; por exemplo, na região nordeste do Brasil, de acordo com as descobertas de Alvarado Júnior (2019), o número de poços tubulares passou de 93.339 em 2006 para 318.476 em 2017 (IBGE, 2017).

De acordo com o SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) as águas subterrâneas são utilizadas de acordo com diferentes usos, com prevalência para o abastecimento público

Tabela 1 - Principais usos de águas subterrâneas

Tipo de uso	Total	%
Abastecimento doméstico	53.024	30,81
Abastecimento doméstico/animal	22.179	12,89
Abastecimento doméstico/irrigação	1.974	1,15

Abastecimento industrial	16.887	9,81
Abastecimento múltiplo	23.165	13,46
Abastecimento urbano	26.328	15,3
Doméstico/irrigação/animal	4.733	2,75
Irrigação	8.415	4,89
Outros (lazer, etc.)	7.431	4,32
Pecuária	4.555	2,65
Sem uso	3.410	1,98
Total*	172.101	100

***Inclusos poços sem informações de tipo de uso**

Fonte: Ary Júnior (2019).

O SIAGAS é o sistema de informações criado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) em 1997 com o objetivo de armazenar, sistematizar e disponibilizar dados e informações georreferenciadas de poços no Brasil, no sentido de instituir o Cadastro Nacional de Poços.

De forma geral, no Brasil, os aquíferos apresentam água de boa a excelente qualidade natural. Contudo, regionalmente é possível identificar problemas associados ao excesso de alguns íons que podem limitar a utilização das águas subterrâneas, notadamente, nos terrenos cristalinos, concentrados no semiárido nordestino e referem-se à alta salinidade.

Afim de assegurar a qualidade das águas sejam de fontes superficiais ou subterrâneas, é necessário o controle de resíduos urbanos, agrícolas, industriais e de mineração, que sem o gerenciamento adequado, potenciais contaminantes principalmente nitratos e fosfatos podem chegar aos diversos tipos de reservatórios como barragens, rios e lagos, e dependendo das condições de textura, estrutura, estabilidade dos agregados e profundidade dos solos, a concentração destes, podem vir a contaminar as águas subterrâneas por infiltração (CORDEIRO et al., 2021).

A captação de água para o abastecimento urbano, majoritariamente, é realizada a partir de recursos hídricos superficiais (CORDEIRO et al., 2021). Contudo, o uso do recurso subterrâneo vem sendo ampliado em função das vantagens econômicas quando comparado com a água de superfície, visto que a suscetibilidade à contaminação direta eleva os custos com tratamento. Dentre as principais vantagens da água subterrânea, destaca-se (TSUTIYA, 2006):

- A facilidade de local poços próximos aos pontos de reservação e distribuição;
- A necessidade de um tratamento simplificado em razão da qualidade que na maioria das vezes é satisfatória.

Foster (2010) sugere que existem evidências significativas no que se diz a respeito da elevada dependência de águas subterrâneas para abastecimento de água em cidades em desenvolvimento. Dessa forma, para a avaliação dos sistemas subterrâneos de água para áreas urbanas, é necessária a abordagem sobre duas situações:

- Cidades onde uma parte importante do abastecimento municipal de água é proveniente de águas subterrâneas; entretanto, raramente há recursos hídricos subterrâneos suficientes dentro da própria área urbana para atender às demandas de abastecimento de água para regiões de maior porte, e a sustentabilidade na exploração destes recursos, assim, tornando em muitas vezes uma situação problemática para o abastecimento;
- Cidades com sistemas de abastecimento através de fonte superficiais, mas com uma taxa significativa de pontos de exploração das águas subterrâneas para o autoabastecimento privado *in situ*; a busca por recursos hídricos subterrâneos não se restringe às cidades com fácil acesso a aquíferos de alto rendimento, localidades onde o abastecimento de água é importado de uma fonte distante de água superficial muitas vezes de baixa confiabilidade ou alto custo, aceleram a busca por construções de poços D'água privados, como resultado de níveis de serviços de água municipais insatisfatório e/ou altos preços da água.

Embora, com a presença de diversos problemas de sustentabilidade ocasionados por atividades antrópicas e a gestão inadequada dos recursos hídricos subterrâneos, mecanismos legais foram criados ao longo dos anos para ordenar o uso e a exploração de águas subterrâneas de forma ambientalmente equilibrada.

Aos Estados cabem colocar em prática a gestão integrada das águas subterrâneas, pois estão sob o seu domínio exclusivo, de acordo com o artigo 26 da Constituição Federal. Portanto, a regulamentação das normas gerais editadas pela União deve ser realizada pelos respectivos Estados para permitir a aplicação no âmbito estadual.

No plano federal foram editados diversos atos normativos para incluir as águas subterrâneas na gestão e programas específicos, como a Agenda Nacional de Águas Subterrâneas e o Programa Nacional de Águas Subterrâneas, tais como:

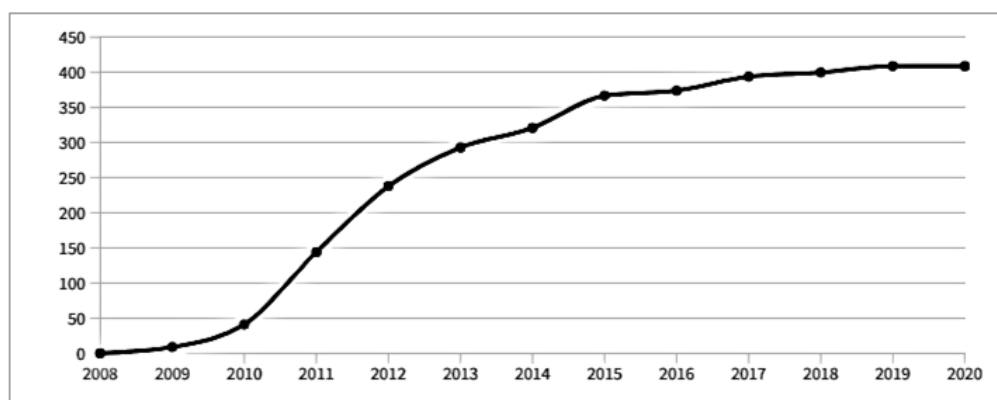
- Lei 6.938/1981, de 31 de agosto de 1981 que institui a Política Nacional de Meio Ambiente - PNMA, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação;
- Lei 9433/1997 que institui a Política Nacional de recursos Hídricos;

- Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) n. ° 303, de 2002 que dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente, inclusive conceituando nascentes como exultório de águas subterrâneas;
- CONAMA n° 335, de 2003 que Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios;
- CONAMA n. 396, de 2008 que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento de águas subterrâneas;
- Ministério da Saúde, Portaria n° 888, de 2021 que dispões de procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Porém há desafios com relação à fiscalização e a gestão adequada das águas subterrâneas. Por exemplo, processos de outorga para o controle das demandas e adequação às produções aquíferas, são estabelecidas por Lei, porém existe uma resistência por parte dos usuários sobretudo em áreas urbanas, que continuam com poços individuais não outorgados dificultando sua localização e controle de captação (CONICELLI e HIRATA, 2016).

Apesar das exigências legais, as estatísticas sobre a extração das águas subterrâneas são ainda incipientes quando comparadas com as águas superficiais. Muitos usuários das águas subterrâneas estão em condição irregular, pois não possuem outorga de recursos hídricos ou declaração de uso isento, embora nas últimas décadas essa realidade vem obtendo avanços (Figura 2). Em 2009, foi implantada pela CPRM a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), com o objetivo de acompanhar as variações espaciais e temporais quali-quantitativas das águas nos principais aquíferos brasileiros. Em 2020, a RIMAS contava com 409 pontos de monitoramento, distribuídos em 24 aquíferos em 20 unidades da federação. O número de pontos de monitoramento teve um crescimento bastante expressivo de 2008 a 2015.

Figura 2 - Evolução da quantidade de poços de monitoramento ao longo dos anos da RIMAS



Fonte: ANA (2021).

Em seu Art. 2º, a resolução N° 396/2008 do CONAMA descreve águas subterrâneas como águas que ocorrem naturalmente ou artificialmente no subsolo, e aquíferos como corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos. Afim de estabelecer padrões de qualidade, prevenção e controle de contaminação, o Art. 3º desta resolução explicita classes de qualidade de água exigidos para fontes subterrâneas de abastecimento. Assim são classificadas em:

- Classe Especial: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses destinadas à preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral e as que contribuam diretamente para os trechos de corpos de água superficial enquadrados como classe especial;
- Classe 1: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que não exigem tratamento para quaisquer usos preponderantes devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;
- Classe 2: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;
- Classe 3: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, para as quais não é necessário o tratamento em função dessas alterações, mas que podem exigir

tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;

- Classe 4: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que somente possam ser utilizadas, sem tratamento, para o uso preponderante menos restritivo;
- Classe 5: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas a atividades que não têm requisitos de qualidade para uso.

Uma discussão importante refere-se ao “autoabastecimento” utilizando poços de água construídos com recursos próprios dos usuários. Comumente, a proximidade da residência de um poço particular, combinada com baixos custos de investimento inicial, torna os poços privados uma opção atrativa para o abastecimento individual. A utilização de poços particulares, muitas vezes, não é contabilizada nas estatísticas oficiais de abastecimento de água, não são outorgados e podem ser classificados como “clandestinos”, pois não são reconhecidos pelas agências de gestão.

O uso de poços de água privados para autoabastecimento urbano cresceu rapidamente nos últimos anos (FOSTER, 2022). Nas regiões semiáridas, a prática geralmente origina como uma ‘estratégia de enfrentamento’ para a escassez hídrica, que gera um abastecimento público intermitente, racionamento de água ou colapsos de sistemas. Além disso, pode originar também em razão de baixo índice de atendimento dos serviços de água em áreas periurbanas e rurais. Estes poços privados, na maioria das vezes não são monitorados e, por conseguinte, a qualidade da água, especialmente em aquíferos rasos, pode representar risco de contaminação aos usuários.

No Brasil, a pesquisa sobre o autoabastecimento urbano realizada por Foster (2022) revelou que 35% do abastecimento total de água na última crise hídrica de São Paulo (apesar da cidade não ser atendida principalmente por fontes subterrâneas). Além disso, existem pelo menos 2,5 milhões de poços de água urbanos privados, que representam 6 a 7 vezes o investimento anual em abastecimento de água por agências governamentais.

Portanto, as águas subterrâneas são exploradas para abastecimento das cidades através de poços espalhados por áreas urbanizadas, muitos sem medidas de proteção específicas, tornando-os vulneráveis à contaminação. Neste sentido, esforços especiais devem atender o controle local de formas de contaminação das águas subterrâneas, tais como, postos de gasolina, oficinas

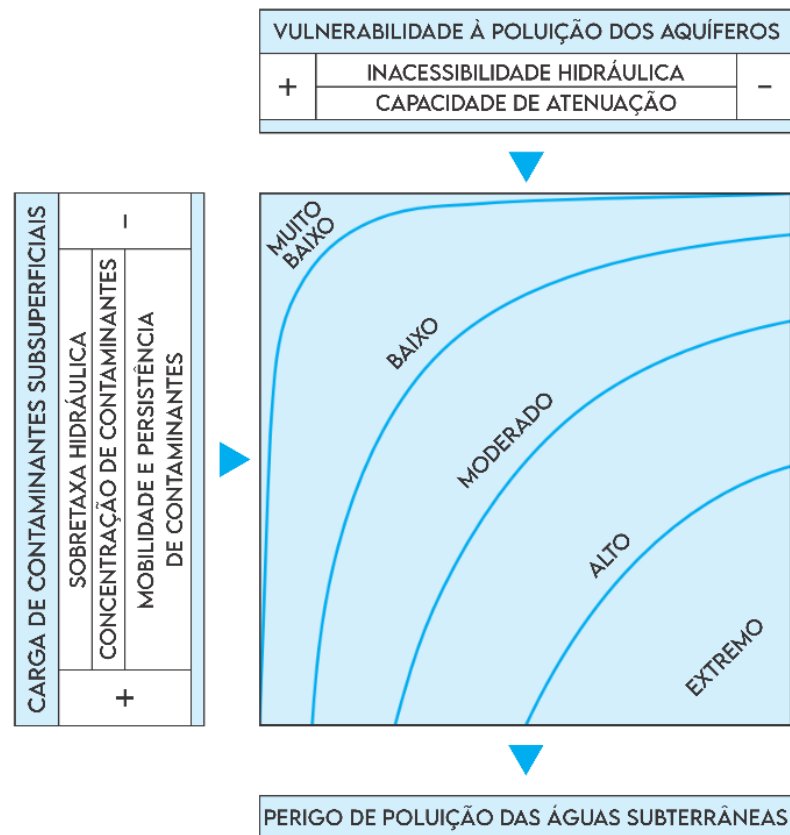
mecânicas, esgotos domésticos, entre outros. Além disso, o estado deve garantir o direito à água em quantidade suficiente, qualidade aceitável, acesso físico e econômico e protegido de eventuais poluidores principalmente em zonas de vulnerabilidade.

3.3 Fontes de contaminação e vulnerabilidade das águas subterrâneas

Define-se vulnerabilidade das águas subterrâneas como a sensibilidade da qualidade das águas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero (Figura 3); apresentando-se de forma interativa com a carga contaminante que é apresentado no meio subterrâneo através de atividades antrópicas, sejam por mineração, urbanização, desenvolvimento industrial e/ou agrícola, assim fragilizando a segurança das águas subterrâneas. (LOBO-FERREIRA, 1998; FOSTER et al., 2013).

O termo vulnerabilidade diferencia-se de risco de poluição; os riscos dependem da existência pertinente de cargas poluentes, como a presença de diversas fontes poluidoras, portanto, existe a possibilidade de encontrar fontes subterrâneas com um índice elevado de vulnerabilidade de baixo risco à poluição, assim como haver fontes com riscos de poluição elevado apesar do baixo índice de vulnerabilidade (LOBO-FERREIRA, 1998). No mesmo sentido, Kemerich et al. (2011) afirmam que o risco de poluição das águas subterrâneas consiste na associação e interação da vulnerabilidade natural do aquífero com a carga poluidora aplicada no solo ou em subsuperfície. Possibilitando situações como áreas de alta vulnerabilidade, mas sem risco de contaminação em casos de baixas cargas poluidoras.

Figura 3 - Relação entre vulnerabilidade e carga contaminante



Fonte: Foster *et al.* (2002).

Conicelli e Hirata (2016) observam a grande importância das águas subterrâneas para o desenvolvimento social e econômico da população, entretanto, há um desacordo com o conhecimento da população sobre a capacidade e o nível de exploração dos aquíferos, que em conjunto ao alto índice de perfurações de poços profundos irregulares, dificultam os desafios para uma gestão eficaz, resultando em problemas de como a diminuição da disponibilidade hídrica dos mananciais subterrâneos devido a superexploração, e a contaminação dos aquíferos devido à falta de cuidados necessários.

A irregularidade diante da exploração clandestina das águas subterrâneas vai de encontro à disponibilidade hídrica local, violando o direito de uso de terceiros e dificultando a obtenção de dados e fiscalização sobre os impactos diretos ao abastecimento público e aos usuários outorgados, embora existam direitos sobre a distribuição de recursos hídricos, isso não concede ao indivíduo permissões para a extração sem autorização e ao uso descontrolado do mesmo. Pelo contrário, esse direito assegura a transparência da gestão de forma a garantir o acesso, qualidade e quantidade destinada ao abastecimento humano (VILLAR, 2016). Com a

exploração sem moderação de água dos aquíferos podem reduzir significativamente o volume e a vazão de água disponível nos poços, assim, com a redução do nível dos lençóis freáticos acarreta na diminuição de deságue nos corpos hídricos superficiais e nascentes. E pode, ainda, causar subsidência do solo, afetando diretamente a estabilidade das construções, chegando a comprometer a estrutura em alguns casos (SERAPHIN, 2018).

A captação indiscriminada sem obediência à técnica e legislação ameaça à segurança da saúde pública dos usuários e elevam o perigo de contaminação dos aquíferos (FOSTER e HIRATA, 1993). Além de diversos fatores degradantes, Silva e Araújo (2003) afirmam que a destinação final do esgoto doméstico e industrial em fossas e tanque sépticos, a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e industriais, postos de combustíveis e de lavagem e a modernização da agricultura representam fontes de contaminação das águas subterrâneas.

Além da questão sobre a exploração sem controle dos recursos hídricos subterrâneos, deve-se atentar a suas taxas de reabastecimento de forma sustentável. É necessário identificar como diferentes tipos de recarga dos aquíferos, tendo em vista que diferentes cidades são compostas por diversos padrões de ocupação, que podem ser mais ou menos propícios a infiltração da água no solo e condições de saneamento seguras, essencial para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos, pois identifica as atividades humanas com maior probabilidade de impactos negativos no aquífero e, portanto, indica a priorização das medidas necessárias de controle e mitigação, impactos gerados pela urbanização que levam a intrusão de contaminantes no solo, gerando redução da qualidade da água subterrânea, meio de processos de recarga não intencionais (FOSTER et al., 2002; SERAPHIN, 2018).

Para Marsalek et al., (2008) as principais fontes contaminadoras dos aquíferos por meio de recarga não intencionais nas cidades são:

- Aterros antigos ou lixões;
- Tanques e lagoas de tratamento;
- Tanques subterrâneos de combustível;
- Águas residuais;
- Transporte de água contaminada em canais abertos e rios;
- Industrias;
- Locais de enterro de humanos e animais.

A recarga intencional dos aquíferos vem se desenvolvendo através da aplicação e desenvolvimento de técnicas de drenagem sustentável, elevando pontos de retenção e infiltração da água da chuva a partir da conservação ou reabilitação de ecossistemas naturais (SERAPHIN, 2018).

As principais técnicas de drenagem sustentável existentes, que auxiliam na infiltração da água, são (HINMAN, 2012):

- Sistemas de infiltração, como valas, células, trincheiras;
- Bacias de bioretenção ou jardins de chuva;
- Compostagem dos solos perturbados.

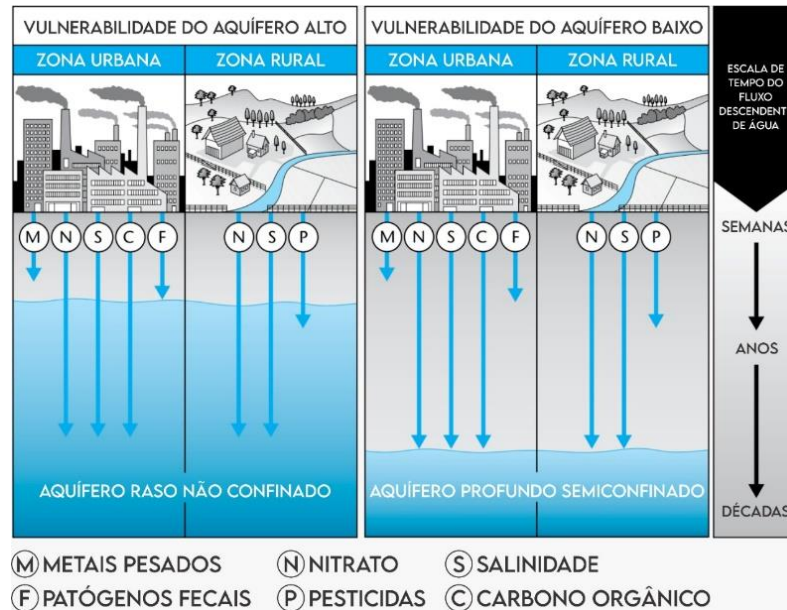
Impactos na diminuição das taxas de infiltração natural de águas pluviais, estão relacionados com mais intensidade devido às características de tipologias morfológicas de ocupação do solo, enquanto os impactos que envolvem a recarga artificial e intrusão de contaminantes no solo, envolvem-se diretamente com características da gestão da ocupação (SERAPHIN, 2018).

Assim como múltiplos usos e tipos de ocupação do território em conjunto com as condições geológicas das cidades contribuem para problemas de contaminação de aquíferos, principalmente em áreas urbanas, por meio de vazamento de esgotos das redes coletoras que podem estar ocorrendo, já que a situação de grande parte das cidades brasileiras a instalação das redes de esgoto precedeu a década de 1990, em vista disso, estudos desenvolvidos em aquíferos sob cidades providas de redes de esgoto têm mostrado que os casos de contaminação se concentram nas seguintes condições (HIRATA, et al., 2019):

- Áreas de maior densidade populacional;
- Áreas de redes de esgoto mais antigas, pois as taxas de vazamento são maiores devido à falta de manutenção correta, impactos mecânicos causados pela acomodação dos solos, variação de fluxo do efluente, e corrosão dos materiais instalados;
- Porções mais rasas do aquífero;

A Figura 4 revela os fluxos de contaminantes em aquíferos subterrâneos em áreas urbanas e rurais.

Figura 4 - Fluxo de contaminantes em aquíferos

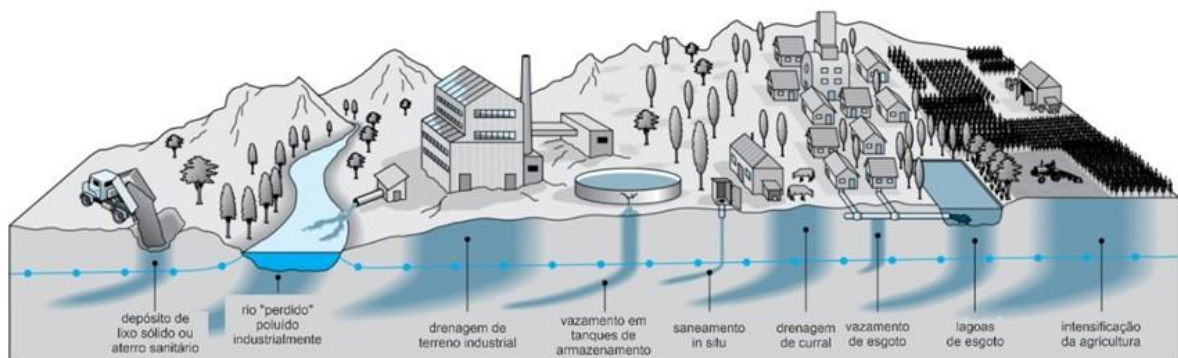


Fonte: Foster *et al.* (2002).

O fluxo dos aquíferos e o transporte de contaminantes é de difícil observação e medição, pois geralmente ocorre em um lento processo, em consequência disso, ocorre uma falsa sensação de segurança sobre os riscos de uma possível contaminação, em especial entre os administradores dos recursos hídricos e solos (FOSTER e HIRATA, 1993).

Portanto os riscos de degradação causado pelas diversas possíveis fontes de contaminações (Figura 5) precisam ser criteriosamente estabelecidas, sobrepondo mapas de vulnerabilidade, perímetros de proteção de poços e mapas de localização de possíveis fontes de contaminação, com esses dados e informações facilitam o planejamento, exploração e proteção dos recursos hídricos existentes na região de maneira mais eficiente (GUIGUER e KOHNKE, 2020).

Figura 5 - Fontes de contaminação das águas subterrâneas



Fonte: Foster *et al.* (2002).

As ações para a proteção de águas subterrâneas estão relacionadas a estratégias ligadas a quatro grandes pilares (HIRATA et al., 2019):

- i. Comunicação visando à conscientização da sociedade e do governo sobre o real papel socioambiental e valor econômico das águas subterrâneas;
- ii. Investimentos em órgãos de controle e gestão dos recursos hídricos, principalmente em fortalecer ações de fiscalização e disciplina do uso das águas;
- iii. Ampliação da cobertura da rede de coleta e tratamento de esgotos;
- iv. Criação de programas permanentes de proteção das águas subterrâneas, baseados em pesquisa e estudos técnicos. Sendo assim, recomendam-se:
 - a) Fortalecimento de práticas de gestão integrada de recursos hídricos, como preconizada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), abrangendo as áreas de saneamento e águas subterrâneas e o planejamento territorial e das atividades econômicas e o meio ambiente;
 - b) Incentivar estudos hidrogeológicos, com o objetivo de identificar oportunidades de exploração sustentável para ampliação da oferta de água para a sociedade, a partir de investimentos em pesquisa e monitoramento do recurso;
 - c) Proporcionar a inclusão dos prestadores de serviços públicos de saneamento em parcerias com órgãos de governo e comitês de bacia para a execução de políticas públicas voltadas à gestão das águas subterrâneas, por meio de planos de monitoramento e fiscalização conjuntos.
 - d) Criar programas de identificação de áreas críticas do recurso hídrico subterrâneo, ou seja, onde os aquíferos apresentam maior perigo de contaminação e de superexploração, como forma de orientar as políticas de proteção das águas subterrâneas.
 - e) Fortalecer as fiscalizações e a implantação de redes de esgoto e estações de tratamento priorizando a novas áreas de ocupação humana em detrimento às áreas de ocupação urbana mais antigas, em pontos mais antigos das cidades com o avançado processo de contaminação as companhias de saneamento deveriam implementar programas sistemáticos de reparação e substituição de tubulações antigas.

- f) Abordar o tema águas subterrâneas e o recurso hídrico subterrâneo para a formação acadêmica de profissionais universitários e técnicos por meio de novos cursos. Com o grande potencial de pesquisa as universidades e centros de pesquisa devem promover a capacitação e atualização do tema no setor.
- g) Reforçar programas de conscientização aos usuários de águas subterrâneas sobre as necessidades de regularização dos poços e sobre os impactos da perfuração e extração irregular das águas.

Em razão da vulnerabilidade das águas subterrâneas, especialmente em áreas urbanas em crescente desenvolvimento, é imprescindível adotar uma 'abordagem adaptativa' para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, baseada, em monitoramento contínuo dos níveis das águas subterrâneas, tendências de qualidade para cenários futuros de captação de água subterrânea mais sustentáveis. Além disso, as técnicas para mapeamento de índices de vulnerabilidades são igualmente importantes para gerar apoio ao planejamento ambiental, com vistas à gestão das águas subterrâneas locais.

3.4 Mapeamento de índices de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos

Segundo Bandeira (2004), a partir de métodos de obtenção de índices de vulnerabilidade de fontes de abastecimento subterrâneo torna-se possível a construção de mapas de vulnerabilidade para áreas de interesse, propiciando uma importante ferramenta de avaliação da contaminação das águas subterrâneas, planejamento do uso do solo, gerenciamento de resíduos sólidos, assim como na criação de redes de monitoramento e contaminação

Segundo Foster (2002), tendo em vista que a carga contaminante pode ser controlada, a política de proteção das águas subterrâneas deve se concentrar em alcançar o controle necessário, (1) prevenindo futuras contaminações através da análise de mapas de vulnerabilidade sobre possível expansão área urbana ou de área industrial sobre pontos de fragilidade, os mapas de vulnerabilidade é uma importante ferramenta para reduzir o risco de poluição das águas subterrâneas identificando áreas mais vulneráveis à poluição, de modo que a localização de atividades potencialmente perigosas pode ser evitada ou proibida. (2) Lidando com as fontes de poluição existentes, priorizando medidas de contenção em áreas onde há a

existência de atividades potencialmente poluidoras. (3) A seleção de novas áreas de abastecimento de água subterrânea, a dinâmica para disponibilizar novos pontos de abastecimento de água subterrânea devem envolver o mesmo procedimento recomendado para avaliar o risco de poluição para as fontes existentes de água subterrânea, ou seja, reforçando a importância do mapeamento que evidenciam os pontos desfavoráveis de exploração.

Assim, a seleção de uma determinada metodologia para prever vulnerabilidade de aquíferos à contaminação depende, muitas vezes, da quantidade de informações disponíveis, assim como o objetivo de trabalho, da escala e dos recursos disponíveis para essa determinação. Existem casos em que uma região possui particularidades em que a metodologia proposta possa sofrer modificações ou adaptações para fornecer resultados de vulnerabilidade mais seguros e confiáveis para uma dada área. (GUIGUER e KOHNKE, 2020).

Nos últimos anos, diversos métodos de mapeamento de vulnerabilidade foram desenvolvidos, todavia, suas fórmulas foram fundamentadas em diferentes critérios físicos e geológicos, dessa forma, uma área em específico é abordada por diferentes métodos, os mapas e resultados obtidos apresentam zonas de vulnerabilidades diferentes (DA COSTA, 2022). Em posse de valores de índices de diferentes metodologias de análise de vulnerabilidade, torna-se possível uma análise com diferentes interpretações e comparações de resultados, assim contribuindo para uma melhor avaliação da área de estudo, revelando cada particularidade dos métodos assim como suas vantagens e desvantagens (SCHMIDT, 2020).

Dessa forma, diversos trabalhos nesta temática foram realizados a partir de diferentes métodos como GOD, DRASTIC, AVI (Tavares et al., 2009; Alvarado. et al. 2016; Guiguer e Kohnke, 2020; Salgado et al., 2018).

A vulnerabilidade natural à contaminação inclui as características de configuração ambiental que naturalmente possibilitam a modificação da qualidade da água subterrânea.

Dentre os métodos existentes para determinação da vulnerabilidade natural, dois métodos se destacam: o método “GOD”, que engloba a vulnerabilidade naturalmente presente no ambiente (FOSTER e HIRATA, 1988), e o método DRASTIC (ALLER et al., 1987). De forma geral, essas metodologias utilizam índices de diferentes classes os quais são multiplicados aos pesos dos seus respectivos fatores. Em seguida, os valores dos diferentes fatores são somados gerando o índice de vulnerabilidade.

O método GOD (FOSTER e HIRATA, 1988) corresponde a uma das técnicas de determinação de vulnerabilidade mais utilizadas devido a sua simplicidade de conceitos e implementação, uma vez que utiliza dados básicos de estudos hidrogeológicos.

A utilização de ferramentas SIG, possibilitam a realização de pesquisas e a emissão de diversos tipos de relatórios, segundo o foco e interesse dos setores, projetos, planejamento, e avaliação em setores de administração, por exemplo integrando informações relativas às características das redes de infraestrutura como iluminação pública, gás, abastecimento de água, esgotamento sanitário, sistemas de sinalização, ou em casos mais específicos como a incidência de doenças epidemiológicas, ocorrências policiais, entre tantas outras (DOMINGUES, 2007).

Tavares et al., (2009), buscaram classificar o nível e o mapeamento frente a vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea numa região limitada da Bacia Sedimentar do Araripe no estado do Ceará, com a utilização do Método GOD. Revelando que a área de estudo apresenta vulnerabilidade à contaminação predominantemente variando de média à alta, atenuando a necessidade de desenvolvimento e implantação do zoneamento de proteção do manancial.

Alvarado et al., (2016) realizaram um estudo multicriterial em conjunto ao Sistema de Informações Geográficas (SIG) para a identificação e classificação das fontes de abastecimento de água para consumo humano, considerando aspectos naturais pela metodologia GOD, antropológicos e técnicos no aquífero Vale de Toluca, no México.

Guiguer e Kohnke (2020), promoveram uma análise comparativa entre métodos de vulnerabilidade nas cidades canadenses de Ottawa pelo método DRASTIC e Ontário pelo método AVI e na cidade de Caçapava -SP com a utilização da metodologia GOD, evidenciando as características de cada um dos métodos utilizados. Onde concluiu-se que a metodologia mais completa é a DRASTIC, onde são considerados 7 parâmetros de análise. A metodologia AVI considera o potencial de recarga (condutividade hidráulica, gradientes hidráulicos e porosidade) junto a profundidade do lençol freático, portanto, com a consideração de recarga ao aquífero faz com que esta metodologia seja melhor aplicada em algumas situações. A metodologia GOD é a mais simplificada, onde observou-se que as principais desvantagens da metodologia GOD é o fato de não utilizar a hidráulica recarga nos cálculos para obter o índice de vulnerabilidade.

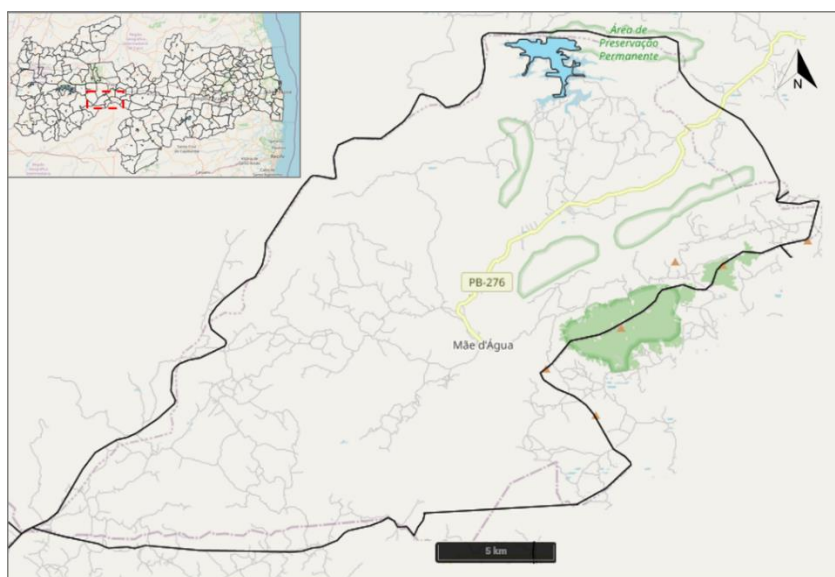
Salgado et al., (2018) avaliaram a influência do lançamento de esgoto na qualidade da água explorada do aquífero Sucuru localizado no município de Sumé, estado da Paraíba. Os resultados dos indicadores mostraram que o aproveitamento da água desse tipo de aquífero, que

vem se intensificando nas últimas secas anos e pode ser estabelecido de forma segura e sustentável, contudo um plano de monitoramento para controlar os níveis de recarga das águas subterrâneas é imprescindível.

4 ÁREA DE ESTUDO

A escolha da área de estudo, foi determinada por características regionais presentes no alto sertão paraibano, sujeitando sua população a criar estratégias para convivência com a seca, dessa forma, resultando em condições de fragilidade hídrica. Portanto o espaço de estudo compreende o município de Mãe D'água (Figura 6), situado no sertão do estado da Paraíba, que detém área de 228,676 km², e distante 340 km da capital João Pessoa. O município limita-se com os municípios de Catingueira, Imaculada, Matureia, Olho D'água, São José do Bonfim, Santa Terezinha e Teixeira. O município possui uma população de 4.019 habitantes e apenas 40% desta vive na área urbana. A agricultura constitui a principal atividade econômica, seguida da pecuária e comércio (IBGE, 2010).

Figura 6 - Localização do município de Mãe D'água - PB



Os dados do mapeamento do saneamento mostram que 39% da população total é atendida através do sistema público de abastecimento de água. O índice de atendimento urbano de água é de 99,95%, enquanto que o índice de perdas é de 16% (SNIS, 2020). Não foram observados índices para o esgotamento sanitário. Em relação à segura hídrica, o Atlas Águas (ANA, 2021), revela que o Índice de Segurança Hídrica – ISH é classificado como médio e a eficiência da produção de água é classificada como mínima. A vulnerabilidade do manancial e do sistema produtor se enquadra, respectivamente, como alta vulnerabilidade e sistema produtor satisfatório. Ainda de acordo com o referido atlas, o plano de ação para o município em relação

à segurança hídrica prevê infraestrutura que requer estudo de alternativas através de novo manancial.

Os solos da região são resultantes da desagregação e decomposição das rochas cristalinas do embasamento, sendo em sua maioria do tipo Podizólico Vermelho-Amarelo de composição arenoargilosa, apresentando em algumas localidades latossolos e solos de aluvião. Sua vegetação é de pequeno porte, típica de caatinga xerofítica, onde se destaca a presença de cactáceas, arbustos e árvores de pequeno a médio porte (CPRM, 2005).

O município de Mãe D'água-PB está localizado no denominado polígono das secas, com índice pluviométrico baixo e irregular com médias anuais em torno de 746,9mm/ano. O polígono das secas, ocupa área da caatinga ocupando uma área de cerca de 750.000 Km², abrangendo principalmente estados da região nordeste (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Sergipe e Bahia) e parte do estado de Minas Gerais (CPRM, 2005; ALVES et al., 2009).

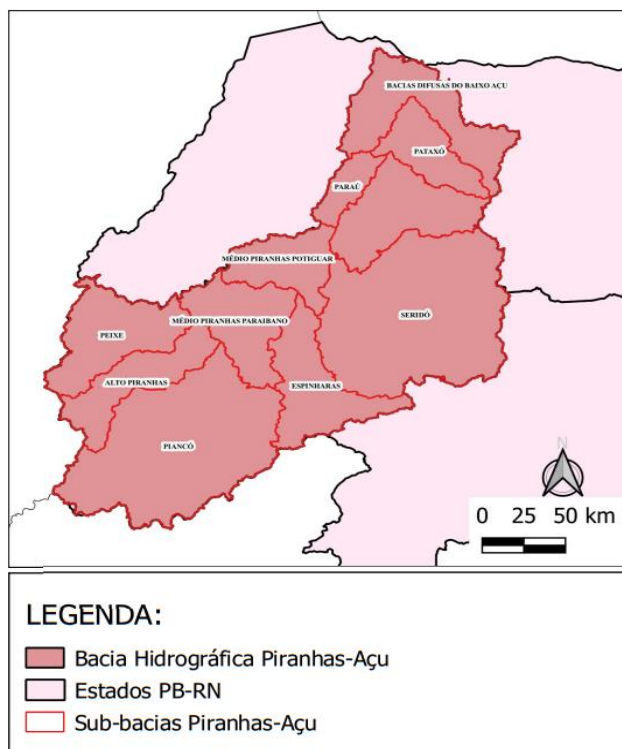
A importância de seus cursos D'água constituem afluentes das sub-bacias dos rios Rio Piancó e Espinharas. Seu relevo encontra-se na denominada "Planície Sertaneja", ou seja, integrado a um extenso pediplano arrasado, porém, constituído por um conjunto de serras alongadas e alinhadas ao longo da estrutura geológica regional que se estende dos municípios de Manaíra-PB a Teixeira-PB, onde destaca-se o parque estadual Pico do Jabre com 1.197m, o ponto culminante do Estado da Paraíba (CRPM, 2005).

4.1 Bacias hidrográficas

A área de estudo está inserida na sub-bacia do rio Espinharas, a qual faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. Esta última está situada na região semiárida do Nordeste brasileiro, no qual 40,6% localiza-se no estado do Rio Grande do Norte e 59,4% no estado da Paraíba (Figura 7). A referida bacia hidrográfica está dividida em 11 (onze) sub-bacias, conforme as informações da Tabela 1 (ANA, 2014).

A sub-bacia hidrográfica do Espinharas (SBHE) encontra-se nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. O principal rio que está sobre domínio da SBHE é o Rio Espinharas, abastecidos pelas águas do Rio da Cruz e do Rio Farinha, formando um dos principais afluentes do médio curso do Rio Piranhas-Açu. (VASCONCELOS, 2014; ANA, 2014).

Figura 7 - Bacia hidrográfica Piranhas-Açu e suas sub-bacias



Fonte: Adaptado de ANA (2014).

Os dados da Tabela 2 mostram as características básicas das sub-bacias que compõem a grande bacia do rio Piranhas-Açu.

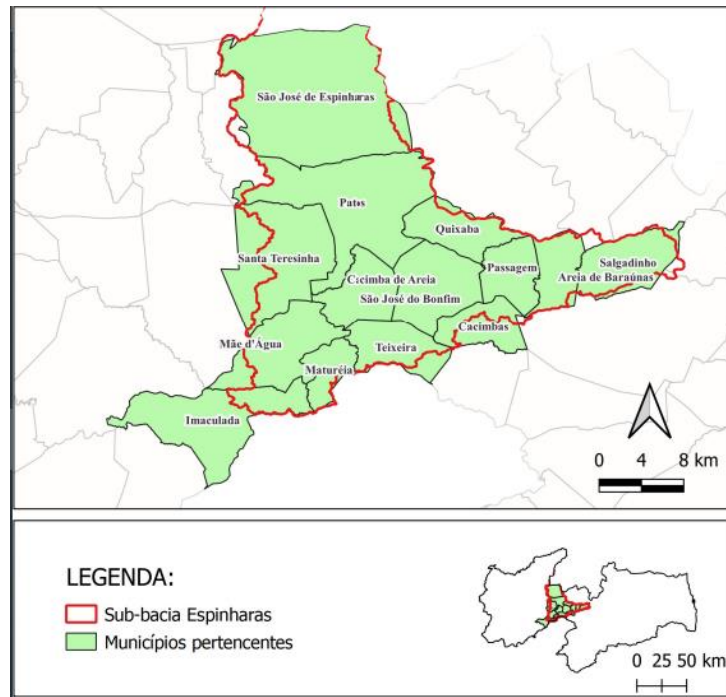
Tabela 2 - Sub-bacias componentes da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu

Sub-Bacias	Área (Km ²)	Área (%)	Nº de municípios	Rio principal
Piancó	9.207,00	21,1%	41	Piancó
Alto Piranhas	2.562,00	5,9%	19	Piranhas
Peixe	3.428,00	7,8%	23	Rio do Peixe
Espinharas	3.291,00	7,5%	28	Espinharas
Médio Piranhas Paraibano	2.894,00	6,6%	24	Piranhas-Açu
Seridó	9.923,00	22,7%	44	Seridó
Médio Piranhas Paraibano/Potiguar	2.245,00	5,1%	14	Piranhas-Açu
Médio Piranhas Potiguar	3.536,00	8,1%	19	Piranhas-Açu
Paraú	974,00	2,2%	8	Paraú e Piranhas-Açu
Pataxó	1.954,00	4,5%	11	Pataxó e Piranhas-Açu
Bacias Difusas do Baixo Piranhas	3.668,00	8,4%	15	Piranhas-Açu

Fonte: Adaptado de ANA (2014).

No estado da Paraíba, 14 municípios compõem a SBHE; Areia de Baraúnas, Assunção, Cacimba de Areia, Cacimbas, Mãe D'água, Passagem, Patos, Quixaba, Salgadinho, Santa Luzia, Santa Teresinha, São José de Espinharas, São José do Bonfim, e Teixeira como apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Municípios paraibanos inseridos na SBHE



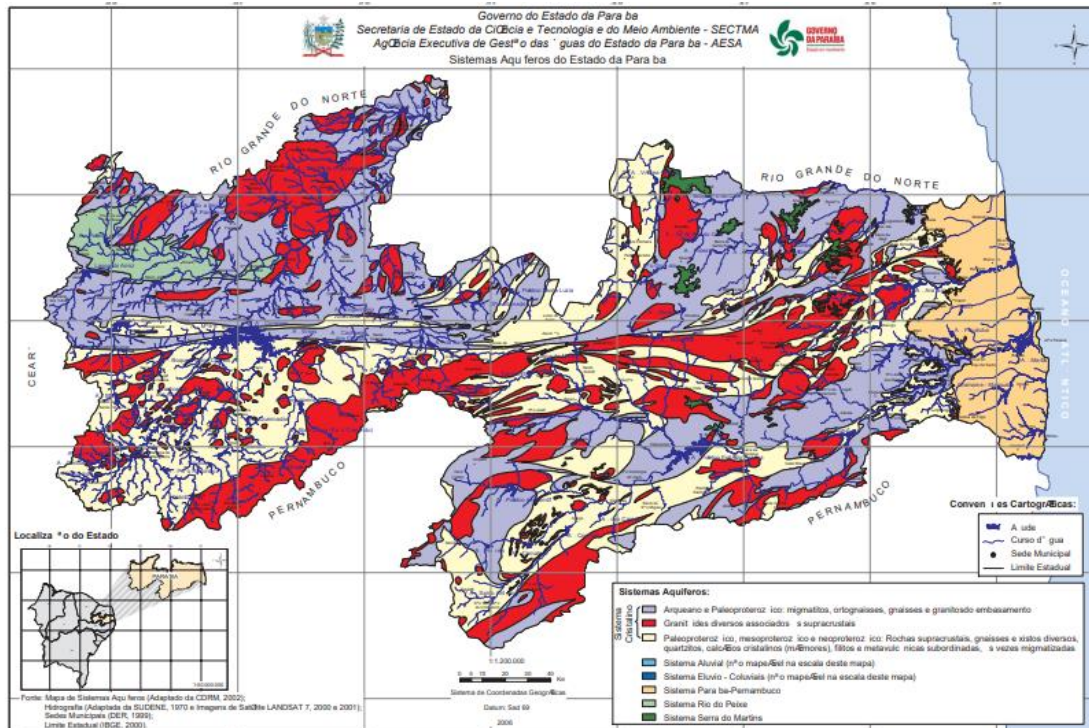
Fonte: Adaptado de AESA.

4.2 Litologia

Sistemas de aquíferos apresentam diversas formas de armazenamento, recarga, circulação e descarga, que podem estar presentes em um ou mais tipos de formações geológicas.

No estado da Paraíba, encontra-se os seguintes sistemas aquíferos (Figura 9): Cristalino, Rio do Peixe, Paraíba-Pernambuco, Serra dos Martins, Aluvial e Elúvio-coluvial. Com a predominância do sistema do aquífero cristalino de área de ocupação de 87% do território paraibano, presente desde o Agreste até o Sertão, passando pelas regiões do Cariri, Curimataú e Brejo, resultando em poços de baixas vazões e água na maior parte salinizada (AESAs, 2016).

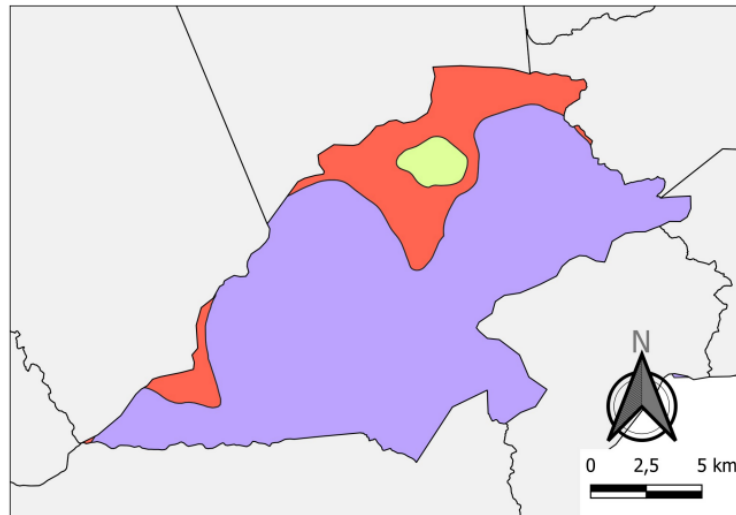
Figura 9 - Sistemas aquíferos do estado da Paraíba



Fonte: AESA (2006).

O sistema cristalino caracteriza-se pela presença de zonas fraturadas e litologias predominantemente de idades paleoproterozóicas a neoproterozóicas, com presença de rochas metaígneas, compostas por granitoides, gnaiesses, granulitos e migmatitos; rochas metassedimentares, compostas por xistos, filitos, quartzitos e ardósias; e diversos tipos de rochas metavulcânicas (AESA, 2006). No cristalino, a água subterrânea ocorre em sistemas interconectados de fendas, fraturas e discontinuidades, formando reservatórios descontínuos, aleatórios e com extensões limitadas. Estas reservas de água ocorrem através de zonas com predominância de água doce intercaladas por zonas com predominância de água salobra ou salgada, além disso, o comportamento heterogêneo e anisotrópico na hidrogeologia dos meios fissurados está ligado diretamente à escala de observação e, portanto, pode dizer que praticamente cada poço representa um “aquífero” diferente, com características próprias. (FEITOSA e DINIZ, 2011). A Figura 10 apresenta a litologia no município de Mãe D’água-PB, formada pela presença de silte transicional, rochas supracrustais e silte calcialcalina.

Figura 10 - Litologia no município de Mãe D'água - PB



LEGENDA:

- Sítio transicional: leucogranito e biotita-hornblenda sienito.
- Rochas Supracrustais: Gnaisses, xisto, metatufo, quartzitos, calcários cristalinos.
- Sítio Calcálcico: granito, quartzito, diorito e tonalito.

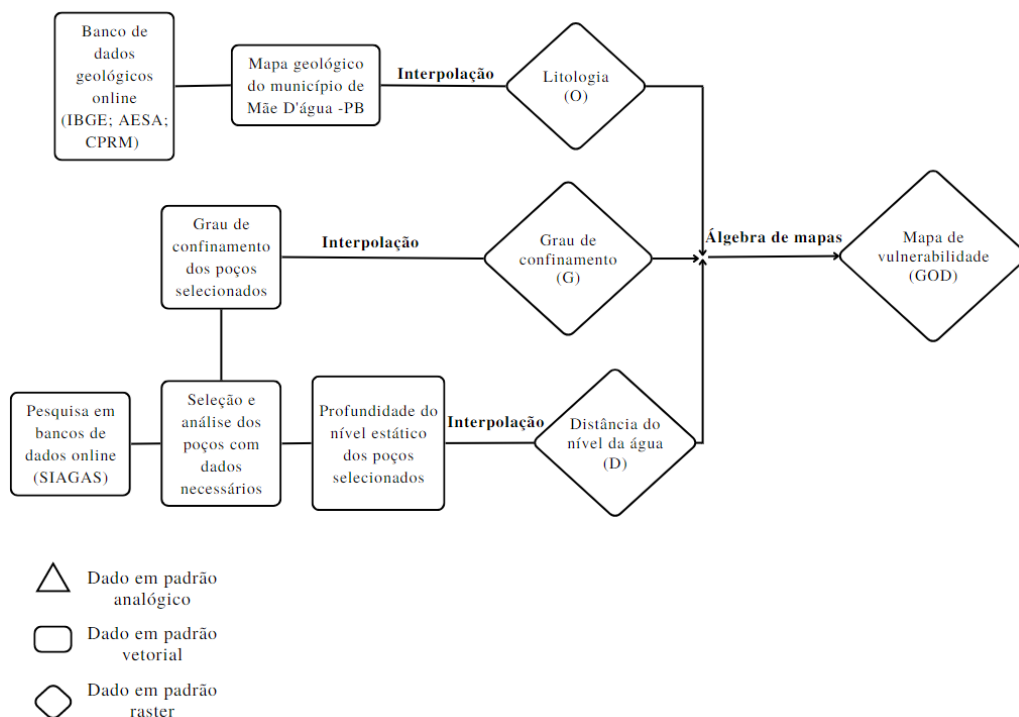
Fonte: Adaptado de CPRM (2005).

5 ÁREA DE ESTUDO

O mapeamento da vulnerabilidade à contaminação da área de estudo foi obtido através da determinação do índice “GOD” desenvolvido por Foster e Hirata no ano de 1988, onde retorna um índice de vulnerabilidade através da multiplicação de três parâmetros; “G” Grau de confinamento de água subterrânea (Groundwater occurrence), “O” Classificação litológica da zona vadosa (Overall aquifer class), “D” Profundidade do lençol freático (Depth to groundwater table).

Os principais procedimentos metodológicos podem ser observados na Figura 11 e estão descritos nas alíneas seguintes.

Figura 11 - Procedimentos metodológicos para obtenção do mapa de vulnerabilidade natural do aquífero



5.1 Levantamento de dados e processamento cartográfico

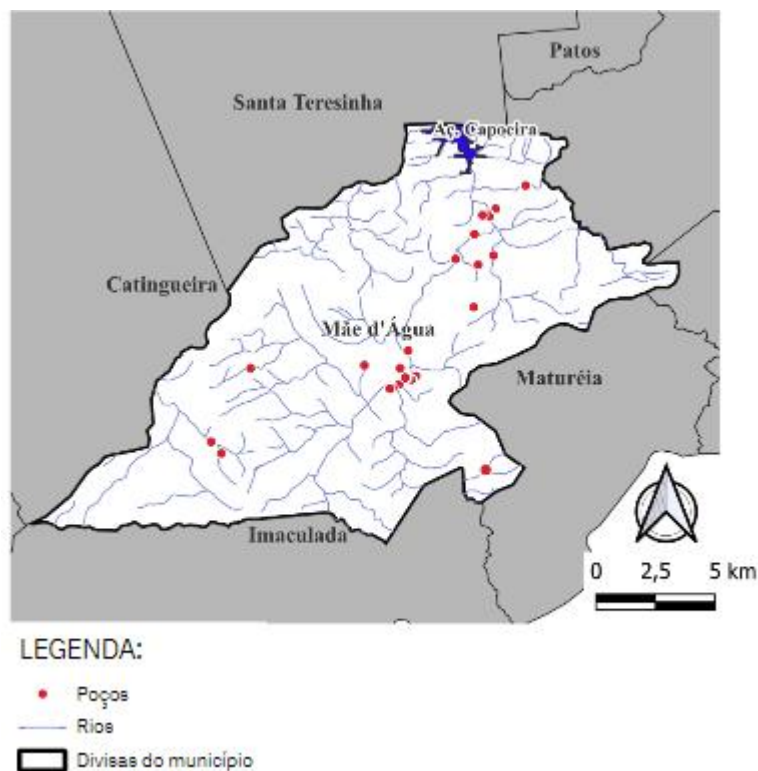
A obtenção do mapeamento da vulnerabilidade à contaminação da área de estudo se deu em ambiente de Sistemas de Informações geográficas (SIG) através do software Q GIS 3.28.0. Foram utilizadas as seguintes bases de dados:

- Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba (AESAs);
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS);
- Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM).

Através de um conjunto de informações foi elaborado um banco de dados com as informações necessárias para a aplicação da metodologia proposta.

Inicialmente, foi obtido um mapeamento com a localização dos poços no município de Mãe D'água-PB a partir do banco de dados de poços fornecidos pelo SIAGAS. Dessa forma os poços selecionados distribuem-se, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Localização dos poços no município de Mãe D'água - PB



Fonte: Adaptado do SIAGAS

Os valores referentes aos índices G e D foram obtidos após a análise da base de dados disponibilizada pelo SIAGAS, contabilizando um total de 25 poços, atribuindo os índices conforme descritos na Tabela 3. Adotou-se as seguintes convenções para os três parâmetros utilizados na determinação do referido índice GOD:

Para o parâmetro Grau de confinamento (G): poços profundos foram considerados como confinados e poços escavados foram definidos como não-confinados. Ressalta-se a presença elevada de poços rasos escavados em encostas dos principais rios do município.

As atribuições para o índice Profundidade do lençol freático (D), concentrou-se nos dados do nível estático dos poços, também disponíveis no catálogo de dados do SIAGAS.

Para o índice Litologia da zona vadosa (O), os dados estratigráficos do município foram observados e atribuídos valores para as áreas de abrangência litológicas correspondentes à área de estudo. Esta análise foi realizada através de informações presentes na base de dados e mapas geológicos disponibilizados pela AESA e IBGE, favorecendo uma análise cartográfica e detalhamentos lito geológicos de todo o território paraibano, que em conjunto ao estudo executado no ano de 2005 pela CPRM “Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea” em consonância com as diretrizes do Governo Federal e dos propósitos apresentados pelo Ministério de Minas e Energia, diagnosticou o município de Mãe D’água-PB em aspectos fisiográficos, geológico, detalhamento quantitativo e qualitativo dos poços cadastrados no território.

Tabela 3 - Valores dos critérios definidos para o método GOD do município de Mãe D’água - PB

Ref. de Ponto (SIAGAS)	Localidade	Nível Estático (m)	G	O	D
2600030475	Sítio Chico Antônio	8,70	0,2	0,6	0,8
2600005428	Exu	8,00	0,2	0,6	0,8
2600005426	Mãe D’água	7,00	0,2	0,6	0,8
2600045291	Mãe D’água	7,00	0,2	0,6	0,8
2600045296	Distrito de Santa Maria	6,00	0,6	0,6	0,8
2600030479	Sítio Jatobá	5,70	0,6	0,6	0,8
2600005427	Distrito de Santa Maria	5,00	0,2	0,6	0,8
2600030459	Fazenda Beira Rio	4,70	0,7	0,6	0,9
2600030468	Sítio Cacimba de Pedra	4,64	0,7	0,6	0,9
2600030470	Sítio Vila Capoeira	4,18	0,2	0,6	0,9
2600045295	Mãe D’água	4,00	0,7	0,6	0,9
2600030461	Sítio Mãe D’Água	3,96	0,2	0,6	0,9
2600030481	Sítio Pedraria	3,89	0,7	0,6	0,9
2600030477	Sítio III Juazeiro	3,62	0,2	0,6	0,9
2600030480	Sítio Jatobá	3,60	0,7	0,6	0,9
2600030472	Sítio Novo Terto	3,40	0,7	0,6	0,9
2600005379	Distrito de Santa Maria	3,00	0,2	0,6	0,9

2600045292	Distrito de Santa Maria	3,00	0,7	0,6	0,9
2600030464	Sítio Mãe D'Água	3,00	0,7	0,6	0,9
2600030460	Sítio Mãe D'Água	2,95	0,7	0,6	0,9
2600030467	Distrito de Santa Maria	2,88	0,7	0,6	0,9
2600030463	Sítio Mãe D'Água	2,78	0,7	0,6	0,9
2600030471	Sítio Vila Capoeira	2,10	0,7	0,6	0,9
2600045297	Mãe D'água	2,00	0,7	0,6	0,9
2600005598	Santo Aleixo	0,00	0,2	0,6	0,9

Fonte: Autoria própria

Após as atribuições dos valores necessários, os dados foram lançados no ambiente SIG. A conversão de formato vetorial para o formato *raster* foi realizada mediante interpolação espacial, possibilitando a representação das informações espaciais através de uma grade de informações para possibilitar a combinação entre os critérios G, D e O. A interpolação espacial permite calcular o valor de uma variável em uma posição do espaço através de diferentes métodos. A metodologia escolhida foi o método do Inverso Ponderado da Distância (Inverse Distance Weighted - IDW), que em síntese, consiste em atribuir um peso para cada ponto amostrado vizinho, em função da distância que ele se encontra do ponto em que se deseja calcular (MENEGOL, 2004). A combinação entre os critérios foi apoiada pela técnica de álgebra de mapas através da interação algébrica entre os mapas anteriormente objetificados. Dessa forma, permitindo a construção do mapa de vulnerabilidade. Segundo Medeiros *et al.*, (2011), a técnica de álgebra de mapas utiliza os próprios mapas ou planos de informação que representam as variáveis para realizar operações algébricas, ou seja, cada valor associado a uma camada de mapa ou a uma célula representa as variáveis que serão somadas, subtraídas, multiplicadas, entre outras, quando comparação à álgebra convencional.

5.2 Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação

Conforme explicitado anteriormente, a metodologia GOD foi selecionada para avaliação da vulnerabilidade devido a sua simplicidade de aplicação e ao baixo número de parâmetros exigidos. Dessa forma, é possível seu uso em ambientes de baixa disponibilidade de dados. GOD é um método de sistema de classificação que avalia a vulnerabilidade por meio de três critérios:

1. G (Groundwater occurrence): Grau de confinamento de água subterrânea. Analisa-se o tipo de aquífero, podendo ser livre, confinado ou semi-confinado;
2. O (Overall aquifer class): Classificação litológica da zona vadosa e camadas formadoras do aquífero, proporcionando analisar a capacidade de atenuação que a própria estrutura do aquífero possui para com o poluente;
3. D (Depth to groundwater table): Profundidade do lençol freático, considera-se a distância da superfície do terreno do aquífero até o início de sua zona saturada (Foster e Hirata, 2022).

Para a estimativa da vulnerabilidade a partir desta metodologia, multiplicam-se cada um dos três critérios que possuem a mesma relevância de ponderação no cálculo. Dessa forma, o índice de vulnerabilidade é determinado através do produto dos valores dos índices obtidos na caracterização dos parâmetros e classes apresentados na Tabela 4. A fórmula matemática empregada para a obtenção do índice de vulnerabilidade é dada pela Equação 1.

$$\text{índice de vulnerabilidade do aquífero} = G \cdot O \cdot D \quad (\text{Equação 1})$$

Tabela 4 - Caracterização dos parâmetros e índices do método GOD

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	ÍNDICE
Grau de Confinamento (G)	Nenhum	0
	Fluxo ascendente jorrante	0 - 0,2
	Confinado	0,2 - 0,4
	Não confinado-coberto	0,4 - 0,6
	Não confinado	0,6 - 1
Litologia da Zona Vadosa (O)	Argila lacustrina estuariana, solos residuais;	0,4
	Silte, loess, till, glacial, xisto, lamito;	0,5
	Areia eólica, siltito, tufo vulcânico, formações magmáticas/metamórficas e vulcânicas mais antigas	0,6 - 0,8
	Areia aluvial e fluvioglacial, arenito, lava vulcânica recente	0,8
	Cascalho de leque aluviais, calcário, calcarenito, calcrete + calcário	0,8 - 1
Profundidade do lençol freático (D)	>50m	0,6
	20m à 50m	0,7
	5m à 20m	0,8
	< 5m	0,9

Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (2002)

O resultado final retorna a um índice de vulnerabilidade que varia de 0 a 1 (Tabela 5). Os valores dos índices podem ser correspondidos em cinco classes de vulnerabilidade: Desprezível, Baixa, Moderada, Alta e Extrema.

Tabela 5 - Definição de classe de vulnerabilidade do método GOD

CLASSE	INTERVALO	DEFINIÇÃO CORRESPONDENTE
Insignificante /Desprezível	0 - 0,1	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação);
Baixa	0,1 - 0,3	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, em longo prazo, quando continua e amplamente lançados ou lixiviados;
Média/Moderada	0,3 - 0,5	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Alta	0,5 - 0,7	Vulnerável a muitos contaminantes, exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados em muitas condições de contaminação
Extrema	0,7 - 1	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação

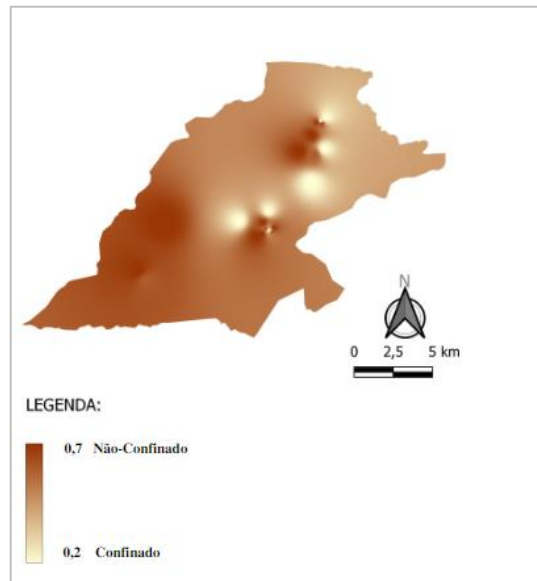
Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (2002)

Os maiores valores do índice correspondem às áreas mais vulnerável à poluição, enquanto que os valores mais baixos correspondem a área menos vulnerável.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

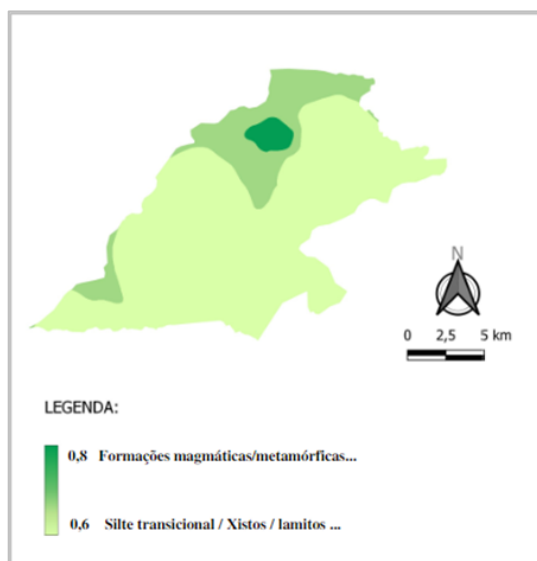
Através do fluxo metodológico, foram obtidos os mapas dos critérios G, O e D. Representados pelas figuras: Figura 13, Figura 14 e Figura 15, respectivamente.

Figura 13 - Mapa de caracterização quanto ao grau de confinamento hidráulico (G)



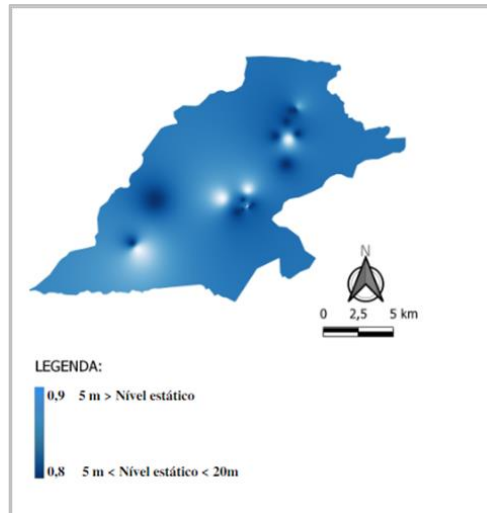
Fonte: Autoria própria

Figura 14 - Mapa de caracterização quanto aos extratos de cobertura da litologia (O)



Fonte: Autoria própria

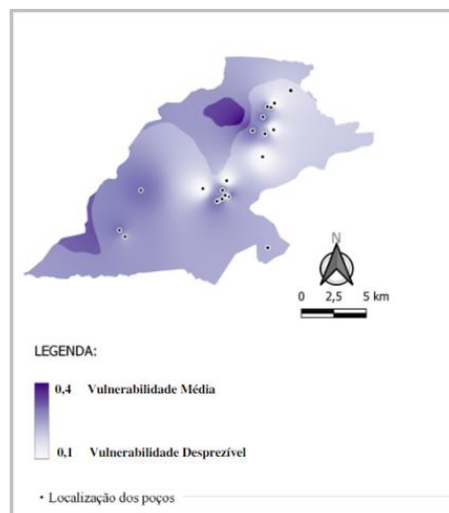
Figura 15 - Mapa de caracterização quanto ao nível estático do lençol freático (D)



Fonte: Autoria própria

O mapa de vulnerabilidade do aquífero para área de estudo foi obtido, conforme mostra a Figura 16. A Tabela 6 mostra os metadados resultantes da classificação da vulnerabilidade natural à contaminação nos poços da área de estudo. A caracterização do parâmetro G, expressa as condições de confinamento dos poços selecionados em confinados e não-confinados em um gradiente de cores, a partir de valores estabelecidos que variaram entre 0,2 e 0,7. Embora a área de estudo localize-se em uma região na qual uma de suas principais características é a grande profundidade das fontes subterrâneas, observa-se a presença de pontos de confinamento hidráulico não-confinados; isso se dá pela escavação de poços as margens dos cursos de rios.

Figura 16 - Mapa de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos do município de Mãe D'água - PB



Fonte: Autoria própria

A caracterização do parâmetro G, expressa as condições de confinamento dos poços selecionados em confinados e não-confinados em um gradiente de cores, a partir de valores estabelecidos que variaram entre 0,2 e 0,7. Embora a área de estudo localiza-se em uma região na qual uma de suas principais características é a grande profundidade das fontes subterrâneas, observa-se a presença de pontos de confinamento hidráulico não-confinados; isso se dá pela escavação de poços as margens dos cursos dos rios.

Tabela 6 - Metadados do mapa de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos do município de Mãe D'água - PB

Ref. de Ponto (SIAGAS)	Localidade	Nível Estático (m)	G	O	D	GOD	Classificação
2600030475	Sítio Chico Antônio	8,70	0,2	0,6	0,8	0,10	Desprezível
2600005428	Exu	8,00	0,2	0,6	0,8	0,10	Desprezível
2600005426	Mãe D'água	7,00	0,2	0,6	0,8	0,10	Desprezível
2600045291	Mãe D'água	7,00	0,2	0,6	0,8	0,10	Desprezível
2600045296	Distrito de Santa Maria	6,00	0,6	0,6	0,8	0,29	Baixa
2600030479	Sítio Jatobá	5,70	0,6	0,6	0,8	0,29	Baixa
2600005427	Distrito de Santa Maria	5,00	0,2	0,6	0,8	0,10	Desprezível
2600030459	Fazenda Beira Rio	4,70	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030468	Sítio Cacimba de Pedra	4,64	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030470	Sítio Vila Capoeira	4,18	0,2	0,6	0,9	0,11	Baixa
2600045295	Mãe D'água	4,00	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030461	Sítio Mãe D'Água	3,96	0,2	0,6	0,9	0,11	Baixa
2600030481	Sítio Pedraria	3,89	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030477	Sítio III Juazeiro	3,62	0,2	0,6	0,9	0,11	Baixa
2600030480	Sítio Jatobá	3,60	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030472	Sítio Novo Terto	3,40	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600005379	Distrito de Santa Maria	3,00	0,2	0,6	0,9	0,11	Baixa
2600045292	Distrito de Santa Maria	3,00	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030464	Sítio Mãe D'Água	3,00	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030460	Sítio Mãe D'Água	2,95	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030467	Distrito de Santa Maria	2,88	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030463	Sítio Mãe D'Água	2,78	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600030471	Sítio Vila Capoeira	2,10	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600045297	Mãe D'água	2,00	0,7	0,6	0,9	0,38	Média
2600005598	Santo Aleixo	0,00	0,2	0,6	0,9	0,11	Baixa

Fonte: Autoria própria

O mapa de caracterização do parâmetro O apresenta informações coletadas sobre formações geológicas dirigidas diretamente ao município de Mãe D'água-PB em conjunto a base de metadados disponibilizados pela AESA e IBGE, que ocorrem de maneira geral em todo território paraibano, resultando no mapa de áreas com demarcações definidas, contudo a apresentação do mapa aponta camadas desde siltes transicionais e xistos até formações magmáticas/metamórficas e vulcânicas de características de rochas mais consolidadas, constituindo as características apontando valores índices que variaram entre 0,6 até 0,8. Ressalta-se que todos os poços citados neste estudo estão localizados em áreas de siltes transicionais, estabelecendo único valor para todo o parâmetro.

O mapa de caracterização quanto ao nível estático D, expõe o nível estático de água dos poços em metros de profundidade em um gradiente de cores estabelecidos por valores propostos pelo método que variaram entre 0,2 e 0,7. Pontos mais próximos a superfície, ou seja, de menor profundidade são mais propensos ao contato à potenciais contaminantes, é notório que os poços do tipo escavados, majoritariamente, possuem nível estático mais rasos, elevando assim sua vulnerabilidade.

A caracterização do índice de vulnerabilidade GOD, mostrou que 20% dos poços estão em condições desprezíveis de vulnerabilidade, devido as características de sua camada confinante mais profundas e baixo fluxo de percolação, assim, trazendo maior proteção de seus recursos, 28% apresentam condições de baixa vulnerabilidade, tornando preocupantes em casos de carregamentos contínuos de longo prazo, lançados de forma extensiva e/ou lixiviados e 52% vulnerabilidade média, dado que os poços apresentaram nível estático mais próximos a superfície em conjunto ao menor grau de confinamento (poços escavados), que sem a proteção da camada confinante compreende menor proteção, elevando a acessibilidade hidráulica ao aquífero, facilitando o transporte de possíveis poluentes que, conseqüentemente, levam um tempo menor para comunicar-se da zona insaturada para a zona saturada do manancial subterrâneo.

Tabela 7 - Porcentagem das classes de vulnerabilidade

CLASSE	INTERVALO	TAXA DE OCORRÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS (SIAGAS)
Insignificante /Desprezível	0 - 0,1	20%	2600030475; 2600005428; 2600005426; 2600045291; 2600005427
Baixa	0,1 - 0,3	28%	2600045296; 2600030479; 2600030470; 2600030461; 2600030477; 2600005379; 2600005598.
Média/Moderada	0,3 - 0,5	52%	2600030459; 2600030468; 2600045295; 2600030481; 2600030480; 2600030472; 2600045292; 2600030464; 2600030460; 2600030467; 2600030463; 2600030471; 2600045297.
Alta	0,5 - 0,7	0%	Sem dados
Extrema	0,7 - 1	0%	Sem dados

Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo realizar o mapeamento da vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos do município de Mãe D'água - PB, situado no semiárido do Brasil que vivencia um contexto de insegurança hídrica.

Desta forma, destaca-se a importância da proteção e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, com o intuito de reduzir impactos ambientais em áreas detectadas com maiores índices de vulnerabilidade, principalmente no contexto de fragilidade de abastecimento vivenciado em pequenos municípios do semiárido do Brasil. Nestes municípios, o acesso à água é limitado e a população é submetida a buscar recursos hídricos de fontes alternativas. Muitas vezes, nesta busca por fontes alternativas, em geral poços rasos ou profundos, aspectos relacionados à qualidade da água são negligenciados.

Neste sentido, o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação é útil para apoiar a adequada gestão destes poços. A metodologia GOD foi utilizada para esse fim e verificou-se a validade do uso desse método para a área de estudo, diagnosticando maiores índices de vulnerabilidade para a classe média, com índice GOD igual à 0,38 que abrange 58% da área de estudo.

Recomenda-se para as áreas classificadas com maiores valores de vulnerabilidade, ações de precauções que evitem o acesso de possíveis contaminantes, como o fortalecimento de sistemas adequados de tratamento de esgotos domésticos, industrial e de alta concentração orgânica, ações de monitoramento de qualidades das águas subterrâneas, aplicando medidas para identificar a carga poluente, atentar-se ao uso e ocupação das áreas mais frágeis, e investigar detalhadamente o real perigo à contaminação perante aos principais pontos de contaminação, como postos de gasolina, matadouros, fossas, cemitérios, e lixões. Não foram observadas áreas com vulnerabilidade alta ou extrema, limitadas pela disponibilidade de dados e de números de poços analisados, bem como pelas características do tipo geológico estabelecido no estudo.

Outros métodos de obtenção da vulnerabilidade de aquíferos devem ser utilizados, através de novos parâmetros de determinação para uma tomada de decisão melhor apoiada na gestão dos recursos hídricos subterrâneos nesta área. Ressalta-se que para um detalhamento mais eficaz aconselha-se um maior número de poços amostrados e em conjunto a coleta de dados do solo em cada ponto estabelecido, pois, com a grande limitação dos dados geológicos disponíveis, a escolha generalizada pode gerar anomalias nos resultados obtidos.

Além disso, o uso de processos de sistemas de informações geográficas para a elaboração de mapas de vulnerabilidade vem se mostrando uma importante ferramenta na gestão e monitoramento dos recursos subterrâneos.

REFERÊNCIAS

- AESA. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba – PERH-PB. Resumo executivo e atlas. AESA, João Pessoa-PB. 2006.
- ALLER, Linda et al. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, v. 455, 1987.
- ALVARADO, A. et al. Multi-criteria decision analysis and GIS approach for prioritization of drinking water utilities protection based on their vulnerability to contamination. **Water Resources Management**, v. 30, n. 4, p. 1549-1566, 2016.
- ALVES, Jose Jakson Amancio; DE ARAÚJO, Maria Aparecida; DO NASCIMENTO, Sebastiana Santos. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, p. 126-135, 2009.
- ALY JUNIOR, O. **Segurança hídrica no semiárido, recursos hídricos na agropecuária e adaptação às mudanças do clima: serviços ecossistêmicos das águas subterrâneas e aquíferos no Brasil**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Plano Nacional de Segurança Hídrica. Brasília, 2019: 112 p. Disponível em <https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>. Acesso em 13 de setembro de 2022.
- ANA. Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água. 2010.
- ANA. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Informe 2021. Brasília: ANA. 2021. Disponível online: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1>. Acesso: 20 nov. 2022.
- BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento et al. ASPECTOS DE VULNERABILIDADE NATURAL DOS SISTEMAS AQUÍFEROS DA BACIA DO PARACURI, BELÉM/PA. **Águas Subterrâneas**, 2004.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Disponível em: Acesso em: 20 nov. 2022.
- CASTRO, L., WANKLER, F. L. Revisitando a obra “as águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil”. *Boletim de Conjuntura (BOCA)*, 9(27), 50-54. 2022.

CIRILO, José Almir et al. A questão da água no semiárido brasileiro. **Águas do Brasil: análises estratégicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008.

CONICELLI, Bruno Pirilo; HIRATA, Ricardo. Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, 2016.

CPRM. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado de Paraíba: diagnóstico do município de Mãe d'Água. 2005. Recife: CPRM. 2005. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16107>. Acesso em 20 nov. 2022.

DA Costa, M. S., Gomes, M. D. C. R., & de Moraes Nascimento, S. A. (2022). Vulnerabilidade de aquíferos à poluição: uma revisão metodológica. *Revista de Geociências do Nordeste*, 8(1), 60-76.

FEITOSA, F. A. C.; DINIZ, J. A. O. Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. **Águas Subterrâneas**, 2011.

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

FOSTER, Stephen. The key role for groundwater in urban water-supply security. **Journal of Water and Climate Change**, v. 13, n. 10, p. 3566-3577, 2022.

FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. São Paulo: Instituto Geológico, 1993.

FUNASA, Programa Nacional de Saneamento Rural / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília, 2019.

GUIGUER, Nilson; KOHNKE, Michael Wolfgang. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. **Águas Subterrâneas**, 2002.

HIRATA, Ricardo. **Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas**: estudo de casos no estado de São Paulo. 1994.

LOBO FERREIRA, J. P. C. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. In: **Lisboa, 4º Congresso da Água da APRH**. 1998.

MAYER, Juliana de Souza Lima et al. Diagnóstico de soluções alternativas coletivas de abastecimento de água em comunidades rurais. 2022.

MEDEIROS, Camila Macêdo et al. Mapeamento da vulnerabilidade de parte da bacia sedimentar do baixo curso do Rio Paraíba utilizando o método GOD. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO–SBSR**, v. 15, p. 3819-3826, 2011.

MENEGOL, L. R. Paralelização de método de interpolação de dados: krigagem. **Monografia**). **Universidade**, 2004.

SALGADO, Jaqueline Pereira et al. Influência do lançamento de esgotos na qualidade das águas do aquífero aluvial do rio Sucuru, no município de Sumé-PB. 2016.

Santos, F. F. S., Daltro Filho, J., Machado, C. T., Vasconcelos, J. F., e Feitosa, F. R. S. O desenvolvimento do saneamento básico no Brasil e as consequências para a saúde pública. **Revista brasileira de meio ambiente**, v. 4, n. 1, 2018.

SCHMIDT, Bruna Ziliatto. Comparação entre as metodologias GOD, DRASTIC, AVI e AVI Reclassificado na estimativa da vulnerabilidade das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica Urbana do Ribeirão dos Couros-Diadema/SP, Brasil. 2020.

SILVA, Rita de Cássia Assis da; ARAÚJO, Tânia Maria de. Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA). **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 8, p. 1019-1028, 2003.

SNIS. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento do Ministério de Desenvolvimento Regional. Brasília, 2022.

TAVARES, Paulo Roberto Lacerda et al. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, p. 227-236, 2009.

Tsutiya, Milton Tomoyuki. Abastecimento de água / Milton Tomoyuki Tsutiya - 3 a edição - São Paulo - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. XIII - 643 p.

UN-Water. *Coping with Water Scarcity. Challenge of the Twenty-First Century*; UN-Water; FAO: Geneva, Switzerland, 2007; p. 23.

VASCONCELOS, Mickaelon Belchior. Poços para captação de águas subterrâneas: revisão de conceitos e proposta de nomenclatura. **Águas Subterrâneas**, 2014.

Villar, P.C., 2016, As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise: *Revista Ambiente e Sociedade*, v. XIX, jan/mar, 2016.

ZOBY, José Luiz Gomes. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Águas Subterrâneas**, 2008.