



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

PAULO RICARDO DANTAS

**VULNERABILIDADE NATURAL, POTENCIAL POLUIDOR E RISCO DE
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE
TAMANDARÉ - PERNAMBUCO**

**RECIFE
2020**

Paulo Ricardo Dantas
Engenheiro Ambiental

Vulnerabilidade Natural, Potencial Poluidor e Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Tamandaré - Pernambuco

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Controle e Remediação da Poluição.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Monthezuma Santoianni
Guerra

Coorientadores: Profa. Dra. Leocádia Terezinha Cordeiro Beltrame

**Recife
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D192v

Dantas, Paulo Ricardo

Vulnerabilidade natural, potencial poluidor e risco de contaminação das águas subterrâneas do município de Tamandaré - Pernambuco / Paulo Ricardo Dantas. - 2020.
79 f. : il.

Orientador: Sergio Monthezuma Santoianni Guerra.
Coorientadora: Leocadia Terezinha Cordeiro Beltrame.
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2020.

1. Método GOD. 2. Método POSH. 3. Vulnerabilidade natural de aquíferos. 4. Risco de contaminação de aquíferos. 5. Geoprocessamento. I. Guerra, Sergio Monthezuma Santoianni, orient. II. Beltrame, Leocadia Terezinha Cordeiro, coorient. III. Título

CDD 620.8

PAULO RICARDO DANTAS

Vulnerabilidade Natural, Potencial Poluidor e Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Tamandaré - Pernambuco

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Controle e Remediação da Poluição

Aprovada em 30 de julho de 2020.

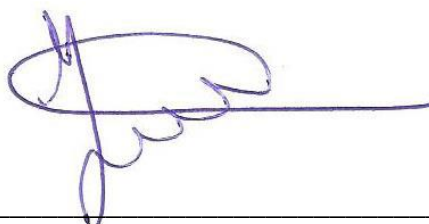


Prof. Dr. Sergio Monthezuma Santoianni Guerra
Presidente da banca e Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva
Membro Interno (PPEAMB / UFRPE)
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Prof. Dr. José Luiz Portugal
Membro Externo (Departamento de Engenharia
Cartográfica – UFPE)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus por ter proporcionado o acontecimento do mestrado e do tema de dissertação que tanto amei.

Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, professores e demais, pela realização desse grande avanço na vida acadêmica. Assim como a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento da bolsa de pesquisa.

Gratidão ao meu Orientador Sérgio Guerra e a Coorientadora Leocádia Beltrame pelo suporte e orientação no desenvolvimento da dissertação, assim como na parte de campo.

Agradecimento ao grande Thiago Luiz, Servidor da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) que foi totalmente altruísta e proativo na ajuda para o desenvolvimento dos resultados do trabalho.

Gratidão a Prefeitura Municipal de Tamandaré, assim como seus servidores da secretária de infraestrutura e de meio ambiente, que tanto ajudaram na pesquisa de campo.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva e Prof. Dr. José Luiz Portugal.

Não menos importantes, agradeço a minha família, em especial aos meus pais Sebastião e Angelita pelo amparo durante a pós-graduação em Recife, aos meus amigos e ao meu amor, pelo apoio e amizade.

Vulnerabilidade Natural, Potencial poluidor e Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Tamandaré – Pernambuco

RESUMO

A crescente e desordenada utilização de águas subterrâneas, bem como o uso do solo no município de Tamandaré, litoral sul do estado de Pernambuco, vem causando significativos impactos ambientais em seus recursos hídricos subterrâneos, o que pode vir a comprometer seriamente a qualidade e quantidade de água disponível para as futuras gerações. Em decorrência deste fato tornou-se necessária, dentre outras providencias a serem tomadas, a elaboração do Mapa de Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Tamandaré. A elaboração do mapa de risco inicia-se com a confecção do mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos existentes, sejam eles porosos ou fissurais, determinando-se desta maneira a fragilidade natural de cada um dos aquíferos em proteger as águas subterrâneas. O mapa de vulnerabilidade natural, elaborado utilizando-se o método GOD (**G**roundwater occurrence, **O**verall aquifer class e **D**epth to groundwater table) proposto por Foster (1987), identificou que 17,2% do município tem vulnerabilidade natural baixa, 58,2% vulnerabilidade média, 24,6% vulnerabilidade alta e 0,1% vulnerabilidade extrema. O passo seguinte correspondeu a elaboração do mapa de fontes com potenciais contaminantes, adotando-se o método POSH (**P**ollutant **O**origin, **S**urcharge **H**ydraulically), proposto por Foster *et al.* (2006), que identificou que 14,6% da área do município possui um potencial poluidor ausente, 5,7% um potencial baixo, 78,4% um potencial moderado e 1,2% um potencial elevado. Por fim procedeu-se a fusão dos mapas de vulnerabilidade natural e de fontes com potenciais contaminantes que resultou no mapa de risco de contaminação dos aquíferos onde observa-se que 14,8 % do município apresenta um risco de contaminação insignificante, 13,1% um risco baixo, 50,9% um risco moderado, 20,7% um risco alto e 0,5% um risco extremo. A partir deste trabalho, tornou-se possível estimar os efeitos de que cada uma das 31 fontes contaminantes cadastradas no município de Tamandaré, assim como a relevância das medidas de controle e remediação dos agentes potencialmente poluidores.

Palavras-chaves: Método GOD; Método POSH; Vulnerabilidade natural de aquíferos; Risco de contaminação de aquíferos; Geoprocessamento; Geologia ambiental.

Natural vulnerability, polluting potential and groundwater risk of contamination at the Tamandaré City – Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

The growing and disordered use of groundwater, as well as land use at Tamandaré City, south coast of the state of Pernambuco, has been causing significant environmental impacts on its underground water resources, that compromise the quality and the amount of available water to future generations. Due to this fact, it became necessary, among other measures to be taken, to prepare the Groundwater Risk of Contamination Map of Tamandaré City. The elaboration of the risk map starts with the preparation of the Natural Vulnerability Map of the existing aquifers: whether porous or fissural, determining the natural fragility of each aquifer in protecting groundwater. The Natural Vulnerability Map, elaborated using the GOD method (**G**roundwater occurrence, **O**verall aquifer class e **D**epth to groundwater table) proposed by Foster (1987), identified that 17.2% of the city has low natural vulnerability, 58.2% medium vulnerability, 24.6% high vulnerability and 0.1% extreme vulnerability. The next step corresponded to the elaboration of the map of sources with potential contaminants, adopting the POSH method (**P**ollutant **O**origin, **S**urcharge **H**ydraulically) proposed by Foster et al., (2006), which identified that 14.6% of the area has an absent polluting potential, 5,7 % a low potential, 78.4% a moderate potential and 1.2% a high potential. Finally, the Maps of Natural Vulnerability and Sources with Potential Contaminants were merged, resulting in the groundwater Risk of Contamination Map, where it was observed that 14.8% of the city has an insignificant risk of contamination, 13, 1% a low risk, 50.9% a moderate risk, 20.7% a high risk and 0.5% an extreme risk. This work turned possible to estimate the effects of each of the 31 contaminating sources registered at Tamandaré City and the relevance of the control and remediation measures of potentially polluting agents.

Keywords: GOD method; POSH method; Natural vulnerability of aquifers; Risk of contamination of aquifers; Geoprocessing; Environmental geology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.....	21
Figura 2 – Diagrama do método GOD para a avaliação da vulnerabilidade do aquífero a contaminação	28
Figura 3 – Mapa da geodiversidade do litoral sul de Pernambuco, Potencialidade Hidrogeológica.	29
Figura 4 – Unidades Aquíferas de Tamandaré-PE.....	31
Figura 5 – Tipos litológicos ocorrentes nas unidades aquíferas de Tamandaré.....	32
Figura 6 – Mapa de Solos de Tamandaré.....	33
Figura 7 – Obtenção de imagens SRTM e MDT para a determinação da superfície freática de Tamandaré-PE.....	35
Figura 8 – Mapa com a drenagem em formato MDT em conjunto com o mapa hipsométrico da cidade de Tamandaré.	36
Figura 9 - Esquema de geoprocessamento para avaliação da profundidade freática.....	37
Figura 10 – Níveis Freáticos de Tamandaré.	38
Figura 11 – Quadrículas utilizadas na determinação de fontes pontuais de contaminação.	43
Figura 12 – Grade estatística para a densidade demográfica de Tamandaré-PE.	44
Figura 13 – Esquema conceitual da correlação entre vulnerabilidade natural e potencial poluidor..	46
Figura 14 – Mapa de vulnerabilidade natural da água subterrânea de Tamandaré.....	49
Figura 15 – Mapa de fontes de contaminação pontuais	53
Figura 16 - Cemitérios de Tamandaré.....	54
Figura 17 - ETE do residencial (1) e receptivo (2).	55
Figura 18 - Indústria Sucroalcooleira.....	55
Figura 19 - Postos de Combustíveis.....	56
Figura 20 - Despejos de efluentes	56
Figura 21 - Estação elevatória de esgoto	57
Figura 22 - Extração de argila.....	58
Figura 23 - Fossas receptivo turístico	58
Figura 24 - Estação de tratamento de efluente municipal	59
Figura 25 - Despejo de efluente de pocilga.....	60
Figura 26 - Descarte inadequado de resíduos sólidos	60
Figura 27 - Potencial poluidor das fontes pontuais.....	61
Figura 28 – Mapa de fontes de contaminação difusas	62
Figura 29 - Potencial poluidor das fontes difusas	65
Figura 30 – Mapa de fontes com potenciais contaminantes resultante.....	66
Figura 31 – Mapa do risco de contaminação dos aquíferos para a área aflorante de Tamandaré.....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos aquíferos (Parâmetro “G”).	31
Quadro 2 – Classificação da litologia (Parâmetro “O”).	34
Quadro 3 – Classificação da profundidade do lençol freático (Parâmetro “D”).	39
Quadro 4 – Parâmetros e <i>scores</i> agrupados.	39
Quadro 5 – Definição das classes de vulnerabilidade do aquífero.	40
Quadro 6 - Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema POSH	42
Quadro 7 - Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH.	43
Quadro 8 – Faixas de densidade populacional urbana.	45
Quadro 9 - Risco de contaminação da água subterrânea a partir da correlação entre a vulnerabilidade natural e a Fonte contaminante Resultante.	47
Quadro 10 – Quadro de áreas de vulnerabilidade – Tamandaré	50
Quadro 11 – Classificação das fontes pontuais de contaminação de Tamandaré	52
Quadro 12 – Classificação das fontes difusas de contaminação de Tamandaré	61
Quadro 13 - Quadro de áreas do potencial poluidor das fontes contaminantes de Tamandaré.	67
Quadro 14 – Quadro de áreas Tamandaré (áreas aflorantes)	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1 Recursos Hídricos	13
3.2 Águas subterrâneas	13
3.2.1 Aquíferos	14
3.2.2 Situação das Águas Subterrâneas	15
3.2.3 Vulnerabilidade Natural.....	16
3.2.4 Fontes de contaminação das águas subterrâneas	17
4. ASPECTOS GEOAMBIENTAIS DA ÁREA DE ESTUDO	21
4.1 Localização de vias de acesso.....	21
4.2 Geologia.....	22
4.3 Formação Hidrogeológica	22
4.4 Hidrografia.....	23
4.5 Solos	23
4.6 Vegetação	24
4.7 Relevo.....	24
4.8 Clima e pluviometria	25
4.9 Uso e ocupação do solo	25
5. METODOLOGIA	26
5.1 Aquisição de dados e informações	26
5.2 Estruturação da base de dados	26
5.3 Alimentação da base de dados	27
5.4 Elaboração do mapa de vulnerabilidade natural	27
5.4.1 Determinação do parâmetro G.....	29
5.4.2 Determinação do parâmetro O	31
5.4.3 Determinação do parâmetro D.....	34
5.5 Elaboração do mapa de fontes contaminantes	40
5.5.1 Caracterização das fontes pontuais	41
5.5.2 Caracterização das fontes difusas	43
5.5.3 Mapa de fontes contaminantes resultante	45

5.6 Mapa de risco de contaminação	46
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1 Vulnerabilidade Natural	48
6.1.1 Vulnerabilidade Natural Baixa	50
6.1.2 Vulnerabilidade Natural Média	50
6.1.3 Vulnerabilidade Natural Alta.....	51
6.1.4 Vulnerabilidade Natural Extrema	51
6.2 Fontes contaminantes	51
6.2.1 Fontes Pontuais	51
6.2.2 Fontes Difusas	61
6.2.3 Mapa de Fontes com Potenciais Contaminantes Resultante.....	65
6.3 Mapa de risco de contaminação	67
6.3.1 Áreas com risco de contaminação insignificante.....	69
6.3.2 Áreas com risco de contaminação baixo	69
6.3.3 Áreas com risco de contaminação moderado	69
6.3.4 Áreas com risco de contaminação alto	70
6.3.5 Risco de contaminação extremo	70
7. CONCLUSÃO	71
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
9. APÊNDICE	78

1. INTRODUÇÃO

A interação do homem com a natureza gera modificações no espaço que o mesmo atua. O homem, a fim de ter uma melhor ocupação desse espaço, emprega técnicas e atividades que podem ocasionar modificações negativas ao meio ambiente, exemplo disso é a agricultura e a atividade industrial que têm o poder de ocasionar danos ao meio ambiente e aos recursos hídricos, tanto os superficiais quanto os subterrâneos.

Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2018), cerca de 97,5% de toda a água existente no planeta terra é salgada, portanto, não adequada para o consumo direto ou para a irrigação. Dos 2,5% de água doce, cerca de 69% é concentrada em geleiras, 30% são águas que se encontram armazenadas em aquíferos (água subterrânea) e 1% estão nos rios. Então a preocupação em preservar essas águas é de suma importância.

As águas subterrâneas, em algumas áreas, podem conter altos níveis de substâncias naturais que limitam o seu uso; é o caso de quando a água do mar invade um aquífero. Nesta situação ocorre a salinização da água causada pela intrusão salina da água do mar (ROMEIRO, 2012).

Os usos indevidos da água também promovem a contaminação dos corpos hídricos, a falta de saneamento básico aumenta esse fator juntamente com despejos de águas servidas, fossas sépticas, elementos químicos provenientes da disposição de resíduos industriais, entre outros.

A atual crise hídrica vem aumentando a necessidade de utilização das águas subterrâneas, sendo este recurso hídrico explorado em diversos meios de utilização, tanto de forma doméstica como industrial, tornando imprescindível a realização de estudos que fortaleçam a proteção desse bem.

Os problemas relacionados à poluição das águas subterrâneas são atualmente uma fonte de sérias preocupações que requerem atenção. Essa poluição gerada pelas atividades humanas pode, se atingir níveis críticos, apresentar sérios perigos para a saúde pública e ao meio ambiente. Para proteger esses recursos hídricos, é necessário fornecer proteção eficaz, pois as operações de descontaminação são difíceis de realizar e bastante caras. Esta proteção pode ser garantida através da delimitação de áreas consideradas vulneráveis ou expostas a altos níveis de poluição (GUETTAIA *et al.*, 2017)

A vulnerabilidade de águas subterrâneas depende da sensibilidade do aquífero a impactos naturais e de suas propriedades físicas, desta forma os aquíferos possuem diferentes graus de proteção às águas subterrâneas contra contaminações de diferentes origens (GUIGUER & KOHNKE, 2002). Segundo

Foster *et al.* (2006), as águas subterrâneas necessitam de proteção, visto que “No mundo inteiro, os aquíferos estão sob perigo cada vez maior de contaminação em decorrência da urbanização, do desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e das empresas de mineração”.

Um aquífero pode ser classificado com um alto nível de vulnerabilidade, porém sem grandes riscos de contaminação, caso não haja uma fonte poluente que possa contaminar o mesmo; ou até mesmo um risco de poluição extremo, apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo. Desta forma, o risco à contaminação é estimado pelas características inerentes ao aquífero e pela existência de atividades potencialmente poluidoras na área, fator este que pode ser controlado (PERNAMBUCO, 2003).

Na faixa litorânea do estado de Pernambuco a ocupação urbana, por muitas vezes desordenada, vem causando significativos impactos ambientais no meio hídrico. A construção de matadouros, cemitérios e lixões sem a devida legalização, promovem também aumentos dos impactos ambientais aos corpos hídricos.

Com intuito de contribuir para o melhor gerenciamento de intervenções capazes de comprometer as águas subterrâneas do litoral sul do estado, este trabalho pretende estabelecer o risco de contaminação das águas subterrâneas da área que abrange o município de Tamandaré. Para isso, será estruturada e implantada uma base de dados espacializados (georreferenciados) contendo informações geoambientais sobre a área em estudo, possibilitando, desta forma, a aplicação do método GOD para a determinação da vulnerabilidade das águas subterrâneas da região de estudo; assim como o método POSH para a classificação das fontes contaminantes presentes na área estudada e a determinação do risco de contaminação pelo cruzamento desses dados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Tamandaré-PE.

2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar o índice de vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Tamandaré para a confecção do mapa de vulnerabilidade natural;
2. Identificar, cadastrar, mapear e classificar as possíveis fontes de contaminação na área de estudo para a confecção do mapa de fontes contaminantes;
3. Elaborar o mapa de risco de contaminação da água subterrânea.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Recursos Hídricos

Como o componente principal do ciclo hidrológico, a água é imprescindível para a qualidade de vida e desenvolvimento humano. O controle racional e sustentável dos recursos hídricos vem sendo gradativamente inserido nas normatizações, preocupando-se desta maneira com a saúde das populações (TERRA, *et al.* 2013).

A água para o consumo humano está cada vez mais escassa devido a degradação dos recursos hídricos de superfície, fazendo com que haja a necessidade cada vez maior de explorações da água subterrânea. A diminuição da disponibilidade de água potável, necessária para suprir as necessidades de consumo, está relacionada ao aumento da demanda gerada pelo crescimento demográfico mundial, além da contaminação da água por agentes contaminantes, como os químicos, biológicos e orgânicos que têm ligação com o desenvolvimento econômico (CORREIA, 2006). Segundo Borba *et al.*, (2018) a água subterrânea tem se tornado uma fonte confiável, com potabilidade natural de baixo custo, porém seu consumo desenfreado e o risco de contaminação, se tornaram motivo de análise.

O entendimento do ciclo da água na terra é de primordial importância, pois a água é a única substância que pode ser encontrada, na natureza, em três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso), estando dispersada em todos os ambientes do planeta Terra: oceanos, continentes e atmosfera (Peixinho & Feitosa, 2008). Dentre as três fases da água, a fase líquida é a de maior interesse, sendo esta indispensável para o uso e para satisfazer as necessidades do ser humano e de todos os outros organismos vivos, em especial os animais e vegetais. O ciclo hidrológico é o responsável pela unificação de tudo que se refere à água em nosso planeta.

3.2 Águas subterrâneas

De acordo com Borges *et al.*, (2017), água subterrânea é toda a água que ocorre abaixo da superfície do solo, preenchendo os poros ou vazios entre os grânulos das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas, e que sendo submetida a duas forças (de adesão e de gravidade) desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos.

Como citado pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS, 2017), as águas subterrâneas possuem distribuição bastante variável, assim como as águas superficiais, por estarem

relacionadas ao ciclo hidrológico, porém as águas subterrâneas apresentam-se cerca de 100 vezes mais abundantes que as águas superficiais de lagos e rios.

As águas subterrâneas são importantes fontes de abastecimento hídrico e cerca de 50% da população no mundo depende de forma exclusiva desta água para o consumo (TUSHAAR *et al.*, 2007). Elas são reservas essenciais por estarem à disposição a qualquer momento e, além de proporcionarem baixo custo de armazenamento, constituem-se como fonte alternativa às águas superficiais, sujeitas a alterações mais frequentes na sua qualidade natural (Löbler & Silvério da Silva, 2015). No Brasil, aproximadamente 37% dos municípios são abastecidas pelas águas subterrâneas (BORGES *et al.*, 2017).

De acordo com Osório (2004) as atividades humanas no solo podem alterar e promover novos mecanismos de recarga do aquífero, modificando a taxa, a frequência e a qualidade da recarga de águas subterrâneas. A compreensão desses processos e a correta avaliação dessas alterações são imprescindíveis para a determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas.

3.2.1 Aquíferos

A Resolução Nº 15/2001 no Art. 1º III do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), define aquífero 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”.

Os aquíferos podem ser de diversos tipos, de acordo quanto a pressão exercida pela água em relação à pressão atmosférica e quanto a geologia do material saturado. Segundo Silva Júnior & Caetano (2010) quanto a pressão, os tipos de aquíferos são classificados como:

1. Aquífero Livre:

Também chamado de freático ou não confinado, é aquele cujo limite superior é a superfície de saturação ou freático, na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica. Podendo também ser coberto.

2. Aquífero Confinado

Também chamado de aquífero sob pressão, é aquele onde a pressão da água em seu topo é maior do que a pressão atmosférica. Em função das camadas limítrofes, pode ser definido como: confinado, não drenante e confinado drenante.

2.1 Aquífero Confinado Não Drenante

É aquele em que as camadas limítrofes, inferior e superior, são impermeáveis. Na captação por sondagem nesse tipo de aquífero, a água jorra naturalmente, sem necessidade de bombeamento: são os poços denominados “jorrantes” ou “artesianos”.

2.2 Aquífero Confinado Drenante

É aquele que pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou a saída de fluxos.

3. Aquífero Suspenso

É um caso especial de aquífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável que nem armazena nem transmite água.

Em relação à geologia do material saturado, Osório (2004), classifica os aquíferos em:

1. Aquíferos Porosos ou Contínuos

Ocorrem em rochas sedimentares consolidadas ou sedimentos não consolidados compostos por materiais argilosos, grãos de areia ou cascalhos. A porosidade é constituída pelos espaços vazios entre os grãos quase sempre homoganeamente distribuídos, que permitem o armazenamento de água.

2. Aquíferos Fraturados, Fissurais, Fissurados ou descontínuos

Ocorrem em rochas ígneas e metamórficas ou sedimentares silicificadas. A capacidade destas rochas em acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, aberturas e intercomunicações.

3. Aquíferos Cársticos

São os aquíferos formados em rochas carbonáticas. Constituem um tipo peculiar de aquífero fraturado, onde as fraturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes, criando, nestes casos, cavernas e canais subterrâneos devido à contínua ação de dissolução da água.

Também inerente aos aquíferos, de acordo com Silva Júnior & Caetano (2010), é importante descrever que a superfície freática é aquela onde a água encontra-se submetida à pressão atmosférica. A zona saturada fica situada abaixo da superfície freática e nela todos os vazios existentes no terreno estão preenchidos com água. A zona não saturada, também conhecida como zona vadosa é aquela que está situada entre a superfície freática e a superfície do terreno, e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases (ar e vapor d'água) e por água.

O entendimento de cada tipo de aquífero serve para mensurar o grau de proteção que o mesmo possui em relação à água subterrânea que está presente nos mesmos, desta forma, o tipo de aquífero é fundamental para esta análise.

Os aquíferos que ocorrem no Estado de Pernambuco se enquadram essencialmente em dois tipos: intersticiais e fissurais (COSTA FILHO & COSTA, 2000).

3.2.2 Situação das Águas Subterrâneas

Os aquíferos têm se tornando uma preocupação recorrente, pois a água subterrânea presente nos mesmos está sofrendo contaminações, sendo, portanto, uma problemática frequente na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, já que os aquíferos são considerados reservatórios estratégicos para a

população. A recuperação de aquíferos contaminados, quando possível devido a inexistência de métodos específicos para tal, envolve o consumo de elevados custos financeiros, desta forma, prevenir a contaminação é um passo fundamental, já que remediar é oneroso e difícil (TERRA *et al.*, 2013). Para Foster *et al.* (2006), o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação, normalmente é o primeiro passo na avaliação do risco de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade, em escala municipal ou estadual.

Conforme descrito por Oni *et al.*, (2017), devido ao aumento populacional, há uma grande necessidade global do uso da água subterrânea, dessa forma a necessidade de proteção do recurso hídrico se torna primordial. A exploração de diversos aquíferos subterrâneos, mesmo após um enorme investimento, é abandonada devido a várias razões, dentre elas a infiltração de poluentes e subsequente contaminação das águas subterrâneas derivadas da lixiviação, existência de fossas sépticas, depósitos de lixo, tanques de petróleo, bem como o uso inadequado e a eliminação de pesticidas. Tudo isso poderia ter sido evitado com a elaboração do mapa de risco de contaminação do aquífero subterrâneo.

Com o intuito de minimizar esse problema, são adotadas em diversas partes do mundo, e de forma mais expressiva em países desenvolvidos, medidas de prevenção, já que uma vez contaminado, a recuperação do aquífero é de extrema dificuldade e requer um alto custo financeiro (CUTRIM & CAMPOS, 2010). Dessa forma, estudos como a avaliação da vulnerabilidade e risco de contaminação de aquíferos, são uma dessas medidas para evitar contaminação das águas subterrâneas.

3.2.3 Vulnerabilidade Natural

Segundo Foster *et al.*, (1988),

a vulnerabilidade ou perigo de contaminação da água subterrânea é definido como a probabilidade de que a água subterrânea na parte superior de um aquífero atinja níveis inaceitáveis de contaminação em decorrência das atividades que se realizam na cobertura imediata da superfície do solo.

A médio ou a longo prazo, todos os aquíferos são vulneráveis à contaminação em decorrência da aplicação constante ou periódica de insumos que são utilizados em atividades agrícolas, como é o caso de pesticidas em áreas rurais ou o a operação de cemitérios, ambos representando uma fonte de contaminação. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada. O mesmo, porém, não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca do aquífero (FOSTER & HIRATA, 1993).

A intenção de avaliar o grau de vulnerabilidade dos aquíferos é decorrente principalmente da necessidade de fornecer às autoridades competentes, uma ferramenta que seja útil nas tomadas de decisões ao nível de planejamento territorial (BATISTA, *et al.* 2016). Esta ferramenta tem a função de proteger os recursos hídricos ainda preservados ou passíveis de uso. O monitoramento da vulnerabilidade é essencial para a adequada exploração das águas subterrâneas e, geralmente, é o primeiro passo na avaliação do risco de contaminação de água subterrânea (MFONKA, *et al.*, 2018). Sua recuperação após a ocorrência de contaminação é um problema à parte a ser resolvido.

3.2.4 Fontes de contaminação das águas subterrâneas

As atividades com potencial poluidor de acordo com a distribuição espacial, podem ser divididas em pontuais ou difusas.

As fontes de contaminação pontuais geralmente produzem plumas bem definidas e mais concentradas, facilitando a sua identificação, e/ou seu controle.

As difusas, por sua vez, não geram plumas de contaminação definidas, porém normalmente afetam uma área muito maior do aquífero (FOSTER *et al.*, 2002). A grande fonte de contaminação difusa são os cursos d'água que recebem uma grande carga orgânica pelo despejo de esgoto e deposição de lixo, assim como áreas de circulação de agrotóxicos, como áreas agrícolas.

3.2.4.1 Fontes Pontuais

a) Atividades Industriais

As atividades industriais estão relacionadas com a eliminação de resíduos de produção para o solo, atmosfera, águas superficiais e subterrânea. As indústrias podem contribuir para a contaminação das águas subterrâneas com metais pesados e compostos químicos inorgânicos, além de outros compostos, inclusive orgânicos, mesmo em pequenas quantidades, tem potencial poluidor altamente tóxicos (Silva, 2003 e Oliveira, 2011).

Foster & Hirata (1993), salientam que as altas concentrações de contaminantes e certas práticas de disposição de resíduos e efluentes fazem com que as atividades industriais gerem uma grande preocupação ambiental na avaliação de potencial poluidor de águas subterrâneas.

b) Lagoas de Efluentes

No sistema de tratamento de esgoto, as lagoas são altamente utilizadas, tanto para o armazenamento, evaporação, sedimentação, manejo e oxidação de efluentes industriais e urbanos. Uma boa parte das lagoas de efluentes são construídas com uma base de materiais naturais, impermeabilizados, resultado da compactação do solo e da sedimentação. Os materiais utilizados na impermeabilização das lagoas, com custo razoável, não conseguem preservar a impermeabilidade por longos períodos de tempos, podendo assim, permitir a infiltração de efluentes no solo a uma taxa que varia de acordo com o impermeabilizante empregado, de 10-20mm/dia (Foster *et al.*, 2006).

c) Atividades de Mineração

As atividades de mineração, extração de argila por exemplo, podem causar impactos na qualidade da água subterrânea, a partir de modificações hidráulicas nos sistemas de fluxo das águas, tanto direta quanto indiretamente, causadas pela construção e operações de escavações subsuperficiais e em minas a céu aberto. Com essas atividades é possível aumentar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos a partir da remoção física de partes da zona não saturada ou das camadas confinantes que davam a proteção natural as águas subterrâneas (Foster *et al.*, 2006).

d) Águas Superficiais Contaminadas

A disposição final de efluentes residuais e de resíduos sólidos é geralmente feita em cursos de águas superficiais, como rios, riachos e canais. Muitas vezes, recebem altas cargas de efluentes não tratados que ultrapassam a capacidade de autodepuração natural dos corpos receptores por muitos quilômetros a jusante. Dessa forma essas ações são acometidas como fontes de contaminação das águas subterrâneas, a partir de certas condições hidrogeológicas (Foster *et al.*, 2006).

e) Disposição de Resíduos Sólidos

A disposição de resíduos sólidos de forma inadequada, é responsável por grande número de eventos de contaminação das águas subterrâneas. Em regiões de clima úmido e quente, a incidência desses casos é agravada pela geração de grandes volumes de chorume, tão peculiar deste tipo de clima (Foster *et al.*, 2006). Esse lixiviado (chorume) tem grande potencial de contaminação do lençol freático, e sua composição dependerá do tipo de material do resíduo, ou da sua associação, que é descartado no solo.

f) Postos de Combustíveis

Nas áreas em que os postos de combustíveis são inseridos, o efluente, muitas vezes com adição de efluente residencial, pode apresentar possível presença de compostos tóxicos sintéticos, provenientes do armazenamento de combustíveis em tanques subterrâneos. Este tem sido uma das principais fontes de contaminação pontual que acomete aos aquíferos em áreas urbanas. A poluição dos solos e das águas presentes nos aquíferos, estão correlacionadas com a corrosão dos tanques ao longo do tempo, liberando o combustível para o solo e água. Outra questão são as conexões entre os tanques que também podem propiciar vazamentos, já que o tráfego de veículos pesados é constante em áreas de postos de combustíveis (Foster *et al.*, 2006).

g) Poços de Águas Subterrâneas

Os poços escavados para captação de água podem ser focos potenciais de contaminações hídras. Isso pode ser causado quando na sua construção, operação e manutenção, não forem tomadas as precauções necessárias (SILVA, 2003). Segundo Foster & Hirata (1993), em áreas urbanas e rurais existe uma grande quantidade de poços tubulares, que não são selados adequadamente e podem ser fontes de alto risco de contaminação, já que em alguns casos esses poços podem ser usados, ilegalmente, como local de deposição de resíduos sólidos.

h) Cemitérios

A atividade de enterrar corpos humanos (e animais) no solo, é uma prática comum e cultural. Geralmente essa prática gera cargas contaminantes microbiológicas em uma área pequena, atingindo uma pequena parte do solo, podendo o impacto ser reduzido, utilizando sepulturas impermeabilizantes (Foster *et al.*, 2006).

3.2.4.2 Fontes Difusas

a) Áreas Urbanas e Residenciais

Com o crescimento populacional urbano, a contaminação das águas subterrâneas está associada a zonas residenciais sem esgotamento sanitário, com tanques sépticos e fossas negras. A urbanização gera uma carga contaminante relacionada ao crescimento urbano, sendo esta carga diminuída caso exista um bom sistema de rede de esgoto e drenagem bem elaborados e cautelosamente operado (MARION, 2011).

A contaminação do aquífero pode ocorrer a partir de vazamentos nas tubulações da rede de esgoto, devido a existência de rupturas no percurso. Em estudo de escala regional, a avaliação precisa da carga contaminante, gerada pela urbanização, não é possível; porém pode ser definido o risco

potencial de contaminação levando em consideração a extensão da cobertura da rede de esgoto e a densidade populacional (Foster & Hirata, 1993).

b) Áreas com Uso Agrícola

A agricultura é uma atividade potencialmente poluidora devido ao manejo do solo decorrente, tanto com formas mecanizadas como manuais, devido à aplicação intensiva e prolongada de fertilizantes artificiais, assim como o uso de agrotóxicos em grande extensão de áreas. Além disso, a irrigação excessiva do solo contribui com a erosão e infiltração de nutrientes, sais e traços de componentes orgânicos que podem contaminar o lençol freático (SILVA, 2003).

De acordo com Foster e Hirata (1993), certas práticas agrícolas são capazes de provocar uma grande contaminação difusa nas águas subterrâneas, principalmente em áreas com solos pouco espessos, muito porosos ou com textura arenosa, além de causar possível aumento na salinidade das águas subterrâneas.

A determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas identifica quais aquíferos, ou parte deles, são mais vulneráveis (frágeis) à contaminação a partir de atividades antrópicas e naturais. Kemerick *et al.* (2011), salientam que é possível obter uma área com alta vulnerabilidade a contaminação, porém sem risco de contaminação, pelo fato da ausência de carga contaminante significativa, ou vice-versa.

c) Áreas desmatadas

Essas áreas são regiões em que a vegetação foi removida ou, em alguns casos, não foi desenvolvida. Mesmo sem atividades agrícolas ou de extração mineral presentes, as áreas desmatadas não possuem a camada vegetal que impede a erosão e a lixiviação. Com a inserção de atividades causadoras de impacto ambiental, esse impacto se torna mais agressivo em áreas sem vegetação, já que a falta de uma camada natural, como a serapilheira, promove uma menor proteção ao solo desnudo, pois as raízes de plantas promovem um maior incorporação de poluentes que adentram ao solo (MEIRA, 2014).

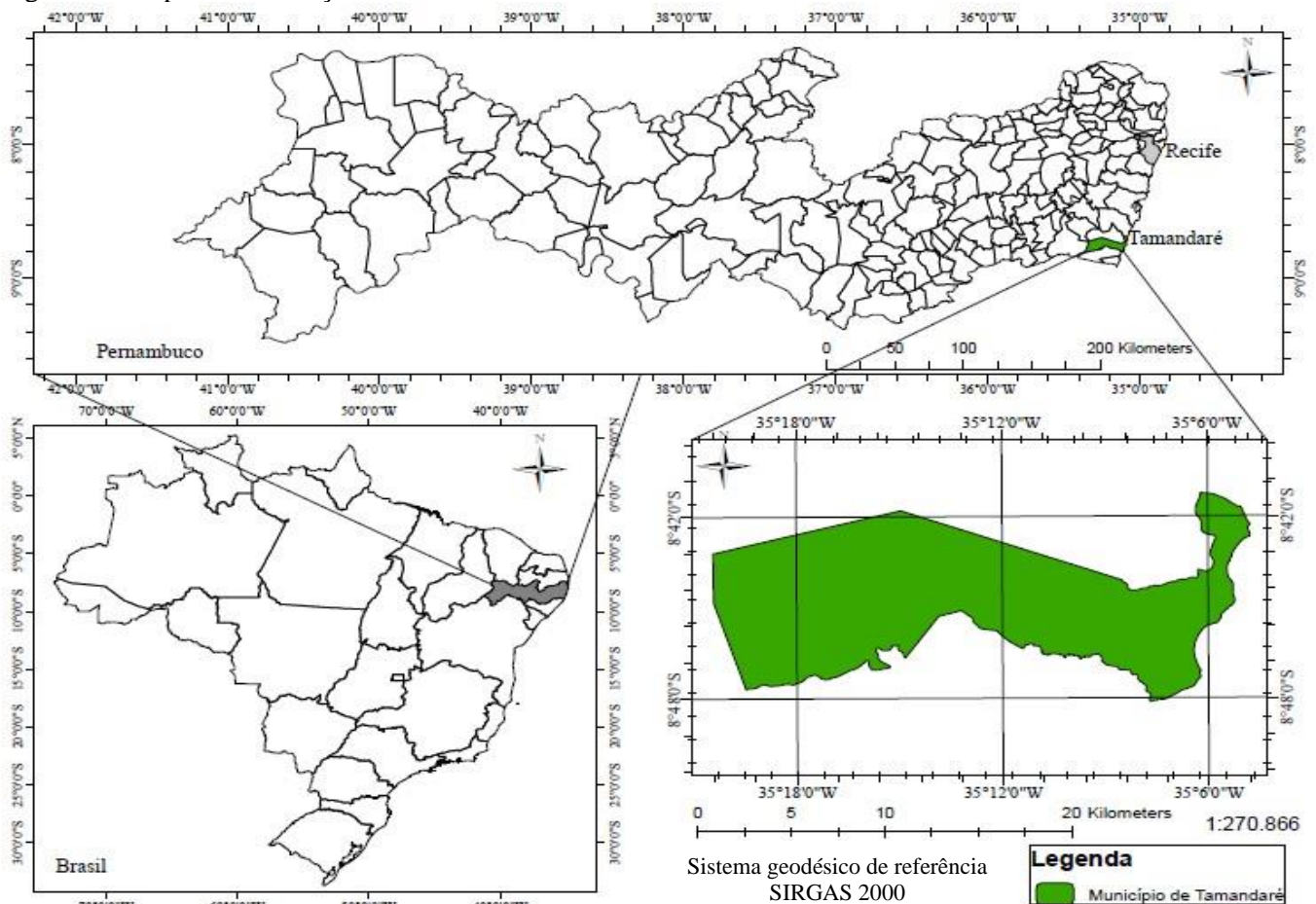
4. ASPECTOS GEOAMBIENTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Tamandaré é uma cidade turística muito conhecida tanto no Pernambuco quanto no Brasil. Com belezas naturais e praias muito visitadas. A população de Tamandaré chega a duplicar em períodos festivos, como o Carnaval. A necessidade de conservar os bens hídricos é de grande valia, já que o potencial de contaminação das águas subterrâneas pode ser agravado ainda mais em períodos festivos.

4.1 Localização de vias de acesso

A zona costeira sul do estado de Pernambuco é formada pelos municípios de Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Rio Formoso, Sirinhaém, Barreiros, Tamandaré e São José da Coroa Grande. A área objeto do trabalho corresponde ao município de Tamandaré que é localizado a cerca de 110km de distância da capital Recife. Possui cerca de 213.750 km² e uma população estimada de 20.715 habitantes, de acordo com o Censo de 2010 (IBGE, 2020). O acesso para o município se dá pelas rodovias BR 101, PE 60 e PE 76. Tamandaré é limitado a norte por Rio Formoso e Sirinhaém, a sul por Barreiros, a oeste por Água Preta e a leste pelo Oceano Atlântico.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



4.2 Geologia

A área estudada situa-se no nordeste brasileiro e está totalmente inserida na Bacia Sedimentar de Pernambuco em sua porção centro-sul (GUIMARÃES, 2016).

Da cidade do Recife para sul (onde a cidade de Tamandaré se encontra) desenvolve-se de forma descontínua, com grandes variações dimensionais e de ocorrência espacial, a bacia hidrogeológica costeira, conhecida como Bacia Vulcano-Sedimentar do Cabo.

A Bacia Vulcano-Sedimentar do Cabo ocupa toda a extensão da faixa costeira sul do Estado de Pernambuco, com uma largura média de 10km na porção insurgida. O limite desta bacia é feito ao sul pelo Alto de Maragogi (local de limite dos estados de Pernambuco e Alagoas), ao norte pelo Lineamento Pernambuco com direção aproximada na planície do Recife, e a oeste limita-se por falhas normais com o Terreno Pernambuco-Alagoas (SANTOS, *et al.* 2000)

Cobrimo discordantemente as várias formações das bacias sedimentares, ocorrem os sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras, que na região não se apresenta como bom aquífero (PERNAMBUCO, 1998).

Segundo LEAL (1994), ocorrem na área duas unidades geológico/geotectônicas distintas, representadas localmente por rochas cristalinas do embasamento pré-cambriano e as rochas sedimentares da Bacia Costeira Pernambuco/Paraíba. O embasamento cristalino é composto essencialmente por granitos e granodioritos, enquanto a bacia sedimentar é representada pelas formações Cabo, Estiva, Ipojuca e Barreiros, além dos sedimentos recentes de idade cenozoico e mesozoica.

4.3 Formação Hidrogeológica

O município de Tamandaré está inserido em dois domínios, o Hidrogeológico Intersticial e o Hidrogeológico Fissural. As rochas do embasamento cristalino armazenam água em fraturas abertas, mas em pouca quantidade e apresentando geralmente má qualidade química (FRANÇA *et al.* 1988). O Domínio Intersticial é composto de rochas sedimentares dos Depósitos Flúvio-marinhas. O Domínio Fissural é formado de rochas do embasamento cristalino que englobam o sub-domínio rochas metamórficas constituído do Complexo Cabrobó e o sub-domínio rochas ígneas da Suíte calialcalina Itaporanga (CPRM, 2005).

No território de Tamandaré, a formação hidrogeológica com maior destaque é a formação Cabo. Adicionalmente existe a formação Barreiras, ocorrendo muito restritamente na área do município estudado, entretanto, em outras áreas do litoral sul do Pernambuco esta formação hidrogeológica é mais expressiva, com área de aproximadamente 14,4 km² (COSTA & COSTA FILHO, 2004).

4.4 Hidrografia

De acordo com o Diagnóstico do município de Tamandaré (CPRM, 2005), o território de Tamandaré é banhado pelos rios Una e Ilhetas, além do riacho Jundiá e do córrego Saltinho, sendo estes três últimos localizados, quase inteiramente dentro dos limites municipais.

Conforme o diagnóstico socioambiental do litoral sul de Pernambuco, elaborado por Pernambuco (2001;2003), o rio Una nasce na Serra do Salobro, município de Capoeiras, localizado no agreste pernambucano. Nas proximidades da Planície litorânea corresponde ao limite municipal entre Tamandaré e Barreiros.

O rio Ilhetas nasce na porção sudoeste do município de Rio Formoso, próximo à divisa Tamandaré, drenando na direção sudeste, desde sua nascente, até atingir a Planície Costeira. Ao aproximar-se do litoral segue para nordeste e, nessa direção, desemboca no Oceano Atlântico. Neste trecho final, o rio Ilhetas é ladeado por manguezais que são separados do oceano por um estreito cordão arenoso.

O riacho Jundiá drena para sudeste, atravessando o município de Tamandaré na sua porção mais ocidental e despejando suas águas no Rio Una, nas proximidades do engenho Jundiá de Baixo.

O córrego Mamucabas, nasce a oeste da Reserva Biológica de Saltinho, unidade de conservação federal sob responsabilidade do Núcleo de Gestão Integrada do ICMBio, tratando-se de um importante fragmento de Mata Atlântica no litoral sul de Pernambuco. Ainda dentro desta reserva, este córrego é represado, de tal forma a compor a principal fonte de abastecimento da cidade de Tamandaré. O Mamucabas drena inicialmente na direção sudeste, tomando em seguida a direção sul até sua desembocadura no rio Ilhetas, já nas proximidades da faixa litorânea.

4.5 Solos

Os solos do Litoral Sul de Pernambuco variam desde os predominantemente arenosos, localizados nos terraços litorâneos, até os de textura argilosa que recobrem os morros e colinas situados a oeste da Planície Costeira e constituem a associação Latossolo Vermelho Amarelo e Podzólico Vermelho Amarelo. Ocupando a maior parte da área, estes últimos solos são oriundos da decomposição de rochas cristalinas (granitos e gnaisses), bem como de sedimentos argilo-arenosos das Formações Barreiras e Cabo. São, geralmente, profundos, ácidos e de baixa fertilidade. Na extremidade oeste dos municípios de Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca e no trecho entre as cidades de Sirinhaém e

Rio Formoso, os Podzólicos apresentam-se rasos e com grande quantidade de afloramentos rochosos, tornando restrito o uso agrícola (PERNAMBUCO, 2001).

Os solos originários de depósitos aluviais (solos Aluviais), ao longo de rios e riachos, em geral associados a solos hidromórficos, mal drenados (solos Gley) se apresentam encharcados nos trechos onde o lençol freático aflora. Os solos aluviais, juntamente com os de origem vulcânica (Terra Roxa Estruturada), encontrados em colinas da Formação Ipojuca, são os de melhor potencial agrícola da área.

4.6 Vegetação

Originalmente, a floresta tropical atlântica recobria toda a faixa costeira do estado de Pernambuco, sendo representada por vegetação do tipo Mata Atlântica e manguezais situados nas cotas mais baixas e sob influência das águas das marés. Atualmente, supõe-se que alguns poucos remanescentes dão indicação dessa vegetação primária, ocorrendo, em geral, matas secundárias de extensão e estágios de sucessão diversos, distribuídos de forma esparsa por toda área do Litoral Sul (PERNAMBUCO, 2001). No município de Tamandaré, a Reserva Biológica de Saltinho, trata-se de uma das expressões mais importantes da Mata Atlântica no estado. Nesta reserva localiza-se a nascente do Córrego Mamucabas.

4.7 Relevo

O relevo de Tamandaré é formado por áreas que passaram por retrabalhamento intenso, caracterizando como unidades das superfícies retrabalhadas. Essas áreas possuem relevo altamente dissecados e com vales profundos. A região do litoral de Pernambuco e Alagoas, é formada pelo “mar de morros” que precedem a Chapada da Borborema, com solos pobres e vegetação de floresta muito secas, adaptadas aos climas quentes (hipoxerófila).

O relevo é bastante irregular, marcado por morros e colinas, sendo predominantemente representado por áreas com altitudes entre 10 e 50 m configurando o topo dessas elevações um plano ascendente que se eleva dos limites da Planície Costeira. Em direção ao continente, a topografia é cada vez mais acidentada, com altitudes superando facilmente os 400 metros. A vegetação original é do tipo Mata Atlântica e manguezais situados nas cotas mais baixas e sob influência das águas das marés. Entretanto, devido à forte ação antrópica, a maior parte da área é ocupada por plantações de cana-de-açúcar.

4.8 Clima e pluviometria

O clima de Tamandaré é do tipo Tropical Chuvoso com verão seco (CPRM, 2005). De acordo com o Jornal do Tempo (2020), a partir de dados climáticos extraídos de série histórica compreendida entre 1961 e 1990, e dados do Atlas pluviométrico do Brasil produzido pela CPRM (2011), com séries históricas compreendidas entre 1977 e 2006, a pluviosidade média anual de Tamandaré é de aproximadamente 1.800mm, tendo o mês de novembro como o mais seco do ano, com ocorrência média de 30,6 mm. O mês de junho é o mais chuvoso, com média pluviométrica de 307 mm. O período chuvoso, ou inverno, inicia-se em março e dura até o mês de agosto, chovendo nesse período cerca de 1.240,1 mm. O período seco, ou verão, se inicia em outubro e perdura até janeiro, chovendo nesta época cerca de 196,8 mm.

4.9 Uso e ocupação do solo

Do litoral para o interior, os tipos predominantes de uso/ocupação do solo encontrados nesse segmento do litoral pernambucano distribuem-se em três grandes faixas norte-sul aproximadamente paralelas, sendo essas: uma primeira faixa, de localização litorânea, onde intercalam-se, em proporções diversas, coco-da-baía, uso urbano e manguezais; uma segunda faixa, localizada à retaguarda da primeira, onde figuram como usos predominantes cana-de-açúcar, policultura (novos assentamentos rurais), zonas industriais e alguns núcleos urbanos de relativa expressão (Cabo de Santo Agostinho, Barreiros, Ipojuca, Sirinhaém, Rio Formoso e Tamandaré), intercalados por remanescentes de Mata Atlântica; e uma terceira faixa, localizada na porção mais ocidental da área, tendo como usos predominantes plantação de cana-de-açúcar, intercalados, na porção centro-norte do espaço em questão, por fazendas, granjas e chácaras de recreio e, no restante do segmento em causa, por remanescentes de Mata Atlântica, com extensão e adensamento variados (PERNAMBUCO, 2001).

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada no trabalho proposto consistiu basicamente na realização das seguintes etapas:

- Aquisição de dados e informações
- Estruturação da base de dados
- Alimentação da base de dados
- Elaboração do mapa de vulnerabilidade natural
- Elaboração do mapa de fontes contaminantes
- Elaboração do mapa de risco de contaminação

5.1 Aquisição de dados e informações

Esta etapa foi concretizada a partir de visitas técnicas às instituições responsáveis pela cartografia ou guarda de documentos geoambientais sobre a área de estudo, sendo eles a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) e Secretaria de Infraestrutura de Tamandaré. Nesta ocasião foram levantados e adquiridos os dados e informações referentes à área em estudo.

Os documentos adquiridos foram submetidos a uma análise de forma a verificar quais seriam utilizados, ou seja, os quais tivessem informações necessárias para a confecção dos mapas, a partir de dados geoambientais pertinentes (hidrogeologia, por exemplo), permitindo desta maneira a inserção dos mesmos em uma base de dados georreferenciada (Geodatabase) estruturada posteriormente em software licenciado de geoprocessamento (ArcGis).

5.2 Estruturação da base de dados

A estruturação é uma etapa em que os dados serão inseridos numa base que será armazenado organizadamente todo material cartográfico (arquivos shapefiles (arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas) e raster (imagens que contêm a descrição de cada pixel, em oposição aos gráficos vetoriais)), a ser utilizado nas atividades de modelamentos de dados e conseqüente geração dos mapas de vulnerabilidade natural, de fontes contaminantes e de risco de poluição dos aquíferos subterrâneos.

Como parte da estruturação do Geodatabase (base de dados) (GDBTAMANDARE) foram criados mais de um *Feature Datasets* (coleção de classes de recursos relacionados que compartilham

um sistema de coordenadas em comum), cada um direcionado para produtos semelhantes (elementos cartográficos, elementos do meio físico, elementos do meio antrópico, elementos da biota etc) e onde seriam armazenadas as *Feature Class* (produtos temáticos) utilizadas na elaboração dos trabalhos de modelamento. Com objetivo de facilitar a importação de produtos temáticos (mapas geológicos, pedológicos, fitológicos etc), optou-se pela criação de várias *Feature Datasets*, projetadas cada uma delas em diferentes sistemas cartográficos (SAD-69, WGS-84, SIRGAS 2000, etc) visto que os órgãos responsáveis pelos produtos temáticos optaram pela utilização de sistemas cartográficos distintos. Entretanto, nas atividades de modelamento deste trabalho de pesquisa, optou-se pela utilização do sistema geodésico de referência SIRGAS 2000.

5.3 Carga da base de dados

A base de dados, recém estruturada, foi alimentada com os dados e informações previamente adquiridas, sempre que necessário à confecção de mapas com diferentes aspectos, através de criação de *Features Class*, com feições importadas do próprio geodatabase.

Como parte das atividades de estruturação de dados, procedeu-se inicialmente o recorte dos produtos temáticos pela área do município de Tamandaré, padronizando-se desta maneira as áreas dos mapas a serem tratados. Ou seja, todos os *shapefiles* utilizados no modelamento corresponderam a mesma porção territorial.

5.4 Elaboração do mapa de vulnerabilidade natural

Para determinar a vulnerabilidade natural de aquíferos, foi aplicada uma metodologia proposta por Foster (1987), Foster, Hirata, e Rocha (1988) e Foster *et al.* (2006), conhecida como método GOD (Groundwater occurrence, Overall aquifer class e Depth to groundwater table), sendo este amplamente aplicado nos países da América Latina, tanto pela adequação às condições Brasileiras e Caribenhas, como por seu bom desempenho, menor custo e maior facilidade de obtenção dos parâmetros utilizados pelo método. Para a determinação da vulnerabilidade são levados em consideração a avaliação de três parâmetros:

1. O tipo de ocorrência da água subterrânea, ou tipo de aquífero (G), corresponde a um *score* que varia de 0,0 - 1,0, de acordo com o grau de confinamento;
2. Litologia (O), o solo e as litologias predominantes, situadas acima da zona saturada do aquífero, condicionam o tempo de deslocamento de contaminantes e vários processos de

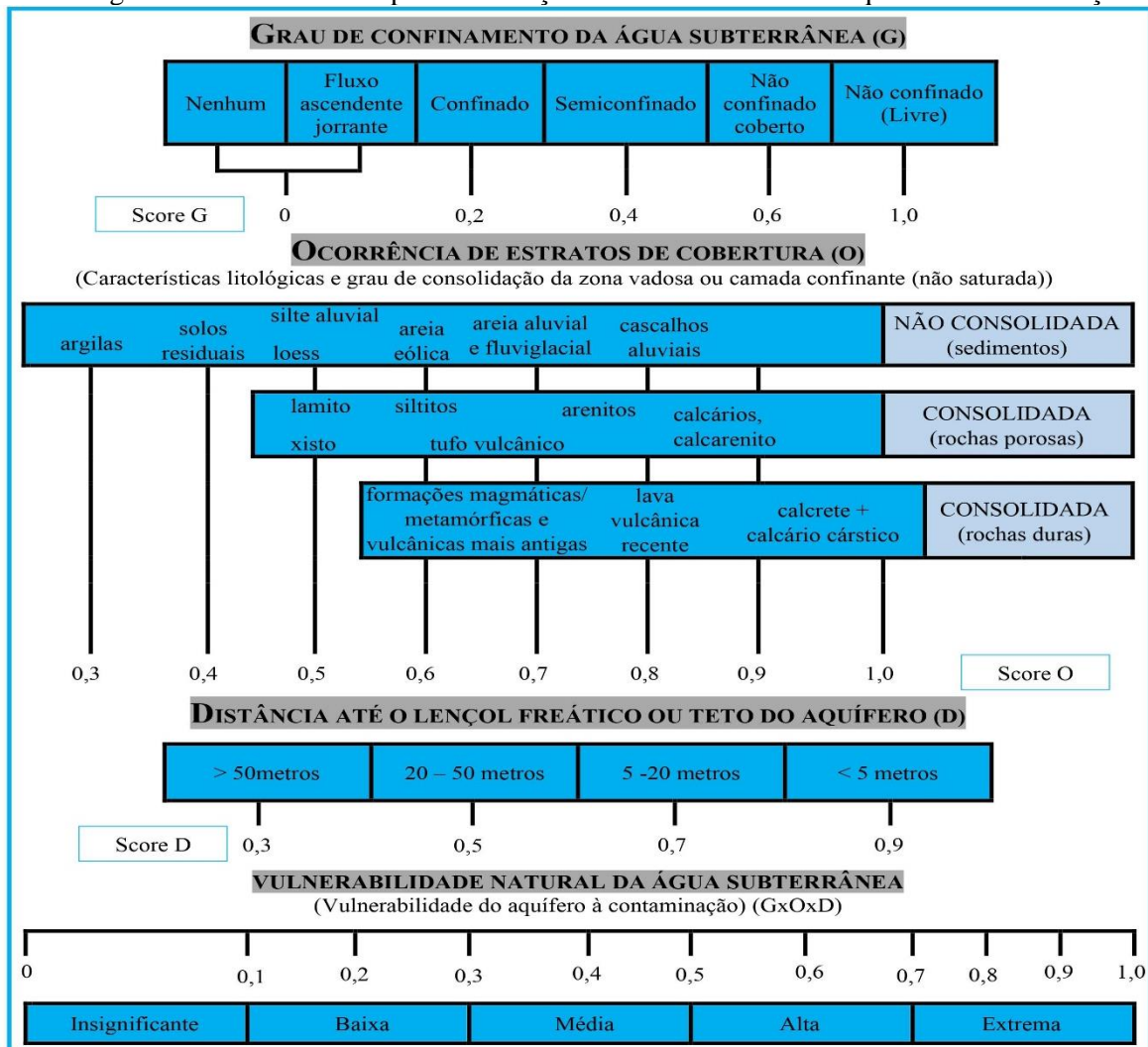
sua atenuação. Cada tipo de solo tem sua capacidade de atenuação. A ocorrência de estratos litológicos pode implicar em *score*, com valores variando de 0,3 a 1,0.

3. Profundidade do nível de água no Aquífero (D), corresponde à profundidade do teto do aquífero, sendo a distância que o contaminante terá de percorrer para alcançar a zona saturada do mesmo. A Profundidade ou nível estático pode assumir valores de *score* que variam de 0,3 a 0,9.

O índice de vulnerabilidade natural do aquífero é dado pelo produto dos *scores* dos três parâmetros citados acima, determinados cada um deles segundo o esquema apresentado na figura 2. Deve-se salientar que no produto dos três parâmetros, todos terão o mesmo grau de importância, ou seja, um peso unitário.

Como resultado do produto têm-se o índice de vulnerabilidade com valores variando entre 0 e 1.

Figura 2 – Diagrama do método GOD para a avaliação da vulnerabilidade do aquífero a contaminação



Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (2006).

Os dados com as informações necessários para a determinação dos parâmetros dos métodos foram identificados pelo mapa de confinamento hidráulico (mapa hidrogeológico), mapa geológico, mapa de solo e informações sobre a profundidade do nível freático a partir de modelo digital de terreno (MDT).

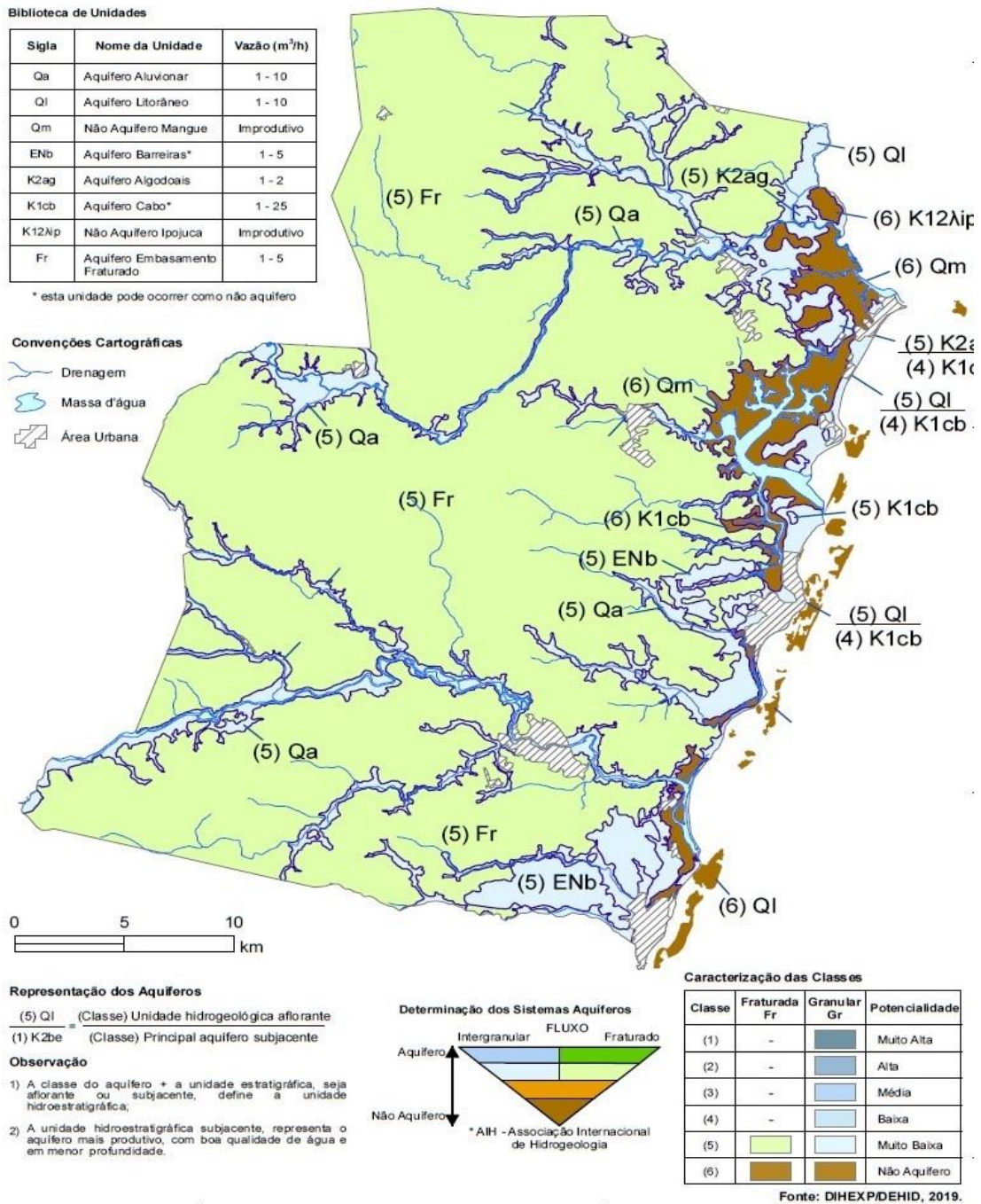
O índice de vulnerabilidade de cada aquífero é determinado em função de uma análise conjunta dos mencionados fatores, que o classificará em vulnerabilidade extrema, alta, média, baixa ou insignificante.

5.4.1 Determinação do parâmetro G

Para a construção do mapa que indica a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas da área de Tamandaré, foi necessário a aquisição de arquivos em formatos digitais que possibilitassem a identificação dos parâmetros necessários para a utilização do método GOD.

Como forma de identificar os aquíferos e a litologia da área da região de estudo, foi utilizado os dados do Mapa geodiversidade do litoral sul de Pernambuco, com escala 1:100.000 e elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2019), conforme ilustrado na Figura 3. Neste mapa foram retiradas as informações correspondentes aos parâmetros “G” e “O” do método.

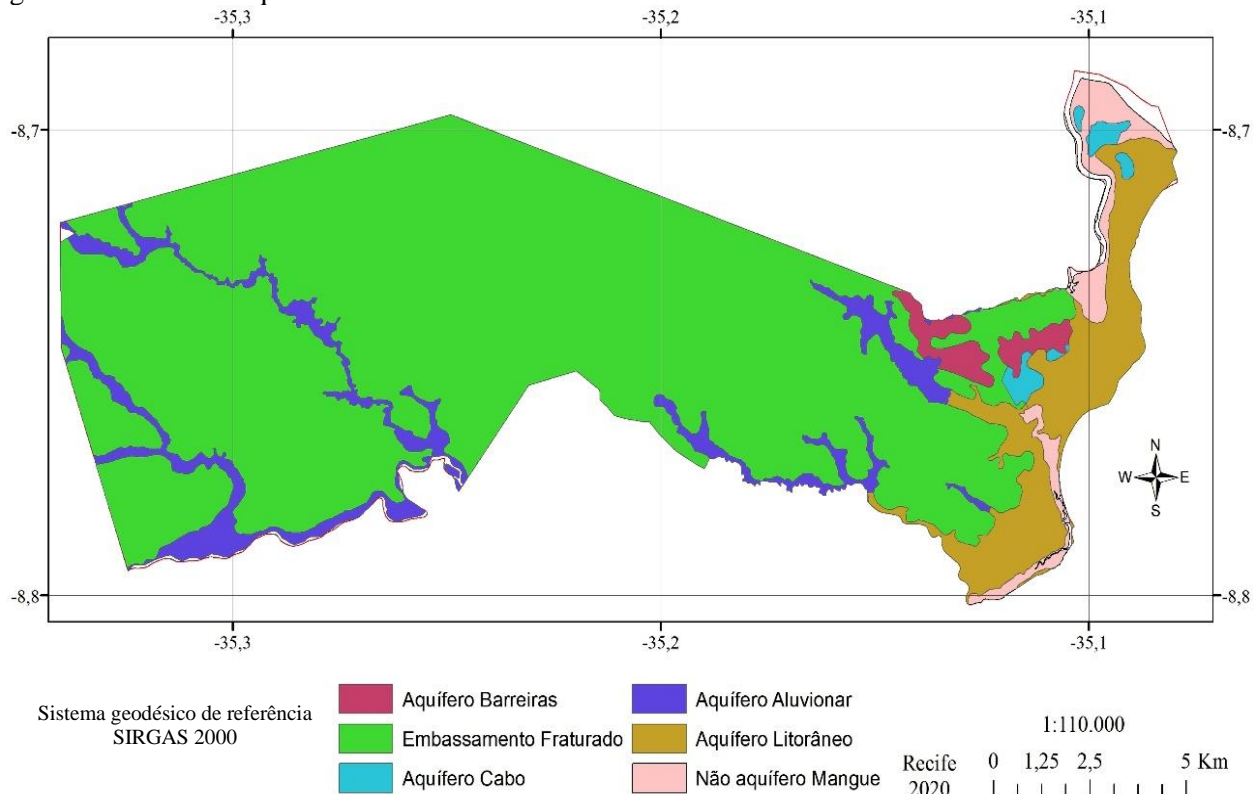
POTENCIALIDADE HIDROGEOLÓGICA



Fonte: CPRM, (2019).

A avaliação da vulnerabilidade natural foi determinada apenas para as áreas aflorantes, onde os aquíferos ocorrem de forma livre. O mapa com os aquíferos existentes em Tamandaré é apresentado na figura 4, com o recorte do mapa hidrogeológico disponibilizado como encarte no mapa de geodiversidade do litoral sul de Pernambuco.

Figura 4 – Unidades Aquíferas de Tamandaré-PE.



Para o parâmetro “G” (ocorrência da água subterrânea ou tipo de aquífero), foi atribuído valor único para todos os aquíferos, em virtude de o mapa representar somente as porções não confinadas (livres). Como na área de Tamandaré a água subterrânea é predominantemente armazenada em aquíferos livres, o *score* do parâmetro “G” para todas as áreas aflorantes, de acordo com o método GOD, foi considerado 1 (um), conforme ilustrado no quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos aquíferos (Parâmetro “G”).

Tipo de Formação	Grau de confinamento	Score “G”
Aquífero Barreiras	Não confinado	1,0
Embasamento Fraturado	Não confinado	1,0
Aquífero Cabo (Aflorante)	Não confinado	1,0
Aquífero Aluvionar	Não confinado	1,0
Aquífero Litorâneo	Não confinado	1,0
Não Aquífero Mangue	Não confinado	1,0

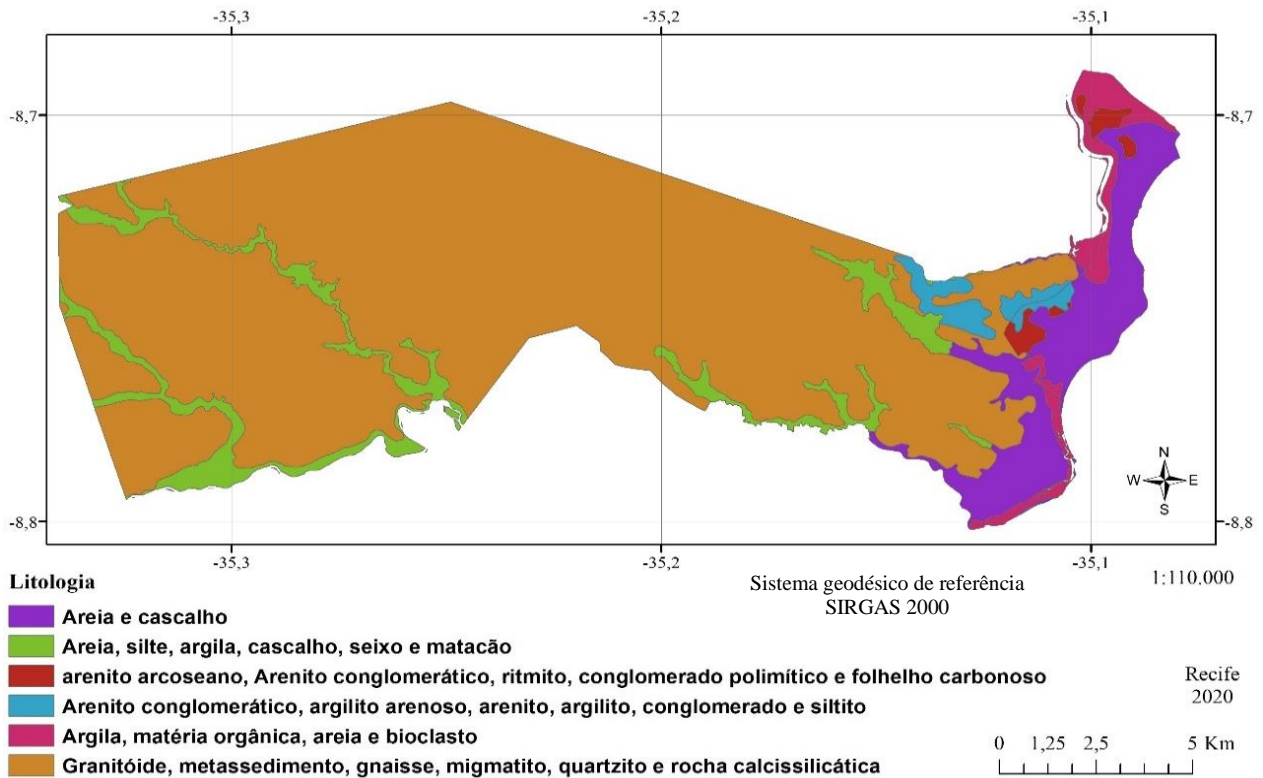
Fonte: CPRM, 2019.

5.4.2 Determinação do parâmetro O

A partir da determinação do primeiro parâmetro, segue-se para a definição do segundo que, por sua vez, está relacionado com a litologia da área, que compreende a extensão dos aquíferos de Tamandaré.

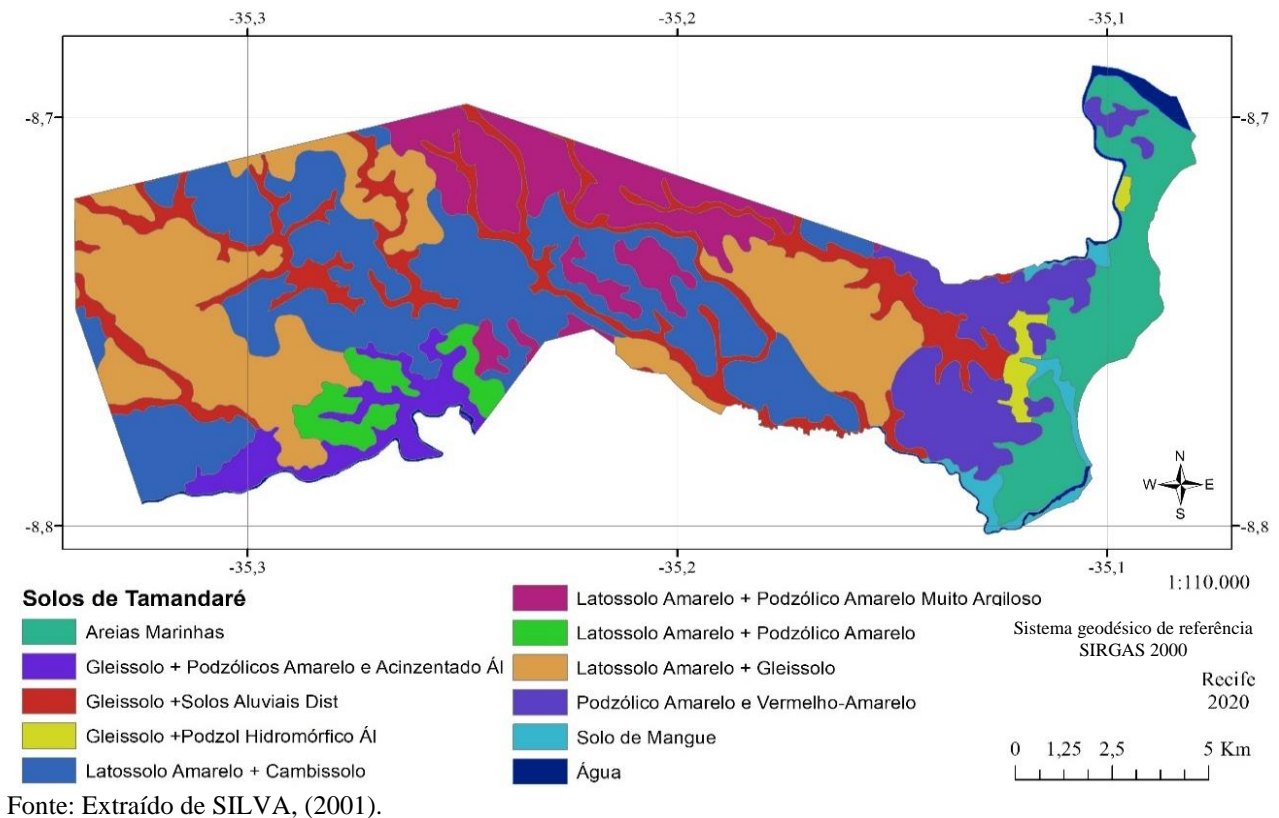
O segundo parâmetro é a ocorrência de estratos de cobertura da zona que armazena a água subterrânea, ou da litologia. Ele corresponde ao parâmetro “O” do método e, para esta classificação, foram utilizados dados referentes à litologia dos aquíferos, também a partir do mapa hidrogeológico disponibilizado como encarte do mapa de geodiversidade do litoral sul do Pernambuco, conforme ilustrado na Figura 05.

Figura 5 – Tipos litológicos ocorrentes nas unidades aquíferas de Tamandaré.



O mapa de solos também fornece informações importantes que podem auxiliar na atribuição do *score* do segundo parâmetro do método GOD. Este mapa serviu de apoio para que fossem tomados os *scores* de forma mais adequada, baseando-se nas características de cada tipo de solo e sua influência na litologia da região de estudo. O mapa de solos utilizado está ilustrado na Figura 06.

Figura 6 – Mapa de Solos de Tamandaré.



De acordo com os estudos de Borges, Athayde e Reginato (2017), o solo é considerado como uma primeira barreira de percolação dos contaminantes, dessa forma, pode ser considerado como camada de cobertura. Quando os contaminantes ultrapassam essa barreira, infiltram pelas fraturas atingindo a água subterrânea presente no aquífero.

A maior parte das variáveis é vinculada às características dos solos e à litologia dos aquíferos. Desse modo, é importante que os *scores* atribuídos aos parâmetros sejam considerados de forma adequada, baseando-se no método utilizado.

A atribuição dos *scores* para os diferentes tipos de litologia presentes na área de Tamandaré, são apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 – Classificação da litologia (Parâmetro “O”).

Tipo Litológico	Score “O”
Areia e cascalho	0,65
Areia, silte, argila, cascalho, seixo e matacão	0,6
Arenito arcoseano, arenito conglomerático, ritmito, conglomerado polimítico e folhelho carbonoso	0,8
Arenito conglomerático, argilito arenoso, arenito, argilito, conglomerado e siltito	0,7
Argila, matéria orgânica, areia e bioclasto	0,3
Granitóide, metassedimento, gnaisse, migmatito, quartzito e rocha calcissilicática	0,6

Fonte: Adaptado de CPRM (2019).

5.4.3 Determinação do parâmetro D

Para a determinação do terceiro parâmetro do método GOD, assim como descrito na metodologia, foram utilizadas imagens em formato de modelo digital de terreno (MDT), para que fosse extraída a profundidade do nível freático.

A partir dos dados necessários para a caracterização dos parâmetros “G” e “O”, foi necessário a aquisição de dados em formatos digitais, como o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), Topodata e modelo digital de terreno (MDT), assim também como a rede de drenagem da área, em formatos shapefiles e raster, ambos trabalhados em software de geoprocessamento licenciado. Com esses arquivos e imagens, foi extraída a superfície do lençol freático, que foi utilizada como base para o parâmetro “D” do método, para determinar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas de Tamandaré.

As imagens em formato de modelo digital de terreno (MDT) foram obtidas pelo ASF (Alaska Satellite Facility) Data Search (2020), site onde são abrigadas imagens de satélites de alta qualidade, de todo o globo terrestre, capturadas pela NASA. O ASF Data Search processa, arquiva e distribui dados de sensoriamento remoto para usuários em todo o mundo, com a missão de tornar acessíveis os dados de sensoriamento remoto. As imagens utilizadas correspondem às cartas que compreende o município de Tamandaré. Ambas foram Topodata SRTM de 30 metros de resolução. A figura 7 apresenta a forma de aquisição das imagens descritas, a partir da obtenção de cartas que compreendiam o território de Tamandaré.

Figura 7 – Obtenção de imagens SRTM e MDT para a determinação da superfície freática de Tamandaré-PE.

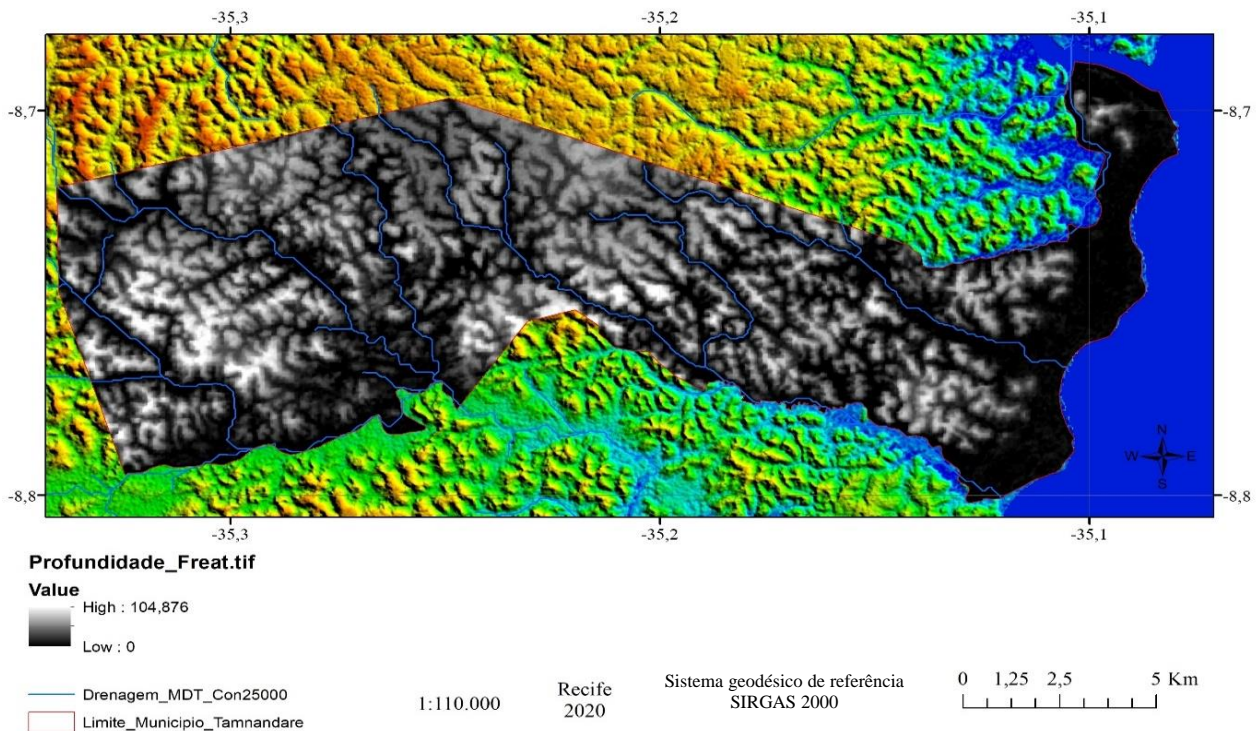
The screenshot displays the ASF Data Search Vertex web interface. At the top, the search parameters are set to 'Geographic' search type, 'Sentinel-1' dataset, and a polygon area of interest. The search results show 250 files out of 1,716 total. The main map area shows a satellite image of a region in Brazil, with a yellow box highlighting the area of interest. Below the map, a table lists search results with columns for scene ID, date, and file size. The 'Scene Detail' panel provides technical specifications for the selected scene, including frame number, flight direction, polarization, and orbit type. A cookie notice is visible at the bottom of the interface.

Scene ID	Date	File Size
S1A_IW_RAW_OSDV_20200303T0753... 162E	March 03 2020 07:53:53	1.41 GB
S1A_IW_GRDH_1SDV_20200303T0753... 4893	March 03 2020 07:53:56	38.74 KB
S1A_IW_RAW_OSDV_20200225T0801... A74C		

Fonte: ASF (2020).

Também foi utilizado o mapa hipsométrico que contém dados relativos ao relevo, como altitude, que serviu para a identificação mais coerente das cotas mais altas e baixas que compõem a rede de drenagem. Na figura 8 é apresentado um exemplo da constituição desse mapa.

Figura 8 – Mapa com a drenagem em formato MDT em conjunto com o mapa hipsométrico da cidade de Tamandaré.



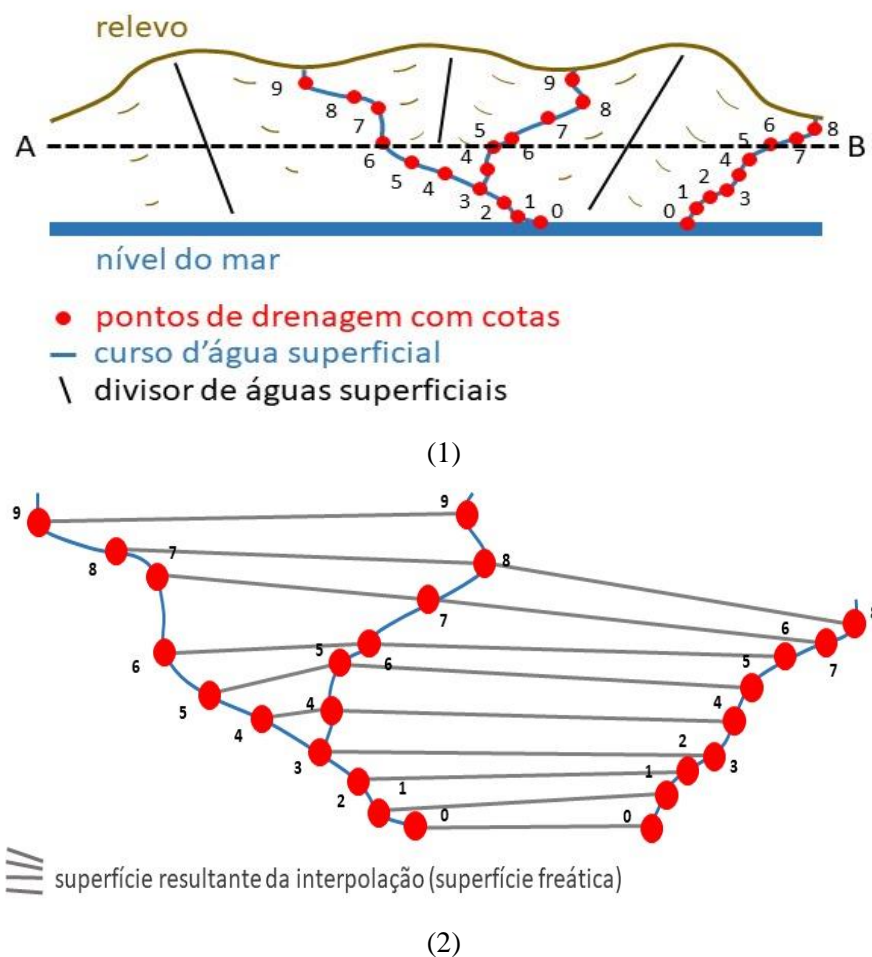
Com a extração da rede de drenagem e dos dados obtidos na aquisição das imagens com a profundidade da superfície freática da área, foi elaborado o mapa de superfície freática. Neste foi determinado os *scores* para cada profundidade de acordo com o método de Foster *et al.* 2006.

Muitos trabalhos relacionados à obtenção do parâmetro “D” do método GOD, utiliza a superfície potenciométrica, feita pela interpolação dos níveis estáticos verificados em poços tubulares. Trabalhos como os realizados por Pinheiro *et al.* (2015), Duarte *et al.* (2016), Araújo *et al.* (2017), Canova e Salazar, (2018), Marques e Oliveira, (2020), utilizam dados de poços cadastrados no sistema SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) mantido pela CPRM. Porém, a utilização de dados de poços reflete o nível de água principal dos aquíferos e não o do nível freático (primeira superfície de água, que muitas vezes não é conectada hidraulicamente de forma contínua com a água subterrânea do aquífero). Outra questão é que a própria metodologia GOD define que deve ser considerado a superfície freática e não uma superfície potenciométrica. Por fim, a base de dados de poços cadastrados no SIAGAS para a área de estudo é insuficiente para ter uma representatividade adequada da área, pois muitos dos poços são clandestinos e não outorgados.

Desta forma, assim como os trabalhos realizados por DAEE-UNESP (2013) e o Comité Inter-governamental Coordenador de los Países de la Cuenca del Plata (2015), a avaliação do parâmetro

“distância até o lençol freático” baseou-se na elaboração de uma superfície freática, utilizando o modelo digital de terreno (MDT) de resolução espacial 30 metros. Pontos em drenagens superficiais foram extraídos, considerando-os como áreas de descarga dos aquíferos, para gerar uma superfície numérica do nível freático e subtraí-la da superfície do modelo digital de terreno. Após o resultado da subtração entre as superfícies, os valores de profundidade do nível de água foram separados em intervalos de classes conforme o método adotado. Para isso, utilizou-se os pontos de intersecção da topografia com as drenagens superficiais (pontos de descarga de água subterrânea), assumindo que essas sejam as áreas em que os aquíferos tenham profundidade do nível da água igual a zero. Na figura 09, são apresentados alguns esquemas de modo a facilitar o entendimento do método de extração da profundidade freática.

Figura 9 - Esquema de geoprocessamento para avaliação da profundidade freática Cotagem (1), superfície resultante (2) e profundidade do lençol freático (3).



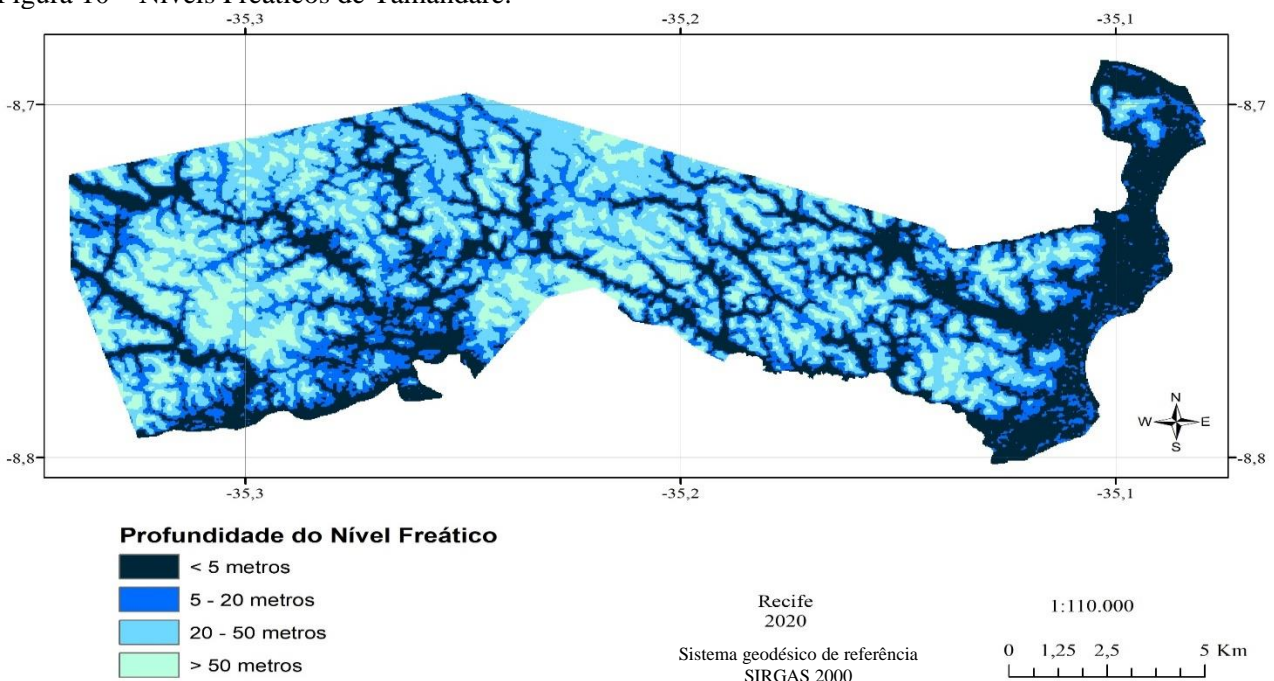


(3)

A modelagem não corresponde a um modelo perfeito totalmente ajustado ao real, mas sim a um modelo que se aproxima, e serve para ser utilizado para estabelecer uma hierarquização em quatro classes de onde ocorre a superfície freática com maior e em menor profundidade.

Na figura 10 estão apresentadas as profundidades encontradas para o nível freático da área de estudo.

Figura 10 – Níveis Freáticos de Tamandaré.



De acordo a figura 10, os níveis freáticos mais rasos têm uma predominância maior na região costeira de Tamandaré, englobando a área urbana da cidade. Nas outras áreas o nível é raso em cursos de drenagem.

Com os dados referentes às profundidades até o lençol freático, é feita a determinação dos *scores* para o último parâmetro, baseados na figura 2 do método adaptado de Foster *et al.*, (2006). Essa classificação é apresentada no quadro 3.

Quadro 3 – Classificação da profundidade do lençol freático (Parâmetro “D”).

Nível Freático	Score “D”
< 5 metros	0,9
Entre 5 e 20 metros	0,7
Entre 20 e 50 metros	0,5
> 50 metros	0,3

De forma a agrupar os parâmetros, o quadro 4 apresenta os *scores* atribuídos para os 3 (três) parâmetros do método de avaliação de vulnerabilidade natural (GOD).

Quadro 4 – Parâmetros e *scores* agrupados.

Parâmetro	Aquífero	Tipo de Ocorrência	Score
G	Aquíferos aflorantes	Aquífero não confinado (livre)	1,0
O		Litologia	
		Arenito arcoseano, arenito conglomerático, ritmito, conglomerado polimítico e folhelho carbonoso	0,8
		Arenito conglomerático, argilito arenoso, arenito, argilito, conglomerado e siltito	0,7
		Areia e cascalho	0,65
		Granitóide, metassedimento, gnaiss, migmatito, quartzito e rocha calcissilicática	0,6
		Areia, silte, argila, cascalho, seixo e matacão	0,3
		Argila, matéria orgânica, areia e bioclasto	
D		Profundidade Freática	
		< 5 metros	0,9
		Entre 5 e 20 metros	0,7
		Entre 20 e 50 metros	0,5
		> 50 metros	0,3

Em seguida, determina-se o índice de vulnerabilidade de cada aquífero que corresponderá ao produto dos *scores* de cada um dos parâmetros (G, O e D) previamente calculado. Com a obtenção deste índice, passa-se à determinação das classes de vulnerabilidade dos aquíferos, bem como os diferentes significados de cada classe de vulnerabilidade, conforme ilustrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Definição das classes de vulnerabilidade do aquífero.

Índice GOD	Classes de vulnerabilidade	Significado
0 - 0,1	Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea
0,1 - 0,3	Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
0,3 - 0,5	Média	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
0,5 - 0,7	Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente absorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação
0,7 - 1,0	Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação

Fonte: Adaptado de FOSTER *et al.*, 2002 e PINHEIRO *et al.*, 2015.

5.5 Elaboração do mapa de fontes contaminantes

Esta etapa do trabalho consistiu no levantamento bibliográfico das atividades potencialmente contaminantes, a partir das informações obtidas durante a coleta de dados e informações realizados nos dias 04, 05 e 06 de dezembro de 2019. Foi confeccionado um formulário (em apêndice) que orientou a coleta dos dados sobre o potencial das fontes contaminantes no município, contendo informações referentes aos aspectos locais (localização, denominação, proprietários, documentação fotográfica, etc) e aspectos operacionais (tipificação da atividade antrópica, situação atual, indústria, tipo de cultura, tempo de atuação, resíduos gerados, descarte de resíduos, etc). Dentre as atividades antrópicas potencialmente poluidoras destacam-se a mineração, atividades agrícolas, cemitérios, lixões/aterros, postos de combustível, armazenamento de produtos químicos, obras enterradas (dutos e tubulações), etc, isto sem considerar a falta de saneamento básico.

Segundo Foster *et al.* (2002), a recarga dos aquíferos ocorre, na maioria dos casos, devido à infiltração da água de chuva em excesso no solo, dessa forma, atividades realizadas neste solo podem ameaçar a qualidade da água subterrânea. A poluição de aquíferos ocorre onde o descarte da carga contaminante gerada pela atividade antrópica (urbana, industrial, agrícola, mineradora) não é bem controlada e certos componentes extrapolam a capacidade de atenuação das camadas do solo. Em Tamandaré o saneamento básico atinge mais de 70% da malha urbana, entretanto, na zona rural, há a utilização de fossas sépticas, ou domésticas.

A partir de uma análise criteriosa dos dados levantados no cadastramento das fontes contaminantes existentes, foi confeccionado o Mapa de Fontes Contaminantes identificando as áreas com

potencial de contaminação e classificando o potencial poluidor em ausente, baixo, moderado e elevado.

Para a classificação das fontes contaminantes foi adotado a metodologia POSH (Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically), proposto por Foster et al. (2006). Esta classifica as fontes pontuais e difusas em três níveis qualitativos de geração de contaminação (baixo, moderado e elevado), tomando como base o tipo de atividade, sua capacidade de geração de contaminantes e a carga hidráulica associada.

A metodologia adotada baseia-se no mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos a partir da geração de contaminação das possíveis fontes contaminantes que a área possui (lixões, cemitérios, matadouros, dentre outras), analisando áreas com maior risco, a partir da identificação de atividades antrópicas que possam provocar contaminação às águas subterrâneas.

Ao levantar as fontes contaminantes durante o levantamento das mesmas, é conveniente classificá-las com base em duas características inerentes ao potencial de contaminação do subsolo:

- A possibilidade de presença de contaminantes que, geralmente, são persistentes e móveis no subsolo
- A presença de uma carga hidráulica associada (sobrecarga) com capacidade de gerar o transporte horizontal dos contaminantes para os aquíferos.

5.5.1 Caracterização das fontes pontuais

As fontes pontuais são classificadas de acordo com o método POSH, conforme apresentado nos quadros 6 e 7.

A coleta de dados das fontes contaminantes presentes no município foi realizada *in loco*, com registro fotográfico de cada fonte pontual. Além de utilização do formulário (apêndice) aplicado a cada uma delas para a classificação.

Quadro 6 - Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema POSH

Potencial de gerar Carga contaminante no subsolo	Fontes de Contaminação				
	Deposição de resíduos sólidos	Áreas industriais*	Lagoas de águas residuárias	Outras (área urbana)	Mineração e exploração de petróleo
Baixo	Chuva menor que 500mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/industriais tipo 1	Indústria Tipo 1	Águas residuárias residenciais, mistas, urbanas agroindustriais e de mineração de não metálicos.	Cemitérios	-
Moderado	Chuva maior que 500mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/industriais tipo 1, ou todos os demais casos	Indústria Tipo 2	Esgoto residencial se a área >5 ha, demais casos relacionados acima ou abaixo	Posto de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos	Algumas atividades de mineração/extração de materiais inertes
Elevado	Resíduo industrial tipo 3, resíduos de origem desconhecida. Lixões a céu aberto, todos os resíduos.	Industria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie mais de 100kg/dia de produtos químicos perigosos	Todos os resíduos industriais, qualquer efluente, se área >5 ha	-	Operações em campos de petróleo, mineração de metais

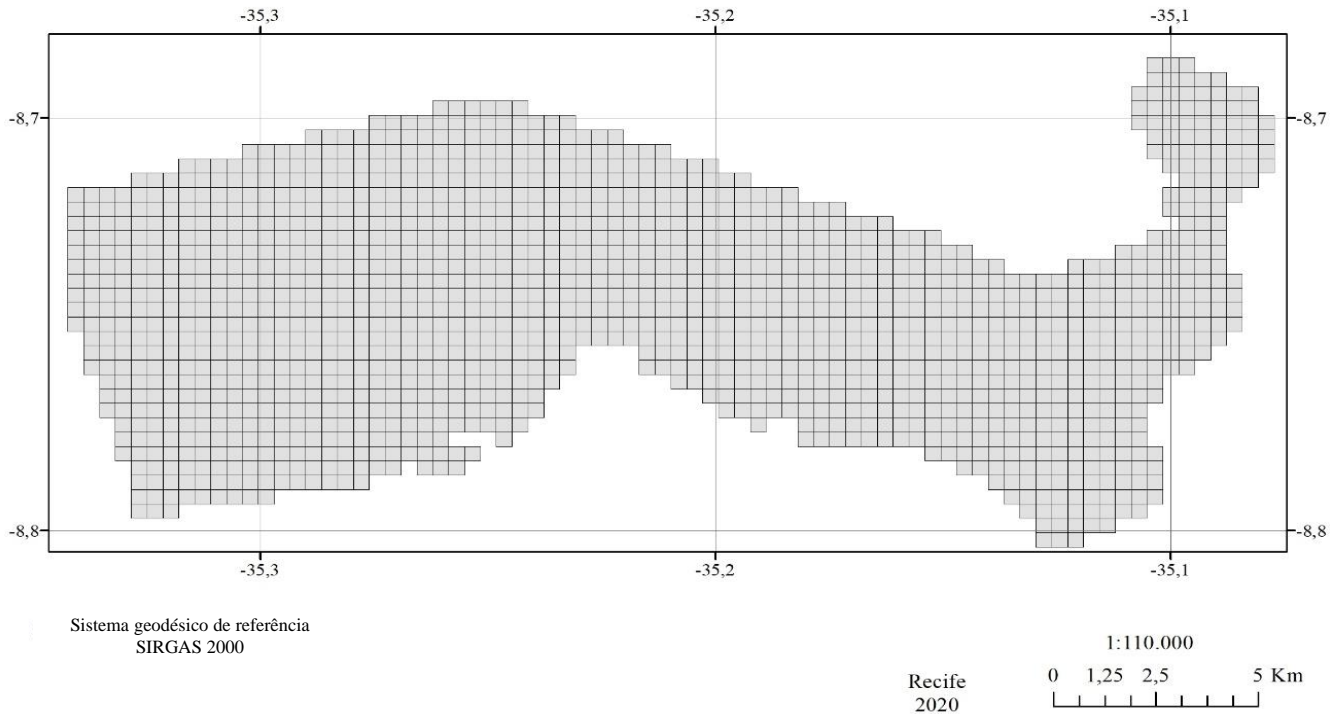
* solos contaminados de indústrias abandonadas devem ter a mesma classificação que a da própria indústria
 Indústrias Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos
 Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão
 Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal

Fonte: Adaptado de FOSTER *et al.* (2006).

Para a caracterização da área de influência de cada fonte contaminante ou conjunto de fontes contaminantes muito próximas, foi construído um mapa de fontes pontuais utilizando quadrículas com dimensões de aproximadamente 400x400 m. O tamanho adotado foi definido conforme a quantidade de informações observadas, realizando adequações com objetivo de tornar mais efetiva a mensuração da área de influência da fonte contaminante, baseada na área total do município dando o destaque apropriado para as informações. Cada fonte pontual cadastrada foi disposta no mapa com sua área de influência de acordo com as quadrículas utilizadas. Em seguida, as áreas foram classificadas de acordo com o método de POSH para a determinação do potencial poluidor de fontes pontuais, prevalecendo sempre o potencial mais elevado existente na quadrícula. Na figura 11 estão

apresentadas as quadrículas que foram utilizadas para a mensuração das áreas de influência das fontes de contaminação pontuais.

Figura 11 – Quadrículas utilizadas na determinação de fontes pontuais de contaminação.



5.5.2 Caracterização das fontes difusas

As fontes pontuais difusas são classificadas de acordo com o método POSH conforme o quadro 7.

Quadro 7 - Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH.

Potencial de Carga contaminante no subsolo	Fonte de Contaminação	
	Saneamento in situ	Práticas agrícolas
Ausente	Quando não há presença de potencial poluidor	
Baixo	Cobertura de rede de esgoto maior que 75% e densidade populacional menor que 50 pessoas/área.	Rotação de culturas, terras para pasto extensivo, sistema de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semiáridas.
Moderado	Intermediário entre Reduzido e Elevado	
Elevado	Cobertura de rede de esgoto menor que 25% e densidade populacional maior que 100 pessoas/ha. Quando o sistema de rede de esgoto for maior que 75%: densidade populacional maior que 250 hab/área*	Cultura comerciais intensivas, monoculturas em solo bem drenado, climas úmidos ou com eficiência de irrigação baixa, pasto intensivo em campos muito fertilizados

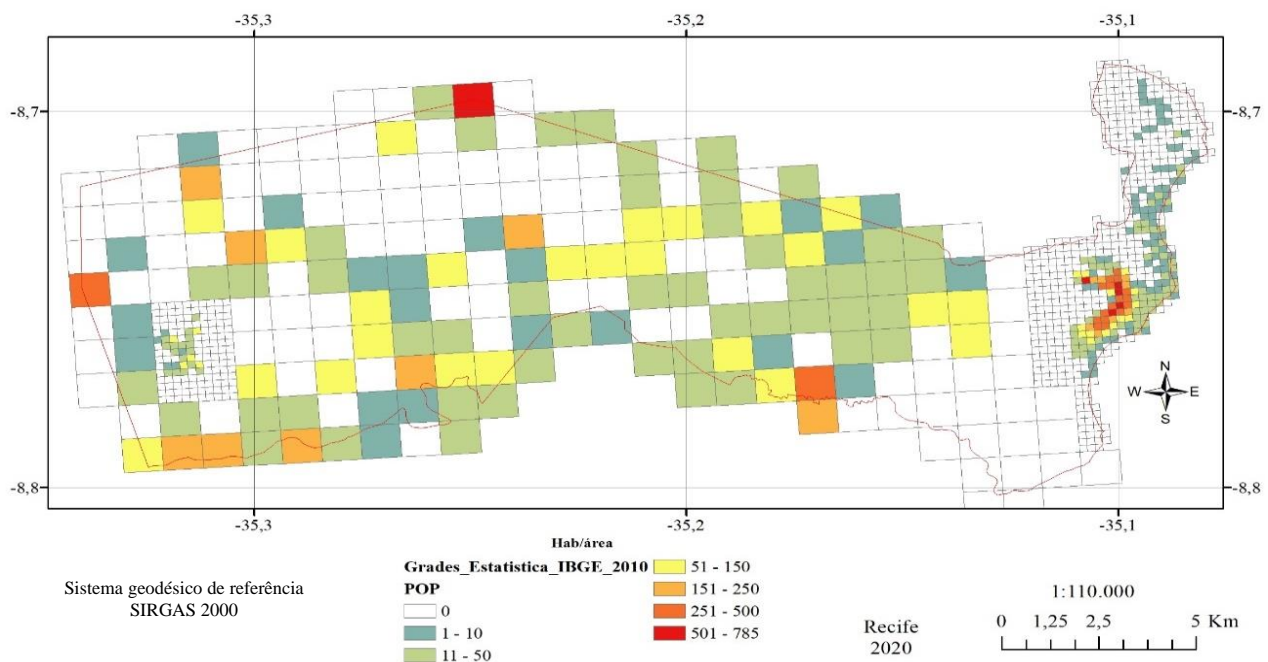
*área: 4ha para área urbanizada, 100ha para área não urbanizada. (grade estatística IBGE)

Fonte: Adaptado de FOSTER *et al.* (2006).

Para fontes difusas, a área de influência corresponde a área da própria fonte difusa. Diferentemente das fontes pontuais, as fontes difusas podem ter uma influência maior no ambiente em que a mesma está. Para a caracterização de fontes difusas relacionadas à população, foi utilizado a grade estatística de densidade demográfica, formulada pelo IBGE. Essa grade estatística permite obter as informações sobre população (total e por sexo) e o total de domicílios do Censo Demográfico 2010 para diversos recortes espaciais. Divide o território em células de 200 x 200 m (4 hectares) nas áreas urbanas e 1 x 1 km (100 hectares) nas áreas rurais. As áreas habitadas, foram classificadas em área urbana de baixa, moderada e alta densidade. Na figura 12 estão apresentadas as células (quadrículas) que foram utilizadas para a mensuração das áreas de influência das fontes de contaminação difusas relacionadas à densidade demográfica.

Figura 12 – Grade estatística para a densidade demográfica de Tamandaré-PE.

Grade Estatística Censo IBGE 2010



Fonte: Adaptado de IBGE, 2016.

Para a classificação da densidade populacional, foi feita a divisão das zonas de baixa, moderada e alta densidade. Para isso foi utilizado a grade estatística do IBGE cruzada com a malha urbana a partir de imagem de satélite, correspondente ao polígono das faixas urbanas de Tamandaré. De acordo com a faixa populacional da cidade foi estabelecido a divisão das faixas de densidade a partir da grade estatística do município. Dessa forma, delimitando as zonas urbanas de baixa, moderada e alta densidade de acordo com a densidade populacional de cada conjunto de células, seguindo o padrão das mesmas. A distribuição de cada zona foi estabelecida de acordo com as condições citadas,

sendo apresentadas no quadro 8. As comunidades rurais, como sítios, engenhos e pequenas propriedades rurais habitadas, presentes na zona rural de Tamandaré, estão apresentadas nas células de 100 hectare (1 x 1km) de área, as quais foram classificadas como áreas urbanas de baixa densidade populacional, conforme o quadro 8.

Quadro 8 – Faixas de densidade populacional urbana

Áreas urbanas	Densidade populacional
Área urbana de baixa densidade	0 – 50 hab./célula
Área urbana de moderada densidade	51 – 250 hab./célula
Área urbana de alta densidade	> 250 hab./célula

Essa mensuração é utilizada de forma diferente por diversos autores, já que a densidade demográfica varia de cidade para cidade. A distribuição adotada foi utilizada de forma a se adequar melhor à realidade populacional do município, tendo como base os dados estatísticos do censo do ano de 2010, realizado pelo IBGE. Existem 07 (sete) faixas de densidade populacional na grade estatística do IBGE, então dividiu-se em 3 (três) zonas para se enquadrar nas faixas de densidade baixa (0-50 hab.), moderada (51-250 hab.) e alta (251-785 hab.).

Ainda para a identificação das fontes difusas presentes na área, foi elaborado um mapa de uso e ocupação simplificado, a partir de imagens de satélite, onde foram identificadas as áreas com atividades agrícolas, áreas desmatadas, áreas com vegetação preservada, áreas em recuperação, áreas de extração mineral e áreas rurais. Cada área foi classificada de acordo com o método de POSH para a determinação do potencial poluidor.

A determinação de fontes difusas seguiu a identificação por imagens de satélite, com o auxílio de mapa e uso e ocupação do solo cedido pela Secretaria de Infraestrutura da Prefeitura de Tamandaré. A caracterização das fontes seguiu de acordo com o potencial poluidor definido pelo método utilizado.

A partir da localização das fontes difusas de contaminação e de suas classificações de acordo com o método POSH de Foster *et al.*, (2006), as fontes foram caracterizadas quanto ao seu potencial poluidor para as águas subterrâneas, seguindo as características de cada tipo de fonte contaminante citada pelo método.

5.5.3 Mapa de fontes contaminantes resultante

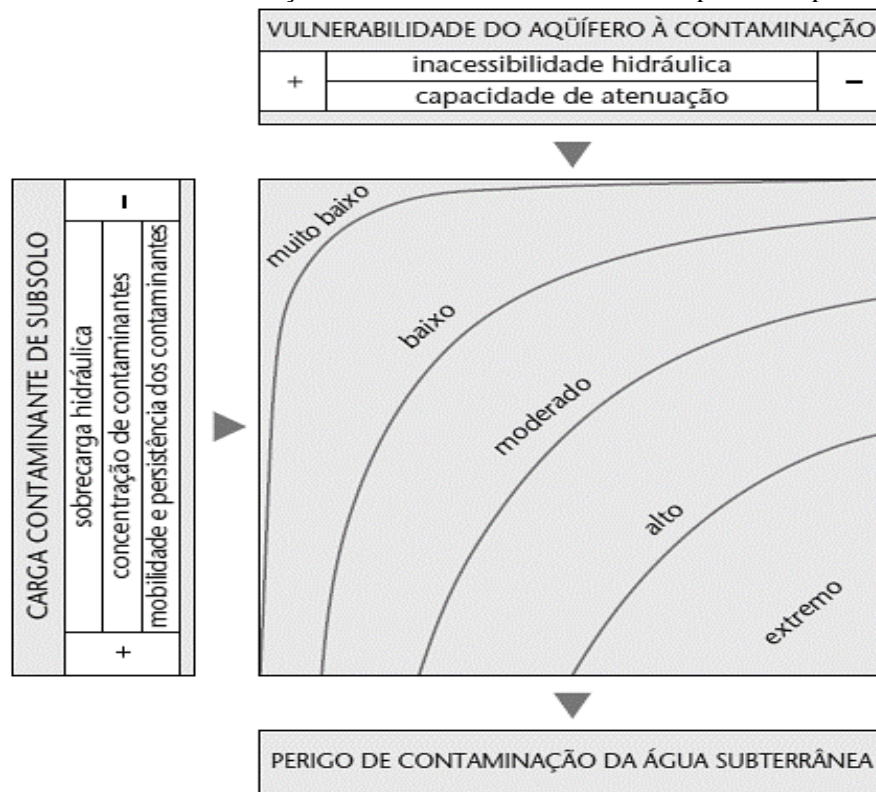
A partir do levantamento dos dados em relação às fontes contaminantes difusas e pontuais, tais como a influência e o nível de potencial poluidor, é possível realizar a junção de ambas as informações, gerando assim um produto que sintetiza a influência de todas as fontes de poluição, ou seja, o mapa de fontes contaminantes resultante do município de Tamandaré.

O procedimento adotado foi um somatório de áreas de polígonos, a partir dos dois mapas citados, em software de geoprocessamento Arcgis. Nesse somatório, foi considerado o potencial poluidor da fonte contaminante de maior potencial de contaminação. O mapa resultante dessa junção está apresentado no item 6.2.3 de resultados e discussão.

5.6 Mapa de risco de contaminação

O Mapa de Risco de Contaminação corresponde ao resultado da superposição do Mapa de Vulnerabilidade Natural com o Mapa de Fontes Contaminantes Resultante, onde serão identificadas as áreas com risco de contaminação insignificante, baixo, moderado, alto e extremo. A avaliação do risco de contaminação é feita a partir da correlação entre a vulnerabilidade natural e o potencial poluidor das fontes contaminantes, a partir do esquema conceitual para avaliação do risco de contaminação da água subterrânea, proposto por Foster *et al.*, (2006). O esquema adotado neste trabalho está apresentado na Figura 13, enquanto a correlação entre a vulnerabilidade natural e o potencial gerador de carga contaminante das fontes resultantes (pontuais + difusas), para a classificação do risco de contaminação está demonstrada no quadro 9.

Figura 13 – Esquema conceitual da correlação entre vulnerabilidade natural e potencial poluidor.



Fonte: Extraído de Foster *et al.*, (2006).

Quadro 9 - Risco de contaminação da água subterrânea a partir da correlação entre a vulnerabilidade natural e a Fonte contaminante Resultante.

VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO	Potencial poluidor da fonte contaminante			
	Ausente	Baixo	Moderado	Elevado
Insignificante	Insignificante	Baixo	Baixo	Baixo
Baixa	Insignificante	Baixo	Baixo	Moderado
Média	Insignificante	Baixo	Moderado	Alto
Alta	Insignificante	Moderado	Alto	Extremo
Extrema	Insignificante	Moderado	Alto	Extremo

Fonte: Adaptado de LNEC/COSTA (2015) e FOSTER *et al.* (2012).

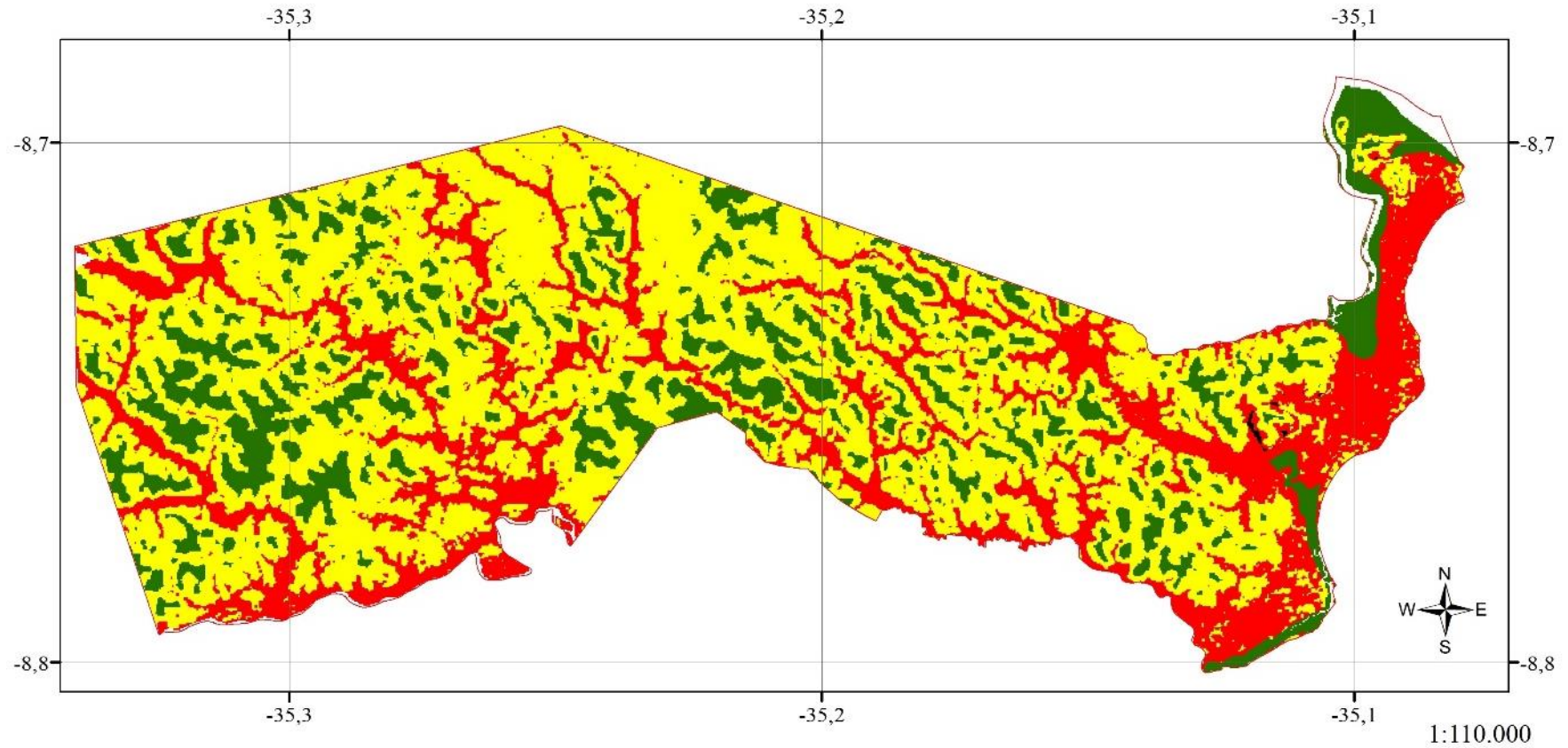
Com a elaboração do mapa de risco de contaminação dos aquíferos é possível caracterizar uma determinada área, de acordo com a sua sensibilidade à contaminação (vulnerabilidade natural) e suas possíveis fontes de contaminação (potencial poluidor), contribuindo assim, como uma ferramenta importante para o planejamento do uso e ocupação do solo e para identificação de locais adequados como a disposição de resíduos sólidos entre outras atividades ambientalmente impactantes.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO





6.1 Vulnerabilidade Natural

A partir da obtenção dos dados necessários para a composição do método GOD, no qual foram utilizados os parâmetros de ocorrência da água subterrânea, litologia e profundidade do nível freático, foi confeccionado o mapa de vulnerabilidade natural da área aflorante de Tamandaré, que está apresentado na figura 14.

Figura 14 – Mapa de vulnerabilidade natural da água subterrânea de Tamandaré

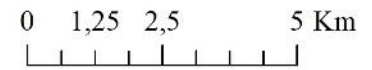


Vulnerabilidade Natural **Índice GOD calculado**

	Baixa	0,15 – 0,3
	Média	0,3 – 0,5
	Alta	0,5 – 0,7
	Extrema	0,7 – 0,72

Recife
2020

Sistema geodésico de referência
SIRGAS 2000



A partir do mapa anterior, foi possível classificar cada área do território de Tamandaré de acordo com sua vulnerabilidade natural a contaminação da água subterrânea. Diante disso será exposto a discussão para cada tipo de zona de vulnerabilidade. Não foram identificadas, amparado pelo método GOD, áreas com vulnerabilidade insignificante. Ressaltando que para esta avaliação (figura 14), o parâmetro G obteve *score* geral de 1,0 (aquíferos livres).

No quadro 10 é apresentado a distribuição de áreas e percentagens de cada zona de vulnerabilidade determinada em Tamandaré.

Quadro 10 – Quadro de áreas de vulnerabilidade – Tamandaré

Vulnerabilidade Natural	Área (km²)	%
Baixa	36,7	17,2
Média	124,4	58,2
Alta	52,5	24,6
Extrema	0,1	0,1
Total:	213,8	100,0

6.1.1 Vulnerabilidade Natural Baixa

Nessa área, a vulnerabilidade é maior para contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados. Cerca de 17,2% do território de Tamandaré é caracterizada com vulnerabilidade baixa, o que corresponde a 36,7 km² de área total. Essa baixa vulnerabilidade foi determinada por fatores como a presença de litologia com mais capacidade de proteção, sendo mais presentes na faixa costeira da área de estudo. Partindo para o oeste as zonas de baixa vulnerabilidade tem maior influência pela profundidade do lençol freático sendo maior que 50 metros, garantindo uma susceptibilidade menor a contaminação dos aquíferos. Dessa forma, as áreas de baixa vulnerabilidade são as mais indicadas para a presença de empreendimentos que possam causar danos de contaminação às águas subterrâneas.

6.1.2 Vulnerabilidade Natural Média

Esta zona é mais vulnerável a alguns contaminantes, quando continuamente lançados ou lixiviados. Nessas áreas a profundidade do lençol freático já não é tão alta, com pontos que variam de 5 a 20 metros. A litologia também já não promove tanta proteção aos aquíferos, como é o caso de arenito arcoseano e conglomerático, ritmito (*score* 0,8). Ou granitóide e quartizito que possuem *score* menos alto (0,6), com ocorrência de profundidades freáticas que variam de 20 a 50 metros. Essas

variações promovem um aumento no índice geral de vulnerabilidade. O território de Tamandaré possui essa zona como a mais presente, com cerca de 58,2% e 124,4km² de sua área.

6.1.3 Vulnerabilidade Natural Alta

Áreas com vulnerabilidade natural alta são susceptíveis à poluição por contaminantes (exceto os que são fortemente absorvidos ou rapidamente transformados). Com 24,6% de ocorrência e com área total de 52,5 km², nessa zona o principal parâmetro que faz o aumento do índice subir é a profundidade do lençol freático, o que não é surpresa já que quanto mais próximo da superfície, mais fácil será a contaminação. As áreas com alta vulnerabilidade sofrem influências também da litologia, além da pouca proteção que os aquíferos livres promovem. No caso de Tamandaré, a litologia presente nessas áreas é caracterizada pela areia, silte, cascalho ou até mesmo arenitos. É possível observar no mapa (figura 14) que as áreas com vulnerabilidade alta cobrem as faixas de profundidade do lençol freático menor que 5 metros, de acordo com a figura 09.

6.1.4 Vulnerabilidade Natural Extrema

As zonas de vulnerabilidade extrema são vulneráveis à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação. Essa parcela tem uma presença muito baixa na área de Tamandaré (0,1%), sempre apresentada em pequenas porções do mapa, o que soma apenas 0,1km². As regiões que apresentam esse nível de vulnerabilidade extrema a contaminação, são caracterizadas por áreas com profundidade do lençol freático menor que 5 metros e litologia predominantemente composta por arenito arcoseano, arenito conglomerático, ritmito, conglomerado polimítico e folhelho carbonoso (*score* 0,8). Nessas regiões, a chance de contaminação da água subterrânea é muito alta, devendo ser afastados qualquer tipo de empreendimento e/ou atividade que possa vir a causar algum tipo de contaminação ao solo e água.

6.2 Fontes contaminantes

De acordo com o método utilizado, as fontes contaminantes pontuais e difusas são classificadas em baixo, moderado e elevado potencial poluidor da água subterrânea, e as áreas onde não existam fontes potenciais são consideradas como de potencial ausente.

6.2.1 Fontes Pontuais

Durante o período de coletas de dados, foram identificadas 31 fontes pontuais de contaminação. Essa identificação foi realizada com a ajuda de funcionários da secretaria de infraestrutura da

prefeitura de Tamandaré. As fontes pontuais de contaminação foram visitadas e suas informações estão expostas no quadro 11.

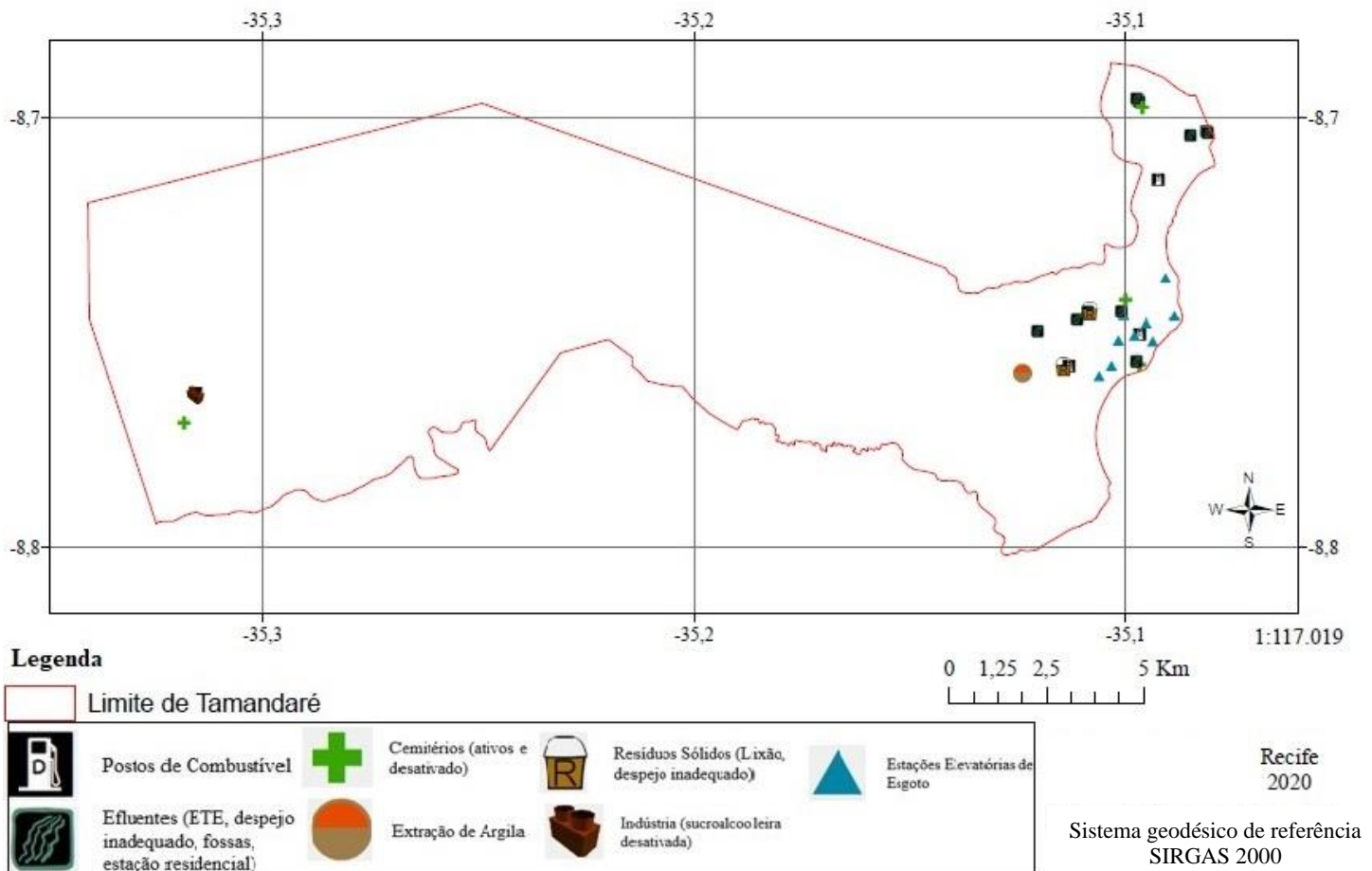
Quadro 11 – Classificação das fontes pontuais de contaminação de Tamandaré

Nº	Atividade/empreendimento	Bairro	Coordenadas Geográficas		Classificação POSH Potencial Poluidor
			Latitude	Longitude	
01	Cemitério jardim da saudade	Centro	-35,099848	-8,742398	Baixo
02	Cemitério vila Saué	Zona rural	-35,317616	-8,771142	Baixo
03	Cemitério desativado 1	Centro	-35,096931	-8,757633	Baixo
04	Cemitério desativado 2	Praia dos carneiros	-35,096240	-8,697748	Baixo
05	Estação de tratamento de efluentes - condomínio residencial	Praia dos carneiros	-35,096983	-8,696350	Baixo
06	Tanques de tratamento de efluente - Receptivo turístico	Praia dos carneiros	-35,085030	-8,704189	Baixo
07	Indústria de destilado de cana de açúcar desativada (Vila Saué)	Zona Rural	-35,315548	-8,764407	Baixo
08	Posto de combustíveis 1	Praia dos carneiros	-35,092555	-8,714589	Moderado
09	Posto de combustíveis 2	Praia de Tamandaré	-35,113184	-8,757903	Moderado
10	Posto de combustíveis 3	Centro	-35,096864	-8,750569	Moderado
11	Despejo de efluente tratado de condomínio residencial	Praia dos carneiros	-35,097496	-8,695612	Moderado
12	Estação Elevatória de Esgoto 01	Centro	-35,103398	-8,757788	Moderado
13	Estação Elevatória de Esgoto 02	Centro	-35,106306	-8,760201	Moderado
14	Estação Elevatória de Esgoto 03	Praia de Tamandaré	-35,101794	-8,751904	Moderado
15	Estação Elevatória de Esgoto 04	Centro	-35,097208	-8,756702	Moderado
16	Estação Elevatória de Esgoto 05	Centro	-35,098065	-8,750772	Moderado
17	Estação Elevatória de Esgoto 06	Centro	-35,093856	-8,752090	Moderado
18	Estação Elevatória de Esgoto 07	Centro	-35,095355	-8,747928	Moderado
19	Estação Elevatória de Esgoto 08	Centro	-35,100566	-8,746044	Moderado
20	Estação Elevatória de Esgoto 09	Praia de Tamandaré	-35,088824	-8,746199	Moderado
21	Estação Elevatória de Esgoto 10	Praia de Campas	-35,090863	-8,737359	Moderado
22	Despejo inadequado de efluente	Zona rural	-35,120495	-8,749759	Moderado
23	Despejo inadequado de efluente	Centro	-35,097600	-8,756871	Moderado
24	Extração de argila	Zona rural	-35,124028	-8,759571	Moderado
25	Coleta inadequada de efluente - receptivo turístico (fossa)	Praia dos Carneiros	-35,081370	-8,703242	Elevado
26	Coleta inadequada de águas cinzas - receptivo turístico (fossa)	Praia dos Carneiros	-35,081048	-8,703595	Elevado
27	Lagoas de tratamento de efluentes	Oitizeiro	-35,111378	-8,746985	Elevado

28	Lixão desativado (+10 anos)	Praia de Tamandaré	-35,114454	-8,758074	Elevado
29	Pocilga com despejo de efluentes	Oitizeiro	-35,108846	-8,745250	Elevado
30	Despejo de resíduos sólidos	Oitizeiro	-35,108414	-8,745090	Elevado
31	Canal de águas pluviais com contribuição de águas residuárias	Centro	-35,101077	-8,745189	Elevado

Para a localização das fontes contaminantes pontuais no espaço físico/geográfico de Tamandaré, as fontes foram agrupadas de acordo com o tipo, sendo eles, postos de combustíveis, efluentes, cemitérios, extração de argila, resíduos sólidos, indústria e estações elevatórias de esgoto, conforme está ilustrado na figura 15.

Figura 15 – Mapa de fontes de contaminação pontuais



Após da localização e classificação das fontes pontuais de contaminação, procedeu-se a caracterização das mesmas quanto ao potencial poluidor das águas subterrâneas.

6.2.1.1 Fontes Pontuais de baixo potencial poluidor

Cemitérios – estas fontes, em sua maioria, possibilitam algum tipo de contaminação do lençol freático. Isso ocorre tanto pela falta de camada impermeabilizadora quanto pela construção em uma área com pouca proteção ao solo. Kemerich *et al.*, (2010), descreve que, dependendo da profundidade do lençol freático, vírus e bactérias presentes no necrochorume (formado pela decomposição dos corpos enterrados) é eliminada e não existem grandes problemas de contaminação; porém dependendo das condições hidrogeológicas, podem causar impacto à água subterrânea. O potencial poluidor baixo é também relacionado a estrutura feita pelos caixões e sepulturas que formam uma barreira que evita o necrochorume adentrar tanto no solo e atingir a água subterrânea.

Caso o cemitério esteja situado em regiões de solos porosos e permeáveis, como areia e pedregulho, o movimento do necrochorume pode ser rápido e adentrar no lençol freático, podendo causar doenças de veiculação hídrica (KEMERICH *et al.* 2010).

Tamandaré possui dois cemitérios ativos e dois desativados, apresentados na figura 16. Os desativados, segundo moradores e fiscais da prefeitura, foram abandonados há mais de 40 anos.

Figura 16 - Cemitérios de Tamandaré
Cemitérios ativos (1 e 2) e desativado (3)



(1)



(2)



(3)

Estações de tratamento de efluentes (ETE) - em Tamandaré, foram identificados condomínios residenciais e receptivos turísticos que possuem sistemas de tratamento dos efluentes próprios. Estes sistemas são constituídos por tanques fechados, sem vazamentos, com boa capacidade de tratamento. Nos residenciais, o efluente tratado é despejado em uma área fora do limite do condomínio. Já no receptivo turístico (em dezembro de 2019) o sistema encontra-se em fase de implementação, já tendo sido realizado alguns testes com o tratamento do efluente. Na figura 17 são apresentadas imagens desses sistemas citados

Figura 17 - ETE do residencial (1) e receptivo (2).



(1)



(2)

Indústria sucroalcooleira desativada - indústrias são atividades de significativo impacto ambiental, visto que os efluentes e resíduos sólidos gerados no processo produtivo muitas vezes não são tratados ou destinados adequadamente. Entretanto, a indústria sucroalcooleira cadastrada está desativada há cerca de 5 anos, sendo, portanto, classificada, pelo método adotado, como indústria tipo 1, ou seja, de baixo potencial poluidor. A mesma é apresentada na figura 18.

Figura 18 - Indústria Sucroalcooleira



6.2.1.2 Fontes Pontuais de moderado potencial poluidor

Postos de combustível - Essas atividades são classificadas como de moderado potencial poluidor às águas subterrâneas. As principais fontes de poluição do solo e da água subterrânea são tanques corroídos e há uma forte correlação entre a incidência e tamanho dos vazamentos com a idade dos tanques instalados (Foster *et al.*, 2006). Tamandaré possui três postos de gasolinas compreendidos dentro dos limites da sede municipal, apresentados na figura 19 (1 e 2).

Figura 19 - Postos de Combustíveis



(1)

(2)

Despejos de efluentes - foram detectados alguns lançamentos de efluentes em vários pontos da cidade, tanto de efluentes brutos quanto tratados. Deve ser salientado que o despejo desses líquidos tem elevada contribuição na contaminação do lençol freático. Um condomínio residencial de grande porte visitado despeja o efluente tratado pela própria ETE em um córrego próximo ao empreendimento. Outros pontos, com lançamento de efluente bruto também foram identificados, sendo o despejo realizado no solo urbano, mas em pequenos pontos, portanto não caracterizando um potencial poluidor elevado. Na figura 20 são apresentadas imagens desses despejos.

Figura 20 - Despejos de efluentes

Efluente tratado do condomínio (1) e córrego com lançamento inadequado de efluente (2)



(1)

(2)

Estações elevatórias - O sistema de tratamento do efluentes de Tamandaré conta com onze estações elevatórias de esgotos, que direcionando-os às lagoas de tratamento de efluentes do município. As estações elevatórias são instaladas em locais de cotas mais baixas para que o efluente seja reunido e posteriormente elevado até as lagoas de estabilização situadas em cotas mais elevadas. Na figura 21 é apresentada uma dessas estações citadas.

Figura 21 - Estação elevatória de esgoto



Extração de argila - o impacto desta atividade na vulnerabilidade do aquífero é amplificado desde o início de sua operação, quando se processa a remoção do solo para construção de edificações e efetivação da lavra propriamente dita. Essa retirada de material influencia na capacidade do solo em proteger a água subterrânea, visto que, via de regra, a cobertura vegetal e a camada de solo são retiradas. Outro impacto observado decorre da alteração, geralmente elevação, do nível do lençol freático, visto que a profundidade do mesmo é alterada pela retirada de solo. Na figura 22 é apresentada essa atividade.

Figura 22 - Extração de argila



6.2.1.3 Fontes Pontuais de elevado potencial poluidor

As fontes pontuais de potencial elevado são relacionadas predominantemente a águas residuárias e resíduos sólidos, despejados e/coletados de forma irregular.

Fossas - um receptivo turístico, muito frequentado e situado na Praia de Carneiros, é responsável pela geração de uma elevada quantidade de efluentes sanitários. A destinação ainda é feita por fossas, tanto para as águas negras (banheiro), como para as águas cinzas (pia de cozinha). Esse tipo de tratamento de águas residuárias é altamente contaminante e pode comprometer seriamente a qualidade das águas subterrâneas. Um fato animador é que no complexo turístico está sendo construída uma estação de tratamento de efluentes que, quando estiver em funcionamento, deverá resolver este problema. Na figura 23 são apresentadas imagens das fossas citadas durante a coleta de dados.

Figura 23 - Fossas receptivo turístico
Fossa negra (1) e fossa de águas cinzas (2).



(1)



(2)

Lagoas de Tratamento de efluentes - a estação de tratamento de efluentes, contendo quatro lagoas, trata o esgoto de toda a cidade de Tamandaré, incluindo o industrial, mostrada na figura 24. A área destinada a esta atividade é grande, sendo vizinha a um bairro periférico da cidade (Oitizeiro), onde foi possível identificar algumas fontes de contaminação como pocilga e despejo de resíduos sólidos no solo, a céu aberto. As lagoas são necessárias para que haja o tratamento do efluente, porém devem ser construídas de tal maneira que não propicie vazamento de efluente para o aquífero. Além do mais, o seu dimensionamento deve ser feito de forma que o efluente tenha um tempo de detenção suficiente para que se processe um tratamento eficaz. De acordo com o método POSH, estas lagoas apresentam um elevado potencial poluidor.

Figura 24 - Estação de tratamento de efluente municipal



Pocilga - durante a coleta de dados, foi detectado próximo à ETE municipal, um ponto de lançamento de efluentes provenientes da criadores de porcos apresentado na figura 25 (a pocilga se encontra acima da ribanceira, sendo apresentado apenas o efluente despejado). Esse líquido é composto de material de alta carga poluidora, e quando despejado ao solo, pode comprometer seriamente a qualidade das águas subterrâneas.

Figura 25 - Despejo de efluente de pocilga



Despejo inadequado de resíduos sólidos - O antigo lixão do município não está mais em operação e sua desativação tem mais de uma década. Hoje os resíduos sólidos são direcionados para o município de Rio Formoso, onde existe um aterro sanitário consorciado com outros municípios, incluindo Tamanadaré. Porém o terreno correspondente ao lixão abandonado pode conter altos níveis de contaminantes, acumulados durante os vários anos de atividades do lixão, visto que o mesmo recebia todos os tipos de resíduos gerados pelo município. Portanto, este lixão, apesar de abandonado, pode representar um elevado risco de comprometimento das águas subterrâneas devido ao grande volume de carga contaminante armazenada e que pode ser facilmente lixiviada, principalmente em períodos de chuvas intensas (Foster *et al.* 2006). Como o acesso é restrito, não foi possível o registro fotográfico deste lixão desativado. Na figura 26 são apresentadas imagens de um ponto de despejo inadequado de resíduos sólidos e o antigo lixão da cidade.

Figura 26 - Descarte inadequado de resíduos sólidos
Ponto de descarte inadequado (1) e lixão desativado (2).



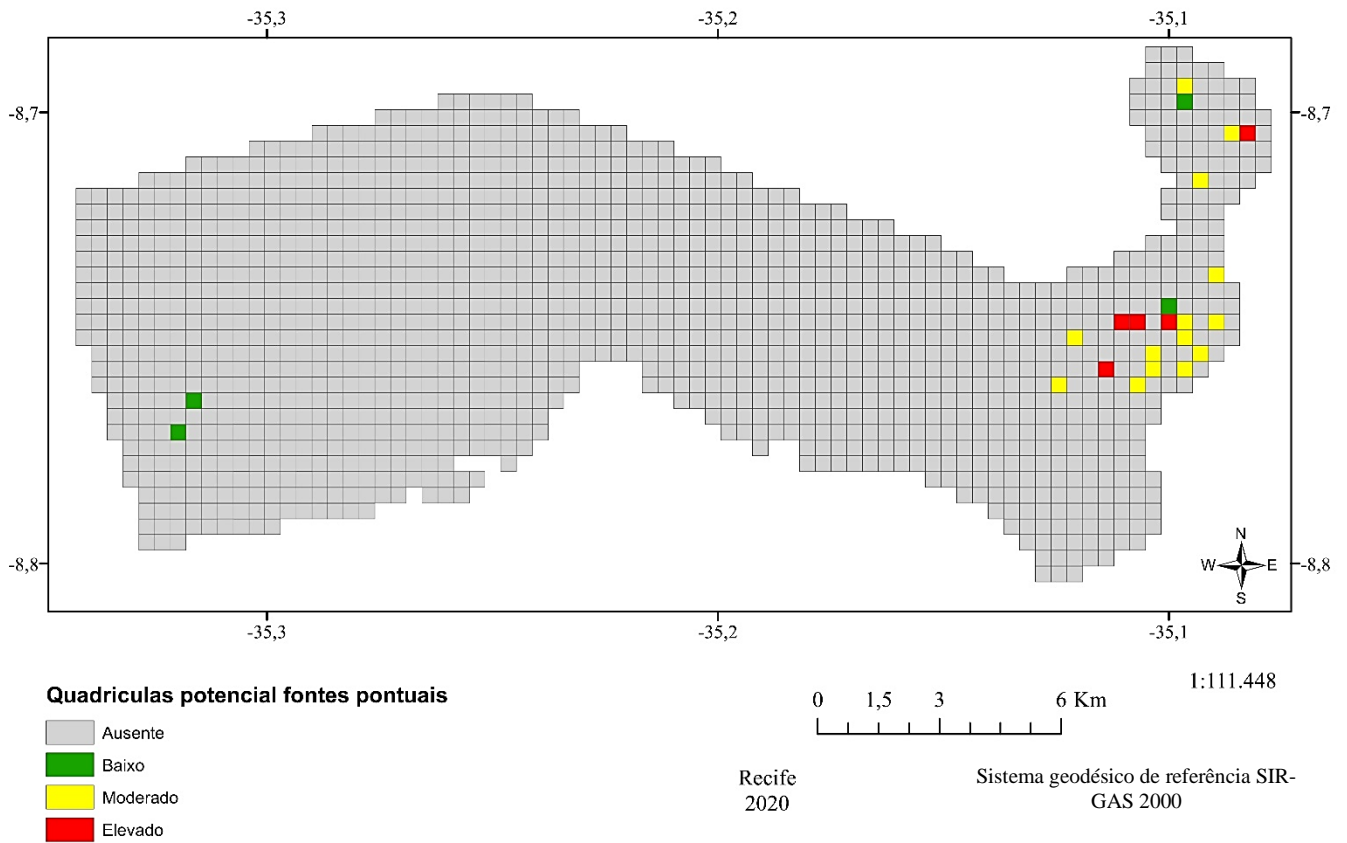
(1)



(2)

A partir da caracterização das 31 fontes contaminantes pontuais, foi gerado o mapa que apresenta o potencial contaminante que tais fontes possuem, sendo as mesmas distribuídas de acordo com a área das quadrículas e suas classificações de potencial poluidor (Figura 27).

Figura 27 - Potencial poluidor das fontes pontuais



6.2.2 Fontes Difusas

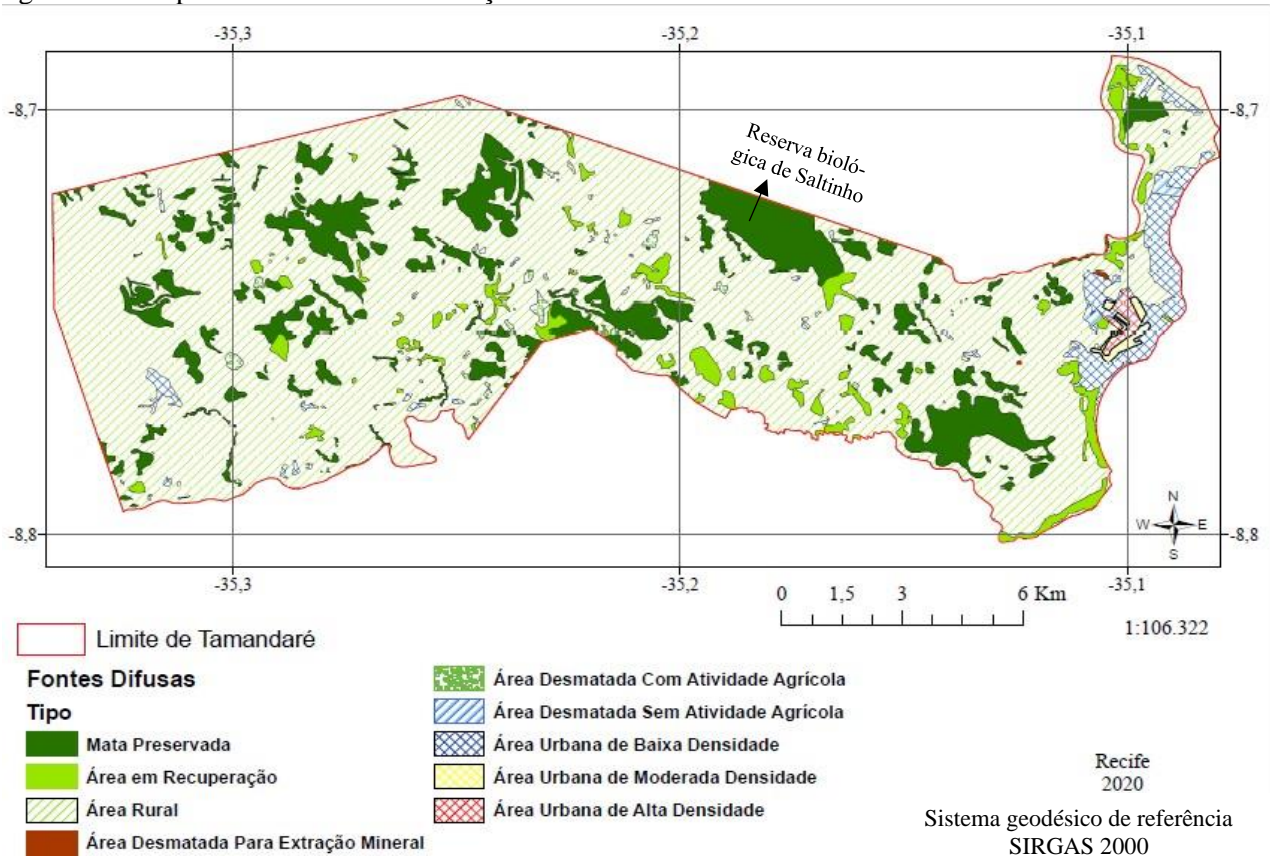
Durante a elaboração do mapa de fontes difusas, foram identificados nove tipos de potenciais poluidores à água subterrânea, listadas no quadro 12.

Quadro 12 – Classificação das fontes difusas de contaminação de Tamandaré

Tipo de fonte de contaminação difusa	Classificação POSH Potencial Poluidor
Mata preservada	Ausente
Área em recuperação	Baixo
Área desmatada sem atividade	Baixo
Área urbana de baixa densidade	Baixo
Área rural	Moderado
Área urbana de moderada densidade	Moderado
Área desmatada com atividade agrícola	Elevado
Área desmatada com atividade mineral	Elevado
Área urbana de alta densidade	Elevado

As fontes difusas citadas foram mapeadas e a sua distribuição está apresentada no mapa da figura 28.

Figura 28 – Mapa de fontes de contaminação difusas



6.2.2.1 Fontes difusas de potencial poluidor ausente

Mata preservada - Entre as fontes difusas com potencial poluidor ausente destacam-se as manchas de mata preservada que é caracterizada por não ter sofrido nenhuma intervenção antrópica intensa, podendo ser visualizadas árvores e vegetação nativa mais densas. Nestas áreas o potencial poluidor de águas subterrâneas é nulo. Em Tamandaré, existe a Reserva Biológica de Saltinho, que se encontra localizada na parte superior do mapa de fontes de contaminação difusa (figura 28).

6.2.2.2 Fontes difusas de baixo potencial poluidor

Entre as fontes difusas com baixo potencial poluidor destacam-se as áreas de recuperação, as áreas desmatadas sem atividade e as áreas urbanas de baixa densidade populacional:

Área em recuperação - Essa área é caracterizada como uma região que foi desmatada e/ou explorada, mas se encontra sem atividade e com vegetação crescente, representada na figura 28 com uma

coloração menos escura que a preservada, porém com vegetação em recuperação. Para essa região foi adotada como potencial poluidor baixo por causa da antropização ocorrida.

Área desmatada sem atividade – São áreas que também foram desmatadas e se encontram sem vegetação, carreando possíveis poluentes de áreas agrícolas para o aquífero com mais rapidez devido à falta de vegetação protetiva ao solo. Como nessa área não há atividade agrícola e/ou de extração mineral, o potencial poluidor é baixo.

Área urbana de baixa densidade populacional - Constituem-se elementos responsáveis pela contaminação de aquíferos uma vez que podem não possuir saneamento básico além da pouca quantidade de habitantes por área. As regiões de baixa densidade foram consideradas as que possuem densidade demográfica de 0 a 50 habitantes por células (vide figura 12). Levando-se em conta que a cidade de Tamandaré possui 70% da zona urbana com saneamento, a maior parte desta é de potencial baixo a contaminação. As áreas urbanizadas fora da zona urbana central da cidade, como por exemplo os sítios, povoados e engenhos, foram consideradas como de baixa densidade pelo pequeno percentual habitacional que ocorre nas regiões rurais do município.

6.2.2.3 Fontes difusas de moderado potencial poluidor

Dentre as fontes difusas com moderado potencial poluidor, destacam-se as áreas rurais e as áreas urbanas com moderada densidade populacional.

Área rural – Foram as áreas consideradas como as remanescentes do mapa de fontes de contaminação difusa, ou seja, após a identificação de outras fontes difusas, o restante foi considerado áreas rurais. Nessas áreas ocorrem atividades agrícolas pouco intensivas, com diversos tipos de culturas, em que não é identificado uma concentração de monoculturas. São regiões em que é possível identificar pastos, áreas com agricultura e com solo preparado para plantio, por esta razão, as áreas rurais foram consideradas como tendo um potencial poluidor moderado.

Área urbana de moderada densidade populacional – São áreas que possuem entre 51 e 250 pessoas a cada 4 hectare (célula). Como o saneamento em Tamandaré é consideravelmente mais alto que a maioria dos municípios, a maneira utilizada para diferenciar as áreas urbanas quanto ao potencial poluidor das águas subterrâneas foi pela densidade demográfica.

6.2.2.4 Fontes difusas de elevado potencial poluidor

Dentre as fontes difusas com elevado potencial poluidor destacam-se as áreas desmatadas com atividade agrícola, as áreas desmatadas com atividade mineral e as áreas urbanas com alta densidade populacional.

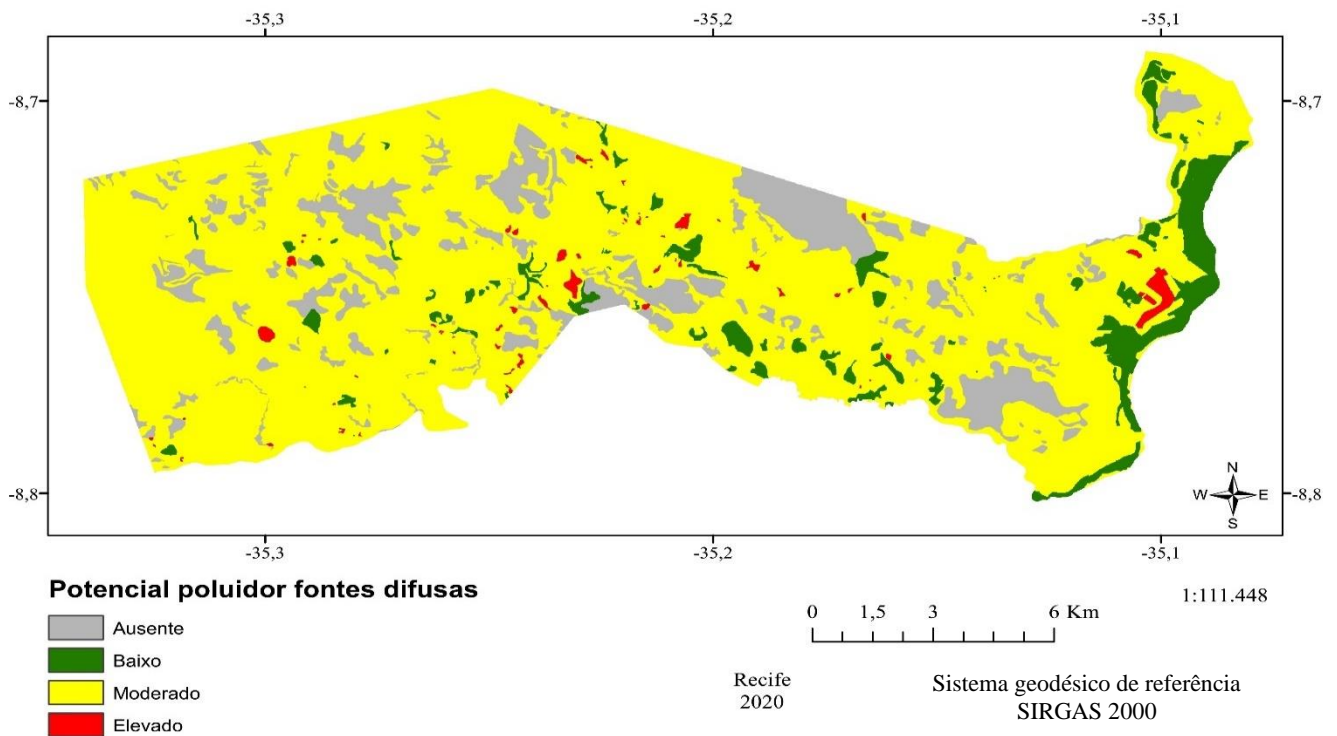
Área desmatada com atividade agrícola – São áreas com capacidade de contaminar a água subterrânea de forma difusa por nutrientes e pesticidas, causando aumento na salinidade das águas, principalmente em regiões mais áridas (BARBOSA *et al.*, 2011). Em Tamandaré foram identificadas algumas dessas áreas, onde é possível verificar a existência de cultivos intensivos e de monocultura, principalmente de cana-de-açúcar. Essas áreas promovem grande quantidade de poluentes para o solo. Também vale salientar que na região existem muitos focos de plantios que foram queimados após a colheita de cana-de-açúcar. Esta falta de vegetação promove também a erosão e o carreamento de sedimentos.

Área desmatada com atividade Mineral - A extração de argila ocorre em uma área desmatada, utilizada para a retirada de barro e material necessário para confecção peças de argila. As áreas sem cobertura e ainda com a extração de parte do solo promove um dano tanto pontual quanto difuso em relação a contaminação de aquíferos, além do afloramento do lençol freático devido a retirada de material superficial do solo.

Área urbana de alta densidade populacional - Foram consideradas como alta densidade as áreas que possuem densidade demográfica superiores a 250 habitantes/célula, baseado na grade estatística do IBGE. São regiões mais centrais de Tamandaré, onde a quantidade de pessoas é bem maior do que no restante da área urbana.

A partir da caracterização das fontes contaminantes difusas, foi gerado o mapa que apresenta o potencial contaminante que as tais fontes possuem, sendo distribuídas de acordo com o potencial poluidor, como pode ser observado na figura 29.

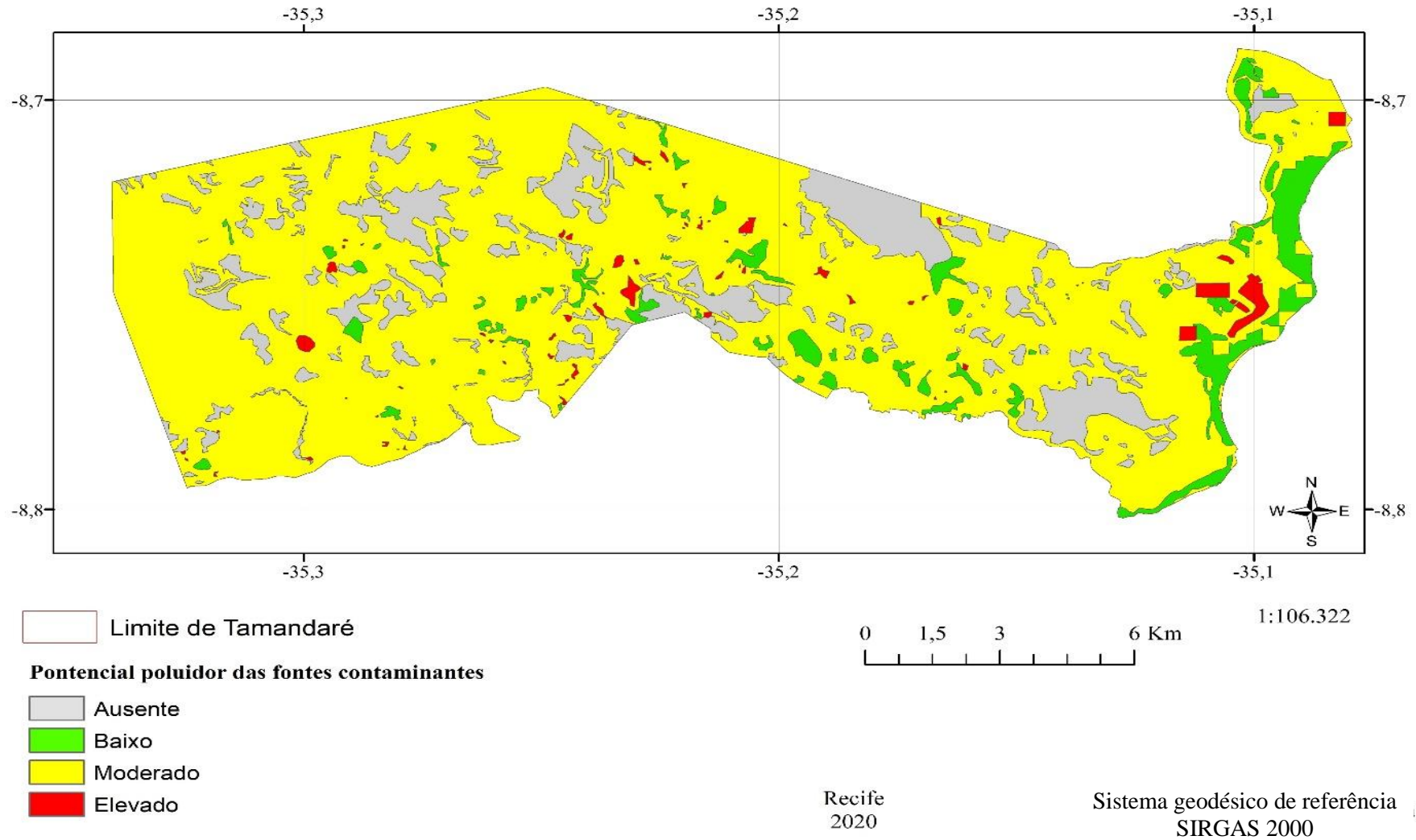
Figura 29 - Potencial poluidor das fontes difusas



6.2.3 Mapa de Fontes com Potenciais Contaminantes Resultante

A partir da caracterização e classificação de cada fonte contaminante presente em Tamandaré, assim como a atribuição do potencial poluidor que cada uma delas possui, de acordo com o método, foi feita a junção das fontes pontuais e difusas, de forma a se obter um mapa de fontes contaminantes resultante (final). O mapa do potencial poluidor que as fontes contaminantes possuem encontra-se exposto na figura 30. É válido lembrar que o procedimento adotado foi um somatório de áreas de polígonos, a partir dos dois mapas citados. O somatório considera o potencial poluidor da fonte contaminante de maior potencial de contaminação.

Figura 30 – Mapa de fontes com potenciais contaminantes resultante



No quadro 13 estão apresentadas as áreas e as percentagens relativas às fontes contaminantes resultantes no município de Tamandaré.

Quadro 13 - Quadro de áreas do potencial poluidor das fontes contaminantes de Tamandaré.

Potencial Poluidor	Área (km ²)	%
Ausente	31,3	14,6
Baixo	12,2	5,7
Moderado	167,7	78,4
Elevado	2,6	1,2
Total:	213,8	100,0

A partir do mapa final de potencial poluidor das fontes de contaminação presentes em Tamandaré, foi possível desenvolver a metodologia de classificação do risco de contaminação das águas subterrâneas, a qual utilizou a vulnerabilidade natural e o potencial poluidor das fontes contaminantes.

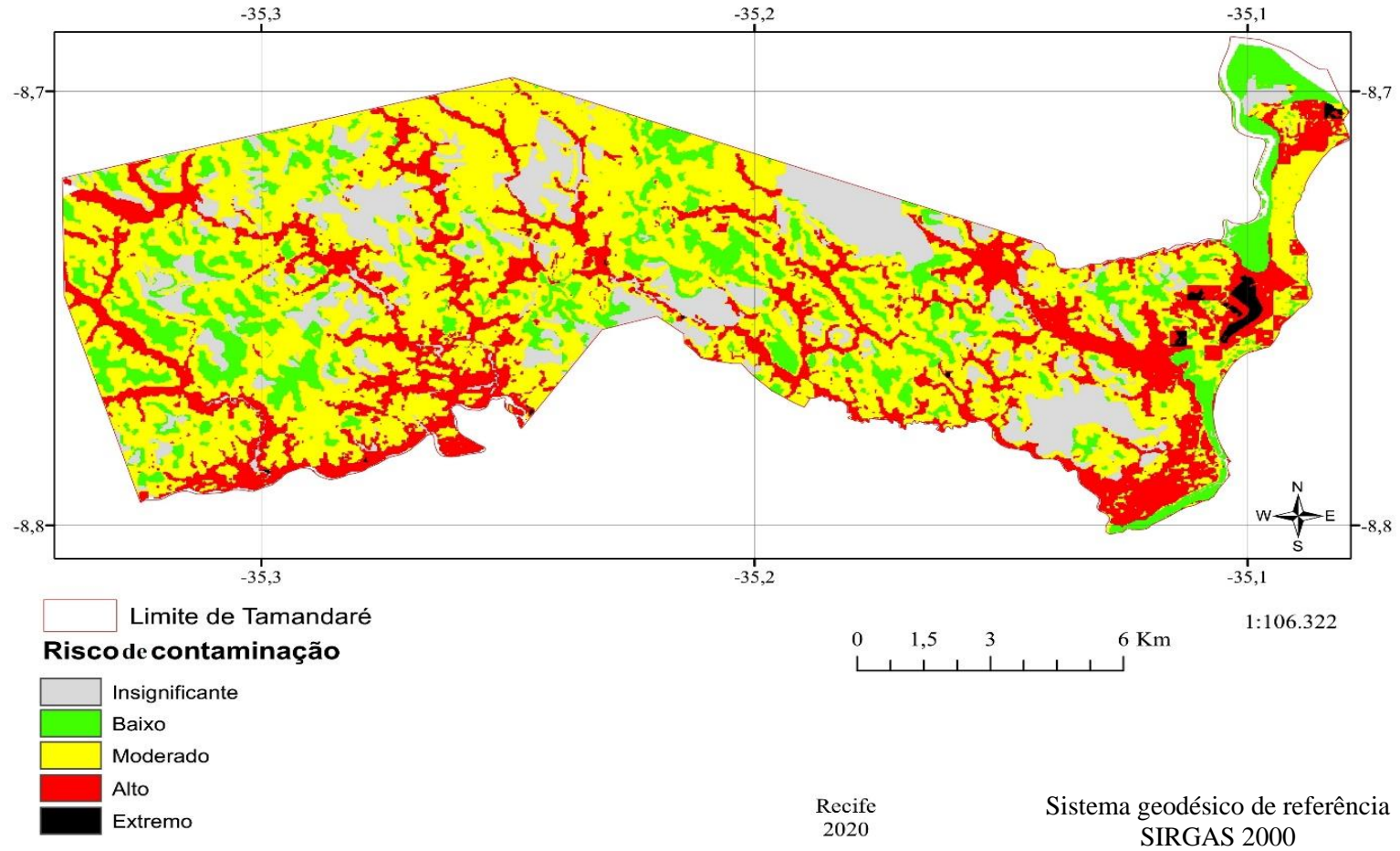
6.3 Mapa de risco de contaminação

Levando em consideração as condições ambientais da área de Tamandaré, os impactos promovidos pelas ações antrópicas decorrentes do uso e ocupação do solo, manejo de culturas agrícolas, utilização de fossas, despejos de efluentes, resíduos sólidos, cemitérios, entre outros, o risco de contaminação da água subterrânea pode ser aumentado em diversos casos. Além das ações antrópicas, as próprias características geoambientais e hidrogeológicas podem promover uma menor proteção ao aquífero, aumentando o risco também. Exemplos disso são a pouca profundidade do lençol freático e características litológicas (LINHARES *et al.*, 2014)

Para a determinação do risco de contaminação que as águas subterrâneas de Tamandaré possuem, foi realizada a sobreposição do mapa de vulnerabilidade natural e do mapa de fontes com potenciais contaminantes resultante. Dessa forma foi verificado o risco que essas duas variáveis (vulnerabilidade natural e potencial poluidor das fontes contaminantes) promovem às águas subterrâneas.

Na figura 31 está apresentado o mapa de risco de contaminação dos aquíferos para as áreas aflorantes (aquífero livre) de Tamandaré. O mapa de risco foi criado a partir da correlação dos dados de vulnerabilidade natural e potencial poluidor de acordo com o quadro 9, anteriormente apresentado.

Figura 31 – Mapa do risco de contaminação dos aquíferos para a área aflorante de Tamandaré.



No quadro 14 são expostas as áreas de cada zona de risco, assim como as percentagens de cada uma delas.

Quadro 14 – Quadro de áreas Tamandaré (áreas aflorantes)

Risco de contaminação	Área (km ²)	%
Insignificante	31,5	14,8
Baixo	28,1	13,1
Moderado	108,9	50,9
Alto	44,2	20,7
Extremo	1,1	0,5
Total	213,8	100,0

6.3.1 Áreas com risco de contaminação insignificante

As zonas de risco insignificantes são predominantemente formadas pelas áreas com ausência de fontes difusas, caracterizadas pela mata preservada, a qual não promove poluição às águas subterâneas, já que são áreas em que a intervenção antrópica é inexistente ou muito baixa. Sem a presença de atividades potencialmente poluidoras, o risco de contaminação é considerado insignificante, mesmo com uma vulnerabilidade natural alta. As zonas com risco insignificante correspondem a cerca de 14,8% de todo o território de Tamandaré, com área total aproximada de 31,5 km².

6.3.2 Áreas com risco de contaminação baixo

Com área total de 28,1 km² e correspondendo a 13,1% da área do município, as zonas de baixo risco de contaminação identificadas em Tamandaré tiveram uma maior influência de áreas com vulnerabilidade natural baixa, e fontes contaminantes de baixo e moderado potencial poluidor, como por exemplo áreas urbanas de baixa densidade. Essa zona se encontra menos presente na área urbana, e de maior ocorrência em zona rural.

Segundo Iritani, (2017), embora o risco de contaminação seja baixo, situações de contaminação podem ocorrer, já que o processo pode ser causado tanto pelas condições de operação do empreendimento/atividade, como por exemplo acidentes, manuseio e armazenamento de produtos e resíduos perigosos, etc., ou pela percolação do contaminante no solo, relacionado com a fator tempo de sua infiltração.

6.3.3 Áreas com risco de contaminação moderado

Com 50,9% de ocorrência e área total com cerca de 108,9km², as zonas de risco moderado são as majoritárias dentro dos limites de Tamandaré. O risco foi caracterizado pela presença de área rural, a qual é uma fonte difusa de moderado potencial poluidor. Áreas com vulnerabilidade alta e

com presença de fonte contaminante difusa de área urbana de baixa densidade, promovem o risco moderado de contaminação.

6.3.4 Áreas com risco de contaminação alto

Esse risco é caracterizado como o grande potencial de que as fontes contaminantes, somadas à fragilidade do aquífero, podem causar às águas subterrâneas. As zonas de risco alto possuem área total de 44,2km², o que corresponde a 20,7% da área de Tamandaré. Essa zona possui influência das áreas de vulnerabilidade natural alta, somadas as fontes de contaminações moderadas como área urbana de moderada densidade e área rural. Áreas desmatadas com atividade agrícola, também contribuíram para o risco de contaminação alto, assim como a presença da indústria sucroalcooleira.

6.3.5 Risco de contaminação extremo

A zona de risco mais sensível de Tamandaré possui uma área total de 1,1km², correspondente a 0,5% da área municipal.

As fontes contaminantes de alto potencial poluidor, como despejo de lixo e efluentes de forma inadequada, fossas, somadas às áreas urbanas de alta densidade, e/ou vulnerabilidade natural alta e extrema, foram os fatores que mais contribuíram para a composição das áreas de risco extremo de contaminação. A presença dessas atividades compromete, em alguns pontos, a segurança das águas subterrâneas do município, necessitando de controle e eliminação de potenciais poluidores presentes.

Foi observado que muitas fontes poluidoras devem ser eliminadas, já que o despejo adequado de efluentes e resíduos causam um grande aumento no risco de contaminação de Tamandaré. O risco de contaminação pode ser diminuído a partir de adequações e investimentos para que esse potencial poluidor seja reduzido. Pesquisas nessas áreas devem ser incentivadas em prol da redução dos riscos às águas subterrâneas.

7. CONCLUSÃO

A análise da vulnerabilidade natural de contaminação dos aquíferos é útil e importante, pois pode auxiliar nas primeiras ações relacionadas à gestão das águas subterrâneas bem como a gestão ambiental na cidade de Tamandaré e sinalizar áreas vulneráveis à contaminação.

De forma geral, Tamandaré possui áreas com vulnerabilidade natural alta e extrema, que devem ser preservadas para que não haja possíveis contaminações do aquífero. Algumas destas áreas necessitam de medidas corretivas para fontes pontuais removíveis, como pontos de despejo de efluentes e resíduos sólidos, como forma de diminuir o risco de contaminação, e monitoramento das fontes difusas, como áreas agrícolas e urbana, aumentando a área saneada.

A avaliação das zonas de vulnerabilidade dos aquíferos deve ser mais bem aproveitada quando utilizada para a análise conjunta com os tipos de fontes potenciais de contaminação, já que ampara a tomada de decisão dos órgãos gestores em relação à qualidade ambiental.

As ações antrópicas devem ser cuidadosamente calculadas e planejadas para que o impacto ambiental não seja alto. As zonas de vulnerabilidade natural que influenciam no risco de contaminação sempre devem ser consideradas em casos de implantação de intervenções com a presença de atividades que possuam potencial poluidor às águas subterrâneas.

Fontes difusas potencialmente poluidoras como o saneamento *in situ*, lançamento no solo de efluentes e resíduos domésticos, áreas desmatadas com e sem ações antrópicas, e de outras atividades pontuais (postos de combustíveis, indústria, estações elevatórias de esgoto, etc.), devem ser identificadas de forma a ampliar os estudos técnicos necessários para a proteção das águas subterrâneas existentes em Tamandaré.

Os resultados do mapeamento de risco indicam que o método aplicado é uma ferramenta prática para a análise da área de estudo, na qual aproximadamente 44,2 km² foram classificados como de alto risco de contaminação, equivalente a cerca de 20,7% da área de Tamandaré. Na área de estudo a predominância do risco de contaminação foi moderado, passando dos 50% de ocorrência na região.

Os mapas de risco de contaminação devem ser atualizados periodicamente após implantadas medidas de controle e remediação dos riscos existentes, de forma a monitorar a evolução do risco de contaminação das águas subterrâneas de Tamandaré. Além de servir como política pública como instrumento complementar de planos diretores municipais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Situação da Água no Mundo**. Digital/ASCOM, 2018. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/textos-das-paginas-do-portal/agua-no-mundo/agua-no-mundo>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

ARAÚJO, K. V., CAVALCANTE, I. N.; OLIVEIRA, R. M.; PEIXOTO, F. S.; LIMA NETO, I. O. **Vulnerabilidade natural e perigo de contaminação do Sistema Aquífero Dunas na região norte do Município de Aquiraz, Ceará**. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 38, n. 2, p.37-48, 2017. Instituto Geológico. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929x.20170008>.

ASF DATA SEARCH. 2020. Disponível em: <<http://vertex.daac.asf.alaska.edu/>>. Acesso em: 07 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (ABAS). **Águas subterrâneas: o que são?** 2017. Disponível em: <<https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2020.

BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; CAVANI, A. C. M. **Avaliação do perigo de contaminação do sistema aquífero guarani em sua área de afloramento no estado de São Paulo decorrente das atividades agrícolas. Águas Subterrâneas**, [s.l.], v. 25, n. 1, p. 1-14, 2 out. 2011. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v25i1.21296>.

BATISTA, C. S. P.; GESUALDO, G. C.; LEITE, P. C. C.; LASTORIA, G.; GABAS, S. G.; CAVAZZANA, G. H.; CASADEI, J. de M.; AZOIA, T. de S. **Aplicação do método GOD para avaliação de vulnerabilidade de aquífero livre em bacia hidrográfica**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1 (67), p. 1-14. 2016

BORBA, W. F.; LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. **Caracterização das Condições Naturais Das Águas Subterrâneas no Município de São Borja-RS**. Geociências, São Paulo, v. 37, n. 1, p.75-84, mar. 2018.

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**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.327-337, out. 2017. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28857>.

CANOVA, Â. V.; SALAZAR, R. F. S. **Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Ibirubá-RS**. Ciência e Tecnologia, Cruz Alta, v. 2, n. 1, p.75-88, ago. 2018. DOI: 10.33053/cientec.v2i1.6968

COMITÉ INTERGUBERNAMENTAL COORDINADOR DE LOS PAÍSES DE LA CUENCA DEL PLATA. **Diagnóstico y Cartografía de las Águas Subterrâneas de la Cuenca de la Plata: Programa Marco Para La Gestión Sostenible De Los Recursos Hídricos De La Cuenca Del Plata En Relación A Los Efectos Hidrológicos De La Variabilidad Y El Cambio Climático**. Bacia do Prata: CIC, 2015. 37 p.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), 2001. RESOLUÇÃO Nº 15, DE 11 DE JANEIRO DE 2001. MMA. Brasília.

CORREIA, E. R. C. **Caracterização da Vulnerabilidade natural do Aquífero Boa Viagem no município de Recife – Método GOD**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, Recife. 2006.

COSTA FILHO, W. D.; COSTA, W.D. **Caracterização Hidrogeológica do Estado de Pernambuco**. In: 1st JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 2000, Fortaleza. Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater, 2000.

COSTA, W. D., COSTA FILHO, W. D. **A Gestão Dos Aquíferos Costeiros de Pernambuco**. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004. Florianópolis. SUPLEMENTO - Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (ed.). **Mapa Geodiversidade do Litoral Sul de Pernambuco**. 2019. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21490>. Acesso em: 06 mai. 2020.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (ed.). **Mapa Geodiversidade do Estado de Pernambuco**. 2010. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14707>. Acesso em: 05 jun. 2020.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. 2011. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html> >. Acesso em: 16 jun. 2020.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: **Diagnóstico do município de Tamandaré**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 20 p.

CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. **Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH**. Revista Geociências, UNESP, São Paulo. Vol. 29, n.3, p. 401-411, 2010.

DAEE-UNESP. **Águas subterrâneas do Estado de São Paulo, diretrizes de utilização e proteção**. Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Instituto Geociências e Ciências Exatas. Laboratório de Estudo de Bacias (UNESP-LEBAC). Governo do Estado de São Paulo. 44 p. illus. 2013.

DUARTE, M. L. ZANCHI, F. B. NEVES, J. R. D. COSTA, H.S. JORDÃO, W. H. C. **Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no município de Humaitá, Amazonas, Brasil**. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. V. 11, nº 2. Taubaté. Abr/Jun 2016. IPABH. doi:10.4136/ambi-agua.1797

ESRI. **Data Management**. Disponível em: <http://www.esri.com/software/arcgis/geodatabase/single-user-geodatabase>>. Acesso em 26 jun. 2019.

FOSTER, S.; HIRATA, R. C. A. **Determinação de riscos de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. 87 p. (Boletim, n. 10)

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies.** World Bank, GWMATE. Washington, 101 p., 2002.

FOSTER, S.S.D. **Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy.** In: **Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants**, 38., 1987, Noordwijk. Proceedings and Information of the International Conference held in the Netherlands. Noordwijk: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69-86

FOSTER, S.S.D., HIRATA, R.C., ROCHA, G.A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas: In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 5, 1988, São Paulo. Anais. São Paulo: ABAS, 279p. il. 175-185. 1988.

FOSTER, S; HIRATA, R; GOMES, D; D'ELIA, M; PARIS, M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** São Paulo. Servemar. 2006.

FRANÇA, H.P.M., VASCONCELOS NETO, B.G.M., ANDRE, H.O., CIRILO, J.A., CABRAL, J.J.S.P. **Análise preliminar do comportamento hidrodinâmico e da intrusão marinha no Aquífero Beberibe na Região Metropolitana Norte do Recife.** In: Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste, Recife. Anais. Recife: ABAS, 194p. il. p.59-72. 1988.

GUETTAIA, S., MESSAOUD, H., BOUDJEMA, A., ZAHROUNA, A. **Vulnerability assessment of an aquifer in an arid environment and comparison of the applied methods:** Case of the mio-plio-quaternary aquifer. Energy Procedia, Beirut-Lebanon, v. 119, p.482-489, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.057>.

GUIGUER, N; KOHNKE, M.W. **Métodos para a determinação da vulnerabilidade de aquíferos.** In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Florianópolis, SC, 2002.

GUIMARÃES, T. O. **Patrimônio geológico e estratégias de geoconservação: popularização das geociências e desenvolvimento territorial sustentável para o Litoral Sul de Pernambuco (Brasil).** Tese de Doutorado apresentada ao departamento de geológica da UFPE. Recife/Pe. 2016. 407p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - (org.). **Grade Estatística.** Rio de Janeiro: IBGE, 2016. 31 p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Tamandaré.** IBGE Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/tamandare/panorama>>. Acesso em 05 de julho de 2020.

IRITANI, A.; ROSSINI-PENTEADO, D.; EZAKI, S.; ODA, G. H. **Perigo de contaminação da água subterrânea na região de Indaiatuba a Capivari, estado de São Paulo, Brasil.** Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 1-16, 2017. Instituto Geológico. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929x.20170001>.

JORNAL DO TEMPO. **Climatologia para Tamandaré-PE.** SOMAR Meteorologia. Disponível em: <<http://jornaldotempo.uol.com.br/climatologia.html/Tamandare-PE/>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

KEMERICH, P. D. C.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; UCKER, F. E.; FOLETTO, C. V. **Influência dos cemitérios na contaminação da água subterrânea em cidade no sul do Brasil.** Águas

Subterrâneas, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 129-141, 29 set. 2010. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v24i1.20341>.

KEMERICH, P. D. C.; SILVA, J. L. S.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; SAUCEDO, E. M. **Determinação da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea no bairro nossa senhora do perpétuo socorro em Santa Maria - RS**. Engenharia Ambiental (Online), v. 8, p. 085-098, 2011

LEAL, O. **Vulnerabilidade das águas subterrâneas da Região Metropolitana do Recife. Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife - Projeto SINGRE**. Recife. CPRM/FIDEM, 28p. il. 1994.

LINHARES, F.M; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P.; COELHO, V. H. R. **Avaliação da vulnerabilidade e do risco à contaminação das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Gramame (PB)**. Sociedade & Natureza, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 139-157, jan. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320140110>.

LNEC/COSTA, Consórcio. **Estudos Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife: RELATÓRIO DA ATIVIDADE 1**. Recife: Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Pernambuco, 2015. 219 p.

LOBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA J. L. (2015). **Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, Rio Grande do Sul, Brasil**. Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. Vol. 10 n. 1. Taubaté: Jan. / Mar. 2015. ISSN 1980-993X – DOI: 10.4136/1980-993X. 2015.

MARION, F.A. **Águas Subterrâneas, Atividades Potencialmente Contaminantes e o Aporte do Geoprocessamento na Definição de Conflitos**. GEO AMBIENTE ON-LINE, Jataí, ano 2011, n. 17, p. 31-47, 20 dez. 2011. ISSN: 1979-9860

MARQUES, J. H. S; OLIVEIRA, I. B. **Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Salvador, Bahia, Brasil, utilizando o Método GOD**. Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas. Águas Subterrâneas, [s.l.], v. 34, n. 1, p. 1-15, 26 jan. 2020. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i1.29767>.

MEIRA, J. C. R. **Avaliação da Relação Entre a Ocupação do Solo e a Qualidade Físico-Química e Microbiológica do Aquífero Guarani em Mineiros (GO)**. 2014. 158 p. Tese (DOUTORADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, Goiânia, 2014.

MFONKA, Z.; NGOUPAYOU, J.r. Ndam; NDJIGUI, P.-d.; KPOUMIE, A.; ZAMMOURI, M.; NGOUH, A.n.; MOUNCHEROU, O.f.; RAKOTONDRABE, F.; RASOLOMANANA, E.h. **A GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Foumban (Western-Cameroon)**. Groundwater For Sustainable Development, [s.l.], v. 7, p.250-264, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.006>.

OLIVEIRA, J.P.R. **Estudo dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) Em Regiões Industriais da Grande São Paulo- Via Cromatografia a Gás Acoplada a Espectrometria de Massas (GC-MS) E Captura de Elétrons (GC-ECD)**. 2011. 209 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2011.

ONI, T.E.; OMOSUYI, G.O.; AKINLALU, A.A. **Groundwater vulnerability assessment using hydrogeologic and geoelectric layer susceptibility indexing at Igbara Oke, Southwestern Nigeria.** Nriag Journal of Astronomy And Geophysics, Akure-Nigeria, v. 6, n. 2, p.452-458, dez. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.04.009>.

OSÓRIO, Q. S. **Vulnerabilidade Natural de Aquíferos e Potencial de Poluição das Águas Subterrâneas.** 2004. 169 p. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PEIXINHO, F.C.; FEITOSA, F.A.C. (2008). **ÁGUA É VIDA.** In: Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro / editor: Cassio Roberto da Silva. Rio de Janeiro: CPRM, 264 p. 2008.

PERNAMBUCO. Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. **Diagnóstico Socioambiental do Litoral Sul de Pernambuco.** CPRH. Recife, 2001.

PERNAMBUCO. Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. **Diagnóstico Socioambiental do Litoral Sul de Pernambuco.** CPRH. Recife, 87p. 2003.

PERNAMBUCO. Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. **Diagnóstico Socioambiental do Litoral Norte de Pernambuco.** CPRH: Recife, 2003. 214p.

PERNAMBUCO. SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. PROÁGUA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – Documento Volume 3.** Recife, 1998. 369p.

PERNAMBUCO. SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. PROÁGUA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – Documento Síntese.** Recife, 1998. 215p.

PINHEIRO, R. J. B.; RAUBER, A. C. C.; NUMMER, A. V.; SILVA, J. L. S. **Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria-RS.** Rega, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p.61-79, jul. 2015. Semestral.

ROMEIRO, C. I. R. **A Tecnologia SIG Aplicada ao Estudo da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste.** 2012. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistema de Informação Geográfica). Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informações da Universidade Nova de Lisboa. 2012.

SANTOS, A. C.; REBOUÇAS, A. C.; COSTA, W. D.; ACCIOLY, A. C. A. **Métodos e Critérios de Uso e Proteção das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana do Recife- Estado de Pernambuco - Nordeste do Brasil** In: 1st JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 2000, Fortaleza. Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater, 2000.

SILVA JÚNIOR, L. O.; CAETANO, L. C. **Aquíferos.** 2010. CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Aquiferos-1377.html>>. Acesso em: 07 jun. 2019.

SILVA, F. B. R. e; SANTOS, J. C. P; SILVA, A. B. **Zoneamento agroecológico do Estado de Pernambuco. Documentos,** vol 35 Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento - UEP Recife; Governo do Estado de Pernambuco, 2001. CD-ROM.

SILVA, R. B. G. **Águas subterrâneas: um valioso recurso que requer proteção**. São Paulo: DAEE, 2003. 28p.

TERRA, L. G.; LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. **Estimativa da vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do Município de Santiago-RS**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 10, p. 2208 - 2218, 2013

TERRA, L. G.; LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S.; ERTEL, T. **Análise dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Município De Santiago-RS, Como Ferramenta De Gestão**. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves. Anais [S.I.]: ABRH, 2013. p. 1 - 8.

TUSHAAR, N. S. *et al.* **Groundwater: a global assessment of scale and significance**. In: WATER FOR FOOD WATER FOR LIFE, Anais... p. 395-423, 2007.

9. APÊNDICE

a) Questionário utilizado durante a coleta de dados

CADASTRO DE FONTES CONTAMINANTES – TAMANDARÉ PE		
Possíveis contaminantes da água subterrânea		
Data: ____/____/____	Ficha nº:	
Latitude:	Longitude:	M.C.:
Altitude:		
Nome Fantasia:		
Endereço		
Bairro:		
Categoria:		
Operação		
Porte		
Potencial Poluidor:		
Há geração de efluente?		
Sim ().	É tratado (ou direcionado para a estação de tratamento)?	
	SIM () Obs.:	
	Se NÃO, qual a destinação? ()	
Não (). Obs.:		
Observações:		
Fotografias:		