

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

RAÍZA DAQUINO PRINTES

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL E DO PERIGO À
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE
SANTARÉM/PA, BRASIL**

SÃO PAULO
2020

RAIZA DAQUINO PRINTES

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL E DO PERIGO À
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE
SANTARÉM/PA, BRASIL**

VERSÃO ORIGINAL

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do certificado de Especialista em Gerenciamento de Áreas Contaminadas e Revitalização de Brownfields.

Orientador (a): Prof.^a MSc. Lélia Cristina da Rocha Soares

SÃO PAULO

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Printes, Raíza Daquino.

Avaliação da Vulnerabilidade Natural e do Perigo à Contaminação das Águas Subterrâneas no Município de Santarém/PA, Brasil. / Raíza Daquino Printes; orientadora, Lélia Cristina da Rocha Soares – São Paulo, 2020. 74 f. + 2DVDs

Dissertação Especialização em Gerenciamento de Áreas Contaminadas e Revitalização de Brownfields - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020.i

.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Nome: PRINTES, Raíza Daquino

Título: Avaliação da Vulnerabilidade Natural e do Perigo à Contaminação das Águas Subterrâneas no Município de Santarém/PA, Brasil

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão do curso MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Aprovado em: _____ / _____ / _____

Banca Examinadora

Prof. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Aos meus pais, Gilvandra e Miguel, e aos avós.
In memoriam (José's, Maria Izabel e Tio
Gilberto).

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Lélia Soares pela paciência, empenho e cuidado durante o período de elaboração deste trabalho.

A mim mesma, por sempre buscar melhorar como profissional, me capacitar, acreditar na ciência acima de tudo como ferramenta de mudança para o desenvolvimento da sociedade.

A minha mãe pela segunda vez porque ela é o ser humano que mais me apoia nessa vida, e me motiva a ser uma pessoa melhor a cada dia.

A todos os professores da especialização e aos mestres que já passaram pela minha vida, obrigada pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos fora e dentro da sala de aula.

A todos os meus colegas da especialização, que me ajudaram nos momentos conturbados e sempre estavam dispostos a ajudar nos exercícios, trabalhos ou qualquer dúvida relevante dos conteúdo deste curso, sem essa turma eu não teria chegado até aqui. Em especial, ao grupo Norte: Sebastian, Marcos, Omar e Jubal Cabral. E aos meus amigos, que são família: Amanda, Brandon, Thais, Klv, Alba, Leoni, Barbara, Day, Andressa, Amanda V., Nayara, Sanny e Agatha pelo apoio, paciência, parceria e carinho ao longo desses anos.

E por fim, aos meus filhos pets Chicão, Maria Flor e Kika.

"Nada mais indigesto para o mundo dominador
que a liberdade de uma mulher..."

Fernanda Young

RESUMO

PRINTES, Raíza Daquino. Avaliação da Vulnerabilidade Natural e do Perigo à Contaminação das Águas Subterrâneas no Município de Santarém/PA, Brasil. 2020. 74 f. Monografia (MBA em Gerenciamento de Áreas Contaminadas e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Por conta do problema de abastecimento humano e a crescente expansão urbana que não acompanha políticas públicas na Amazônia, este trabalho tem por objetivo avaliar o perigo à contaminação das águas subterrâneas da área urbana do município de Santarém/PA. O perigo é caracterizado pela integração entre a vulnerabilidade do aquífero com as fontes potenciais de contaminação difusas e pontuais feita por levantamento bibliográfico e aquisição de dados, classificados posteriormente pelos método GOD e POSH, com geoprocessamento de dados e auxílio do software *SURFER 8 (Surface Mapping System)*. De forma geral, a metodologia consiste em uma avaliação preliminar para instrumento de planejamento de uso do solo e políticas públicas na avaliação estratégica da gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Os resultados demonstraram que as fontes difusas de contaminação por saneamento *in situ* são de baixo a alto perigo de contaminação. As fontes pontuais, entretanto, apresentam elevado perigo à contaminação das águas subterrâneas presentes nas atividades de mineração, posto de combustível e indústria do tipo 2, em zonas de alta vulnerabilidade do aquífero. Ademais, fica claro que em zonas de alta vulnerabilidade devem ter uma maior fiscalização e monitoramento das águas subterrâneas do aquífero livre da Formação Alter do Chão, localizados a noroeste e sul da área de estudo. Diante disso, tais resultados demonstraram as deficiências na universalização do saneamento e gestão territorial, devendo ser priorizada a melhoria das condições sanitárias que conferem maior grau de perigo difuso às águas subterrâneas, no município de Santarém/PA.

Palavras-chave: Águas subterrâneas, Vulnerabilidade Natural, Perigo à contaminação.
Método GOD, Método POSH.

ABSTRACT

PRINTES, Raíza Daquino. Evaluation of Groundwater Vulnerability and Danger to Groundwater Contamination in the municipality of Santarém / PA, Brazil. 2020. 74 f. Dissertation (Post-Graduation) - Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, 2020.

Due to the problem of human supply and urban expansion that does not follow public policies in the Amazon, this work aims to assess the danger of contamination of groundwater in the urban area of the municipality of Santarém / PA. The danger is benefited by the integration between the vulnerability of the aquifer with the potential sources of diffuse and punctual contamination made by bibliographic survey and data acquisition, later classified by the GOD and POSH methods, with data geoprocessing and aid of the SURFER 8 software (Surface Mapping System). In general, the methodology consists of a preliminary assessment for an instrument of land use planning and public policies in the strategic assessment of the management of underground water resources. The results showed that diffuse sources of contamination by in situ sanitation are low to high contamination risks. Point sources, however, present a high danger to the contamination of groundwater present in mining activities, gas station and type 2 industry, in areas of high vulnerability of the aquifer. In addition, it is clear that in areas of high vulnerability there must be greater inspection and monitoring of the groundwater in the free aquifer of the Alter do Chão Formation, acceptance in the northwest and south of the study area. In view of this, these results demonstrated the deficiencies in the universalization of sanitation and territorial management, and priority should be given to improving sanitary conditions that confer a greater degree of diffuse danger to groundwater in the municipality of Santarém / PA.

Keywords: groundwater, natural vulnerability, contamination hazard. GOD method, POSH method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das fases dos procedimentos metodológicos do estudo	17
Figura 2 - Esquema de avaliação GOD proposto por Foster <i>et al.</i> (2006).	20
Figura 3 - Localização da área de estudo: município de Santarém, Estado do Pará.	24
Figura 4 - Dados das precipitações mensais na estação Automática de Belterra (PA) do ano de 2019.	25
Figura 5- Geomorfologia da região do município do Santarém/PA.	27
Figura 6- Mapa de localização da Bacia do Amazonas	28
Figura 7- Carta Estratigráfica da Bacia do Amazonas.....	30
Figura 8 - - Mapa com as áreas de afloramento do aquífero Alter do Chão no estado do Pará.	31
Figura 9 - Seção hidrogeológica esquemática e mapa potenciométrico da Formação Alter do Chão na região de Santarém.	32
Figura 10- Zonas hídricas em subsuperfície	33
Figura 11- Representação da classificação dos tipos de aquífero quanto a porosidade.	34
Figura 12- Tipos de aquíferos porosos.	35
Figura 13- Composição do mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas	39
Figura 14-Mapa de vulnerabilidade da região proposta por Tancredi(1996).	41
Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo da área urbana de Santarém/PA.	44
Figura 16 - Modelo Numérico do Terreno (MNT) e Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo.	45
Figura 17-Classes de declividade da área urbana de Santarém/PA.	46
Figura 18 - Mapeamento da superfície potenciométrica da área de estudo.	47
Figura 19- Mapa de reclassificação de Vulnerabilidade natural da área de estudo.	53
Figura 20 - Mapeamento das fontes potenciais (difusas e pontuais) de contaminação situadas na área urbana do município de Santarém/PA.....	55
Figura 21 - Distribuição dos Sistemas de Esgotamento Sanitários em Santarém/PA.	57
Figura 22- Área pertencente ao aterro sanitário inativo do Santo André. A) Imagem do ano de 2012. B) Imagem do ano de 2020.....	58

Figura 23- Áreas pertencentes aos cemitérios identificados na área de estudo. A) Cemitérios ao norte da área (João Batista e Nossa Senhora dos Mártires). B) Cemitério a oeste da área (Cambuquira).	59
Figura 24 – Perigo à contaminação das águas subterrâneas por fontes potenciais difusas.	61
Figura 25 - Gráfico com distribuição de percentual das áreas das classes do mapa de perigo de contaminação por fonte difusa.	62
Figura 26 - Vulnerabilidade natural dos aquíferos e fontes potenciais de contaminação mapeadas.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos dados consultados para formar base cartográfica do estudo.	18
Tabela 2 - Índice e Classes de vulnerabilidade do aquífero e sua definição.	20
Tabela 3-Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas de saneamento in situ, de acordo com o método POSH.	21
Tabela 4 - Classificação das fontes de contaminação pontuais segundo o método POSH.	22
Tabela 5 - Classificação do perigo à contaminação em relação às fontes de contaminação.	23
Tabela 6 - Descrição das vegetações encontradas na região de Santarém/PA.	25
Tabela 7 - Índice de vulnerabilidade da água subterrânea na região de Santarém, definida por Tancredi (1996).	41
Tabela 8 - Dados da classificação supervisionada para uso e ocupação da área de estudo....	43
Tabela 9 - Identificação dos 38 poços tubulares utilizados no trabalho de Tancredi (1996) e calculados de acordo o Índice vulnerabilidade de Foster et al.(2006).	49
Tabela 10- Classificação de Vulnerabilidade a partir dos poços usados no estudo.	52
Tabela 11 - Classificação qualitativa de fontes difusas e pontuais das fontes pelo método POSH.	54
Tabela 12-Classificação do perigo de contaminação das águas subterrâneas no subsolo através da vulnerabilidade e potencial de gerar carga contaminante.	64
Tabela 13 - Porcentagens das classes de perigo à contaminação por cada fonte pontual.	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
3	JUSTIFICATIVA	15
4	METODOLOGIA.....	16
4.1	FASE 1: Pesquisa bibliográfica	16
4.2	FASE 2: Aquisição de dados	16
4.2.1	Cadastro e caracterização das fontes potenciais de contaminação	18
4.3	FASE 3: Geoprocessamento	19
4.3.1	Vulnerabilidade Natural do Aquífero	19
4.3.2	Avaliação das atividades potencialmente contaminantes	21
4.4	FASE 4: Avaliação do perigo de contaminação das águas subterrâneas.....	22
5	AREA DE ESTUDO	23
5.1	Clima.....	23
5.2	Vegetação	25
5.3	Geomorfologia	26
5.4	Geologia.....	27
5.4.1	Geologia Regional.....	27
5.4.2	Geologia Local.....	29
5.5	Hidrogeologia	31
6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
6.1	Água subterrânea	33
6.2	Aquíferos	34
6.3	Vulnerabilidade natural dos aquíferos	36
6.4	Vulnerabilidade em Santarém/PA por Tancredi (1996)	40
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
7.1	Mapa de uso e ocupação do solo	43
7.2	Mapa de Modelo Digital de Elevação (MDE)	44
7.3	Mapa potenciométrico	47
7.4	Índice de vulnerabilidade.....	48
7.5	Fontes potenciais pontuais e difusa de contaminação	53
7.5.1	Fontes Difusas pelo método POSH.....	55
7.5.2	Fontes Pontuais pelo método POSH	57
7.6	Perigo de contaminação das águas subterrâneas	60
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam 22% da água potável no mundo (UNESCO, 1978). Tais mananciais são importantes fontes para o desenvolvimento da vida de todas as espécies, e muitas vezes, são a única fonte disponível numa região de difícil acesso a corpos d'água superficiais. No Brasil são fundamentais para o abastecimento público e outros usos (ANA, 2012). Entretanto, a falta de governança e o uso irregular dessas águas constituem uma ameaça real para a segurança hídrica, uma vez que se apresentam como parte da solução (VILLAR, 2016).

Barbosa *et al.*(2011), destaca que no cenário atual, a água subterrânea é uma fonte estratégica para diferentes tipos de usos. Entretanto, o seu uso descontrolado e as inadequadas formas de uso e ocupação do solo, podem comprometer a qualidade e a quantidade da água. No país má gestão dos aquíferos expõe à superexploração e à poluição, bem como a falta de dados, redes de monitoramento e vulnerabilidade (GOETTEN, 2015). Estima-se que cerca de 88% dos poços tubulares existentes no Brasil são desconhecidos pelo poder público, sendo que 52% dos 5.570 municípios dependem total (36%) ou parcialmente (16%) das águas subterrâneas para o abastecimento público (HIRATA, 2019).

As pesquisas sobre águas subterrâneas na região hidrográfica amazônica são voltadas para os aquíferos sedimentares, entre eles, o Aquífero Alter do Chão, um manancial que ocupa uma área de 313 mil km², localizada na região centro-norte do Estado do Pará e leste do Estado do Amazonas (BRASIL, 2007). Apesar de sua abundância, essa região sofre com problemas de contaminação localizados nos centros urbanos (efluentes domésticos gerando a contaminação de igarapés), empreendimentos de extração mineral (deposição de sólidos e de mercúrio em garimpos) e florestal (desmatamentos, como consequência a erosão e perda de camadas férteis superficiais ao solo). Além de problemas do uso indiscriminado de poços, que é consequência da deficiência do serviço de abastecimento e falta de conservação dessas águas (ZOBY e OLIVEIRA, 2005).

Para contornar esses problemas com poços são adotadas medidas preventivas, pois uma vez contaminados, a recuperação das águas é extremamente difícil e onerosa. Para isso é fundamental conhecer a vulnerabilidade do aquífero, o que torna a aplicação de métodos de avaliação de vulnerabilidade uma prática comum e de grande contribuição (CUTRIM; CAMPOS, 2010). Portanto, a vulnerabilidade de um aquífero é o conjunto de

características intrínsecas que determinam a sua susceptibilidade a ser eventualmente afetado por uma carga contaminante (FOSTER *et al.*, 2006).

Na avaliação do risco quanto à contaminação da água subterrânea, a carga contaminante de uma atividade antrópica é um elemento comumente utilizado (IRITANI *et al.*, 2013). Foster *et al.* (2002) consideram como carga contaminante o potencial que uma atividade antrópica tem de liberar substâncias nocivas para o ambiente, que possam atingir e degradar a qualidade da água subterrânea. De Ketelaere *et al.* (2004) e FOSTER *et al.* (2002) utilizam o termo “perigo” ao invés de “risco”.

Os métodos de GOD (do inglês *Groundwater, Overal, Depth*) e POSH (do inglês *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*) são muito aplicados na avaliação de vulnerabilidade e perigo à contaminação das águas subterrâneas. Estes métodos detêm uma simplicidade conceitual e demandam de bases que são acessíveis com ampla aplicação nos países da América Latina. O método GOD possui bom desempenho, menor custo e maior facilidade de obtenção das informações nele utilizada (MEIRA *et al.*, 2014).

Para avaliar a geração de uma carga poluidora identificando as substâncias tóxicas armazenadas e/ou manipuladas e a existência de carga hidráulica associada à essas substâncias no processo ou no seu destino final, utiliza-se o método POSH (FOSTER *et al.*, 2002). O método POSH tem sido amplamente utilizado no Brasil, em estudos regionais e locais como destacado em SMA/SSE (2009), Carvalho *et al.* (2009), Cutrim & Campos (2010) e IPT/CPLA (2011), por conta dessa facilidade de aplicação e demanda poucas informações, geralmente disponíveis nos órgãos de controle (IRITANI *et al.*, 2013).

A zona urbana de Santarém chega a ter sistemas de aquíferos livres com índices de vulnerabilidade alta. Até o presente, não existe uma avaliação do perigo à contaminação das águas subterrâneas para a cidade. Desta forma, admitindo a vulnerabilidade dos aquíferos por Tancredi (1996), na zona urbana do município de Santarém, Estado do Pará, este estudo buscou fazer uma avaliação preliminar sobre o perigo à contaminação das águas subterrâneas, em escala de detalhe de classificação, com caracterização de fontes pontuais e difusas na área, a fim de evitar contaminação dos aquíferos superficiais por conta da crescente demanda de abastecimento de água para consumo humano.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi realizar o estudo do grau de vulnerabilidade natural do aquífero e aspectos de perigos à contaminação das águas subterrâneas, na área urbana do município Santarém/PA.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas da área de estudo, por meio do método GOD, tendo como base os dados do estudo de Tancredi (1996);
- Mapear e caracterizar as fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas de Santarém/PA;
- Avaliar os locais com maiores índices de perigo à contaminação dos aquíferos;
- Contribuir com uma melhor política de proteção das águas subterrâneas na região Amazônica.

3 JUSTIFICATIVA

As águas subterrâneas da região Amazônica são utilizadas quase que exclusivamente para o abastecimento humano. As pesquisas feitas na Região Hidrográfica Amazônica ainda são escassas e concentradas no aquífero da Formação Alter do Chão. Tampouco dispõe-se de uma integração desses estudos com as informações geológicas regionais existentes.

O município de Santarém/PA vem sofrendo uma expansão urbana e aumento populacional desenfreado, que não acompanha políticas públicas. O sistema de abastecimento público não consegue suprir toda a população, o que ocasiona o aumento de captação de águas subterrâneas por propriedades particulares. O município ainda conta com a ineficácia da gestão de saneamento básico e ao baixo tratamento dos resíduos sólidos no município. Até 2002, o principal receptor de resíduos sólidos de Santarém era o Lixão de Santo André, que anteriormente era uma cava de materiais de construção, a qual a população passou a utilizá-la como destino final de lixo e entulho de forma imprópria, sem nenhum critério técnico para seu funcionamento (SOUZA, 2017). Além de outros problemas ambientais, segundo Pinheiro *et al.* (2009), tal situação constitui ameaça à saúde pública agravando a degradação ambiental e comprometendo a qualidade de vida das populações vizinhas.

Para o município de Santarém existe apenas um estudo que comprehende a vulnerabilidade natural do aquífero local, que é o de Tancredi (1996), porém, nenhuma análise quanto ao perigo à contaminação foi realizada na área.

Desta forma, é importante a realização de estudos sistemáticos e em escala de detalhe mais recentes visando a análise mais aprofundada da vulnerabilidade das águas subterrâneas de Santarém, de modo que se possa futuramente serem contemplados estudos socioeconômicos e ambientais para melhor desenvolvimento da região.

4 METODOLOGIA

Para a identificação de áreas críticas quanto à vulnerabilidade das águas subterrâneas da cidade de Santarém/PA, e assim se alcançar os objetivos desse trabalho, seguiu-se a seguinte metodologia, conforme também mostrado na Figura 1: pesquisa bibliográfica; aquisição de dados; geoprocessamento; e avaliação do perigo à contaminação dos aquíferos.

4.1 FASE 1: Pesquisa bibliográfica

O levantamento bibliográfico buscou reunir conceitos sobre aquíferos e características da área de estudo quanto ao clima, vegetação, geologia, hidrogeologia, geomorfologia. Reuniu também informações teóricas sobre a identificação da vulnerabilidade do aquífero, e da classificação e avaliação do perigo à contaminação, com utilização e interpolação de dados entre os métodos GOD (do inglês *Groundwater, Overal, Depth*) (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2006), e POSH (do inglês *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*) (FOSTER *et al.*, 2006).

Para o estudo de vulnerabilidade natural do aquífero, foram utilizadas informações de poços tubulares e das descrições geológicas e hidrogeológicas apresentadas no trabalho de Tancredi (1996).

4.2 FASE 2: Aquisição de dados

A base de dados utilizada neste estudo refere-se às imagens de satélite, imagens *raster*, arquivos vetoriais (limite estadual, limite municipal, malha urbana, hidrografia e drenagem) e base cartográfica, todos esses itens disponibilizados gratuitamente em sítios de órgãos especializados. Também foram obtidas informações de teses e artigos referentes à área de estudo. A Tabela 1 mostra as fontes bibliográficas de onde foram consultados os dados.

Figura 1 - Fluxograma das fases dos procedimentos metodológicos do estudo

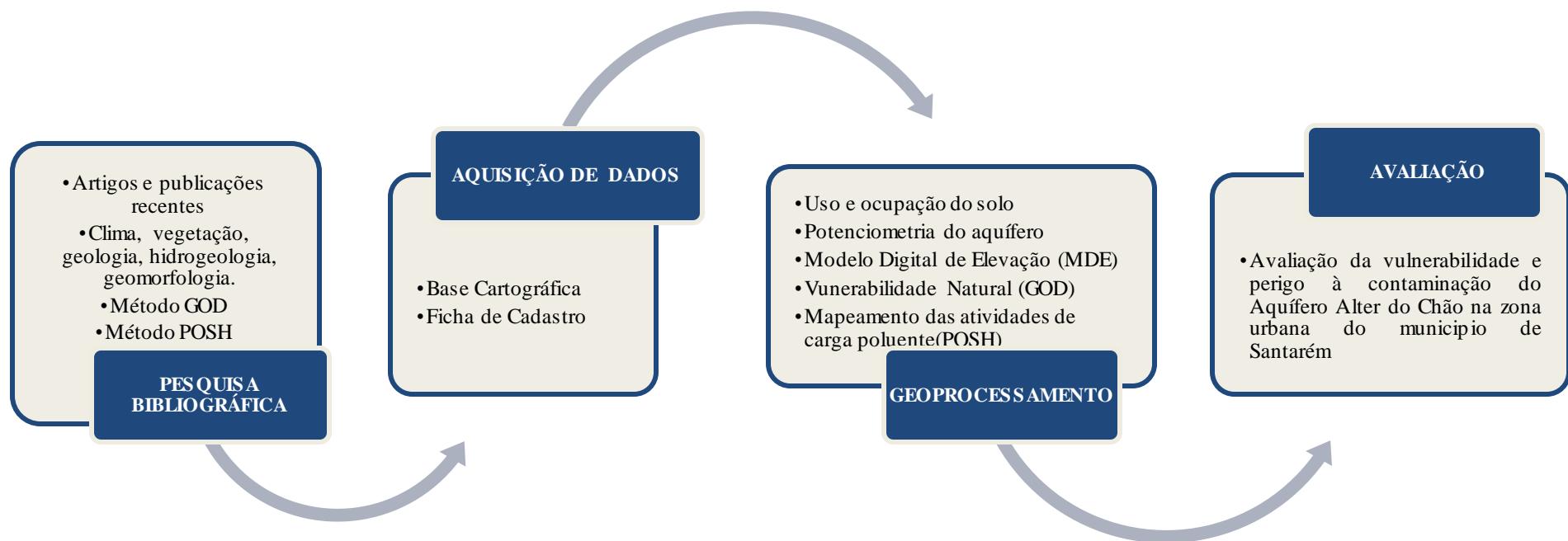


Tabela 1 - Relação dos dados consultados para formar base cartográfica do estudo.

Órgão/Autor	Informação /Produto	Objetivos
Agência Nacional do Petróleo e Castro (2017)	Base de informações sobre os postos revendedores de combustíveis cadastrados	Caracterização dos postos de combustíveis localizados na área de estudo.
IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) e CIAM/Santarém (2020)	Dados censitários e bases cartográficas sobre as divisões políticas, hidrológicas, tipos de solo, geomorfologia, localidades e vias de acesso	Composição do SIG (Sistema de Informação Geográfica) e caracterização da área.
INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais (SRTM, 2020)	Banco de dados Topodata da Folha 02s555 a partir de SRTM - <i>Shuttle Radar Topography Mission.</i>	Caracterização do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área em escala 1:55.000.
USGS – <i>United States Geological Survey</i> (USGS, 2020)	Composição R4G3B2 das bandas espectrais da Imagem Sensor Sentinel-2, de 15 de julho de 2020 do Sistema Geodésio SIRGAS 2000 – UTM e Fuso 21 S - MC 57º W.G	Caracterização supervisionada de uso e ocupação do solo da área em escala 1:55.000.
Plano Municipal de Saneamento Básico (SANTARÉM,2019) Trata Brasil (TRATABRASIL, 2020)	Informações de saneamento (coleta e tratamento de esgotos, disposição de resíduos sólidos)	Caracterização de saneamento <i>in situ</i> na área de estudo.
Gonçalves <i>et al.</i> (2012), Souza <i>et al.</i> (2017) e Galvão <i>et al.</i> (2018)	Informações sobre aterro desativado	Caracterização de aterro desativado e vestígios de potencial à contaminação na área de estudo.
Rodrigues, (2017) e Viana (2019)	Informações sobre cemitérios	Levantamento de informações e localização dos cemitérios na área de estudo.
SIGMINE – Sistema de Informações Geográficas da Mineração (ANM, 2020) e Da Silva <i>et al</i> (2020)	Base de dados sobre os processos minerários cadastrados na Agência Nacional de Mineração (ANM)	Levantamento de informações e localização das áreas de mineração na área de estudo.
Tancredi (1996)	Poços tubulares cadastrados na área de estudo;	Levantamento de informações geológicas, hidrogeológicas e de localização dos poços na área de estudo.

4.2.1 Cadastro e caracterização das fontes potenciais de contaminação

O levantamento cartográfico das atividades potencialmente poluidoras foi realizado a partir de um inventário com a compilação dos estudos mais recentes presentes no acervo da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), referente à avaliação da qualidade das águas subterrâneas, vulnerabilidade e caracterização do Aquífero Alter do Chão. Assim, foram mapeadas, identificadas e cadastradas fontes potenciais de contaminação pontuais (61) e difusa (01) na área de estudo, com auxílio da base

cartográfica e imagens de satélites. O inventário destes pontos foi feito através dos trabalhos publicados, verificado através do Google Earth (consulta em 01 de agosto de 2020), e posteriormente realizada a confirmação de alguns pontos em campo, com uso de um aparelho de GPS (Sistema de Posicionamento Global).

4.3 FASE 3: Geoprocessamento

Para realizar a integração de dados e elaborar o mapa de vulnerabilidade ambiental das águas subterrâneas de Santarém/PA foi realizado um recorte em escala 1:55.000 em detalhe da área, através de técnicas de avaliação dos dados de topografia, geologia, vegetação, geomorfologia, drenagem, imagens de satélites e *shapefiles* processados e projetados no mesmo sistema de coordenadas.

As interpolações feitas na pesquisa foram realizadas pelo método de *Krigagem*. Tal processamento automático de análise de múltiplos dados foi utilizado para gerar mapas de contorno potenciométrico, curva de nível altimétrico, modelo digital de elevação, classificação do uso e ocupação do solo, vulnerabilidade e vetores sobrepostos uns aos outros, por meio do processamento automático do software *SURFER 8 (Surface Mapping System)*.

4.3.1 Vulnerabilidade Natural do Aquífero

O estudo de vulnerabilidade natural do aquífero se deu através: da utilização de informações geológicas e hidrogeológicas disponíveis no trabalho de Tancredi (1996); aplicação do método GOD.

No método GOD (FOSTER *et al.*, 2006) a caracterização geológica e hidrogeológica de uma área se dá por variáveis numéricas entre 0 e 1, que são aplicadas a 03 índices: índice G (Grau de confinamento hidráulico); índice O (Ocorrência de estratos de cobertura); e índice D (Distância do lençol freático). Após a definição de cada índice, o fator de vulnerabilidade é obtido conforme a seguinte equação:

$$[I_{GOD}] = I_{(G)} * I_{(O)} * I_{(D)} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

I_(G) = confinamento hidráulico da água subterrânea no aquífero;

I_(O) = ocorrência de estratos de cobertura (zona não saturada ou camada confinada), em termos das características hidrogeológicas e do grau de consolidação que estabelecem a sua aptidão de atenuação do poluente;

I_(D) = profundidade ou distância do nível da água subterrânea.

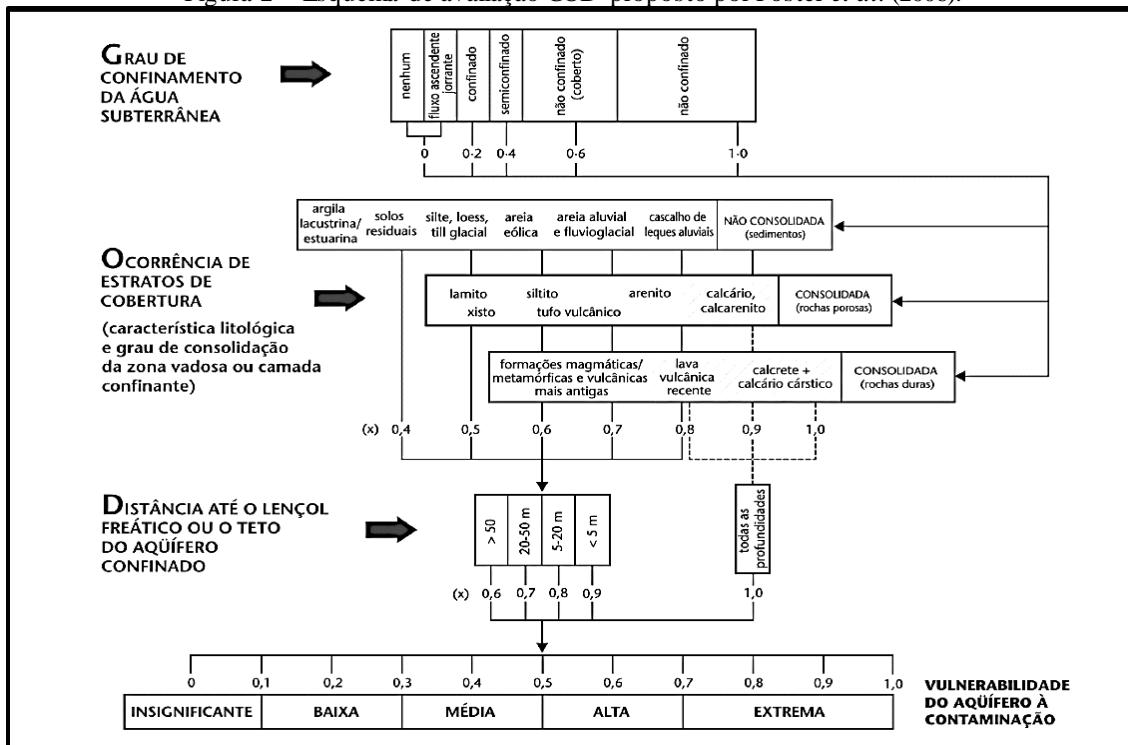
O resultado da interpolação entre índices gera diferentes classes de vulnerabilidade natural do aquífero, como mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Índice e Classes de vulnerabilidade do aquífero e sua definição.

Índice GOD	Classe de Vulnerabilidade	Definição Correspondente
0,7 a 1,0	Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.
0,5 a 0,7	Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação.
0,3 a 0,5	Moderada	Vulnerabilidade a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançado ou lixiviado.
0,1 a 0,3	Baixa	Somente os vulneráveis aos contaminantes conservativos a longo prazo, quando os contaminantes são contínuos e amplamente lançados ou lixiviados.
0 a 0,1	Insignificante	Camada confinada sem fluxo vertical descendente significativo (percolação).

Nos trabalhos de Tancredi (1996), foram identificados 35 poços aptos para este estudo, onde foi necessária a realização de uma reclassificação do índice local, porque houve algumas mudanças no **Índice D** no trabalho de Foster *et al.* (2006), que referem-se às profundidades. A Figura 2 mostra o esquema do método GOD.

Figura 2 - Esquema de avaliação GOD proposto por Foster *et al.* (2006).



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

4.3.2 Avaliação das atividades potencialmente contaminantes

A avaliação da contaminação potencial das atividades humanas foi feita através do cadastro da carga de contaminante no subsolo, que permite avaliar as fontes potenciais de contaminação por um levantamento espacial simplificado na área de estudo, conforme proposto no método POSH (FOSTER *et al.*, 2006). A partir do cadastro e classificação da atividade, pôde-se estimar a origem do poluente e o potencial de geração de cargas difusas e pontuais em três níveis potenciais qualitativos: reduzido, moderado e elevado (Tabela 3 e Tabela 4).

A identificação das fontes de poluição difusas, que são aquelas onde se pode contaminar áreas extensas, foi definida neste estudo a partir do processamento da imagem digital do sensor *Sentinel-2*, de 15 de junho de 2020, por meio da segmentação e classificação supervisionada. A partir da classificação das áreas impermeáveis/edificável por bairro, e dados secundários, da revisão do Plano de Saneamento Municipal de Santarém (SANTARÉM, 2019) e relatório 2020 do Ranking de Saneamento Básico (TRATABRASIL, 2020), pôde-se estimar a área de fonte difusas por saneamento *in situ* (Tabela 3).

Tabela 3-Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas de saneamento *in situ*, de acordo com o método POSH.

Potencial de carga contaminante no subsolo	Saneamento <i>in situ</i>	Práticas agrícolas
Elevado	Cobertura da rede de esgoto inferior a 25% e densidade populacional superior a 100 pessoas/ha	Culturas comerciais intensivas, geralmente monoculturas em solos bem drenados, em climas úmidos com baixa eficiência de irrigação, pasto intensivo em campos intensamente fertilizados.
Moderado	Intermediário entre elevado e reduzido	
Reduzido	Cobertura da rede de esgoto superior a 75% e densidade populacional inferior a 550 pessoas/ha	Rotação das culturas, terra para pasto extensivo, sistemas de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semiáridas.

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

As fontes pontuais, são aquelas facilmente de se representar em mapas com a utilização de coordenadas geográficas, consideradas locais onde se tem a disposição de resíduos sólidos, áreas industriais, lagoas residuais, mineração e exploração de petróleo, onde a sua classificação é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação das fontes de contaminação pontuais segundo o método POSH.

Potencial de gerar carga contaminante no subsolo	Fontes de Contaminação				
	Deposição de Resíduos sólidos	Áreas industriais*	Lagoas de águas residuais	Outras (urbanas)	Mineração e exploração de petróleo
Elevado	Resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida	Tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/d de produtos químicos perigosos	Todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial se a área >5 ha)		Operações em campos de petróleo, mineração de metais
Moderado	Chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/ industriais tipo 1, ou todos os demais casos	Tipo 2	Esgoto residencial se a área > 5 ha, demais casos não relacionados acima ou abaixo	Postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos perigosos	Algumas atividades de mineração/ extração de materiais inertes
Reduzido	Chuva < 500 mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/ indústrias tipo 1	Tipo 1	Águas residuais residentes, mistas, urbanas, agroindustriais e de mineração de não metálicos	Cemitérios	

Indústrias do Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos; Indústrias do Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão; Indústrias do Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/ petróleo, fábricas de produtos químicos / farmacêuticos / plásticos / pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal.

4.4 FASE 4: Avaliação do perigo de contaminação das águas subterrâneas

A avaliação do perigo de contaminação da área da zona urbana de Santarém se deu pela interpolação espacial entre os resultados da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação e às cargas de contaminantes das fontes potenciais pontuais e difusas, como disposto no trabalho de Foster *et al.* (2006). A Tabela 5 mostra a classificação de perigo apresentada no trabalho de Barbosa *et al.* (2011), onde estes autores se basearam em Foster *et al.* (2006).

Os dados para avaliação foram tratados por meio da sobreposição dos resultados entre os mapas, através dos programas *ArcGIS* 10.1 (extração dos dados) e *Surfer8* (interpolação dos dados).

Tabela 5 - Classificação do perigo à contaminação em relação às fontes de contaminação.

Perigo à contaminação	Carga Potencial de Contaminação			
	Reduzido	Moderado	Elevado	
Vulnerabilidade	Insignificante	Muito baixo	Muito baixo	Baixo
	Baixa	Muito baixo	Baixo	Moderado
	Média	Baixo	Moderado	Alto
	Alta	Moderado	Alto	Alto
	Extrema	Alto	Alto	Extremo

Fonte: adaptado de Barbosa *et al.* (2011),

5 AREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à área urbana do município de Santarém/PA, situado na mesorregião do Baixo Amazonas, na confluência das águas dos rios Tapajós e Amazonas, a oeste do Estado do Pará, sob coordenadas geográficas: 02°25'30"S e 54°42'50"W (Figura 3).

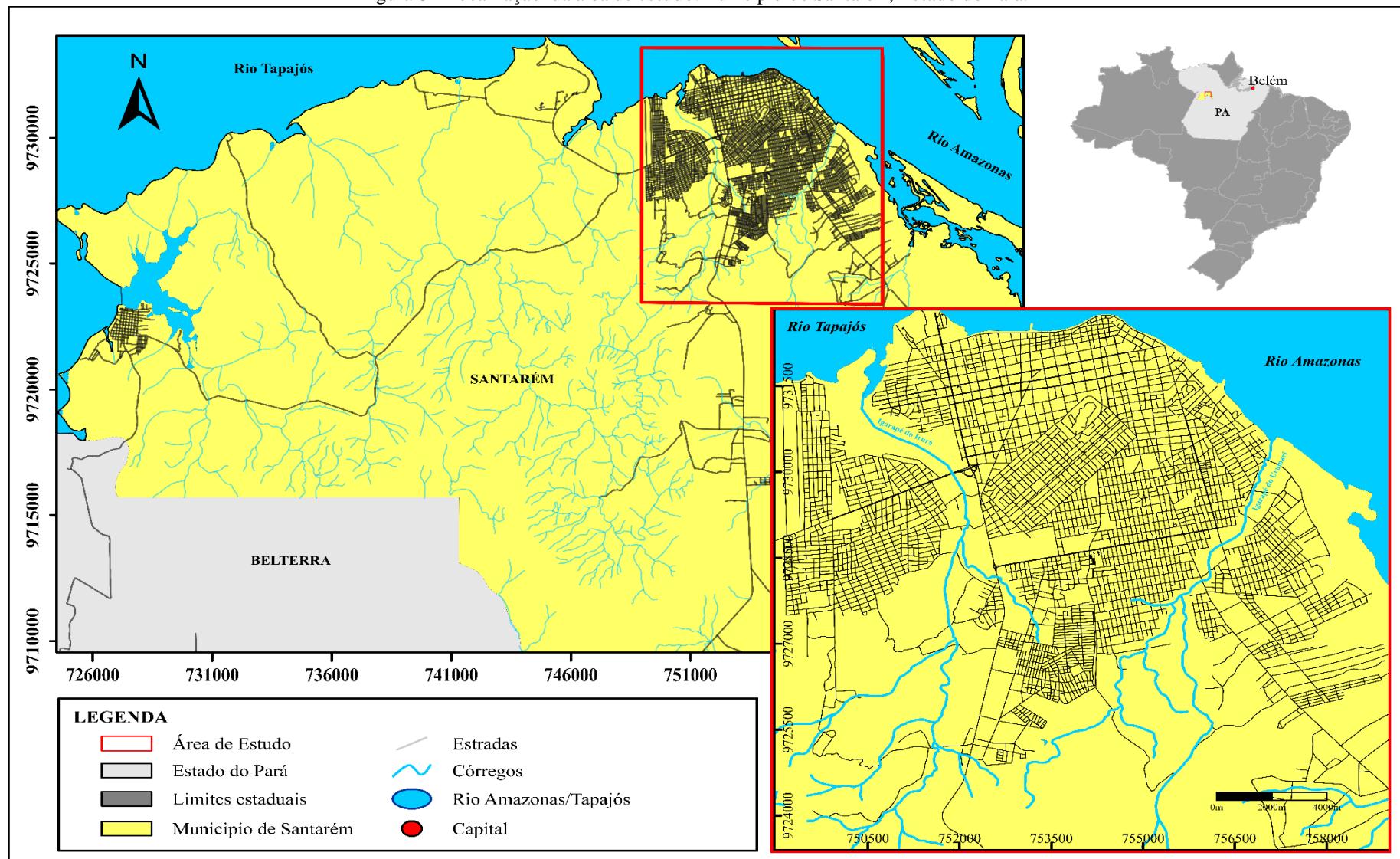
Distante da capital, cerca de 807 km, o município é a segunda região urbana mais importante do Estado. Possui uma população de aproximadamente 304.589 mil habitantes, segundo IBGE (2019), distribuídos em uma área territorial de 17.898,389 km², com densidade demográfica de 12,87 hab/km² (IBGE,2010). O estudo de vulnerabilidade natural e perigo à contaminação foi realizado em parte da cidade de Santarém, ou seja, na zona mais urbanizada do município. Esta área corresponde a 102,1 km².

5.1 Clima

A região de estudo apresenta clima equatorial quente úmido, marcada por dois períodos: o período de seca (julho a novembro); e período chuvoso (dezembro a maio). Nos últimos anos, cerca de 95% dos valores registrados para a temperatura estiveram entre 22,5 e 32,7 °C, durante a estação seca e entre 22,3 e 31,2 °C durante a estação chuvosa, conforme INMET (2020).

Os dados pluviométricos foram obtidos da estação meteorológica de Belterra/PA, distante a 28,4 km da cidade de Santarém. Optou-se por esta estação, pois não foram encontradas estações na cidade da área de estudo, cujos dados estão disponíveis. Assim, os dados mostram que a precipitação pluviométrica anual é de aproximadamente 2.000 mm, com certa irregularidade durante o ano todo.

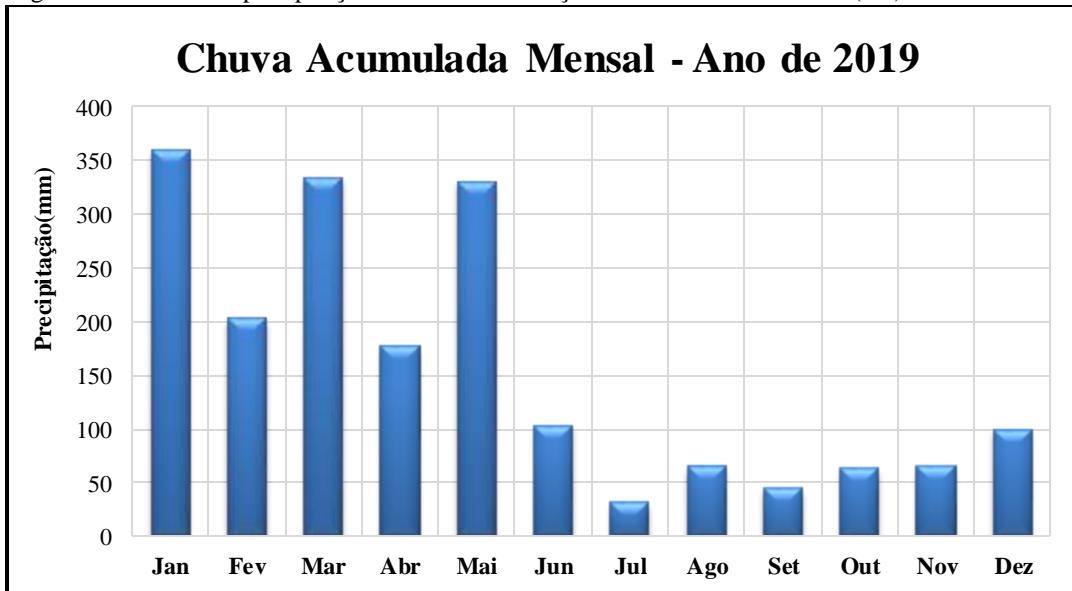
Figura 3 - Localização da área de estudo: município de Santarém, Estado do Pará.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em 2019, a média mensal de precipitação e umidade relativa foram de 53,84 mm e 86,58% na estação seca, e de 250,7 mm e 91,2% na estação chuvosa, respectivamente, conforme INMET (2020). A Figura 4 apresenta os dados da precipitação no período de chuva acumulada de janeiro a dezembro de 2019, com a média de 101,5 mm (INMET, 2020).

Figura 4 - Dados das precipitações mensais na estação Automática de Belterra (PA) do ano de 2019.



Fonte: INMET, 2020.

5.2 Vegetação

Magnusson *et al.* (2008) descreveram e caracterizaram a composição florística e cobertura vegetal das savanas amazônicas presentes na região de Alter do Chão. Posteriormente, o IBGE (2012) definiu as regiões em fito-ecológicas, o qual classificou a região em: floresta ombrófila aberta- A, Floresta ombrófila Densa – D, Vegetação secundária, conforme o Tabela 6.

Tabela 6 - Descrição das vegetações encontradas na região de Santarém/PA.

Região fito-ecológica	Definição
Floresta Ombrófila Aberta - A	Transição entre a Floresta Amazônica e as áreas extra-amazônicas; com fatores climáticos que incluem mais de 60 dias secos por ano.
Floresta Ombrófila Densa – D	Região florística florestal, relacionada a fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas e de alta precipitação, sendo as chuvas bem distribuídas durante o ano.
Savana – S	Este tipo de vegetação xeromorfa reveste solos lixiviados alumínizados, conhecida também como cerrado.
Vegetação Secundária – VS	Áreas em que houve intervenção humana para uso em ocupação de terra, com finalidade agrícola, pecuária ou mineradora.

Fonte: IBGE (2012)

5.3 Geomorfologia

A partir de estudos do Projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1976) e Embrapa (2001), a geomorfologia do município de Santarém é divididas em três domínios: Planície Amazônica, Planalto Rebaixado da Amazônia e o Planalto Tapajós-Xingu.

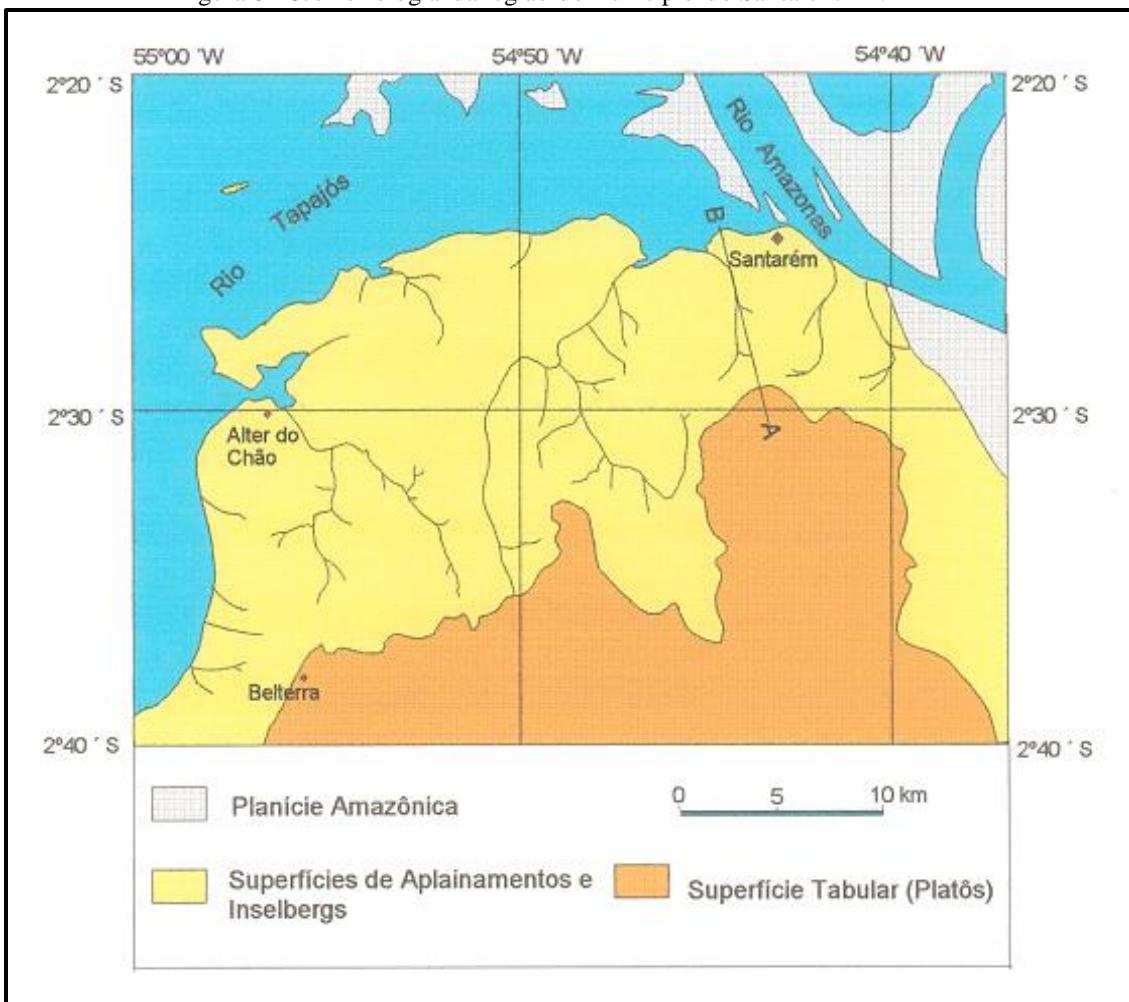
A Planície Amazônica compreende extensas áreas inundáveis e de acumulação de sedimentos quaternários nas margens do Rio Amazonas, regionalmente denominada de “várzea”, formada por lagos, paranás, furos, igapós e pântanos. Os solos encontrados nesta região são os Neossolos e Gleissolos, de origem sedimentar, e ocorre em áreas de relevo plano, com uma altitude próxima ao nível do mar (BRASIL, 1976).

O Planalto Rebaixado da Amazônia detém de superfície tabulares, bordos erosivos, drenagem regional dendrítica ou subdendrítica, com altitude próxima a 100m. No município de Santarém existe duas formas tabulares com vegetação e solos predominantes. Na superfície tabular de relevo plano são encontrados os Latossolos de textura muito argilosa, os quais possuem cobertura de floresta equatorial subperenifólia com babaçu e com uso intensivo (ação antrópica). As formações tabulares com fraca declividade, possui relevos suaves ondulados com pouca dissecação, onde geralmente ocorre Latossolo amarelos, de floresta equatorial subperenifólia com palmeiras e grande quantidade de seringueiras (BRASIL, 1976).

O Planalto Tapajós-Xingu está situado na porção centro-sul do município, tem áreas com altitude que variam entre 120 a 200 m, extensas superfícies tabulares recobertas por mata de “terra firme” - termo local de áreas que não alagam em período sazonal. São os platôs de maiores altitudes da região, com solos espessos, pobres e bem drenados, constituídos geralmente por Latossolos Amarelo Latossolos Amarelos, onde se desenvolve originalmente a Floresta Ombrófila Densa e, e por conseguinte os solos Argissolos Amarelos distróficos, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos Pétricos concrecionários. (BRASIL, 1976; RODRIGUES *et al.*, 2001; JOÃO *et al.*, 2013).

Segundo Tancredi (1996), a geomorfologia da região de Santarém é constituída de formas tabulares do Planalto Tapajós-Xingu e do Planalto Rebaixado da Amazônia, constituindo os platôs localizados na parte sul. Mais ao norte, margeando os rios Tapajós e Amazonas, Tancredi (1996) mostra a superfície de aplainamento e os *inselbergs*, da Planície Amazônica, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5- Geomorfologia da região do município de Santarém/PA.



Fonte: Tancredi (1996).

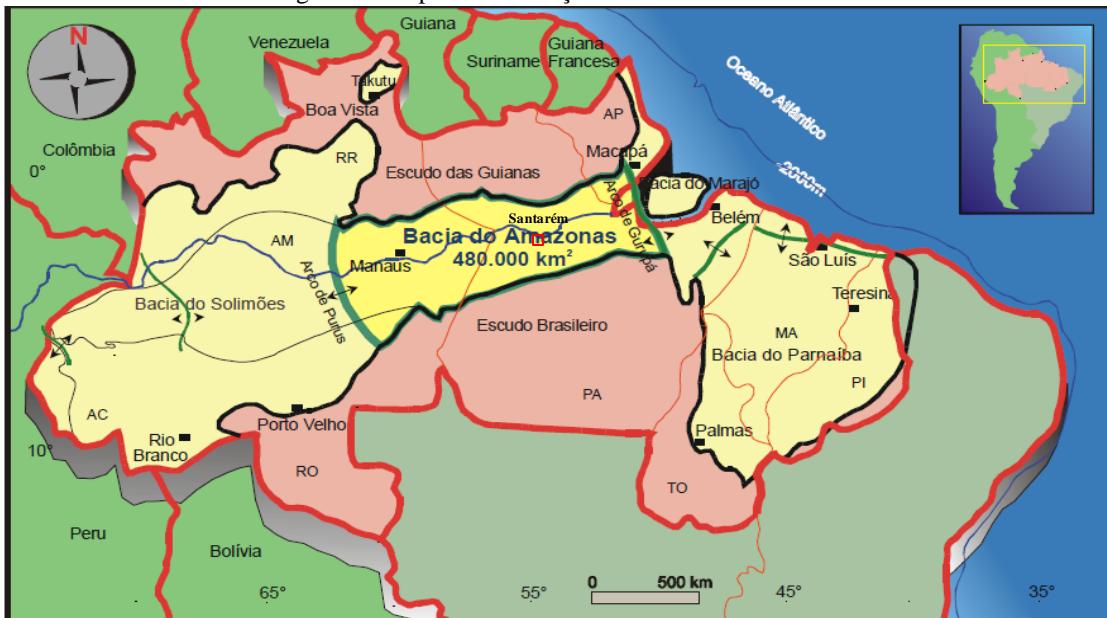
5.4 Geologia

5.4.1 Geologia Regional

O contexto geológico da área do município de Santarém situa-se nas formações sedimentares da Bacia Paleozoica do Amazonas, distribuídas por cerca de 480.000 km², com forma alongada na direção leste-noroeste, abrangem geograficamente os estados do Amapá, Pará e Amazonas (Figura 6). Trata-se de uma bacia intracratônica, limitada geologicamente pelos Escudos das Guianas, ao norte; Escudo Brasileiro, ao sul; Bacia do Solimões, a oeste, por meio do Arco de Purus e a leste, com a Bacia Mesozoica do Marajó, pelo Arco de Gurupá (CAPUTO, 1984; BARATA e CAPUTO, 2007).

O arcabouço tectônico da bacia possui uma geometria superimposta às rochas do Cráton Amazônico (WANDERLEY FILHO, 1991). Esse embasamento é formado por uma paleo-placa continental arqueana e proterozóica, gerada por dois eventos orogênicos principais (Transamazônico e Brasiliano) (ALMEIDA, 1967 apud BONGILO, 2011).

Figura 6- Mapa de localização da Bacia do Amazonas



Fonte: CUNHA, 2000.

As unidades sedimentares basais da Bacia do Amazonas (Figura 7) atingem uma espessura de aproximadamente 5.000 m, que são representadas pelas rochas do Grupo Purus, constituído pela Formação Prosperança (arenitos e siltitos) e Formação Acarí (calcários, dolomitos, siltitos e argilitos) (CAPUTO; ROGRIGUES; VASCONCELOS, 1972). Essas rochas são limitadas por discordâncias com o embasamento cristalino, constituído por uma paleo-placa continental arqueana e proterozóica, formadas por dois eventos orogênicos principais (Transamazônico e Brasiliano), com a bacia do Amazonas situada na porção central (ALMEIDA, 1967 apud BONGILO, 2011).

Para Cunha *et al.* (1994) são reconhecidas duas sequências sedimentares de primeira ordem: uma paleozoica, intrudida por diques e soleiras de diabásio, e outra mesozoico-cenozoico estritamente sedimentar.

A Formação Alter do Chão, onde está situada a área de estudo, pertence ao Grupo Javari (Mesozoico-cenozoico) e está assentada sobre a discordância do topo Paleozóico, onde a deposição se deu ao longo do Cretáceo, implantando um sistema fluvial de alta energia e estendendo-se até as bacias sub-andinas (CUNHA; MELO; SILVA, 2007).

Kistler (1954) definiu a Formação Alter do Chão, datada do Cretáceo Inferior ao Cretáceo Superior, que possui aproximadamente 400.000 km² de superfície, e aflorante na Bacia do Amazonas (BARATA; CAPUTO, 2007).

5.4.2 Geologia Local

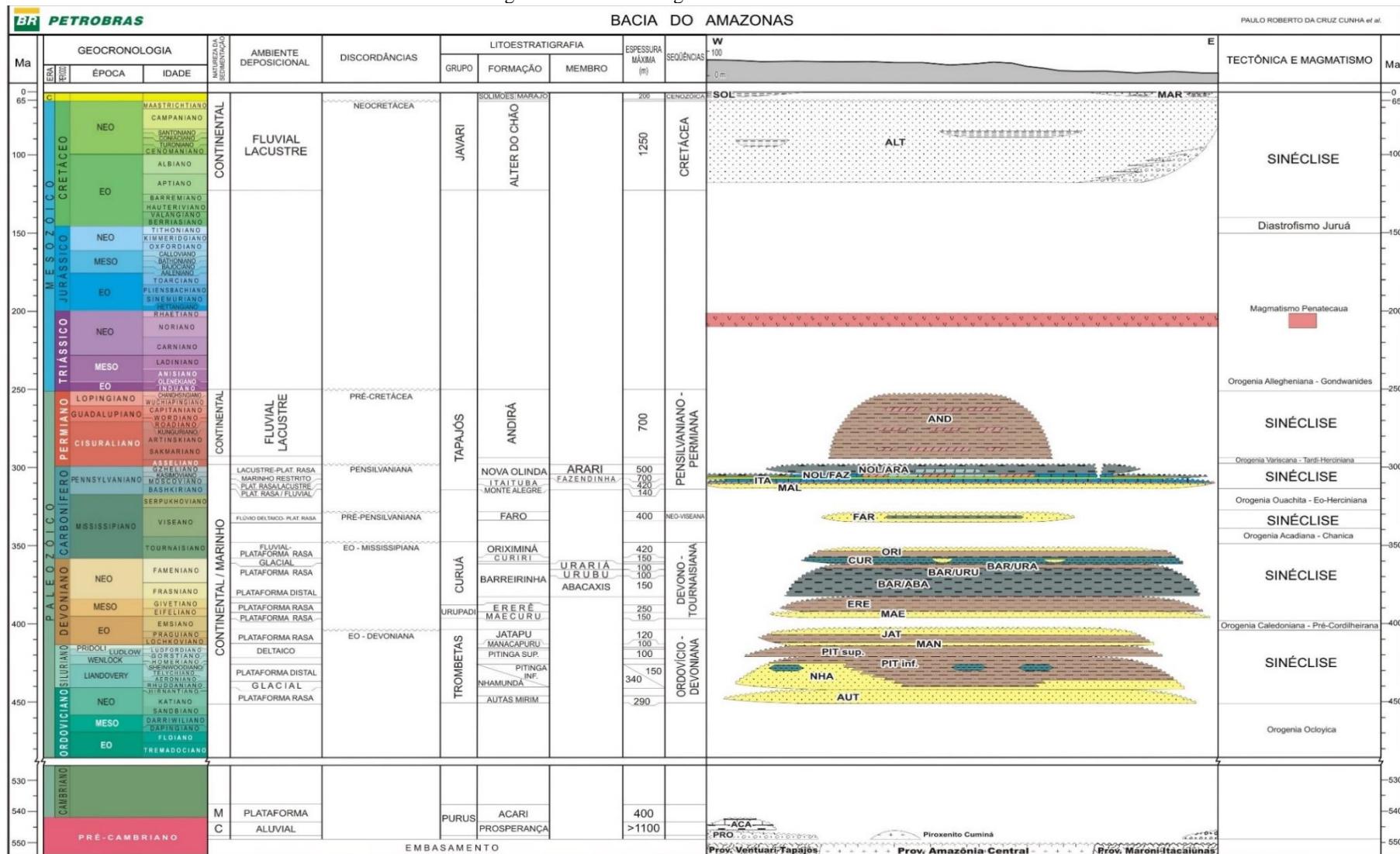
A geologia do município de Santarém é basicamente composta por rochas siliciclásticas da Formação Alter do Chão. Na área de estudo, há também aluviões quaternários que acabam por formar contínuas faixas de praias durante o verão, e que no inverno ficam submersas. No geral, a região apresenta arenitos, argilitos, conglomerados subordinadamente e níveis de laterita (TANCREDI, 1996).

Os arenitos variam entre finos a médios, geralmente com estratificação cruzada, sendo de cor vermelha a variegada, com intercalações argilosas. Os argilitos têm cores vermelha, creme, branca, roxa, variegada, sendo pouco consolidados e com lentes de areia. Os conglomerados possuem seixos de quartzo claro de até 5 cm de diâmetro e seixos de quartzo leitoso de até 15 cm de diâmetro. (TANCREDI, 1996).

Ao norte do rio Amazonas, ocorre um arenito de textura média, com cimento caulínico e silicoso, branco, geralmente manchado de vermelho, consistente, com impregnações de óxido de ferro, tendo sido considerado por muito tempo como arenito Manaus. Entretanto, o mesmo constitui um horizonte da Formação Alter do Chão (TANCREDI, 1996).

A porção superior é constituída por uma sequência predominantemente arenosa, com arenitos finos a grossos, conglomeráticos, esbranquiçados a avermelhados, friáveis, caulínicos, e intercalações argilosas avermelhadas a mosqueadas, e estruturas sedimentares acanaladas e cruzadas, de pequeno porte (TANCREDI, 1996). No topo da Formação, é comum a presença de crosta ferruginosa, laterítica, às vezes desmantelada formando um nível concrecionários, responsável pela preservação do relevo (OLIVEIRA e PASTANA, 1999).

Figura 7- Carta Estratigráfica da Bacia do Amazonas.



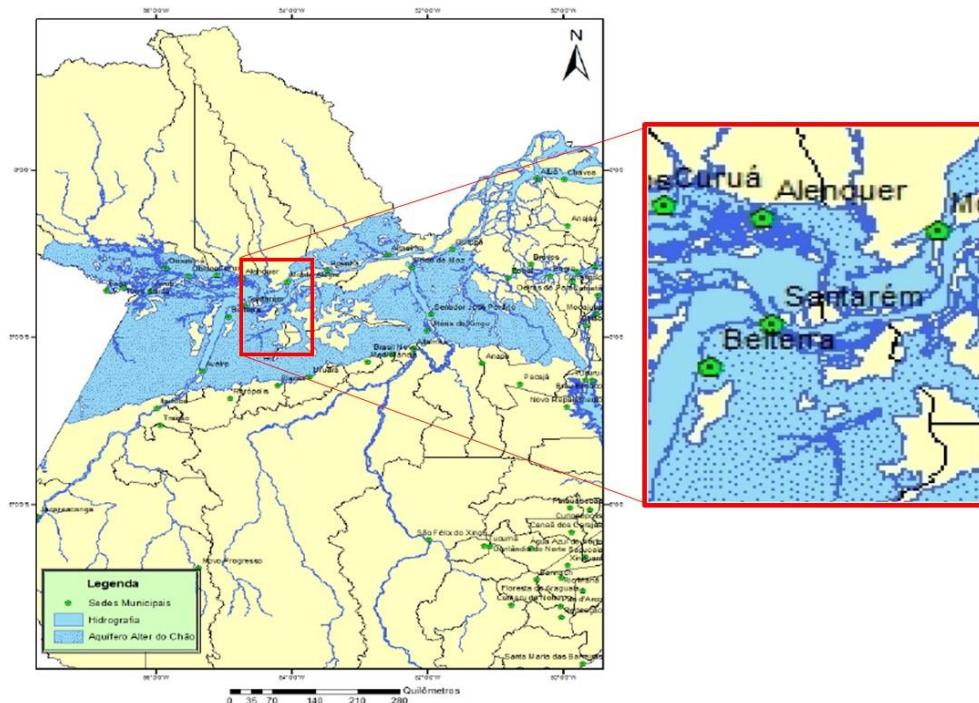
Fonte: Cunha, Melo e Silva (2007).

5.5 Hidrogeologia

No estado do Pará, a Formação Alter do Chão ocorre desde sua fronteira com o estado do Amazonas a oeste até a borda da bacia do Marajó a leste, abrangendo uma área de aproximadamente 9.870 km², sendo aflorante nas cidades de Faro, Oriximiná, Óbidos, Juruti, Terra Santa, Santarém, Alenquer, Aveiro, Prainha, Brasil Novo, Vitória do Xingu, Senador José Porfírio e Porto de Moz (CPRM, 2012). A Figura 8 mostra os locais de afloramento do aquífero Alter do Chão no estado do Pará, com destaque para a região de Santarém/PA.

Os aquíferos que constituem o sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão são formados por arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados. Esse sistema, na região de Santarém, possui espessura de 600 m, sendo que a parte superior do aquífero é livre, até a uma espessura média de 50 m, e na parte inferior os aquíferos são confinados, com espessuras de até 430 m, intercalados por aquíclides e aquitardes. Por serem confinados, esses aquíferos encontram-se naturalmente bem protegidos, com excelentes condições para abastecimento público e assinala, dizendo que a vulnerabilidade dessas águas, de maneira geral, é de moderada a baixa, enfatizando que a área mais protegida é a parte sul do município de Santarém, onde estão localizados os platôs, devido à cobertura argilosa e à profundidade da água subterrânea (TANCREDI, 1996).

Figura 8 - - Mapa com as áreas de afloramento do aquífero Alter do Chão no estado do Pará.

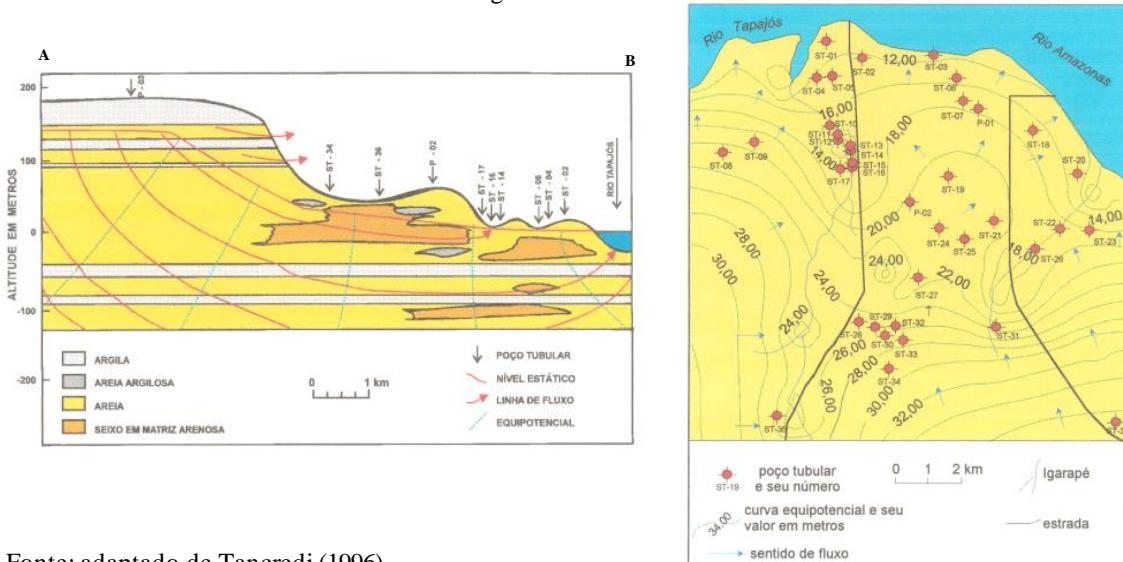


Fonte: modificado de CPRM (2012).

Tancredi (1996) diz que os parâmetros hidrogeológicos desses aquíferos, evidenciam que a transmissividade apresenta valores entre 130 m²/dia a 790 m²/dia, indicando grande capacidade de produção de águas subterrâneas. Os valores da condutividade hidráulica variam de 4,6 m/dia a 18,8 m/dia, sendo que essa variação é determinada pelo grau de seleção e arredondamentos dos grãos de areias dos aquíferos, bem como ausência de pequenas frações argilosas nessas camadas. O sistema de fluxo principal da água subterrânea na região de Santarém é transmitido dos platôs, zona de recarga, para as drenagens da água superficial. Tendo como zonas de maior vulnerabilidade, as áreas às margens do Rio Tapajós, nas zonas urbanas de Santarém e Alter do Chão.

As feições geomorfológicas têm forte influência nas condições hidrogeológicas em função das características estruturais. Na parte sul de Santarém, as zonas dos platôs com topografia atingem altitudes de 200 m, estando o nível hidrostático da água subterrânea situado a partir de 35 m de profundidade, constituindo-se em zona de recarga do aquífero. Na parte norte, situada na superfície de aplainamento, com topografia mais irregular e altitudes decrescentes até a planície de inundação do rio Amazonas, com cerca 10m de altitude, constitui-se a área de descarga. A Figura 9 apresenta seção hidrogeológica proposta por Tancredi (1996) da Formação Alter do Chão na cidade de Santarém.

Figura 9 - Seção hidrogeológica esquemática e mapa potenciométrico da Formação Alter do Chão na região de Santarém



Fonte: adaptado de Tancredi (1996).

Os aquíferos do Quaternário situam-se em planícies aluviais dos principais igarapés, em seus baixos cursos, e a espessura máxima chega a 20 m, tendo pequena

representatividade espacial. Os aquíferos da Formação Alter representam cerca de 80% do sistema hidrogeológico, atingem espessuras totais de 480 m e são constituídos por sucessão de camadas arenosas, com permeabilidade e espessuras variáveis, intercaladas com aquíclides e aquitardes de pequena espessura (TANCREDI, 1996).

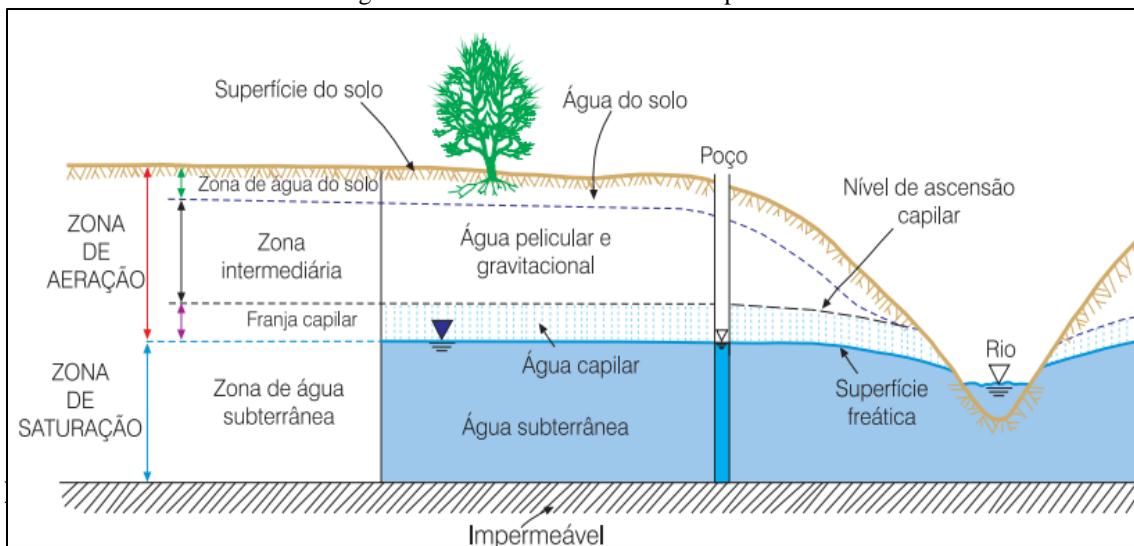
As águas subterrâneas são classificadas como sódio-cloretadas e mistas, tanto para os cátions como para os ânions, e os valores de pH variam de 4.0 a 4.7. O baixo pH das águas, favorece a solubilização de ferro, quando ocorre a queda de pressão nas tubulações, resultando na precipitação dos óxidos e hidróxidos de ferro nas canalizações. (TANCREDI, 1996).

6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1 Água subterrânea

Para Filho (2008), a água subterrânea ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e as formações geológicas profundas totalmente restauradas (Figura 10).

Figura 10- Zonas hídricas em subsuperfície



Fonte: Filho (2008).

Rebouças (2013) define que as águas subterrâneas têm três origens principais: meteórica, conata e juvenil. As águas meteóricas ocorrem até profundidades da ordem de 750 m e participam ativamente do mecanismo de renovação, com isso, a recarga é a infiltração de uma fração de água atmosférica que cai nos domínios, principalmente sob a forma de chuva e neve. As conatas representam estoques na litosfera a profundidades superiores a 4.000 m, retidas nos sedimentos desde as épocas das deposições e por isso,

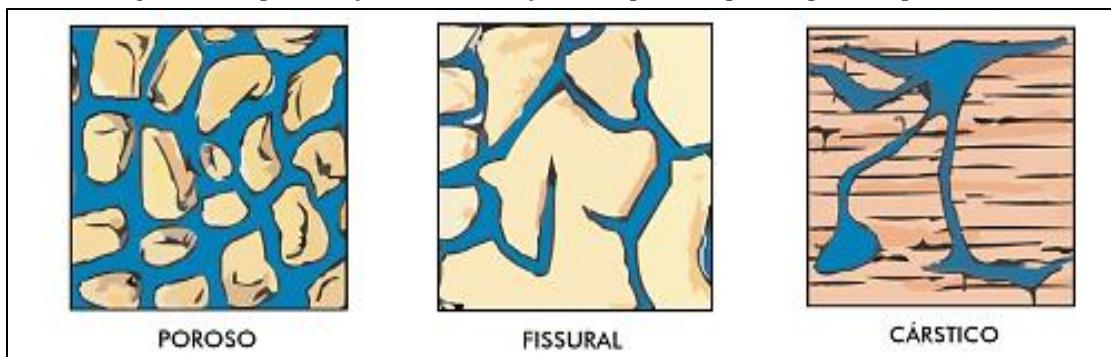
têm altos teores salinos, característicos dos paleoambientes, da ausência de recarga e dos longos períodos de interação água/matriz rochosa. As águas de origem juvenil são geradas por processos magmáticos da Terra, com isso, integram-se por mecanismos geológicos de circulação de massa e energia relacionadas com a tectônica de placas, com a estimativa de cerca de 0,3 km³ por ano.

6.2 Aquíferos

Aquífero é uma formação geológica do subsolo, constituída por rochas permeáveis, que armazena água em seus poros ou fraturas (FILHO, 2008). Outro conceito, conforme Iritani e Ezaki (2012), o define como um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos. Os aquíferos podem ser classificados quanto ao tipo de porosidade da rocha armazenadora ou quanto as suas características hidráulicas dependendo da pressão a que são submetidos.

De acordo com as características de porosidade das rochas, os aquíferos podem ser classificados como porosos, fissurais ou cársticos (Figura 11). Segundo esta classificação, os aquíferos porosos armazenam a água nos espaços vazios da rocha reservatório, ou seja, entre os grãos da rocha porosa (normalmente sedimentares). Nos fissurais, a água preenche os espaços resultantes do fraturamento ou diaclasamento de rochas relativamente impermeáveis, principalmente as de origens ígneas ou metamórficas. Nos cársticos, a água está nos espaços criados pelo processo de dissolução do carbonato (FILHO, 2008).

Figura 11- Representação da classificação dos tipos de aquífero quanto a porosidade.

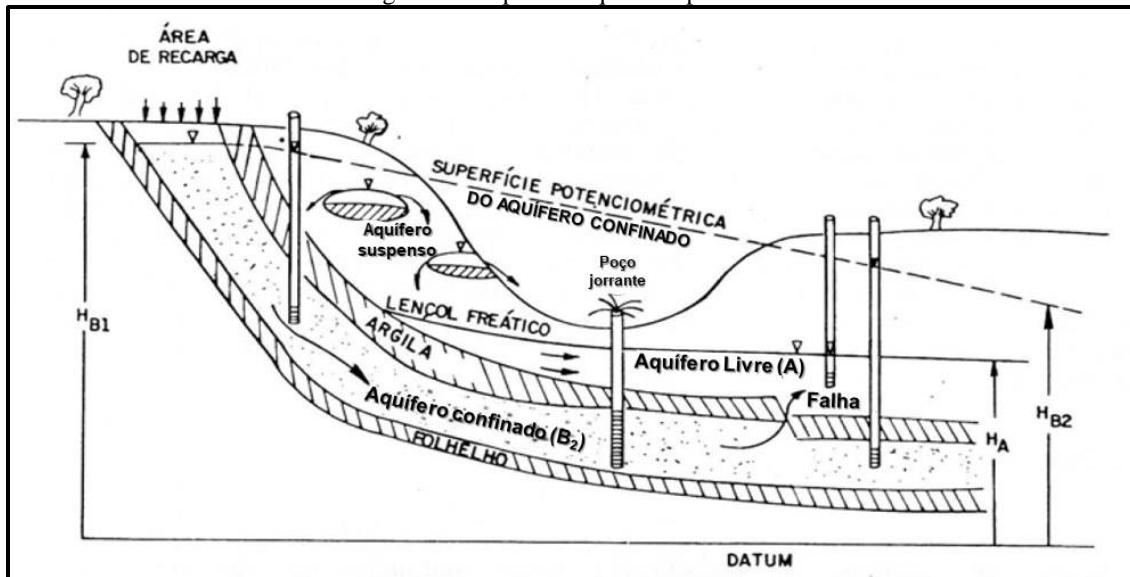


Fonte: Brasil (2007).

De acordo com a pressão das águas e em função da capacidade de transmissão nas respectivas camadas limítrofes (do topo, camada confinante superior, e da base, camada

confinante inferior), pode-se classificar os aquíferos em aquíferos suspensos, livres e confinados, conforme mostra a ilustração na Figura 12.

Figura 12- Tipos de aquíferos porosos.



Fonte: adaptado de Cleary (1989)

O aquífero suspenso, ou não confinado, forma-se sobre uma camada impermeável e por zona de aeração acima do corpo principal de água subterrânea, ocorrendo em pequena extensão, estando à pressão atmosférica (FILHO, 2008; IRITANI e EZAKI, 2012).

Os aquíferos livres movem-se periodicamente para cima e para baixo, em uma superfície livre de água contida, que está em contato direto com o ar, portanto, sob a influência da pressão atmosférica. O nível freático tem oscilações conforme a variação da pluviosidade, sendo que em condições naturais, quando a zona de saturação recebe mais água de infiltração vertical, o nível eleva-se. Ainda a água flui para as nascentes, rios, poços e outras partes de descarga de água subterrânea (FILHO, 2008).

O aquífero confinado é limitado no topo e na base por camadas impermeáveis. Neste caso, o aquífero é submetido a uma pressão maior devido à camada confinante acima dele. As camadas, que limitam o aquífero confinado, têm baixa permeabilidade, mas aquelas que contém água e tem a capacidade de transmitir água às rochas adjacentes, porém, muito lentamente, são denominados de aquitardes (exemplo: argila arenosa). Aquelas camadas que contém água no seu estrato, com capacidade de armazenamento, mas sem a capacidade de transmiti-la, denomina-se de aquíclides (exemplo: argila). Por fim, as rochas impermeáveis que não armazenam e não transmitem água são denominadas

aquifugos (exemplo: granito não fraturado e não alterado (AZEVEDO; FILHO, 1998; FILHO, 2008).

A maioria dos aquíferos é constantemente reabastecida com águas provenientes das chuvas, que caem na superfície do terreno e se infiltra nas áreas aflorantes das formações geológicas, onde o aquífero é livre. Estas regiões são denominadas de áreas de recarga. A água circula lentamente pelos espaços vazios das rochas e sua velocidade depende das características geológicas de cada aquífero, podendo variar de um metro por dia a um metro por ano. Já, as áreas de descargas são locais onde a água sai do aquífero, podendo voltar à superfície do terreno, em forma de nascente ou como escoamento básico, alimentando os córregos, rios e lagos (IRITANI; EZAKI, 2012).

6.3 Vulnerabilidade natural dos aquíferos

Segundo Feitosa *et al.*, (2008) o termo vulnerabilidade expressa pelo menos três idéias:

1. susceptibilidade intrínseca do meio aquífero em ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica;
2. importância socioeconômica do recurso hídrico no presente e no futuro, incluindo a possibilidade de ser substituído por outras fontes.
3. importância do aquífero em manter áreas ecologicamente importantes.

Segundo o mesmo autor, o termo possui vários adjetivos e significados das expressões, dentre eles são:

- Vulnerabilidade Relativa: as unidades de um mapa de vulnerabilidade são classificadas uma em relação a outra e não possuem significado absoluto;
- Vulnerabilidade Absoluta: cada unidade mapeada possui um significado em si, ou seja, cada índice de vulnerabilidade seria associado à capacidade de degradação de um contaminante ou grupo de contaminante ou grupo de contaminantes;
- Vulnerabilidade Geral ou Universal: dirige-se a todas as atividades ou classes de contaminantes; e
- Vulnerabilidade Específica: volta-se a um certo contaminante ou ainda atividade ou classe de contaminantes.

Segundo a *American Society for Testing Materials* (ASTM,1996), definiu o termo de vulnerabilidade como a facilidade que um determinado contaminante pode migrar para

as águas subterrâneas ou para um aquífero em determinadas situações de uso do solo, características do contaminante e condições da área. Para IOP (2019), a vulnerabilidade depende das características do aquífero, da superfície (uso do solo, topografia, geomorfologia, etc.) e do contaminante.

Por tanto, Montero (2012) conclui que a vulnerabilidade de um aquífero é comumente analisada de forma “Absoluta” e “Geral”, sem considerar especificamente um ou outro contaminante ou fonte de poluição, o que obviamente apresenta limitações quanto a sua aplicação.

Enfim, o termo vulnerabilidade do aquífero, aplicado por Foster (1987), é usado para representar as características intrínsecas que determinam a susceptibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante. Foster e Hirata (1988) definem como a interação de duas propriedades dos materiais sobrejacentes aos aquíferos, sendo a acessibilidade hidráulica do contaminante através da penetração até a zona saturada e a capacidade de atenuação da zona não saturada. Assim, a espacialização e correlação entre essas propriedades irá subdividir a área de estudos em diferentes níveis de vulnerabilidade.

Por existir diversas variáveis que podem ser utilizadas para determinar a vulnerabilidade dos aquíferos, diversas metodologias foram elaboradas, como por exemplo a metodologias passíveis de aplicação citadas a seguir:

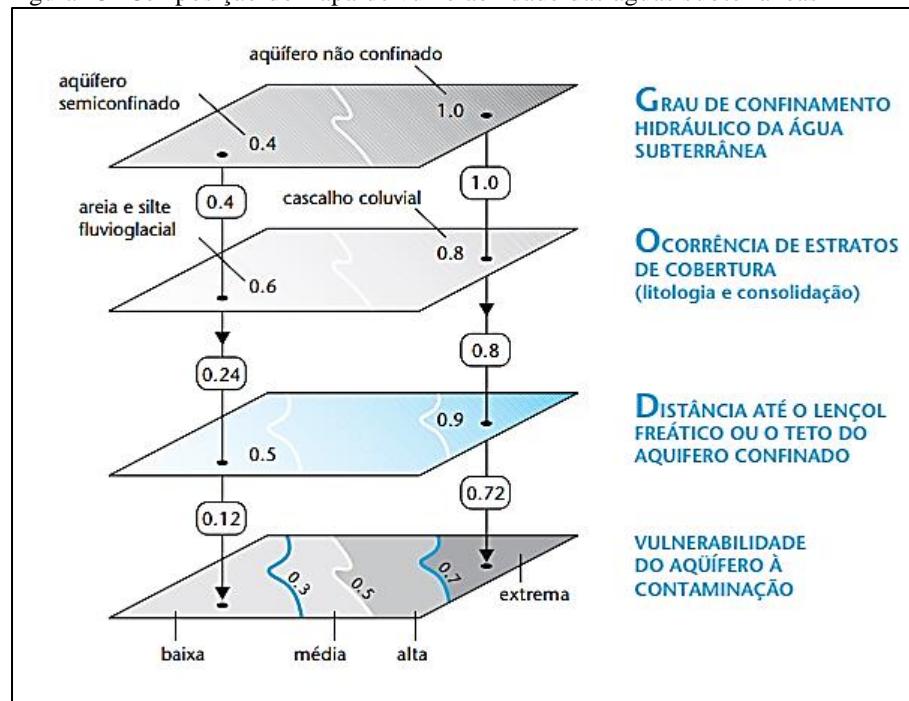
- Método DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987): é usado para a qualificação, mapeamento e atribuição da vulnerabilidade com base em taxas que variam de 1 a 10, de acordo com as características e comportamento das variáveis consideradas na sigla: profundidade da superfície freática, recarga do aquífero, tipo de aquífero, tipo de solo, topografia ou declividade do terreno, influência na zona não saturada, condutividade hidráulica do aquífero. O índice final é a multiplicação entre as variáveis, que vão de 26 (mínima) a 226 (máxima). Dentre os pontos negativos, estão que algumas vezes o método apresenta incompREENSÃO e má interpretação devido à ausência de uma escala definida para a vulnerabilidade, além da subjetividade dos parâmetros de recarga (R) e condutividade hidráulica (C) ambos relacionadas com o processo de recarga do aquífero (AUGE, 2004; MELO JUNIOR, 2008).
- O índice IS (FRANCÉS *et al.*, 2001): este método é uma modificação do índice de vulnerabilidade DRASTIC, onde foram suprimidos os parâmetros S (Solo) e (C) Condutividade hidráulica e acrescentado o LU (do inglês *land use*), parâmetro de

ocupação do solo. O parâmetro LU (Lend Use) divide o uso do solo em classes, cujos valores variam de 0 a 100. O valor 100 indica as atividades mais poluidoras.

- O método AVI (VANSTEMPVOORT, EWERT E WASSENAAR, 1993): tem como base dois parâmetros: a espessura de cada camada sedimentar acima da zona saturada (Zona não saturada do solo) e a condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas (K_i). O índice AVI representa a resistência de um aquitarde ao fluxo vertical, em unidades de tempo, que significa o tempo aproximado para a passagem de um poluente através das diferentes camadas. A partir disso, calcula-se a resistência hidráulica. Destaca-se que este é o único método disponível para aquíferos cársticos. Este método é empregado sem consideração de escala.
- O índice EKv (AUGE, 1995): trata-se de uma classificação para aquíferos livres baseada na profundidade de superfície freática (E) e na permeabilidade vertical da zona subsaturada, o índice vão de 1 a 5. Este método apresenta algumas vantagens por permitir incorporar o conhecimento de inúmeras variáveis hidrogeologias e do comportamento das formações para gerar classes de vulnerabilidade correspondentes a um determinado nível de risco.
- O método SINTACS (CIVITA *et al.*, 1990): se baseou em DRASTIC, e utiliza os mesmos parâmetros. Entretanto, foi adequado às características Itália e mapeamento de maior detalhe. Os parâmetros possuem índice de 1 a 10, que são: profundidade do topo do aquífero, infiltração, impacto da zona vadosa, tipo de solo, litologia do aquífero e condutividade hidráulica. O resultado deste índice definem 6 classes de vulnerabilidade. Porém, assim como o método DRASTIC possui a necessidade de muitos parâmetros, o que dificulta aplicação, devido o aporte financeiro para a medição de todas essas variáveis.
- O método GOD (FOSTER, 1987; FOSTER; HIRATA, 1988): é o utilizado nesta pesquisa, consiste em quantificar três fatores que determinam a vulnerabilidade à contaminação, que são: tipos de aquífero, classe de aquífero em termos de grau de confinamento e litologia, profundidade do nível da água. Este método é simples e sistemático, utilizado amplamente na América Latina e Caribe durante a década de 90, e pode identificar 5 classes de vulnerabilidade, considerando dois fatores básicos: o nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero e a capacidade de atenuação dos estratos de cobertura na parte saturada do aquífero.

O método GOD de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação foi proposto por Foster (1987) e adaptado por Foster & Hirata (1988) e modificado por Foster *et al.* (2006). A partir do levantamento e caracterização desses parâmetros para as unidades hidrogeológicas da área escolhida para o estudo, faz-se o cruzamento dos mapas utilizando-se técnicas cartográficas ou de geoprocessamento, conforme ilustrado na Figura 13, que ilustra as variáveis e os pesos atribuídos a cada grau de vulnerabilidade do método GOD.

Figura 13- Composição do mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas



Fonte: Foster *et al* (2006).

Foster *et al.*, (2006) define o perigo de contaminação da água subterrânea 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 à superfície do solo. O termo “perigo de contaminação da água subterrânea” tem exatamente o mesmo sentido que “risco de contaminação da água subterrânea” de Foster e Hirata (1988). Para o autor, a mudança de terminologia foi feita para adequar-se, por conta do uso em outras áreas de avaliação de riscos como aos ecossistemas e à saúde humana e animal, onde o risco é definido como o produto de “perigo vezes escala do impacto”. Portanto, o perigo à contaminação das águas subterrâneas está associado com a existência ou previsão de alguma atividade ou ação poluente desenvolvida na superfície. Ou seja, qualquer área urbana ou rural que apresenta uma complexa ocupação, com a presença de várias atividades potencialmente poluentes. Entende-se que a análise do

perigo à contaminação de uma determinada área consiste em uma interessante ferramenta de análise preliminar e de orientação às ações de investigação mais detalhada (FOSTER *et al.* (2006)).

Segundo Foster *et al.* (2006), a melhor estratégia para o programa de proteção das águas subterrâneas, com medidas restritivas que tentam controlar ou monitorar as atividades, deve considerar os seguintes itens:

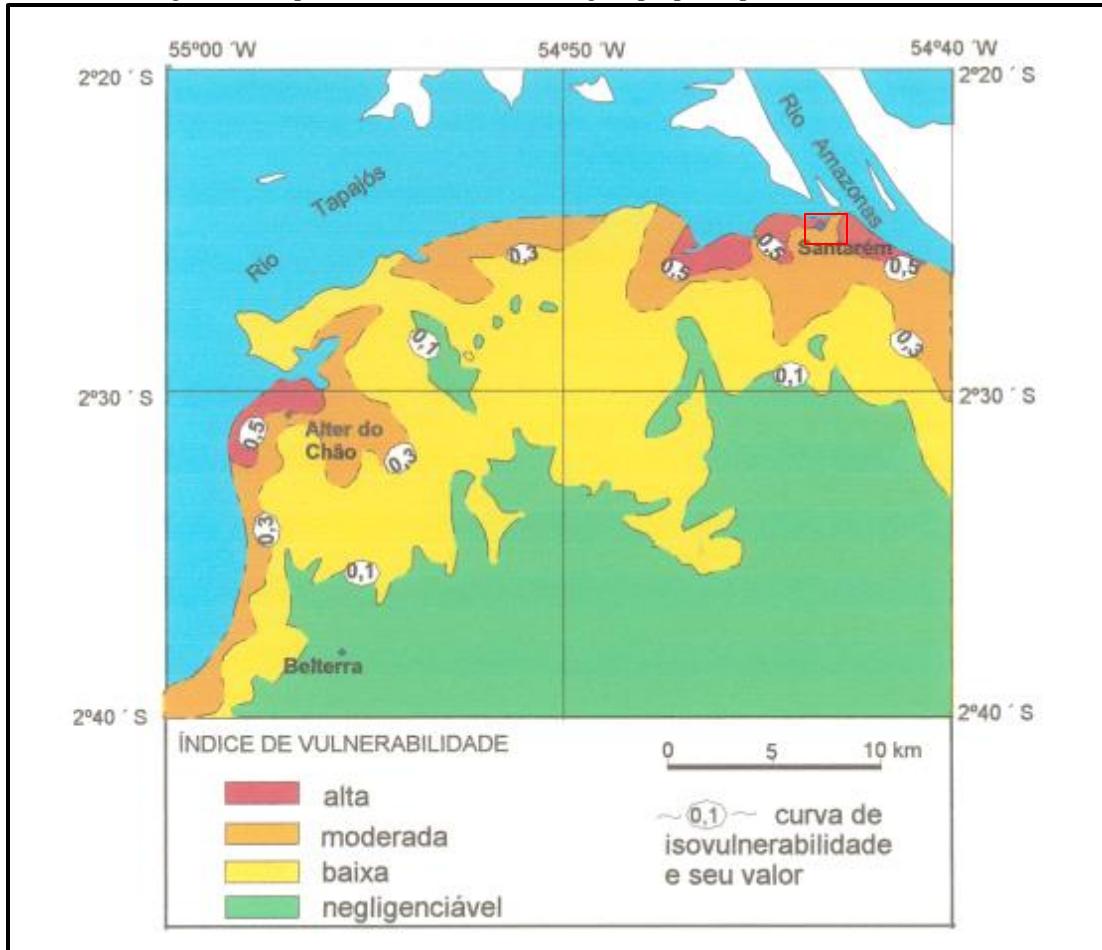
- a identificação de áreas que necessitam de maior atenção ambiental ou atividades que representem maior ameaça à qualidade das águas subterrâneas, com a finalidade de dirigir a elas os recursos técnicos e financeiros de órgãos de controle, em estudos de detalhe, e aplicação de programas de monitoramento;
- a capacidade que a zona não saturada apresenta de degradação dos contaminantes, uma vez que o conhecimento desta característica pode resultar em redução de custos e das exigências ambientais para a instalação de novas atividades;
- o controle da ocupação em áreas que são mais sensíveis à contaminação de aquíferos; e
- a proteção de mananciais importantes que são ou serão utilizados para o abastecimento público.

6.4 Vulnerabilidade em Santarém/PA por Tancredi (1996)

Tancredi (1996) realizou estudo pioneiro na região e é o único, até o momento, a contemplar o município de Santarém/PA, onde em sua pesquisa, o autor definiu os fundamentos para uso e proteção das águas subterrâneas da cidade. Uma das partes do seu trabalho foi avaliar a vulnerabilidade do aquífero da região, com a utilização do método GOD presente nos trabalhos de Foster (1987) e Foster e Hirata (1988). O sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade do aquífero na região de Santarém é apresentado na Figura 14.

O autor define que a vulnerabilidade da água subterrânea da região de Santarém apresenta baixos índices, devido principalmente à espessura da zona não saturada e à constituição desta, argilosa, na parte sul da área, nos platôs, constituindo-se na eficiente função filtro dos aquíferos da Formação Alter do Chão. Entretanto, destaca-se a parte norte com maiores índices de vulnerabilidade e maior possibilidade de diluição de contaminantes, devido sua localização em zonas de descarga da água subterrânea.

Figura 14-Mapa de vulnerabilidade da região proposta por Tancredi(1996).



Fonte: Tancredi (1996).

Tancredi (1996) utilizou o índice de vulnerabilidade do aquífero pelo método GOD apresentado no trabalho de Foster (1987) e Foster e Hirata (1988), conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Índice de vulnerabilidade da água subterrânea na região de Santarém, definida por Tancredi (1996).

Característica Litológica	Índice	Espessura não saturada (m)		< 5	5-15	15-25	25-35	> 35
		Índice	Tipo de Aquífero	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
Arenoso	0,70	Livre	1,00	0,63	0,56	0,49	0,42	0,35
		Livre com Cobertura	0,60	0,38	0,34	0,29	0,25	0,21
		Confinado	0,20	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07
Siltoso Argilo-Arenoso	0,50	Livre	1,00	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
		Livre com Cobertura	0,60	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15
		Confinado	0,20	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Argiloso	0,30	Livre	1,00	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15
		Livre com Cobertura	0,60	0,16	0,14	0,13	0,11	0,09
		Confinado	0,20	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03

O autor caracterizou a vulnerabilidade por zona, sendo que na região sul do município existe aquífero livre com cobertura argilosa (índice de vulnerabilidade 0,6), na parte norte tem aquíferos livres (índice de vulnerabilidade 1,0), concomitante ao aquífero livre ocorrem os aquíferos confinados (índice de vulnerabilidade 0,2).

A litologia foi caracterizada em argilas (índice 0,3), siltos, argilas arenosas e areias argilosas (índice 0,5) e areias com ou sem seixos (índice 0,7), de zona não saturada. A profundidade do nível da água ou espessura da zona não saturada foi tomada em quadro classes: maior que 35 m (índice 0,5), de 35 a 25 m (índice 0,6), de 25 a 15 m (índice 0,8) e menor que 5m (índice 0,9).

O autor destaca que os aquíferos confinados são os que tem as maiores reservas, maior produtividade e baixo grau de vulnerabilidade. Porém, reitera que os poços, que ultrapassam o aquífero livre para captação no aquífero confinado, devem ser isolados durante a construção, com cimentação do espaço anular até a profundidade do confinamento, para sua completa proteção.

O autor também destaca a importância da topografia para a vulnerabilidade, onde setores mais baixos do relevo apresentam níveis hidrostáticos mais rasos e até artesianismo. Com isso, esses setores apresentam maiores possibilidades de rebaixamento do potencial hidráulico (cone de depressão) e consequentemente maior produção. Esses setores mais baixos são também zonas de descargas de águas subterrâneas, com fluxos ascendentes; significando que um poço construído com tecnologia adequada reduz muito o risco de contaminação.

As áreas de recarga estão localizadas em setores mais elevados do relevo, onde os níveis hidrostáticos são mais profundos, o que resulta em mais consumo de energia para exploração de volume equivalente de água. Por sua vez, o gradiente natural induz fluxo descendente da água subterrânea transportando os contaminantes dispostos em superfície para o subsolo. O processo de rebaixamento do nível hidrostático com formação do cone de depressão poderá induzir mais taxas de recarga, e talvez contaminações, se os poços não forem construídos corretamente, operados e/ou abandonados (após sua vida útil).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Mapa de uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo produzido através da caracterização supervisionada da imagem Sentinel-2, de 15 de julho de 2020 (Composição R4G3B2), obtidas USGS-Serviço Geológico dos Estados Unidos. As classes de usos e ocupação do solo definidas segundo Iritani *et al.* (2013) para a área de estudo são:

- Solo exposto: trata-se das áreas desprovidas de vegetação devido à ação de processos erosivos ou desmatamento pela ocupação urbana.
- Área impermeável/edificada: é aquela com arruamento definido, edificações de uso residencial, comercial e industrial, onde incluem ocupações consolidadas (com infraestrutura) ou em fase de consolidação, podendo-se apresentar de forma contígua ou esparsa em relação à área urbana principal.
- Vegetação densa: refere-se à área com cobertura vegetal natural, que compreende as vegetações de Florestas.
- Vegetação rasteira: refere-se à área com cobertura vegetal secundária e pouco desenvolvida, ou seja, onde houve intervenção humana para o uso e ocupação do solo.
- Água: está relacionada aos corpos d'água referenciados no trabalho como córregos e rios.

O mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo (Tabela 8 e Figura 15), correspondente a 102,10 km², mostra que as áreas impermeáveis/edificadas ocupam 37% (37,5 Km²) da área total. Destaque também pode ser dado à classe de vegetação primária dividida entre Floresta ombrófila aberta- A, Floresta ombrófila Densa – D e vegetação secundária, que ocupam 43% da área.

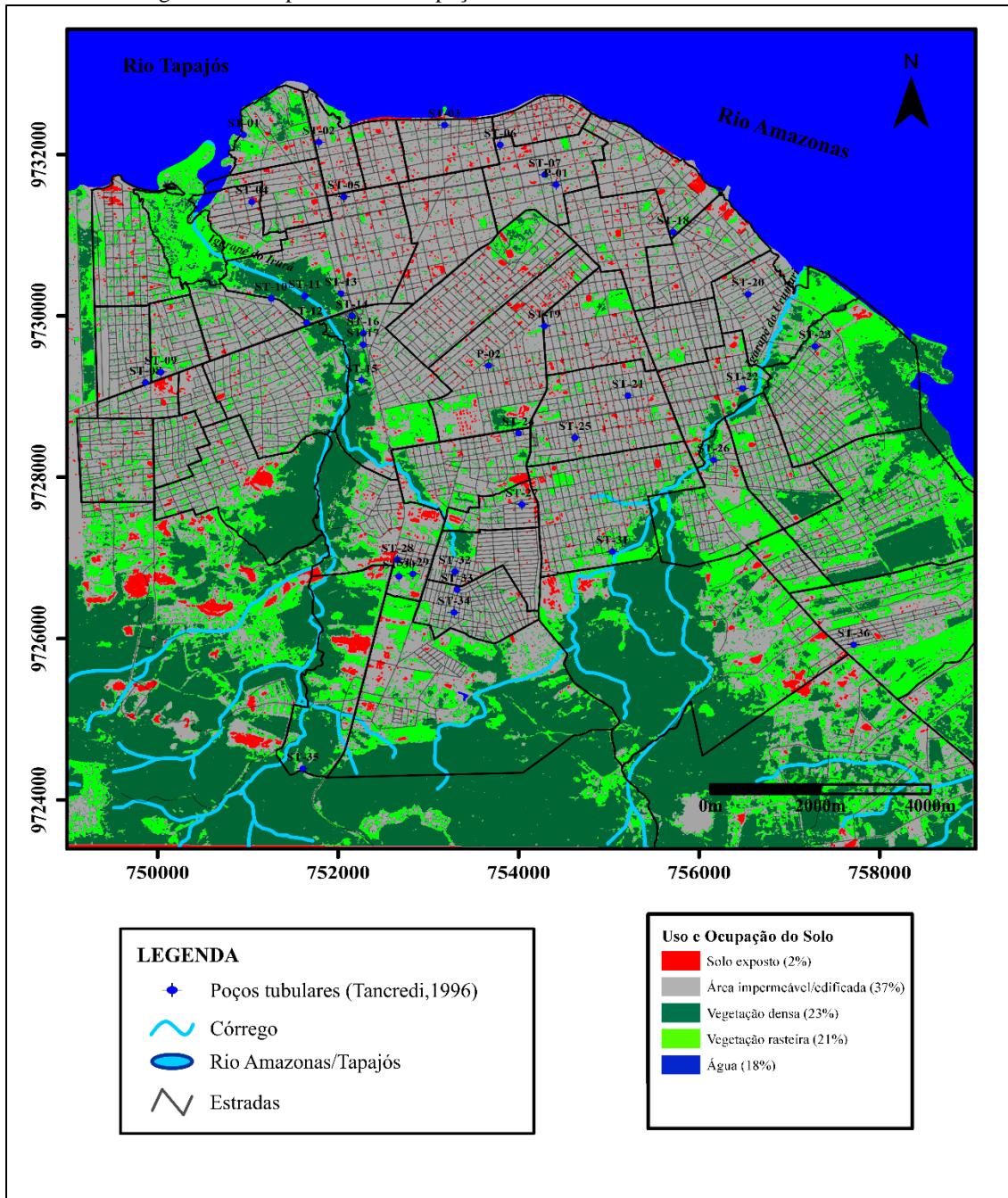
Tabela 8 - Dados da classificação supervisionada para uso e ocupação da área de estudo.

Uso e ocupação	Área Mapeada (km ²)	Área Total (Km ²)	Porcentagem
Solo Exposto	1,6		2%
Área impermeável/edificada	37,5	102,1	37%
Vegetação densa	23,2		23%
Vegetação rasteira	21,0		21%
Água	18,8		18%

Destaca-se que apesar de encontrarmos uma cobertura vegetal bem predominante em relação à região urbana, observa-se que apenas o Igarapé do Irurá possui uma área de

preservação de vegetação no entorno, como mostrado na Figura 15. Consequentemente, devido à urbanização mais densa no entorno do Igarapé do Urumari, pode-se inferir que este corpo hídrico é o mais degradado ambientalmente e propício a sofrer processos erosivos do solo e poluição das águas superficiais.

Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo da área urbana de Santarém/PA.

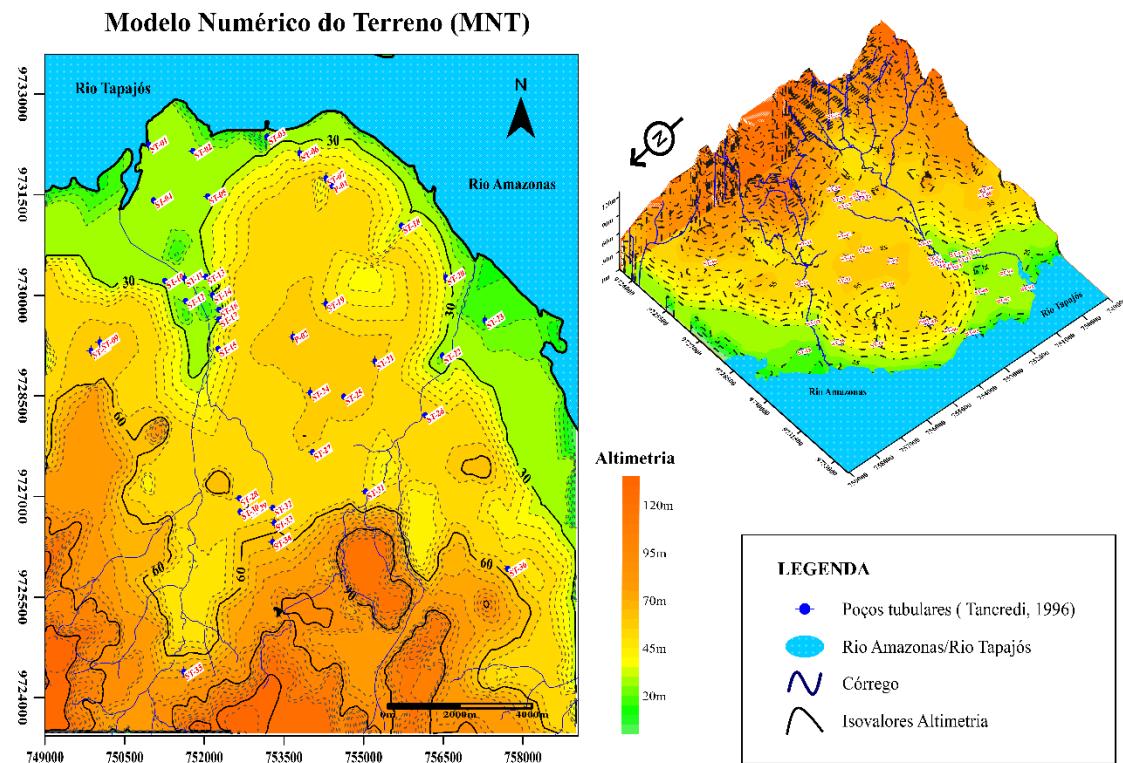


7.2 Mapa de Modelo Digital de Elevação (MDE)

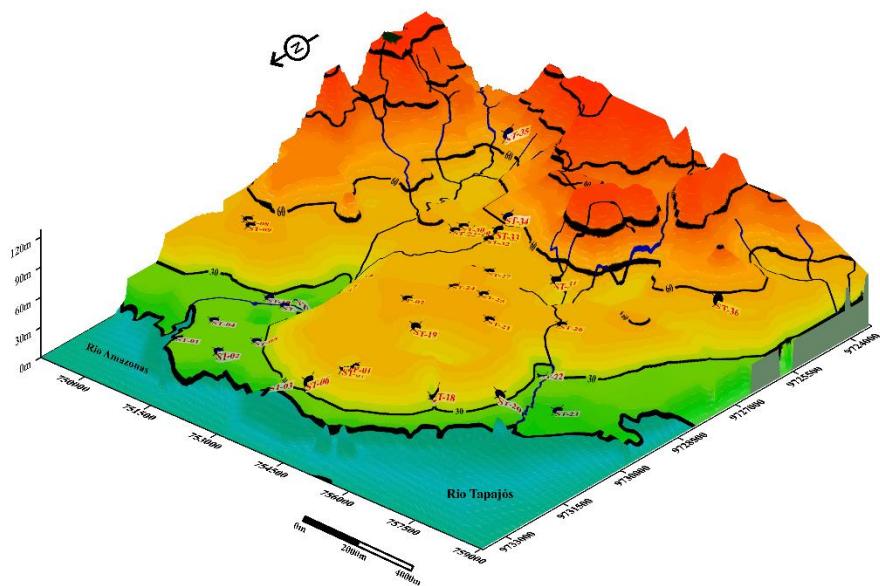
A partir do projeto SRTM (do inglês *Shuttle Radar Topography Mission*), disponível pelo INPE (2020) pôde-se obter um Modelo Numérico de Terreno (MNT)

gerado através do Modelo Digital de Elevação (MDE), em escala de detalhe de 1:55.000 (Figura 16 e Figura 17).

Figura 16 - Modelo Numérico do Terreno (MNT) e Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo.

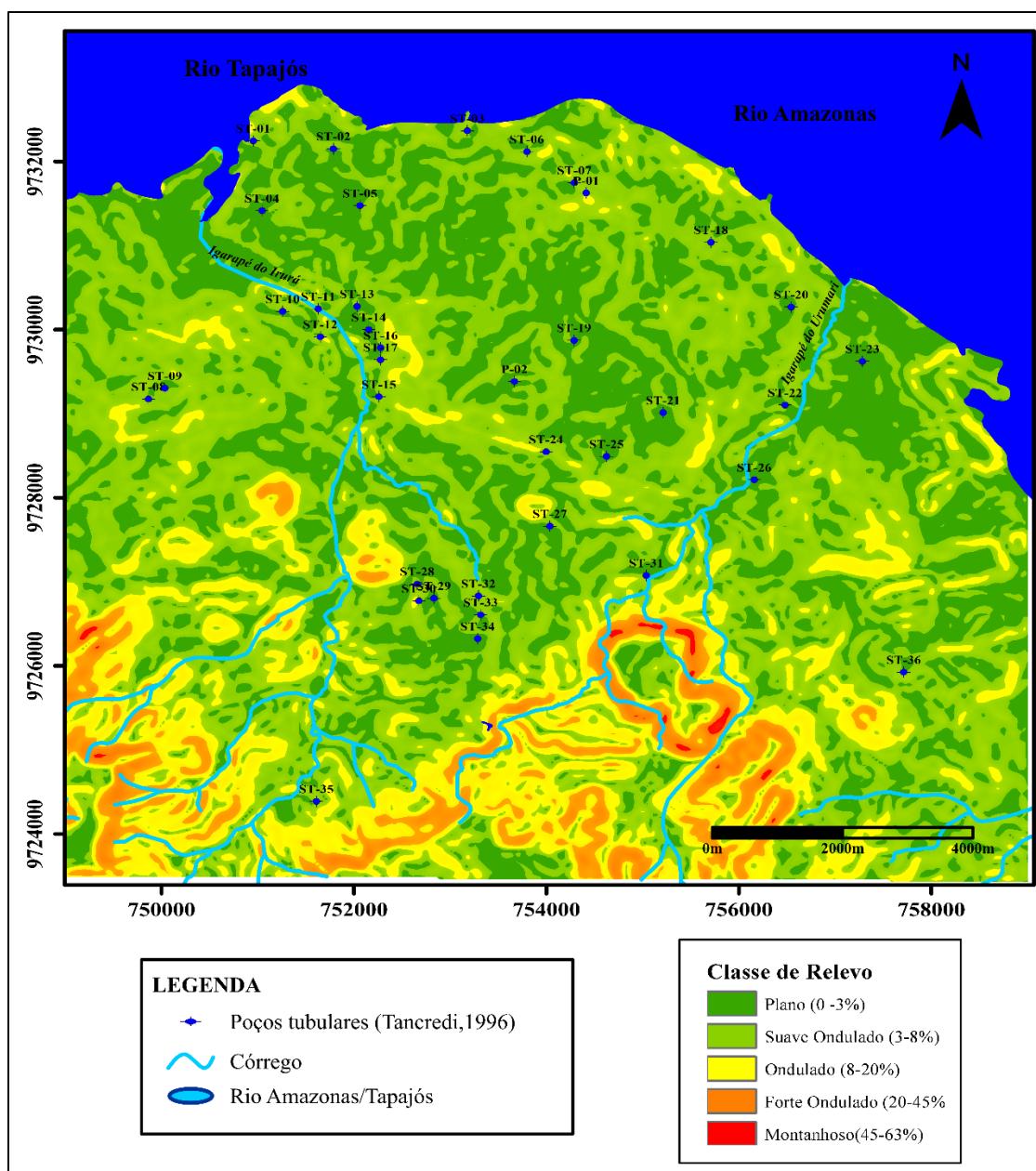


Modelo Digital de Elevação (MDE)



O mapa topográfico da área de estudo apresentou cotas altimétricas de 0 a 128 m. Foram identificadas baixas altimetrias com cotas de até 30m, característicos da Planície Amazônica, nas margens dos Rios Amazonas e Tapajós, ao norte, e na parte nordeste e noroeste no entorno dos igarapés.

Figura 17- Classes de declividade da área urbana de Santarém/PA.

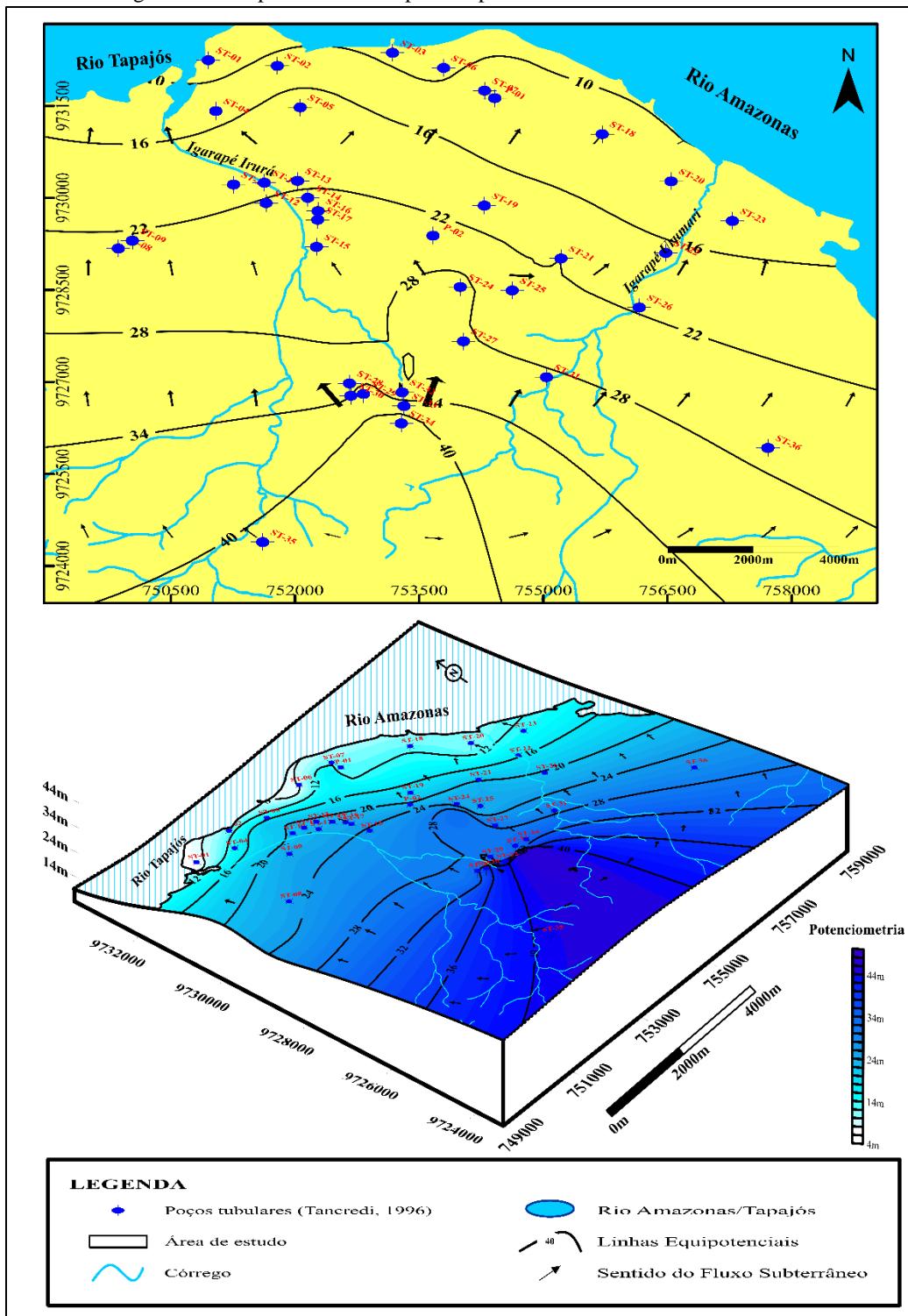


As topografias entre 30 e 120 metros, características do Planalto Rebaixado da Amazônia, perfazem a maior parte da área de estudo. Ao sul da zona urbana estão presentes as topografias mais elevadas (acima de 120m), do Planalto Tapajós-Xingu, composto por morros de relevos ondulados, forte ondulados e montanhosos conforme a classificação da Embrapa (1979) (Figura 17).

7.3 Mapa potenciométrico

A Figura 18 mostra o mapa potenciométrico da área de estudo, cujas informações sobre as cargas hidráulicas (h), utilizadas para a construção do mapa, correspondem àquelas medidas a partir do nível d'água estático e cota topográfica dos poços instalados no aquífero livre do trabalho de Tancredi (1996).

Figura 18 - Mapeamento da superfície potenciométrica da área de estudo.



No mapa potenciométrico da área de estudo é possível observar que o sentido preferencial do fluxo da água subterrânea é de norte para o sul, em direção ao Rio Amazonas e Tapajós.

7.4 Índice de vulnerabilidade

Os resultados do índice de vulnerabilidade foram gerados a partir da interpolação do produto de três parâmetros avaliados: grau de confinamento (**G**), ocorrência do substrato geológico (**O**) e distância ao nível de água subterrânea (**D**). Por isso, optou-se pela utilização de 35 poços tubulares que se encontram dentro do limite da área de estudo, na zona urbana de Santarém/PA. As informações sobre estes poços foram obtidas a partir do trabalho de Tancredi (1996). As características destes poços, assim como as unidades e os índices de vulnerabilidade são apresentados na Tabela 9.

Para o parâmetro grau de confinamento (**G**), foram caracterizados três tipos de aquíferos e assim definidos os valores de **G**: livres ($G=1,0$), confinados ($G=0,2$) e semi-confinado ($G=0,6$). Estes valores foram atribuídos com base na descrição da formação geológica de cada poço, constituídos em sua maioria por areias finas a médias do Quaternário, e arenitos de granulometria fina a grossa e cascalhos da Formação Alter do Chão.

Segundo Tancredi (1996) o sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão são constituídos por uma sucessão de camadas arenosas, com permeabilidade e espessuras variáveis, intercaladas com aquicludes e aquitardes de pequena espessura. Se estende por toda área da região de Santarém (com uma espessura de 600 m), o qual apresenta dois sistemas de aquíferos principais, sendo uma parte superior, constituída por aquífero livre (espessuras médias de 50 m), e uma parte inferior, por aquíferos confinados (espessuras de até 430m).

Os valores atribuídos em ocorrência do substrato geológico da zona vadosa ou camadas confinantes (**O**), acima da zona saturada do aquífero são 0,3 (argilas), 0,5 (siltos, argilas arenosas, areias argilosas) e 0,7 (areias com ou sem seixos), sendo que a maioria dos poços (74,28%) possui valores de 0,5 para esse parâmetro. Este valor indica a predominância de frações de arenitos, siltitos, argilitos e, subordinadamente, os conglomerados e lateritas, conforme Oliveira *et al.* (1999).

Tabela 9 - Identificação dos 38 poços tubulares utilizados no trabalho de Tancredi (1996) e calculados de acordo o Índice vulnerabilidade de Foster *et al.*(2006).

Poço	UTM N	UTM E	Prof. (m)	N.E (m)	Entrada D' Água (m)	CT (m)	Filtro (m)	Aquífero	Litologia e Profundidade (m)	h	G	O	D	I _{god}	Vul.
ST-01	9732245	750953	20	4,5	4,5	11	10-18	L	0-Ar-11-Ag-11,5-Ar-20	6,5	1	0,7	0,9	0,6	A
ST-02	9732152	751787	20	8,6	17	19	17-20	C	0-Ag-9-Ar-10-Ag-12,5-Ar-16-Ag-17-Ar(Ca)-20	-	0,2	0,5	0,8	0,1	B
ST-03	9732365	753179	106,4	J	64	15	64-76 / 86-104	C	0-Ar-24-Ar(Ca)-44-Ar-48-Ag-53-Ar(Ca)-80-Ar-84-Ar(Ca)-108-Ar-112	-	0,2	0,5	0,6	0,1	I
ST-04	9731415	751044	98,4	6,65	64,2	17	64,2-82,4/ 88,4-96,4	C	0-Ar-20-Ca-44-Ag-48-Ar-72-Ca-84-Ar-88-Ar(Ca)-96-Ag-100-Ar(Ca)-118	-	0,2	0,5	0,6	0,1	B
ST-05	9731475	752064	20	0,4	0,4	20	17-20	L	0-Ag-5,6-Ar-9-Ar(Ag)-15-Ar-20-Ag-22-Ar-23	19,6	1	0,3	0,9	0,3	B
ST-06	9732118	753796	28	17	17	24	24-28	L	0-Ag-10-Ar(Ca)-28-Ag-29-Ar(Ca)	7	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-07	9731748	754290	40	24	24	41	37-40	L	0-Ar-6-Ca-9-Ar-40	17	1	0,7	0,7	0,5	A
ST-08	9729174	749866	74	45	45	68	57-71	L	0-Ar-74-Ag-75-Ar	23	1	0,7	0,7	0,5	A
ST-09	9729302	750035	41	16	16	66	32,5-4	L	0-Ar-25-Ag-27,5-Ca-28-Ag-28,5-Ar-41	50	1	0,7	0,8	0,6	A
ST-10	9730217	751259	156,1	-8,69	99	19	99-15,6/ 126,8/129,8 / 138,8-148,8 /153-156,1	C	0-Ag-5-Ar-10-Ag-21,5-Ar-43-Ag-46-Ar-59-Ag-62-Ar-70-Ag-96—Ar-118,5-Ag-125-Ar-132,5-Ag-136-Ar-143-144,5-Ar-150,5-Ag-151,5-Ar-157,5-Ag-160	-	0,2	0,5	0,6	0,1	I
ST-11	9730247	751630	157,1	-3,98	88	23	88-115/ 133,7-136,7 /154,1-157,1	C	0-Ag(Ar)-10-Ar-27-Ag(Ar)-45-Ar-56-Ag(Ar)-76--Ag-86-Ar-118-Ag(Ar)-132-Ar-138-Ag(Ar)-144-Ar—149-Ag-153-Ar-160	-	0,2	0,5	0,6	0,1	I

Poço	UTM N	UTM E	Prof. (m)	N.E (m)	Entrada D' Água (m)	CT (m)	Filtro (m)	Aquífero	Litologia e Profundidade (m)	h	G	O	D	I _{god}	Vul.
ST-12	9729915	751651	157,1	-5,71	82,4	19	82,4-109,8 /151,1-157,1	C	0-Ag-6-Ar-70-Ag-82,5-Ar-110-Ag-126,5-Ar-139,5-Ag-141,5-Ar-143-Ag-148-Ar-160	-	0,2	0,5	0,6	0,1	I
ST-13	9730277	752031	157,2	-3,1	81,2	17	81,2-90,2/ 96,5-101,5/ 110,9-119,9/ 139,1-145,1	C	0-Ar-4-Ag-10-Ar-55-Ag(Ar)-85-Ar-90-Ag(Ar)-95-Ar-101-Ag-109-Ar-120-Ag-135-Ar-145-Ag-150-Ar-160-Ag-170-Ar-200	-	0,2	0,5	0,6	0,1	I
ST-14	9730000	752155	128	-3,1	88	17	88-124	C	0-Ar-44-Ar(Ca)-52-Ar(Ag)-72-Ar-82-Ar(Ag)-92-Ar-126-Ar(Ag)-128	-	0,2	0,5	0,6	0,1	I
ST-15	9729201	752259	133,8	-7	84,1	27	84,1-101,1/ 113-126	C	0-Ag-6-Ar-35-Ag(Ar)-55-Ag(Ar)-85-Ar-103-Ag-106-Ag(Ar)-113-Ar-125-Ag(Ar)-130-Ar-132-Ag(Ar)-141-Ar-144-Ag-146-Ar-150	-	0,2	0,5	0,6	0,1	B
ST-16	9729785	752278	116	-7,5	22	18	22-28 / 63-87 / 94-104	L/C	0-Ar-5,5-Ag-6,5-Ar-50-Ag(Ar)-56-Ag-62-Ar(Ag)-68-Ar-72-Ar(Ca)-124	0,6	0,5	0,7	0,2	B	
ST-17	9729643	752275	115	J	36	19	36-42/ 84,9-114,9	L/C	0-Ar-44-Ar(Ag)-48-Ag(Ar)-60-Ar-72-Ar(Ca)-96-Ar-100-Ar(Ca)-132	-	0,6	0,7	0,7	0,3	B
ST-18	9731039	755711	64	13,8	13,8	26	52-64	L	0-Si-16-Ar-40-Ag(Ar)-48-Ar(Ag)-60-Ar-118	12,2	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-19	9729874	754287	78	36	36	55	54-62 / 66-78	L	0-Ar-33-Ag-36-Ar-80	19	1	0,5	0,7	0,4	M
P-02	9729383	753668	258	N.I.	N.I.	68	N.I.	N.I.	0-Ar-66-Ca-90-Ar-126-Ag-131-Ar-182-Ag-188-258	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I
ST-20	9730269	756544	54	16,3	16,3	27	36-48 / 51-54	L	0-Ar-16-Ar (Ca)-54	10,7	1	0,7	0,7	0,5	M
ST-21	9729012	755213	72	35	35	57	52-60 / 64-72	L	0-Ag-12-La-12-Ar-72	22	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-22	9729102	756480	24	0,32	18	17	18-24	C	0-Ag-3-Ar-5-Ag-12-Ar-24	-	0,2	0,5	0,8	0,1	I

Poço	UTM N	UTM E	Prof. (m)	N.E (m)	Entrada D' Água (m)	CT (m)	Filtro (m)	Aquífero	Litologia e Profundidade (m)	h	G	O	D	I _{god}	Vul.
ST-23	9729623	757284	13,5	3,2	7,5	13	7,5-13,5	C	0-Ag-4-Si-10-Ar-19	-	0,2	0,5	0,8	0,1	I
ST-24	9728546	753997	41,5	17,62	17,62	48	37,5-41,5	L	0-Ar(Ag)-25-Ar(Ca)-30-Ag-40-Ar-41,5	30,38	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-25	9728491	754625	80	45	45	67	56-72 / 76-80	L	0-Ar-22-Ca-24-Ag-24,5-Ar-40-Ca-40-Ar-80	22	1	0,5	0,7	0,4	M
ST-26	9728214	756159	20	0,1	N.I.	27	N.I.	C	0-Ag-12-Ar-20	-	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
ST-27	9727662	754036	64	17,62	17,62	46	30-39 / 42-48	L	0-Ar(Ag)-17-Ag(Ar)-24-Ar-64	28,38	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-28	9726975	752658	54	16,9	16,9	47	48-54	L	0-Ar-31-Ag(Ar)-47-Ar-54-Ag(Ar)-90	30,1	1	0,7	0,8	0,6	A
ST-29	9726804	752829	N.I.	20	20	59	N.I.	L	0-Si-6-Ar-10-Ag-12-Ar-33-Ag-41-Ar-51-Ag-53-Ar(Ca)-61-Ag-67-Ag(Ar)-90	39	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-30	9726773	752675	60	15	15	48	30-34 / 43-60	L	0-Si-19-Ar(Ca)-20-Ar-34-Ar(Ag)-43-Ar-61-Ar(Ar)-65	33	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-31	9727076	755038	22	0,57	18	34	18-22	C	0-Ag-12-Ar-14-Ag-16-Ar(Ca)-22-Ar-25	-	0,2	0,5	0,8	0,1	I
ST-32	9726830	753294	50	17,67	17,67	45	32-41/ 44-50	L	0-Ag-9-Ar(Ca)-50	27,33	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-33	9726607	753317	50	8,17	8,17	46	23-39 / 44-50	L	0-Ag-9-Ar(Ca)-50	37,83	1	0,3	0,8	0,2	B
ST-34	9726323	753285	50	9	9	52	32-41/ 44-50	L	0-Ag-9-Ar(Ca)-50	43	1	0,3	0,8	0,2	B
ST-35	9724389	751610	18	J	13	58	13-18	L	0-Ar(Ag)-6-Ar-13-Ca-18-Ag-22	-	1	0,5	0,8	0,4	M
ST-36	9725924	757713	40	17,3	17,3	44	31-40	L	0-Ag(Ar)-12-Ag-17-Ar-31-Ag-32-Ar-40	26,7	1	0,5	0,8	0,4	M
P-01	9731625	754414	133	31	N.I.	42	N.I.	N.I.	0-Ar-24-Ar(Ca)-36-Ar-41-Ag-42-Ar-46-Ar(Ca)-48-Ar-64-Ca-70-Ar-76-Ca-80-Ar-104-Ag-106-Ar(Ag)-133	11	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	

UTM: sistema de coordenadas universal transversa de mercator (fuso21s); prof.: profundidade; N.E: nível estático (m); CT: cota do terreno (m); J: jorrante; L: livre; C: confinado; Ar: areia, arenito; Si: silte, siltito; Ag: argila, argilito; Ca: cascalho; La: laterita; N.I: Não identificado; h: carga hidráulica; GOD: índice de vulnerabilidade; VUL: classes de vulnerabilidade. A: Alta; B: Baixa; I: Insignificante; M: Moderada;

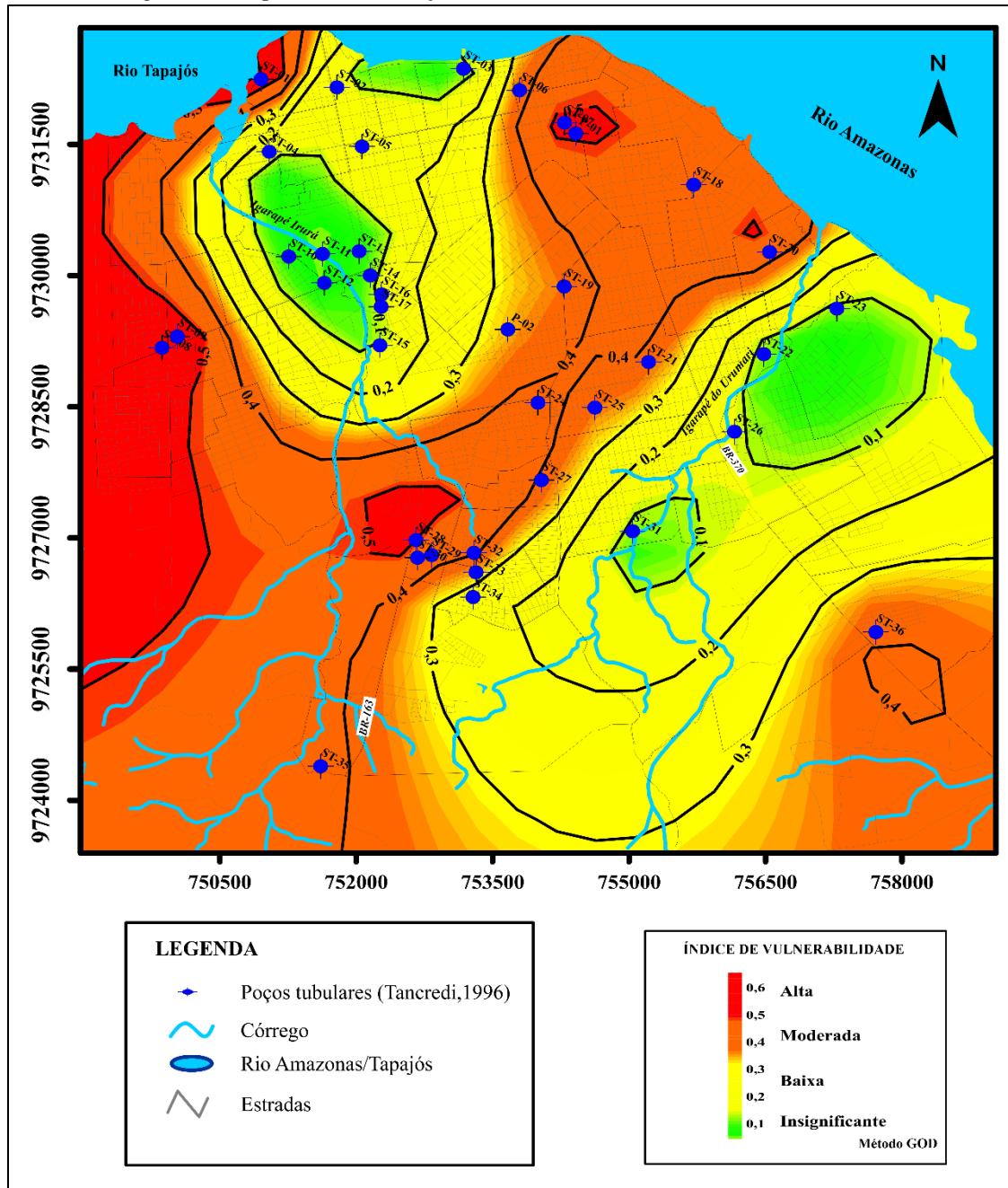
Determinou-se o índice de distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea para aquíferos livres (**D**) que com índices iguais a 0,7 (20-50 m), 0,8 (5-20 m) e 0,9 (inferior a 5 m). O teto da camada aquífera dos poços em aquíferos confinados foi delimitado a partir da profundidade da base dos filtros, que variou entre 7,5 (ST-23) e 99 m (ST-10), que corresponde a 0,8 (5-20 m) e 0,6 (superior a 50 m). É importante destacar que quanto mais raso for o nível da água, consequentemente maior é o risco de contaminação a partir de uma carga imposta na superfície do terreno. Na área de estudo os valores do índice de vulnerabilidade variou entre 0,06 (Insignificante) até 0,6 (Alta). Assim, a Figura 19 apresenta o mapa de reclassificação da vulnerabilidade da área de estudo e a Tabela 10 mostra a classificação da vulnerabilidade em relação aos poços.

Na Figura 19 é possível observar que a área com maior vulnerabilidade natural às águas subterrâneas está localizada a oeste da área de estudo, pois trata-se de uma região com porosidade mais arenosa e os níveis d'água são mais rasos.

Tabela 10- Classificação de Vulnerabilidade a partir dos poços usados no estudo.

Índice GOD	Classe de Vulnerabilidade	Poços	Descrição
0,5 a 0,7	Alta	ST-01, ST-07, ST-08, ST-09 e ST-28	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente sorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação
0,3 a 0,5	Moderada	ST-06, ST-18, ST-19, ST-20, ST-21, ST-24, ST-25, ST-27, ST-29, ST-30, ST-32, ST-35 e ST-36	Vulnerabilidade a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançado ou lixiviado
0,1 a 0,3	Baixa	ST-02, ST-04, ST-05, ST-15, ST-16, ST-17, ST-33 e ST-34.	Somente os vulneráveis a contaminantes conservativos a longo prazo, quando os contaminantes são contínuos e amplamente lançados ou lixiviados
0 a 0,1	Insignificante	ST-03, ST-10, ST-11, ST-12, ST-13, ST-14, , ST-22, ST-23 e ST-31	Camada confinada sem fluxo vertical descendente significativo (percolação).

Figura 19- Mapa de reclassificação de Vulnerabilidade natural da área de estudo.



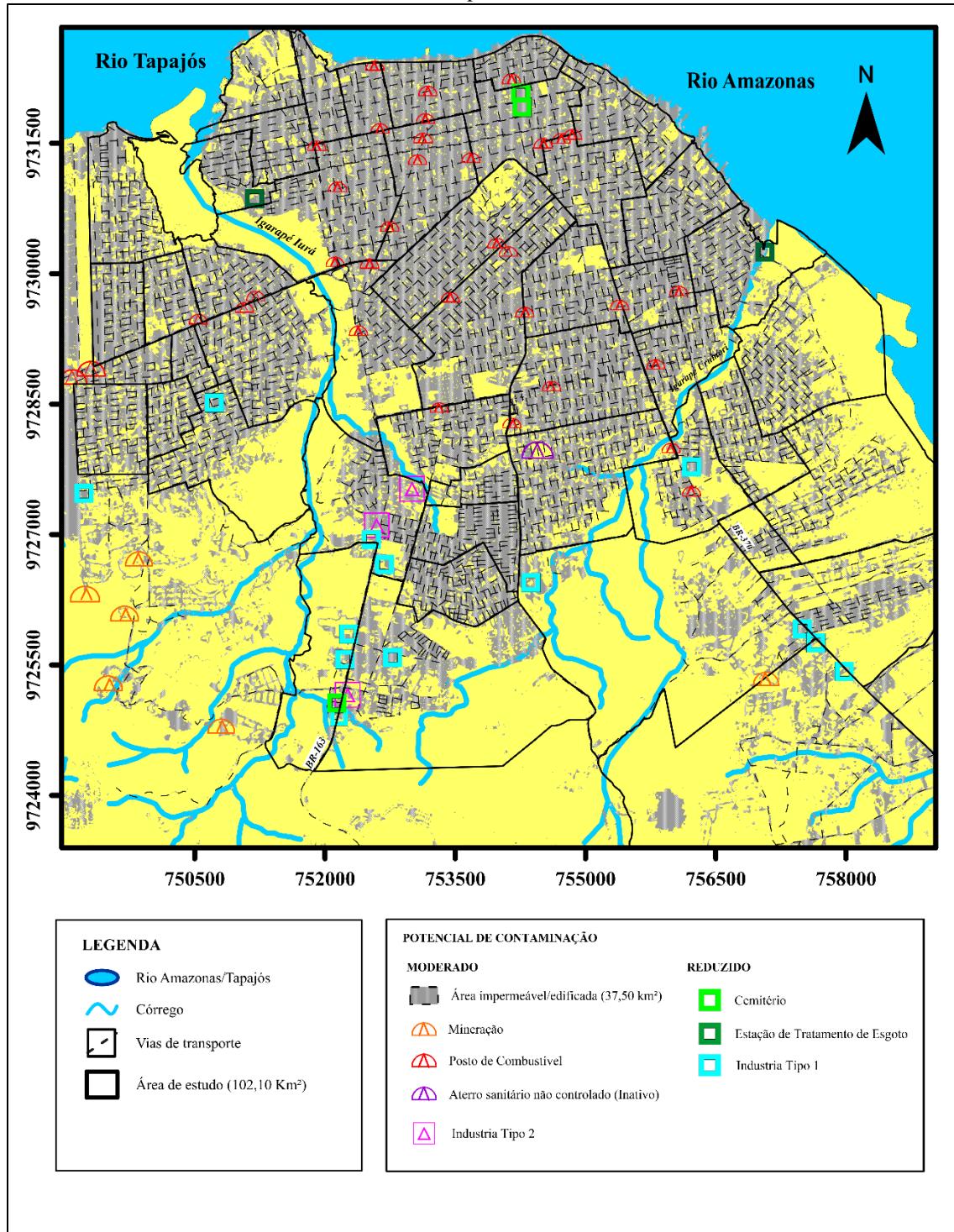
7.5 Fontes potenciais pontuais e difusa de contaminação

Neste estudo foram identificadas oito fontes potenciais de contaminação: áreas residenciais urbanas sem rede de esgoto (saneamento *in situ*); atividades industriais tipo 1; atividades industriais tipo 2; despejo de resíduos sólidos; postos de combustíveis; ETEs públicas; cemitérios; e mineração. Estas fontes potenciais de contaminação (difusas e pontuais) obtiveram classificações moderadas e reduzidas, quanto à carga potencial de contaminante no subsolo na área de estudo (Tabela 11 e Figura 20).

Tabela 11 - Classificação qualitativa de fontes difusas e pontuais das fontes pelo método POSH.

Carga Contaminante de Subsolo	Fonte	Quantidade	Descrição	Potencial (Foster <i>et al.</i> , 2006)
Fonte Difusas	Áreas residenciais urbanas sem rede de esgoto (Saneamento <i>in situ</i>)	60,1 km ²	Densidade Populacional (34 habitantes/ha.) e 36,7% . da população da área de estudo tem rede de esgoto, e ainda é ineficiente e precária.	Moderado
	Atividades industriais tipo 1	12	Madeireiras, indústria de cerâmicas e manufaturas de bebidas e alimentos.	Reduzido
	Atividades industriais tipo 2	03	Armazenamento de grãos e empresa de fertilizantes.	Moderado
	Despejo de resíduos sólidos (Antigo Lixão Santo André)	01	Chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/agroindústrias/industriais tipo 1, ou todos os demais casos.	Moderado
Fontes Pontuais	Posto de combustíveis	36	Outras (urbanas).	Moderado
	Contaminação de cursos de água superficiais (ETEs públicas)	2	Lagoas de águas residuais (ETE Irurá e ETE Urumari).	Reduzido
	Cemitérios	03	Outras (Urbanas).	Reduzido
	Mineração	06	Algumas atividades de mineração/ extração de materiais inertes.	Moderado

Figura 20 - Mapeamento das fontes potenciais (difusas e pontuais) de contaminação situadas na área urbana do município de Santarém/PA



7.5.1 Fontes Difusas pelo método POSH

O município de Santarém/PA tem uma população de 294.580 habitantes, com uma taxa de urbanização (a porcentagem da população que vive na área urbana) de 73% de pessoas morando neste perímetro. Porém, na área deste estudo, que foi realizado um

recorte do município compreendendo, então, 102,1 km² de área, tem 204.281 habitantes, conforme IBGE (2019). O recorte no município foi realizado de modo a limitar a área de estudo à parte mais urbanizada de Santarém/PA.

O saneamento básico na área urbana de Santarém/PA possui uma rede coletora de esgoto sanitário numa extensão de 57 quilômetros, incompleto, com redes principais não implantados. Atualmente existe em operação duas estações de tratamento (ETE Irurá e ETE Urumari) que estão em fase de expansão de acordo com o plano de saneamento 2023, o qual, atualmente, atende aproximadamente 75 mil pessoas (SANTARÉM, 2019). Isto mostra que apenas 36,7% da população da área de estudo tem rede de esgoto, e ainda é ineficiente e precária. Ainda, conforme TRATABRASIL (2020), o sistema de esgotamento sanitário de Santarém/PA apresenta baixos indicadores, com índice¹ de 8,59% de esgoto tratado de água consumida. Segundo o *ranking* de saneamento básico do TRATABRASIL (2020), o município de Santarém está na lista dos 20 piores municípios em saneamento básico (97^a posição), com base na estimativa populacional de 2018. Portanto, esta carga poluidora é caracterizada como moderada, devido ao enquadramento pelo método POSH, e por conta das precárias zonas atendidas da rede coletora.

A Figura 21 mostra a localização das zonas de atendimento das ETEs, sendo que as zonas de bacias de esgotamento sanitários Irurá (oeste da área) e Urumari (leste da área) estão ativas. Na figura, também é mostrada a bacia do Centro, porém encontra-se desativada.

¹ O índice de esgoto tratado referido à água consumida é baseado no indicador do SNIS IN046 e representa a divisão entre o Volume de Esgoto Tratado e a diferença entre o Volume de Água Consumido e o Volume de Água Tratada Exportado (volume de água previamente tratada transferida para outros agentes distribuidores) (Fonte: Brasil, 2018).

Figura 21 - Distribuição dos Sistemas de Esgotamento Sanitários em Santarém/PA.



Fonte: SANTARÉM(2019).

O município de Santarém possui uma economia voltada para a cultura de ciclo curto para mandioca, soja, arroz e milho. Sendo o primeiro maior produtor de mandioca, o terceiro maior produtor de grãos de soja e o quarto produtor de arroz do Estado do Pará (FAPESPA, 2015). No entanto, é importante ressaltar que este estudo não contemplou regiões agrícolas, que são potenciais de poluição difusa, pois não tem disponível um mapeamento recente da ocorrência das diferentes culturas na área estudada. Portanto, estudos futuros devem contemplar o mapeamento de áreas agrícolas e assim complementar a avaliação do perigo à contaminação dessa carga contaminante nas águas subterrâneas do município de Santarém/PA.

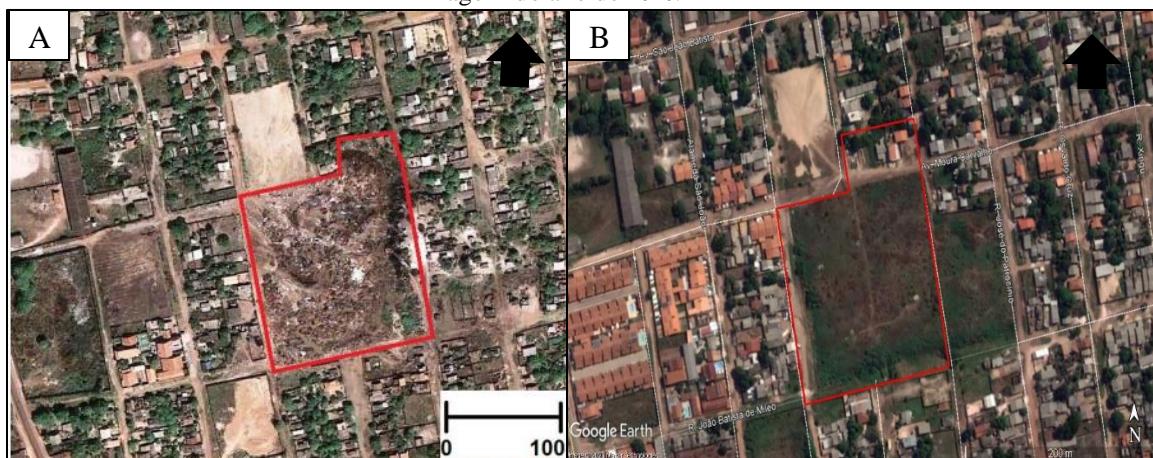
7.5.2 Fontes Pontuais pelo método POSH

As atividades industriais na área de estudo foram delimitadas a partir do contaminante gerado, conforme o método POSH (Foster *et al.*, 2006), em: Tipo 1 e Tipo 2. Tais empreendimentos em sua maioria estão situadas no entorno da BR-163 (Santarém-Cuiabá) e BR-370 (Santarém Curuá-Una).

As indústrias classificadas como Tipo 01 presentes na área de estudo tem como produtos/ matéria prima: madeiras, agregados de construção civil e artefatos de cerâmica vermelha. Esses estão sujeitos a carga contaminante de potencial reduzido. As indústrias do Tipo 02 estão relacionadas ao setor de empresas de armazenamento e manipulação de fertilizantes que atendem toda região de Santarém/PA. Essas fontes geram uma carga potencial moderada.

O antigo lixão de Santo André (Figuras 22 A e B), uma área aproximadamente de 200 m², está localizado na porção sul da cidade de Santarém. Esta região foi utilizada como depósito de resíduos sólidos no período dos anos de 2000 a 2015, conforme Souza *et al.* (2017). Atualmente, esta área encontra-se abandonada, sendo que algumas famílias estão fazendo uso desse local para construir suas casas, como mostrado na Figura 22B. Assim, como se trata de uma fonte de contaminação proveniente de deposição de resíduos sólidos no solo, o local deste antigo lixão é classificado como potencial moderado à contaminação, devido ao tipo de fonte e pela região ter precipitação de 2.000 mm/ano.

Figura 22- Área pertencente ao aterro sanitário inativo do Santo André. A) Imagem do ano de 2012. B) Imagem do ano de 2020.



Fonte: Imagem de Gonçalves *et al.* (2012) e Imagem Google Earth (2020).

Devido aos grandes riscos de contaminação ao meio ambiente, a Resolução CONAMA nº 273/2000, e posteriormente a Resolução nº 319/2002 indicam que toda instalação e sistemas de armazenamento de derivados de petróleo e outros combustíveis são empreendimentos potenciais ou parcialmente poluidores e geradores de acidentes ambientais (BRASIL, 2002). Logo, os postos de combustíveis são classificados como moderados, de acordo com o método POSH, e correspondem a 53,12% (34 postos) de todas as fontes potenciais pontuais identificadas na área de estudo.

Foram identificados 03 cemitérios municipais na área de estudo: o Cemitério São João Batista, Nossa Senhora dos Mártires e Nossa Senhora do Perpétuo Socorro (Cambuquira). Os cemitérios São João Batista e Nossa Senhora dos Mártires estão localizados na parte ao norte da área de estudo, em um terreno de 50.848,277 m². O cemitério Nossa Senhora dos Mártires é o cemitério mais antigo do município, construído em meados do início do século XIX, devido à epidemia de cólera que impossibilitou o sepultamento em áreas próximas às residências. Outro local de enterros praticados

antigamente é as igrejas, que, no entanto, não são contempladas neste estudo. Em 1919 foi sancionada a Lei nº 665 onde se aprovou a construção de uma nova necrópole denominado de São João Batista, inaugurado apenas em 1949 (CANTO, 2015).

Rodrigues (2017) descreve que as atividades na área do cemitério Cambuquira (oeste da área) tiveram início em 1930. Apenas em 1971, a prefeitura Municipal de Santarém começou administrar e gerenciar este cemitério. Em fevereiro do ano de 2009, foi concedida uma liminar, a pedido do Ministério Público, solicitando a interdição imediata do cemitério em virtude de eventos ambientais negativos que atingiram o manancial do Igarapé do Irurá, com objetivo de evitar aumento do carregamento de resíduos a margem deste curso d'água localizado em uma área de preservação ambiental permanente (JUSBRASIL, 2009).

Diante do exposto sobre os cemitérios de Santarém, que são muito antigos, e da classificação pelo método POSH, estas áreas são consideradas como potencial de contaminação reduzido. A Figura 23 apresenta a distribuição das fontes potenciais de contaminação por cemitérios na área de estudo definida.

Figura 23- Áreas pertencentes aos cemitérios identificados na área de estudo. A) Cemitérios ao norte da área (João Batista e Nossa Senhora dos Mártires). B) Cemitério a oeste da área (Cambuquira).



Fonte: Imagem Google Earth, 2020.

Atualmente encontram-se cadastrados 128 processos minerários no município de Santarém, sendo 35 áreas licenciadas, 27 em autorização de pesquisa e 02 em fase de concessão de lavra, conforme a base de dados públicos da plataforma SIGMINE- Sistema de Informação Geográfico da Mineração (ANM, 2020). Na área de estudo foram identificadas 06 áreas de mineração: 05 ativas e 01 com extração ilegal. Esta atividade é classificada como carga potencial moderada à contaminação. Uma consideração realizada

sobre os efeitos da mineração foi apontada por Da Silva *et al.* (2020), que mostram em seu trabalho que as áreas de atividade de mineração de areia representam uma grande degradação do meio ambiente agravada pela falta de monitoramento e controle dessas áreas.

7.6 Perigo de contaminação das águas subterrâneas

O perigo de contaminação do aquífero de Santarém/PA foi avaliado através da integração da caracterização da vulnerabilidade do aquífero com as fontes potenciais de contaminação difusas e pontuais da área de estudo, com a interpolação dos resultados obtidos entre o método GOD e POSH, como mostrado nas Figuras 24 e 26, respectivamente.

O perigo à contaminação das águas subterrâneas da zona urbana de Santarém/PA (Figura 24), quanto às cargas contaminantes provenientes de fontes difusas, apresenta classificação alta em três regiões da área de estudo: na margem do Rio Tapajós, região centro-oeste, e a oeste da área. Os resultados obtidos mostram que 19% da área de estudo apresenta classificação moderada ao perigo de contaminação, e um total de 4% se caracteriza como de alto perigo, que ocorre predominantemente a oeste da área. Seguido 3% de perigo muito baixo localizadas geralmente próximas aos poços confinados. Estas análises destacam a precariedade do saneamento básico e falta de controle e gestão do uso e ocupação do solo e dos recursos hídricos subterrâneos. As distribuições percentuais das áreas das diferentes classes são mostradas no gráfico da Figura 25.

Figura 24 – Perigo à contaminação das águas subterrâneas por fontes potenciais difusas.

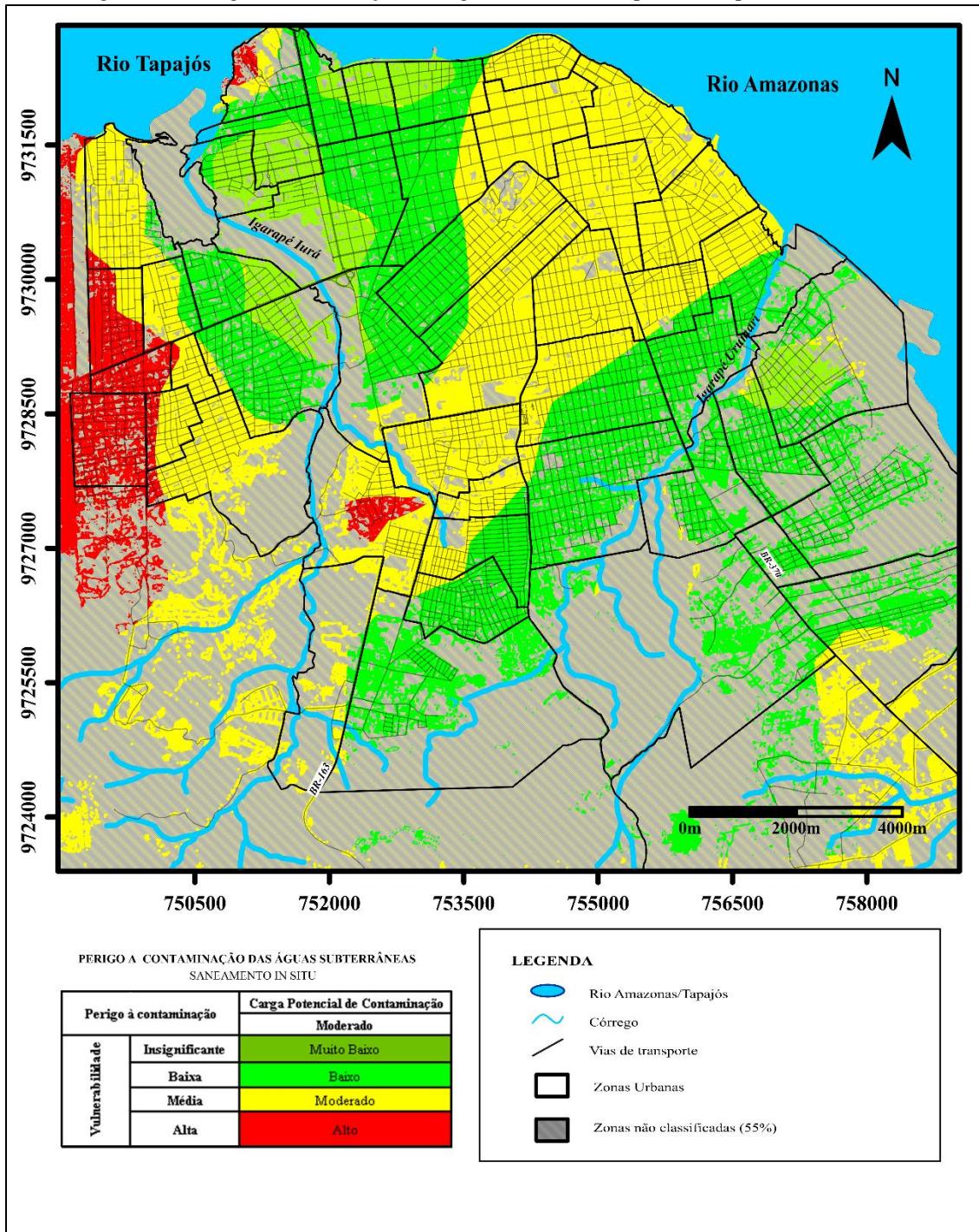
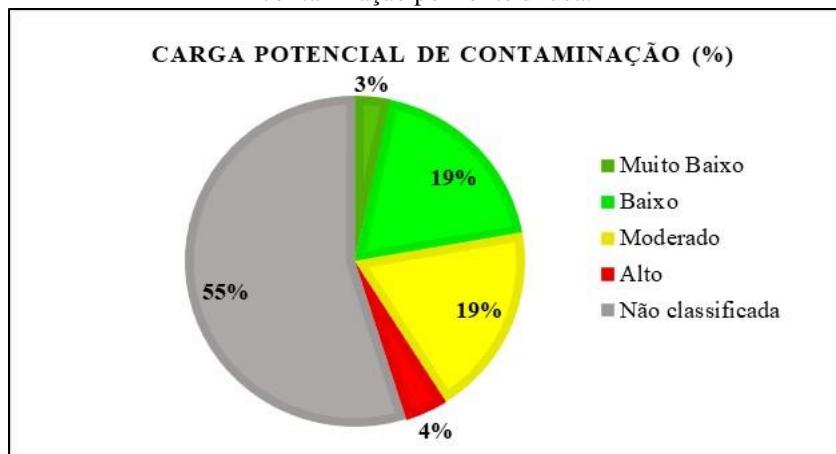


Figura 25 - Gráfico com distribuição de percentual das áreas das classes do mapa de perigo de contaminação por fonte difusa.



As fontes potenciais classificadas são referentes ao seu potencial de gerar carga contaminante ao solo. Assim, como observado na Figura 26, Tabelas 12 e 13, o perigo à contaminação das águas subterrâneas da área de estudo variou de muito baixa a alta. As áreas com alto perigo à contaminação das águas subterrâneas são referentes às atividades de mineração, posto de combustível e indústria. As indústrias do tipo 1 representam perigo à contaminação de muito baixo à moderada. Entretanto, as indústrias do tipo 2 possuem perigo moderado a alto devido à rasa profundidade do lençol nesta região.

Os postos de combustíveis, na área de estudo, variam de muito baixo a alto grau de perigo à contaminação das águas subterrâneas, sendo que cerca de 44 % têm índices baixo e moderado (Tabela 13). A Figura 26 ainda mostra a ocorrência de postos de combustíveis que apresentam perigo à contaminação elevado na região oeste da área, zona de alta vulnerabilidade, e onde a litologia da camada não saturada do aquífero é mais porosa.

Figura 26 - Vulnerabilidade natural dos aquíferos e fontes potenciais de contaminação mapeadas.

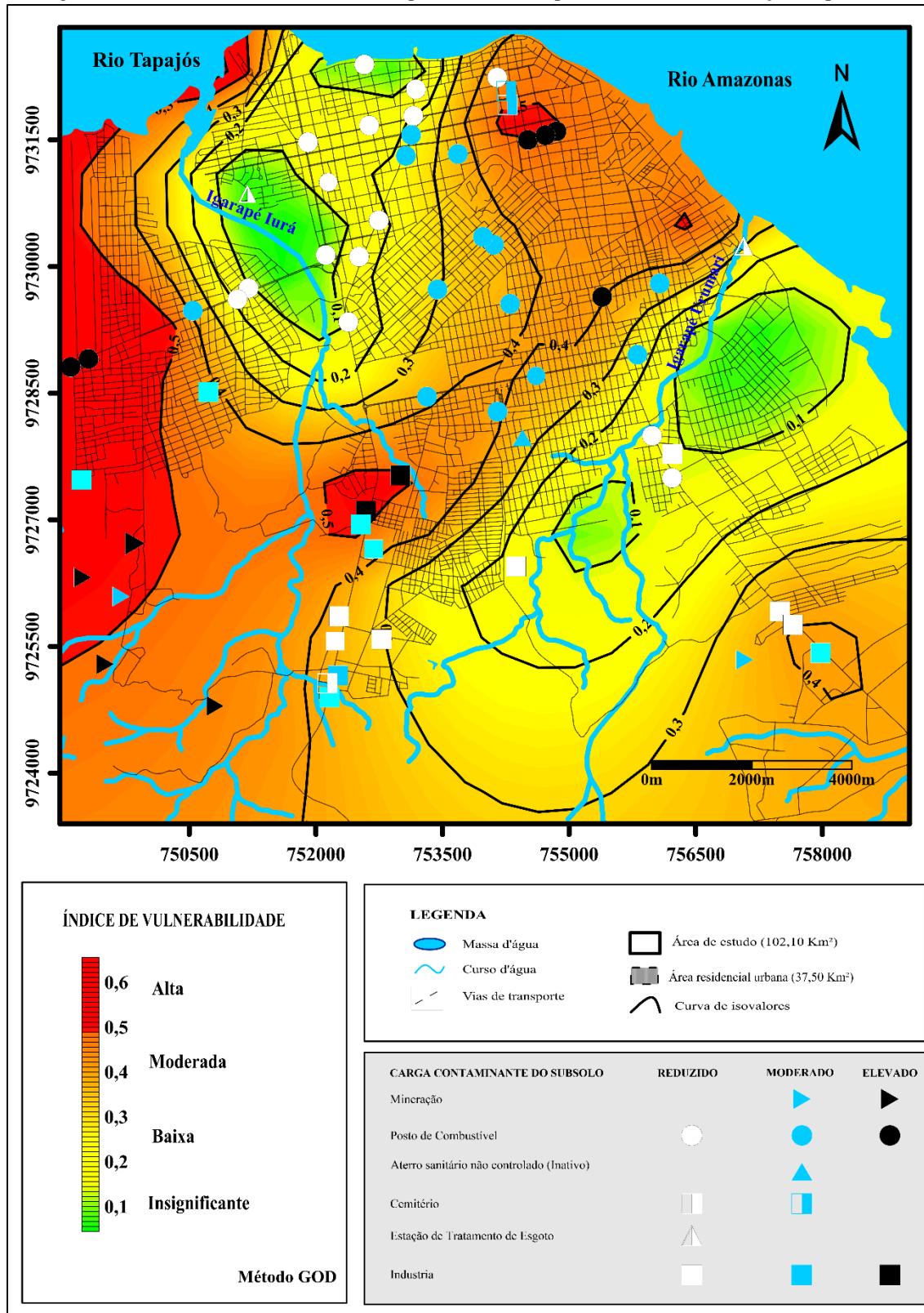


Tabela 12-Classificação do perigo de contaminação das águas subterrâneas no subsolo através da vulnerabilidade e potencial de gerar carga contaminante.

Fontes de Contaminação	Nº de fontes	Carga Contaminante	Vulnerabilidade do aquífero	Classificação do Perigo
Industria Tipo 01- 01	12	Reduzido	Média	Baixo
Industria Tipo 01- 02		Reduzido	Baixa	Muito Baixo
Industria Tipo 01- 03		Reduzido	Média	Baixo
Industria Tipo 01 - 04		Reduzido	Média	Baixo
Industria Tipo 01 - 05		Reduzido	Média	Moderado
Industria Tipo 01 - 06		Reduzido	Média	Baixo
Industria Tipo 01 - 07		Reduzido	Média	Baixo
Industria Tipo 01 - 08		Reduzido	Média	Moderado
Industria Tipo 01 - 09		Reduzido	Alta	Moderado
Industria Tipo 01 - 10		Reduzido	Baixa	Muito baixo
Industria Tipo 01 - 11		Reduzido	Alta	Moderado
Industria Tipo 01 - 12		Reduzido	Média	Baixo
Industria Tipo 02- 01	3	Moderado	Média	Moderado
Industria Tipo 02 - 02		Moderado	Alta	Alto
Industria Tipo 02- 03		Moderado	Alta	Alto
Aterro inativo (despejo de resíduos sólidos)	1	Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 01	34	Moderado	Alta	Alto
Posto de combustível 02		Moderado	Alta	Alto
Posto de combustível 03		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 04		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 05		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 06		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 07		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 08		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 09		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 10		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 11		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 12		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 13		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 14		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 15		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 16		Moderado	Insignificante	Muito baixo
Posto de combustível 17		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 18		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 19		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 20		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 21		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 22		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 23		Moderado	Baixo	Baixo

Fontes de Contaminação	Nº de fontes	Carga Contaminante	Vulnerabilidade do aquífero	Classificação do Perigo
Posto de combustível 24		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 25		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 26		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 27		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 28		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 29		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 30		Moderado	Média	Moderado
Posto de combustível 31		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 32		Moderado	Baixa	Baixo
Posto de combustível 33		Moderado	Muito Baixa	Baixo
Posto de combustível 34		Moderado	Insignificante	Muito Baixo
ETE Iurá	2	Reduzido	Insignificante	Muito Baixo
ETE Urumari		Reduzido	Baixa	Muito Baixo
Cemitério 01		Reduzido	Média	Baixo
Cemitério 02	3	Reduzido	Média	Baixo
Cemitério 03		Reduzido	Média	Baixo
Mineração 01		Moderado	Média	Moderado
Mineração 02		Moderado	Alta	Alto
Mineração 03	6	Moderado	Alta	Alto
Mineração 04		Moderado	Alta	Alto
Mineração 05		Moderado	Média	Moderado
Mineração 06		Moderado	Média	Moderado

Tabela 13 - Porcentagens das classes de perigo à contaminação por cada fonte pontual.

Fontes pontuais	Classes de perigo à contaminação (%)			
	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto
Industria Tipo 01	17	50	33	0
Industria Tipo 02	0	0	33	67
Aterro Inativo (despejo de resíduos sólidos)	0	0	100	0
Posto de combustível	6	44	44	6
ETEs	100	0	0	0
Cemitério	33	67	0	0
Mineração	0	0	50	50

Castro (2017) identifica que os tanques de armazenamento dos postos em Santarém podem ser de ferro, aço carbono e aço carbono revertido (dito ecológico). A Resolução CONAMA nº 319/2002 reitera que toda instalação desse tipo de empreendimento é de potencial ou parcial poluidores e geradores de acidentes ambientais (BRASIL,2002). Assim, os postos de combustíveis localizados em zonas de alta a moderada vulnerabilidade devem ter maior fiscalização por parte da administração pública municipal, pois representam mais perigos à contaminação. Consequentemente, devem ter maior atenção aos aquíferos livres da zona urbana de Santarém, por conta, dos vazamentos de sistemas de armazenamento subterrâneo, que nem sempre são detectados imediatamente, e são uma das principais causas de contaminação das águas subterrâneas.

As atividades de mineração apresentam índices de moderado a alto perigo à contaminação, e geralmente estão localizadas em regiões de alta vulnerabilidade do aquífero. Da silva *et al.*, (2020) destaca o alto grau de degradação ambiental ocasionada pela mineração ilegal, falta de planejamento e de fiscalização dos impactos oriundos dessas atividades, que causam grandes problemas ambientais e sociais na área urbana.

Apesar do valor de classificação ao perigo das ETEs ser muito baixo e estarem em regiões insignificante à baixa vulnerabilidade, sabe-se que o esgoto do município é lançado em sua maioria *in natura*, o que pode comprometer as qualidades das águas subterrâneas que são bombeadas para o consumo humano.

O aterro sanitário inativo está localizado na área de estudo e tem índice moderado de perigo à contaminação. Contudo, é necessário realizar estudos *in loco* para entender o comportamento da carga contaminante desta fonte no solo e na água subterrânea.

Os cemitérios apresentaram perigo de muito baixo a baixo, uma vez que são atividades de reduzido potencial de gerar carga contaminante do solo.

Assim, os resultados mostram que existe a necessidade de se introduzir uma gestão territorial à proteção dos aquíferos da zona urbana de Santarém/PA. Eles também mostram que estudos são necessários para atualizar a avaliação de vulnerabilidade natural e de perigo à contaminação das águas subterrâneas, onde devem contemplar o mapeamento e monitoramento de poços não contemplados neste estudo, como os do SIAGAS-Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou uma avaliação preliminar da vulnerabilidade e perigo à contaminação das águas subterrâneas da zona urbana de Santarém/PA. Os resultados mostram que há uma grande variabilidade na vulnerabilidade natural das águas subterrâneas, cujos índices variam entre 0,06 (Insignificante) e 0,6 (Alta). A região que apresentam maior vulnerabilidade é àquela localizada na parte oeste da área, onde se tem unidades mais arenosas e níveis de entrada d'água mais rasos. É nesta região, também, que ocorrem os maiores índices de perigo à contaminação da área, tanto para as fontes difusas quanto para as fontes pontuais de contaminação.

As fontes difusas, que estão relacionadas à inexistência ou pouca eficácia da rede de esgoto na cidade, apresentam perigos à contaminação de muito baixo a alto. Estas análises mostram a precariedade do saneamento básico e falta de controle e gestão do uso e ocupação do solo e dos recursos hídricos subterrâneos.

Quanto às fontes pontuais de contaminação, os resultados mostram que as que apresentam o maior índice de perigo à contaminação, ou seja, alto, são mineração, postos de combustíveis e indústrias. A falta de planejamento e de fiscalização dos impactos de todas estas fontes potenciais de contaminação, reforça a necessidade de uma gestão ambiental que conduza trabalhos de monitoramento destas atividades.

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de se introduzir uma gestão territorial à proteção dos aquíferos da zona urbana de Santarém/PA. Também devem ser fomentados estudos adicionais da área que contemplam atualização de poços, mapeamento mais detalhado das fontes pontuais de contaminação e mapeamento de fontes difusas referentes às atividades agrícolas.

Finalmente, espera-se que esta pesquisa possa estimular e auxiliar a gestão de recursos hídricos, de meio ambiente e saúde pública, dos órgãos públicos federal, estadual e municipal, juntamente com a sociedade civil organizada, como incentivo para proteção deste recurso natural.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA- AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil.** Informe 2012. Ed. Especial. Brasília: ANA. 2012. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>. Acesso: 04/08/2020.

ANM – AGENCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. SIGMINE – Sistema de Informação Geográfico da Mineração. **Arquivos para download – data base 2020.** Disponível em <<http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap>>. Acesso: 29/07/2020.

ANP- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Rio de Janeiro. **Arquivos para download – data base 2020.** Disponível em <<https://postos.anp.gov.br/>>. Acesso em: 01 agosto de 2020.

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H. e PETTY, R.J. Drastic: *A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. Okahama, 1987.

ALMEIDA, F. F. M. **Origem e evolução da plataforma brasileira.** Rio de Janeiro: DNPM, Boletim 241. Relatório técnico. 1967. 36p. In: BONGIOLI, A. B. S. Contribuição ao estudo da Bacia do Amazonas e do seu embasamento através da gravimetria e da magnetometria. (Tese de Doutorado). Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 290 p. 2011.

ASTM D6030. *Standard Guide for Selection of Methods for Assessing Ground Water or Aquifer Sensitivity and Vulnerability.* West Conshohocken, PA, EUA. 8 p. 1996.

AUGE, M. P. **Primer curso de posgrado de hidrogeología ambiental.** Buenos Aires: UBA, 1995.

AUGE, Miguel Pedro. **Vulnerabilidad de acuíferos.** Revista Latino-Americana de Hidrogeología. Curitiba, v.4, p.97-103, 2004.

VAN STEMPVOORT, Dale; EWERT, Lee; WASSENAAR, Leonard. **Aquifer Vulnerability Index (AVI): a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping.** Canadian Water Resources Journal, v.18, n.1, p.25- 37, jan. 1993

AZEVEDO, A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Aguas subterrâneas.** In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE. 1998.

BARATA, C. F.; CAPUTO, M. V. **Geologia do petróleo da Bacia do Solimões. “O Estado da Arte”.** 4º PDPETRO. Campinas. 10 p. 2007.

BARBOSA, M. C. et al. **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**, v. 25, n. 1, 2011.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Projeto Radambrasil Folha Sa 21-Santarém, Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, Uso potencial da Terra.** Rio de Janeiro. 507 p. 1976.

BRASIL. MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE-MMA. **Águas Subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido.** Brasília: Agência Crio – Comunicação e Negócios, 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Resolução nº 313, de 29 de Outubro de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA.** 15 p. 2002.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016.** Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA, 2018.

CASTRO, Sanny. **Análise da eficiência do Ground Penetrating Radar (GPR) na visualização de estruturas subterrâneas em postos de combustíveis do município de Santarém, Pará.** 2017. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso ao Programa de Ciências da Terra (Bacharel em Geologia) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017.

CAPUTO, M. V. *Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology And Paleogeography Of Northern Basin Of Brazil.* (Tese De Doutorado) - University Of California. 163 – 170 pp. 1984.

CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. **Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas – Histórico e Atualização.** In: Congresso Brasileiro De Geologia. Anais. São Paulo. 35 - 46 pp. 1972.

CIVITA, M., CHIAPPONE A., FALCO M. P., JARRE. *Preparazione de lla carta di vulnerabilitá per Lari localizzazione di um impiantopozzi dell'acque sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi.* Marano sul Parma, 1990.

CARVALHO, A.M.; CONICELLI, B.P.; HIRATA, R.; L'APICCIRELLA, E.S.; SIMONATO, M.D.; CAMPOS, J.E.; ROCHA, G.; SURITA, C.; PILION, A.M.; ABREU, M.C.; BERTOLO, R.; WENDLAND, E. **Gestão os aquíferos da região de Jurubatuba (São Paulo) sob risco?** in: Abas, Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, 1, São Paulo, anais, 10 p. 2009.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto Cosanpa – Relatório Final de Sondagem.** Relatório de construção de poços tubulares profundos, Santarém – PA: CONTEP, 1997.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão, Bacia sedimentar do Amazonas.** Homero Reis de Melo Junior, Maria Antonieta Alcântara Mourão. Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 47 p. 2012.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, **Aterros sanitários em valas.** São Paulo.1997.

CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C. **Bacia do Amazonas.** Boletim de Geociências da Petrobras. Rio De Janeiro. V. 8, Nº 1. 1994.

CUNHA, P. R. C.; MELO, J. H. G.; SILVA, O. B. **Bacia do Amazonas. Boletim de Geociências da Petrobras.** Rio de Janeiro. V. 15, Nº 2. 227 - 251 pp. 2007.

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.** Geociências (São Paulo), v. 29, n. 3, p. 401-411, 2010.

CLEARY, R.W. **Hidrologia das Águas Subterrâneas.** In Engenharia Hidrológica. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. V: 2. São Paulo, 1989.

DAEMON, R. F. **Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas.** Revista Brasileira de Geociências, v. V , p. 78-84, 1975.

DA SILVA, E. F.*et al.* *Environmental impacts of sand mining in the city of Santarém, Amazon region, Northern Brazil. Environment, Development and Sustainability*, v. 22, n. 1, p. 47-60, 2020.

De KETELEARE, D; HÖTZL, H; NEUKUM, C; CIVITA, M; SAPPA, G. **Hazard analysis and mapping.** In: Relatório final da ação 620 de COST de Zwahlen F (ed). Bruxelas, Luxemburgo, pp 86-105. 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS, Rio de Janeiro, RJ. **Caracterização dos solos da área do planalto de Seterra, município de Santarém, Estado do Pará /** Tarcísio Ewerton Rodrigues.*et al.* - Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001,55p.; 22cm. - (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 115). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 29 julho. 2020.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos** (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FEITOSA, F. A. C, MANOEL, J. F., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações.** 3^aEdição Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, 812p. 2008.

FILHO, J. M. **Hidrogeologia : conceitos e aplicações.** In: FEITOSA, F. A. C., *et al.* Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3^a. ed. Rio de Janeiro: CPRM. Cap. 2.1, p. 53-75. 2008.

FOSTER, S. S. D. **Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy.** 1987.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. Lima: Pan American center for sanitary engineering and environmental sciences (CEPIS).88 p. 1988.

FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo César Aoki; GOMES, Daniel; D'ELIA, Mônica; PARIS, Marta. *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies*. Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE). Washington: The Word Bank, 2002. 101p.

FOSTER, S. et al. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. São Paulo: SERVMAR, 114 p. 2006.

FAPESPA - FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS. **Estatística Municipal Santarém**. 1^a Edição, Belém, 2015. Disponível em: <http://www.fapespa.pa.gov.br/upload/Arquivo/anexo/1271.pdf?id=1601250467>. Acesso em: 10/09/2020.

FRANCÉS, A., PARALTA, E., FERNANDES, J., RIBEIRO, L. *Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index*. In: International Conference on Future Groundwater Resources at Risk, 3, 2011, Lisbon. Lisbon: IAH/Unesco, 9p. 2001.

GALVÃO, P. H. et al. **Relações entre Qualidade da Água Subterrânea e Ocupação Desordenada em um bairro de baixa renda localizado em uma antiga área de Lixão, Santarém/PA**. Águas Subterrâneas, 2018.

GOETTEN, W. J. **Avaliação da Governança da Água Subterrânea nos Estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Blumenau. 317f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Regional de Blumenau. 2015.

GONÇALVES, Mayara Maria Castro et al. **Identificação dos Potenciais Riscos a Sociedade no entorno do lixão do bairro Santo André na cidade de Santarém-PA**. Revista Geonorte, v. 3, n. 4, p. 686-698, 2012.

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

KISTLER, P. *Historical resume of the Amazon Basin*. PETROBRAS - RENOR, Relatório interno. Belém. 104 p. 1954

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. 2012.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados estatísticos municipais de Santarém-PA**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/santarem/panorama>>. Acesso em: 29 julho. 2020.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados estatísticos municipais de Santarém-PA. Censo 2010.** Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/santarem/panorama>>. Acesso em: 29 julho. 2020.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEROLOGIA. **Série Histórica – mensal. Estação meteorológica de Belterra – PA.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>> Acesso em 29 de julho de 2020.

INPE- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA E ESPACIAIS. **Projeto SRTM - Shuttle Radar Topography Mission.** 2008. Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>). Valeriano, M. M. Topodata - banco de dados geomorfométricos locais do Brasil. 2008. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 01 de agosto de 2020.

IOP, G.T. C. **Avaliação da vulnerabilidade e do risco potencial de contaminação de água subterrânea no município de Venâncio Aires-RS.** Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNO-LÓGICAS / CPLA – COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL. 2011. **Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.** (José Luiz Albuquerque, coord.), Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos, 5, 102 p.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo.** In:**Cadernos de Educação Ambiental.** São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente., 2012.

IRITANI, Mara Akie *et al.* **Proposta de classificação das fontes potenciais de contaminação da água subterrânea.** Revista do Instituto Geológico, v. 34, n. 2, p. 1-26, 2013.

JOÃO, X. da S. J; TEIXEIRA, S. G.; FONSECA, D. D. F. **Geodiversidade do estado do Pará. Belém.** 2013. 220 p

PINHEIRO, Andreia de Oliveira *et al.* **Os riscos ambientais como fatores determinantes dos processos saúde-doença na área do aterro controlado de Perema, no Município De Santarém-PA.** 2009.

MAGNUSSON, William E. *et al.* **Composição florística e cobertura vegetal das savanas na região de Alter do Chão, Santarém-PA.** *Brazilian Journal of Botany*, v. 31, n. 1, p. 165-177, 2008.

MEIRA, José Carlos Rodrigues *et al.* **Vulnerabilidade natural e perigo à contaminação de zona de recarga do aquífero Guarani.** José Carlos Rodrigues Meira, P. 46, 2014.

MELO JÚNIOR, Homero Reis. **Método Drastic: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade.** In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo, 2008

MONTERO, Rafael Carrion. **Vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos nas sub-bacias do Alto Aguapeí e Alto Peixe-SP.** 2012.

OLIVEIRA , J. R.; PASTANA, J. M. D. N. **Potencialidade hidrogeológica da vila de Alter-doChão, com proposta técnica para perfuração de poço tubular profundo.** Santarém, p. 17. 1999.

OLIVEIRA, Josafá Ribeiro de *et al.* **Caracterização Hidrogeológica da Cidade de Santarém e das Vilas de Mojuí dos Campos e Alter-do-Chão com proposta técnica para a perfuração de poços tubulares profundos.** Águas Subterrâneas, 2000.

REBOUÇAS, A. D. C. **Águas Subterrâneas.** In: GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. Águas subterrâneas e poços tubulares profundos. 2^a. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Cap. 1, p. 17-56.

RODRIGUES, T. E; SANTOS, P. L. dos; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; VALENTE, M. A.; SILVA, J. M. L. da; CARDOSO JÚNIOR, E. Q. **Caracterização dos solos da área do planalto de Belterra, município de Santarém, Estado do Pará.** Belém. 54 p. 2001.

RODRIGUES, Thayrinne Suellen do Amaral. **Determinação da qualidade da água de poços tubulares no entorno do cemitério nossa senhora do perpétuo Socorro, bairro Cambuquira, Santarém-PA.** 2017. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso ao Programa de Ciências da Terra (Bacharel em Geologia) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017.

SANTARÉM - PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTARÉM. Revisão Do Plano Municipal de Saneamento Básico de Santarém – PA. Santarém. 2019.

SANTARÉM - PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTARÉM CENTRO MUNICIPAL DE INFORMAÇÃO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL DE SANTARÉM – CIAM/Santarém. [Banco de dados municipais de Santarém] Disponível em “Dados Brutos Não Publicados”. Acesso em: 02 de agosto de 2020.

SANTARÉM - Justiça manda interditar cemitério, a pedido do Ministério Público do Estado. JUSBRASIL, 2009. Disponível em: <<https://mppa.jusbrasil.com.br/noticias/1060408/santare-m-justica-manda-interditar-cemiterio-a-pedido-do-ministerio-publico-do-estado>> Acesso em: 10 de set. 2020.

SOUSA, Janice P. et al. Caracterização Hidrogeológica do Antigo Lixão do Santo André, Santarém-Pará. XX Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2017.

SILVA, M. L. D. Estudo Hidroquímico e dos isótopos de urânio nas águas subterrâneas em cidades do estado do Amazonas(AM). Universidade Estadual Paulista. Rio Claro - SP, p. 178. 2005.

SOUSA, Barbara Tharyni Rodrigues. **Avaliação Ecotoxicológica Potencial: Analise Comparativa Entre Aterro do Perema (Santarém – PA), e Aterro de Santa Cruz (Rio De Janeiro, RJ).** 2017. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso ao Programa de Ciências da Terra (Bacharel em Geologia) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017.

SMA – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE/SSE – SECRETARIA DE SANEAMENTO E ENERGIA. 2009. **Projeto Jurubatuba: restrição e controle de uso de água subterrânea.** Cadernos do Projeto Estratégico Aquíferos, 1, 109 p

TANCREDI, A. C. F. N. S. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: Fundamentos para uso e proteção.** (Tese de Doutorado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém. 1996. 153 p

TRATABRASIL - INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2020.** São Paulo, 2020.

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. *World Balance and Water Resources of the Earth.* Paris: No, 1978. 662 p.

USGS - United States Geological Survey. **Sentinel-2.** Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 05 agosto de 2020.

VAN STEMPVOORT, EWERT, L. E WASSENAAR, L. – *Aquifer Vulnerability Index: GIS Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping.* Canadian Water Resources, v. 18, n. 1, 1993.

VIANA, Amauri da Silva. **Investigação Geofísica e Caracterização da Vulnerabilidade Do Aquífero À Contaminação por Necrochorume na Área dos Cemitérios Centrais Município De Santarém – Pará,2019.** 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso ao Programa de Ciências da Terra (Bacharel em Geologia) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2019.

VILLAR, PILAR CAROLINA. **As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise.** Ambiente & Sociedade, v. 19, n. 1, p. 83-100, 2016.

WANDERLEY FILHO, J. R. **Evolução estrutural da Bacia do Amazonas e sua correlação com o embasamento.** Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, p. 125. 1991.

ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, R. D. **Panorama da Qualidade da Água no Brasil.** Agencia Nacional de Águas. Brasília, p. 74. 2005.