



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS – IESA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGeo

LEONILSON LIMA

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA PELO MÉTODO
GALDIT NO AQUÍFERO COSTEIRO DA CIDADE DE RAPOSA – MARANHÃO**

GOIÂNIA/GO
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ [X] Dissertação ☐ [] Tese ☐ [] Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Leonilson Lima

3. Título do trabalho

**“AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA PELO MÉTODO GALDIT NO
AQUÍFERO COSTEIRO DA CIDADE DE RAPOSA MARANHÃO”.**

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ [X] SIM ☐ [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Leonilson Lima, Discente**, em 28/04/2026, às 12:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maximiliano Bayer, Professor do Magistério Superior**, em 24/06/2026, às 09:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6155171** e o código CRC **0F2DB861**.

LEONILSON LIMA

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA PELO MÉTODO
GALDIT NO AQUÍFERO COSTEIRO DA CIDADE DE RAPOSA – MARANHÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) do Instituto de Estudos Socioambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Natureza e Produção do Espaço

Linha de Pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica.

Orientador: Prof. Dr. Maximiliano Bayer – PPGeo/UFG

GOIÂNIA/GO
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **07/2026** da sessão de Defesa de Dissertação de **Leonilson Lima**, que confere o título de Mestre em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço**.

Aos vinte e três dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e seis, a partir **09:00** das **horas**, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA PELO MÉTODO GALDIT NO AQUÍFERO COSTEIRO DA CIDADE DE RAPOSA MARANHÃO”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Maxiliano Bayer (PPGEO/IESA)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Marcio Henrique de Campos Zancoppe (IESA/UFG)**, membro titular externo; Professora Doutora **Claudia Valeria de Lima (PPGEO/IESA)**, membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Maxiliano Bayer (PPGEO/IESA)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, **aos vinte e três dias dos mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e seis**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Maximiliano Bayer, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudia Valeria De Lima, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Henrique De Campos Zancoppe, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5954953** e o código CRC **8C4FACD1**.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Lima, Leonilson

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA PELO
MÉTODO GALDIT NO AQUIFERO COSTEIRO DA CIDADE DE
RAPOSA – MARANHÃO [manuscrito] / Leonilson Lima. - 2026.
CVI, 106 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Maximiliano Bayer.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto
de Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em
Geografia, Goiânia, 2026.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Vulnerabilidade aquífera. 2. Água subterrânea. 3. Poços tubulares.
4. Intrusão salina. I. Bayer, Maximiliano, orient. II. Título.

CDU 911

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família. Em especial à minha mãe e meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e por me conceder forças para seguir em frente mesmo nos momentos mais desafiadores.

À minha mãe, Maria José, por todo o apoio incondicional, incentivo constante aos estudos e por ser a principal razão de todo o meu esforço. Estendo meus agradecimentos à minha avó materna, Maria Cambel, por toda a ajuda desde a minha criação, sou um grande admirador de sua história de vida, que sempre me serviu de inspiração.

Aos meus irmãos, Nataliane, que sempre me apoiou, ajudou e esteve presente ao longo de toda a minha trajetória acadêmica; à Cleisson e Cleane, pelo companheirismo e apoio fraterno; à minha sobrinha querida, Emi Sayuri, que, mesmo tendo chegado há pouco tempo, já ocupa um espaço muito especial em minha vida; e ao meu cunhado, Sakae, pela amizade e convivência. À Cleiton (*in memoriam*), que permanece vivo em minhas lembranças e em meu coração. Amo vocês incondicionalmente.

Ao Programa de Pós-graduação em Geografia, pelo apoio concedido à realização desta pesquisa. Ao corpo docente do PPGeo, que contribuiu de forma significativa para o processo de formação acadêmica. À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu professor e orientador, Professor Max Bayer, por todo o apoio, pelos conhecimentos compartilhados, pelos conselhos nos momentos de dúvida e pela constante disponibilidade, contribuindo de forma decisiva para a minha formação acadêmica.

Ao Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física (LABOGEF) e à Universidade Federal de Goiás (UFG), por disponibilizarem toda a infraestrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço aos professores da banca de qualificação, Professora Cláudia Valéria e Professor Jorge Hamilton, por dedicarem seu tempo à avaliação deste trabalho e por contribuírem de forma significativa, possibilitando meu avanço para a etapa final do mestrado.

Aos amigos do Laboratório de Estudo de Bacias Hidrográficas, Matheus Moreno, Letícia Barros, Igor e, em especial, Eri, por todo o apoio e auxílio, sobretudo durante os trabalhos de campo.

Às amigas construídas na Universidade Federal de Goiás (UFG), Lisbeth, Alisson, Deysser, por tornarem a trajetória do mestrado mais leve e menos tortuosa. A todos aqueles que não foram citados nominalmente, registro igualmente minha gratidão.

RESUMO

As águas subterrâneas configuram-se como uma importante fonte de abastecimento público, sendo consideradas mais seguras por se encontrarem no subsolo e, em geral, dispensarem tratamento prévio. O município de Raposa, localizado na porção norte do estado do Maranhão, integra a Ilha de São Luís e é abastecido predominantemente por meio de poços tubulares. Por estar situado em área insular, a cidade sofre influência direta das variações de maré, o que pode afetar a dinâmica e a qualidade de suas águas subterrâneas. A dinâmica de maré, associada ao avanço da impermeabilização do solo, que reduz a recarga dos aquíferos e ao aumento da exploração de poços tubulares, contribui para a diminuição da pressão hidráulica exercida pela água doce em relação à água salgada. Essa redução de pressão favorece a penetração da cunha salina em direção ao continente. Esse movimento é chamado de intrusão salina, trata-se de um fenômeno natural, porém passível de intensificação pela ação antrópica. O objetivo desta pesquisa é identificar e avaliar as áreas vulneráveis à intrusão salina no município de Raposa (MA). Para isso, aplica-se o método GALDIT, voltado ao mapeamento e à avaliação da vulnerabilidade de aquíferos costeiros à intrusão da água do mar, especialmente em função da intensa exploração de água subterrânea para o abastecimento e outras atividades antrópicas. O município de Raposa apresenta lacunas preocupantes de dados hidrodinâmicos, o que compromete a gestão dos poços tubulares, uma vez que, dos 37 poços existentes, apenas 25 apresentaram informações passíveis de utilização nesta pesquisa. A aplicação do índice do método GALDIT identificou áreas com vulnerabilidade moderada a elevada, sobretudo nas regiões com maior concentração populacional e situadas próximas à linha de costa ou sob influência das marés. Os parâmetros que exerceram maior influência na vulnerabilidade foram o parâmetro A (condutividade hidráulica), o parâmetro L (nível piezométrico) e o parâmetro D (distância da linha de costa), em função dos pesos mais elevados atribuídos a esses fatores. Diante do exposto, conclui-se que o município apresenta fragilidades nos dados hidrodinâmicos dos poços tubulares, fundamentais para a compreensão do comportamento da água subterrânea. A ausência dessas informações compromete, sobretudo, a qualidade e a gestão dos recursos hídricos do município. O índice GALDIT permite evidenciar as áreas mais sensíveis à intrusão salina, as quais demandam maior atenção por parte do poder público. Nesse sentido, recomenda-se a adoção de medidas mitigatórias, como a atualização dos dados hidrodinâmicos e hidrogeológicos, a realização de análises físico-químicas da água subterrânea, a racionalização do bombeamento dos poços tubulares e o incentivo ao uso sustentável da água subterrânea.

Palavras-chave: Vulnerabilidade aquífera; Água subterrânea; Poços tubulares; Intrusão salina.

ABSTRACT

Groundwater is an important source of public water supply on São Luís Island and is generally considered safer because it is stored underground and usually does not require prior treatment. The municipality of Raposa, located in the northern portion of Maranhão State, is part of São Luís Island and is predominantly supplied by tubular wells. Because it is situated in an insular area, the city is directly influenced by tidal variations, which may affect the dynamics and quality of its groundwater. Tidal dynamics, associated with the advance of soil impermeabilization, which reduces aquifer recharge, and the increase in groundwater extraction from tubular wells, contribute to the reduction of hydraulic pressure exerted by freshwater in relation to saltwater. This pressure reduction favors the penetration of the saline wedge toward the continent. This movement is known as saltwater intrusion and is considered a natural phenomenon; however, it can be intensified by anthropogenic activities. The objective of this research is to identify and evaluate areas vulnerable to saltwater intrusion in the municipality of Raposa (MA). For this purpose, the GALDIT method, developed by Chachadi and Ferreira (2001), was applied. This method is designed to map and assess the vulnerability of coastal aquifers to seawater intrusion, especially considering the intense groundwater exploitation for water supply and other anthropogenic activities. The municipality of Raposa presents concerning gaps in hydrodynamic data, which compromises the management of tubular wells, since out of the 37 existing wells, only 25 provided usable information for this research. The application of the GALDIT index identified areas with moderate to high vulnerability, particularly in regions with higher population concentration and located close to the coastline or under tidal influence. The parameters that exerted the greatest influence on vulnerability were parameter A (hydraulic conductivity), parameter L (piezometric level), and parameter D (distance from the coastline), due to the higher weights assigned to these factors. Given these findings, it is concluded that the municipality presents weaknesses in hydrodynamic data related to tubular wells, which are essential for understanding groundwater behavior. The absence of this information mainly compromises the quality and management of the municipality's water resources. The GALDIT index allows the identification of areas most sensitive to saltwater intrusion, which require greater attention from public authorities. In this context, the adoption of mitigation measures is recommended, including updating hydrodynamic and hydrogeological data, conducting physicochemical analyses of groundwater, rationalizing pumping from tubular wells, and encouraging sustainable use of groundwater resources.

Keywords: Aquifer vulnerability; Groundwater; Tubular wells; Saltwater intrusion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquematização da interface água doce/salgada em um aquífero costeiro	23
Figura 2 - Subida da interface água salgada	23
Figura 3 – Mapa do índice GALDIT	35
Figura 4 – Franja costeira de São Luís (MA): Carta de Vulnerabilidade à Intrusão Marinha – Método GALDIT.	36
Figura 5 – Carta de Vulnerabilidade à Intrusão Salina pelo método GALDIT do curso inferior da bacia do Rio Bacanga - São Luís- MA	37
Figura 6 – Fluxograma representativo das etapas da pesquisa na cidade de Raposa – MA....	43
Figura 7 – Mapa de localização do município de Raposa – MA	45
Figura 8 – Mapa de Geologia da cidade de Raposa – MA.....	52
Figura 9 – Mapa de Geomorfologia da cidade de Raposa – MA	54
Figura 10 – Mapa de solo da cidade de Raposa – MA.....	57
Figura 11 - Mapa de uso e ocupação do solo e vegetação da cidade de Raposa – MA	59
Figura 12 – Mapa distribuição espacial dos poços tubulares da cidade de Raposa – MA.....	62
Figura 13 – Mapa de profundidade (m) dos Poços tubulares do município de Raposa/MA....	67
Figura 14 – Mapa do nível dinâmico dos Poços tubulares do município de Raposa/MA.....	69
Figura 15 – Área de influência de maré.	72
Figura 16 – Parâmetro G – Ocorrência do Aquífero	74
Figura 17 – Parâmetro A – Condutividade Hidráulica.....	76
Figura 18 – Parâmetro L – Nível do Piezômetro.....	78
Figura 19 – Parâmetro D – Distância da linha da costa.	80
Figura 20 – Impacto do estado atual da intrusão salina – razão $Cl/[HCO_3^- + CO_3^{2-}]$	83
Figura 21 – Perfil litológico A - B.....	84
Figura 22 – Perfil litológico C - D.....	85
Figura 23 – Perfil litológico E - F	85
Figura 24 – Mapa dos perfis litológicos (A-B, C-D e E-F).....	87
Figura 25 – Parâmetro T – espessura do aquífero.	88
Figura 26 – Índice final de vulnerabilidade do método GALDIT da cidade de Raposa – MA	90
Figura 27 – Áreas com maiores cotas altimétricas mais vulneráveis à intrusão salina.....	92
Figura 28 – Zonas de vulnerabilidade da cidade de Raposa – MA	94

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 – Coleta das georreferencias dos poços tubulares	39
Imagem 2 – Coleta da água subterrânea em poços tubulares	41
Imagem 3 – Afloramento do Grupo Barreiras	47
Imagem 4 – Depósitos de Mangues na cidade de Raposa – MA	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros essenciais para o estudo dos aquíferos.	25
Quadro 2 – Valores de Condutividade hidráulica (K) e porosidade total (n) em diferentes materiais.	26
Quadro 3 – Classes de produtividade do aquífero.	27
Quadro 4 – Parâmetros GALDIT e Valores de coeficiente de ponderação.	30
Quadro 5 – Classes de vulnerabilidade	31
Quadro 6 – Classificação do parâmetro G – Ocorrência de Aquífero	31
Quadro 7 – Classificação do parâmetro A – Condutividade Aquífero do aquífero	32
Quadro 8 – Classificação do parâmetro L – Nível do Piezômetro.....	32
Quadro 9 – Classificação do parâmetro D – Distância da linha de costa	33
Quadro 10 – Classificação do parâmetro I – Impacto do estado atual da intrusão	33
Quadro 11 – Classificação do parâmetro T – Espessura do aquífero.....	34
Quadro 12 – Vista parcial do poço tubular P-26, P-32 e P-05 – Raposa/MA.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Valores médios dos parâmetros dos poços do Aquífero Itapecuru na Ilha de São Luís – Ma.....	50
Tabela 2 – Dados Hidrodinâmicos dos Poços da cidade de Raposa.....	64
Tabela 3 – Tábua de marés no município de Raposa – MA.	70
Tabela 4 – Dados hidrodinâmicos da área de estudo - Raposa – MA.	77
Tabela 5 – Distância dos poços tubulares em relação a Linha de Costa - Raposa – MA.....	79
Tabela 6 – Dados dos parâmetros físico-químicos das águas dos poços tubularas coletadas Raposa – MA.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BDTD – Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMESC – Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos
LEBAC – Laboratório de Estudos de Bacias Hidrográficas
LPCQA – Laboratório de Alimentos e Água
NA – Nível da água
ND – Nível dinâmico
NE – Nível estático
PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos
SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SNGRH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UFMA – Universidade Federal do Maranhão
ZEE – Zoneamento Ecológico-Econômico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 Variabilidade hidrológica	20
2.2 Recursos Hídricos Subterrâneos: Função e Vulnerabilidade	21
2.3 Intrusão salina em aquíferos costeiros	22
2.4 Hidrogeologia.....	24
2.5 Parâmetros de comparação entre Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K), Vazão (Q) e Produtividade.....	27
2.6 Vulnerabilidade de aquífero à contaminação	28
2.6.1 Conceitos de vulnerabilidade Intrínseca e Específica	28
2.6.2 Métodos de vulnerabilidade.....	29
2.7 Método GALDIT	30
2.7.1 Histórico e desenvolvimento do método	30
2.8 Aplicação do método GALDIT.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODO	38
3.1 Levantamento e análise de material bibliográfico.....	38
3.2 Material cartográfico	38
3.3 Trabalho de campo, coleta, organização e tratamento dos dados	39
3.3.1 Coleta de água nos poços tubulares para análise físico-química.....	40
3.5 Análise do perfil litológico e determinação dos dados hidrodinâmicos.....	41
3.6 Determinação do nível estático dos poços (NE)	42
3.7 Parâmetros de Condutividade Hidráulica (K).....	42
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
4.1 Localização geográfica e extensão da cidade de Raposa.....	44
4.2 Aspectos geológicos.....	46
4.2.1 Grupo Barreiras (N12b).....	46
4.2.2 Formação Itapecuru	47
4.2.3 Depósito de pântanos e mangues (Q2pm)	48
4.2.4 Depósitos litorâneos (Q2I).....	49
4.2.5 Caracterização Hidrogeológica dos aquíferos Barreiras e Itapecuru no Maranhão	49
4.3 Geomorfologia.....	53
4.4 Pedologia	55
4.5 Uso e ocupação do solo e vegetação.....	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 Distribuição dos poços tubulares na área de estudo.....	60
5.2 Análise dos dados hidrodinâmicos	63
5.3 Área de influência de maré	70
6 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA APLICANDO O MÉTODO GALDIT	73
6.1 Parâmetro G – Ocorrência do aquífero.....	73
6.2 Parâmetro A – Condutividade hidráulica	75
6.3 Parâmetro L – Nível do Piezômetro.....	77
6.4 Parâmetro D – Distância da linha da costa	79
6.5 Parâmetro I – Impacto do estado atual da intrusão salina – razão $\text{Cl}^-/[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$	81
Figura 20 – Impacto do estado atual da intrusão salina – razão $\text{Cl}^-/[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$	83
6.6 Parâmetro T – espessura do aquífero	84

6.7 Vulnerabilidade à intrusão marinha na cidade de Raposa – MA.....	89
6.7.1 Zoneamento de áreas vulneráveis a intrusão salina.....	93
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos correspondem às águas superficiais ou subterrâneas disponíveis para diferentes tipos de uso (Costa et al., 2012) e são insubstituíveis para a manutenção dos ecossistemas e para a realização de diversas atividades desenvolvidas pelo homem, dentre as quais se destacam o abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola e as atividades de lazer e recreação (Costa; Waichman e Santos, 2004).

Dada a sua importância, Souza (2001) enfatiza a necessidade dos recursos hídricos para a qualidade de vida das populações, bem como seu papel essencial para o desenvolvimento no Brasil e no mundo. Segundo a Associação Brasileira de Ciências, “Águas superficiais, subterrâneas e reservas de água são componentes estratégicos e essenciais do desenvolvimento econômico, social e de sustentabilidade dos processos em âmbitos local, regional e continental” (ABC, 2014).

Conforme Pasqualetto et al. (2022), a água tem se tornado um recurso cada vez mais escasso e alvo de conflitos, seja pela sua baixa disponibilidade, que envolve fatores de ordem qualitativa e quantitativa, seja pelo crescimento das atividades produtivas e do abastecimento público. Desse modo, a elevada demanda por recursos hídricos tem despertado preocupações quanto à disponibilidade da água.

A alta demanda por recursos hídricos tem crescido com o aumento das atividades humanas em diversas regiões, neste sentido, a gestão costeira não por ser realizada de maneira isolada da gestão dos recursos hídricos (Loitzenbauer e Mendes, 2016). ao realizar da gestão integrada de áreas costeiras e dos recursos hídricos colabora em inibir pressões que comprometem a quantidade e, sobretudo, a qualidade da água subterrânea disponível para consumo humano.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/97) reconhece a água como bem de domínio público, limitado e dotado de valor econômico, cujo uso deve ser regulado em benefício da coletividade. Em situações de escassez, o abastecimento humano e a dessedentação de animais devem ser prioritários. Os mananciais subterrâneos são o principal reservatório de água doce disponível para os seres humanos. Mais de 60% da população mundial reside em regiões associadas a aquíferos costeiros, o que evidencia o potencial de superexploração e de gestão inadequada dos recursos hídricos subterrâneos. (Chronidou *et al.*, 2022). Dessa forma, a intrusão salina é problema com potencial de atingir quase todas as regiões costeiras e que mais de 61% da população mundial consome água subterrânea (Gurgel et al., 2004).

As áreas costeiras apresentam grande densidade populacional, se comparadas a regiões mais afastadas do litoral (CUSTODIO, 1987), comumente, a água superficial não atende aos padrões de qualidade exigidos e, nesse caso, recorre-se às águas subterrâneas. No entanto, os aquíferos costeiros são a principal fonte abastecimento nas regiões litorâneas, o que os torna vulneráveis ao fenômeno estudado, visto que “A alta exploração de aquíferos costeiros em regiões mais urbanizadas agrava esse avanço da cunha salina para o continente” (ALVES, 2019, p. 16).

Um problema enfrentado em zonas costeiras, que compromete a qualidade da água para diferentes usos, é a intrusão salina em aquíferos, a qual provoca a contaminação por sais e reduz sua potabilidade. Conforme Cabral (1985) A intrusão salina é um fenômeno natural agravado por ações antrópicas, caracterizado pela penetração da água do mar nos aquíferos costeiros, esse processo ocorre principalmente quando há rebaixamento do nível freático, favorecido pela superexploração dos poços e pela redução da recarga natural em função da impermeabilização do solo urbano.

Estudos como os de Mavriou; Kazakis e Pliakas (2019) e Hamzehloo *et al.*, (2022) demonstram que a salinização dos aquíferos costeiros representa um problema de escala global, com potencial de afetar mais de um bilhão de pessoas. Araújo *et al.*, (2023) destacam que a exploração inadequada desses recursos gera impactos negativos, como o avanço da cunha salina, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas quanto à salinidade, limitando seu uso ou, conforme o grau de comprometimento, exigindo a aplicação de sistemas de tratamento, como a dessalinização por osmose reversa, para viabilizar seu aproveitamento.

Os aquíferos costeiros vêm sendo submetidos a intensa pressão em função da crescente urbanização das zonas litorâneas, o que resulta no aumento da demanda por água destinada às atividades domésticas, agrícolas e industriais. Araújo *et al.*, (2023) destacam que a exploração inadequada desses recursos gera impactos negativos, como o avanço da cunha salina, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas quanto à salinidade, limitando seu uso ou, conforme o grau de comprometimento, exigindo a aplicação de sistemas de tratamento, como a dessalinização por osmose reversa, para viabilizar seu aproveitamento.

O município de Raposa apresenta características típicas de vulnerabilidade ambiental: crescimento urbano acelerado, uso intensivo da água subterrânea e proximidade com o litoral. Com uma população estimada em 32.054 habitantes (IBGE, 2024), comparando com o censo de 2010 quando a população era 25.386 habitantes (IBGE, 2010) e apenas 21 poços com dados hidrogeológicos e apenas 33 em funcionamento de um total de 37 identificados, o município depende majoritariamente da captação de águas subterrâneas para o abastecimento da

população. A sobrecarga nos aquíferos, somada à ocupação desordenada e à escassez de áreas de recarga preservadas, eleva o risco de salinização e compromete a segurança hídrica local.

Compreender a problemática da intrusão salina permite a adoção de medidas mitigatórias voltadas à melhoria da gestão e do uso adequado dos recursos hídricos no município de Raposa. A aplicação dessas medidas reduz os riscos que podem afetar a saúde da população, além de possibilitar a identificação dos poços tubulares passíveis de exploração e que são vulneráveis à intrusão.

Diante desse cenário, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: qual é o grau de vulnerabilidade do aquífero costeiro do município de Raposa à intrusão salina, considerando as pressões antrópicas e os parâmetros hidrogeológicos locais? Para responder a essa pergunta, será aplicado o método GALDIT, desenvolvido por Chachadi e Ferreira (2001), com o objetivo de avaliar e mapear a vulnerabilidade dos aquíferos costeiros à intrusão salina.

O método GALDIT foi projetado para uso em áreas litorâneas e baseia-se na integração de 6 (seis) parâmetros principais: G (tipo de aquífero), A (condutividade hidráulica), L (nível freático), D (distância da costa), I (impacto da intrusão salina) e T (espessura do aquífero). Esses parâmetros são ponderados com base em sua influência sobre o risco de salinização, permitindo a geração de índices que refletem o grau de vulnerabilidade espacial dos aquíferos estudados.

A escolha do método GALDIT justifica-se pela sua eficiência em contextos costeiros com disponibilidade limitada de dados. Em Raposa, a escassez de informações hidrogeológicas detalhadas impõe desafios à análise convencional, e o uso de um modelo paramétrico como o GALDIT representa uma alternativa viável para apoiar o diagnóstico técnico e orientar medidas de proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

O método GALDIT já foi aplicado em pesquisas para analisar e mapear a intrusão salina em diversas regiões costeiras do mundo (LOBO FERREIRA *et al.*, 2005) Zona costeira de Goa (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2005), Zona de costa da Guiné-Bissau (TERCEIRO e LOBO FERREIRA, 2010), Região Costeira da Índia (SATISHKUMAR *et al.*, (2016), Mediterrâneo (ZAAROUR, 2017) e outros, inclusive no Brasil, como na Ilha de São Luís, bacia hidrográfica do Pindaré (PEREIRA *et al.*, 2011), na Franja costeira de São Luís Castro, Pereira e Oliveira, (2022), na porção inferior da bacia do rio Bacanga (Martins, 2019). A escolha do município de Raposa como área de estudo decorre da necessidade urgente de compreender os processos que comprometem a qualidade da água subterrânea na Ilha de São Luís, especialmente na bacia hidrográfica do rio Paciência.

A área, marcada por transformação antrópica, encontra-se em situação de vulnerabilidade hídrica crescente, exigindo diagnósticos técnicos que subsidiem a gestão

ambiental, o planejamento urbano e a formulação de políticas públicas voltadas à preservação da água doce subterrânea.

Dessa forma, o presente trabalho justifica-se pela importância estratégica dos aquíferos costeiros para o abastecimento humano em regiões urbanas, pela ausência de estudos locais voltados à vulnerabilidade à intrusão salina, e pela necessidade de fundamentar políticas públicas para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos. Ao propor um diagnóstico técnico com base no método GALDIT, este estudo busca contribuir com o conhecimento científico, com a gestão territorial e com a sensibilização da sociedade civil quanto à importância da preservação da água doce, um recurso essencial, mas cada vez mais ameaçado.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a vulnerabilidade atual à intrusão salina na cidade de Raposa para subsidiar a gestão sustentável das águas subterrâneas no município.

Já os objetivos específicos incluem:

- Realizar a avaliação dos dados geológicos e hidrogeológicos da área de estudo;
- Organizar um banco de dados hidrodinâmicos dos poços tubulares presentes na área de influência da maré;
- Zonear áreas de vulnerabilidade à intrusão salina;
- Propor medidas de mitigação para sustentabilidade hídrica do município de Raposa – MA.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a discussão teórica, fundamentada em autores que versam sobre o tema da dissertação, uma que são indispensáveis para a compreensão do problema da pesquisa.

2.1 Variabilidade hidrológica

A variabilidade hidrológica refere-se às flutuações naturais nos componentes do ciclo hidrológico, como precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e recarga dos aquíferos. Esses processos ocorrem em diferentes escalas temporais e espaciais, sendo controlados por fatores climáticos, geológicos, edáficos e antrópicos. Em regiões costeiras, como a cidade de Raposa (MA), a dinâmica hidrológica desempenha um papel crucial na disponibilidade e qualidade da água subterrânea, sendo essencial para a gestão dos recursos hídricos.

O Brasil possui cerca de 12% da água doce disponível no mundo, porém sua distribuição é altamente influenciada por padrões climáticos regionais (SANTOS, 2012). O regime de chuvas e as vazões das bacias hidrográficas variam significativamente ao longo do território nacional, resultando em períodos de estiagem e eventos de precipitação intensa. Essas variações podem impactar diretamente a disponibilidade hídrica dos rios e a recarga dos aquíferos, além de favorecer eventos extremos, como secas prolongadas e enchentes, com impactos socioeconômicos significativos (MARENGO, 2008).

Os aquíferos desempenham um papel fundamental na regulação hídrica, garantindo o suprimento de água subterrânea de boa qualidade, muitas vezes sem necessidade de tratamento prévio. No entanto, a variabilidade hidrológica pode afetar sua estabilidade, especialmente em regiões litorâneas.

A redução da recarga devido a estiagens prolongadas pode comprometer a disponibilidade hídrica, ao passo que chuvas intensas podem influenciar na qualidade da água subterrânea devido à infiltração de contaminantes. Além disso, a extração excessiva de água subterrânea, associada à urbanização e à alteração do uso do solo, pode potencializar os impactos da variabilidade hidrológica sobre os aquíferos costeiros.

No contexto da cidade de Raposa, a variabilidade hidrológica está diretamente relacionada ao risco de intrusão salina, uma vez que períodos de seca intensa podem reduzir o gradiente hidráulico, facilitando a penetração da cunha salina nos aquíferos costeiros. Assim,

compreender esses processos é essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Ferramentas como modelagem hidrológica e geotecnologias vêm sendo empregadas para monitorar essas variações e subsidiar políticas de manejo eficiente da água subterrânea, sendo o método GALDIT uma abordagem relevante para avaliar a vulnerabilidade à intrusão salina em cenários de variabilidade climática e pressões antrópicas.

2.2 Recursos Hídricos Subterrâneos: Função e Vulnerabilidade

Os recursos hídricos subterrâneos desempenham um papel importante no equilíbrio ambiental e no abastecimento hídrico em diversas partes do mundo. Sobretudo, em regiões costeiras e semiáridas, onde os aquíferos são essenciais para o abastecimento público, atividades industriais, irrigação e na manutenção dos ecossistemas. Em algumas regiões do Brasil, os mananciais subterrâneos se configuram como reservas estratégicas, principalmente em períodos de estiagem ou em locais com grande comprometimento da qualidade da água superficial, que é caso com áreas uma grande concentração populacional (ANA, 2024).

Mundialmente as águas subterrâneas são utilizadas essencialmente para o abastecimento público e para irrigação da produção agrícola (Foster; Chilton, 2003, Todd; Mays 2005). Dada a importância dos recursos hídricos subterrâneos para o abastecimento público, Rebouças (2006) enfatiza que o quanto de água se deve extrair de forma segura de um aquífero é uma questão frequente dos tomadores de decisão. Segundo Meinzer (1920) essa extração seria igual a recarga natural, conceito esse que está obsoleto.

De acordo com Hirata *et al.*, (2019, p. 21), “as águas subterrâneas são a opção exclusiva para 48% dos municípios com população menor que 10 mil habitantes e para 30% daqueles com 10 a 50 mil habitantes.”, considerando que 52% dos municípios brasileiros dependem exclusivamente das águas subterrâneas.

A gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no Brasil teve um grande impulso com a aprovação e implementação da Lei Federal 9433/97 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SNGRH, com o objetivo de estabelecer instrumentos e o uso racional da água a fim assegurar a sua disponibilidade para a atual e futuras gerações.

Para o gerenciamento e implementação de políticas nacionais sobre recursos hídricos foi a Agência Nacional de Águas (ANA), em 17 de julho de 2000, foi editada a Lei nº 9.984 (Brasil, 2000). Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH nº 15/2001

estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas, regulamenta a necessidade de outorga para captação de poços tubulares profundos (Brasil, 2001). O Art. 2º da Política Nacional de Recursos Hídricos visa assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos.

2.3 Intrusão salina em aquíferos costeiros

A intrusão salina é um problema atual que afeta regiões costeiras em diversas partes do mundo, ocorrendo sob condições específicas. De acordo com Cabral (1985, p. 15), “nos aquíferos próximos à costa, situados abaixo do nível do mar, forma-se uma cunha de água salgada que se infiltra sob a água doce e avança em direção ao continente”.

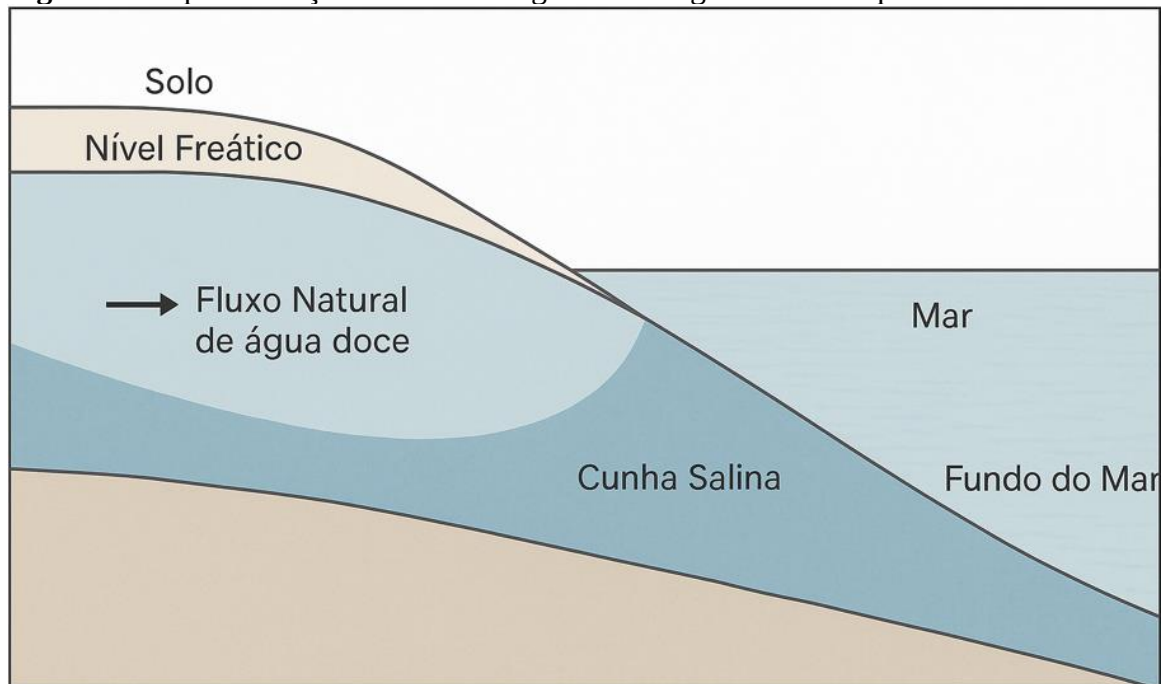
Nas áreas costeiras, a água doce subterrânea vem do continente e encontra o fluxo subterrâneo da água salgada (Vaz, 2017). Em condições naturais, o gradiente hidráulico favorece o fluxo contínuo de água doce subterrânea em direção ao mar, mantendo a cunha salina em equilíbrio hidrodinâmico (Almeida; Silva Júnior, 2007). Esse equilíbrio é representado na Figura 1.

Entretanto, quando ocorre a retirada de água doce por bombeamento excessivo, o equilíbrio é rompido, promovendo o avanço da cunha salina para o interior do aquífero (Almeida; Silva Júnior, 2007, p. 105). A extração contínua rebaixa o nível freático e reduz a pressão da água doce, permitindo que a água salgada avance para restabelecer o gradiente de pressão (Brito *et al.*, 2021).

Fetter (1994) destaca que a principal causa da intensificação da intrusão salina é a intervenção antrópica, seja pela exploração descontrolada dos aquíferos, seja pela impermeabilização de áreas de recarga. Antes da exploração intensiva, a densidade superior da água salgada a mantinha restrita às camadas inferiores do aquífero, enquanto o fluxo natural de água doce evitava seu avanço (Almeida, 2009).

Assim, práticas inadequadas de gestão dos recursos hídricos podem comprometer o equilíbrio natural entre água doce e água salgada, agravando a vulnerabilidade dos aquíferos costeiros à intrusão salina.

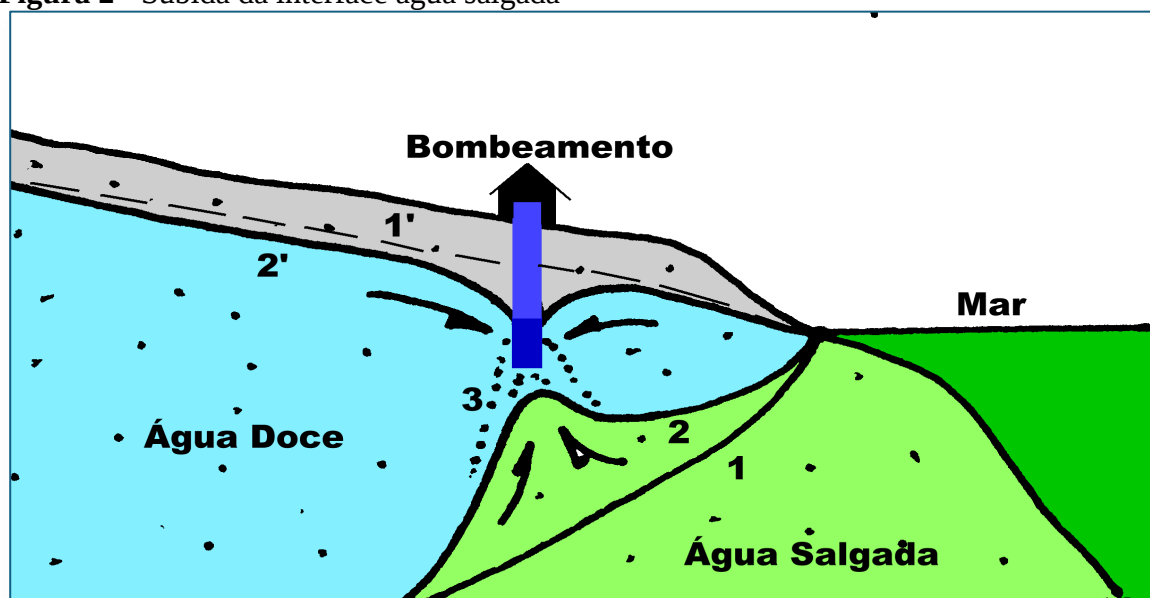
Figura 1- Esquematização da interface água doce/salgada em um aquífero costeiro



Fonte: adaptado de Cruz et. al 2006.

Quando ocorre um desequilíbrio entre a água salgada e a água doce, favorece-se a intrusão da cunha salina. Esse processo é agravado pelo bombeamento, que pode provocar a elevação da interface entre água doce e água salgada, gerando um ponto de gradiente hidráulico horizontal nulo, conhecido como ponto de estancamento. Nessas condições, ocorre acúmulo de sais no entorno, favorecendo a ascensão da água salgada e a consequente contaminação do poço (Figura 2).

Figura 2 - Subida da interface água salgada



Fonte: Leite (2009).

2.4 Hidrogeologia

A hidrogeologia é uma área das Geociências que investiga as águas subterrâneas quanto ao seu movimento, distribuição, quantidade e qualidade, e se subdivide em hidrodinâmica e hidroquímica. A primeira estuda o componente dinâmico das águas subterrâneas, enquanto a segunda investiga a inter-relação química das águas subterrâneas e as rochas (Bueno, 2019).

A caracterização hidrodinâmica dos aquíferos constitui uma etapa fundamental nos estudos de vulnerabilidade, pois permite compreender a capacidade de armazenamento, circulação e exploração da água subterrânea. Entre os métodos aplicados para a obtenção de parâmetros hidráulicos, destaca-se o teste de bombeamento em poços tubulares, o qual possibilita não apenas determinar características hidráulicas do meio aquífero, mas também avaliar o potencial de extração sustentável de água. Os principais parâmetros hidrodinâmicos obtidos por meio dessa técnica são:

- **Vazão:** corresponde ao volume de água extraído do poço por unidade de tempo, a partir do uso de um equipamento de bombeamento.
- **Nível Estático:** profundidade do nível da água em relação à superfície do terreno, medida quando o poço se encontra em repouso (sem bombeamento).
- **Nível Dinâmico:** profundidade do nível da água em relação à superfície do terreno durante o bombeamento.
- **Rebaixamento:** diferença entre o nível estático e o nível dinâmico, expressando a queda do nível da água no interior do poço em função da exploração.
- **Profundidade:** distância perfurada na rocha até atingir o aquífero fornecedor, representando a extensão total do poço tubular.

Para determinar o movimento da água no solo, Henry Darcy, em 1856, realizou experimentos com filtros de areia em Dijon, na França, buscando compreender o comportamento do fluxo de água através de meios porosos. Ele observou que: Quanto maior a carga hidráulica (pressão ou altura da coluna de água que empurrava o fluxo), maior era a vazão (o volume de água que atravessava o filtro). E quanto maior a espessura da camada de areia atravessada pela água, menor era a vazão, porque o caminho percorrido oferecia mais resistência ao fluxo, com a seguinte fórmula:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Onde:

Q = vazão (m^3/s)

K = condutividade hidráulica do meio (m/s), que representa a capacidade do solo/rocha em transmitir água

A = área da seção transversal do fluxo (m^2)

Δh = diferença de carga hidráulica (m)

L = comprimento do trajeto percorrido pela água (m).

Desse modo, foi possível estudar outros parâmetros que são fundamentais para entender o comportamento do aquífero (quadro 01), pode-se destacar: Porosidade, Carga Hidráulica, Condutividade hidráulica (K), Transmissividade (T) e Coeficiente de Armazenamento (S) (Quadro1).

Quadro 1 – Parâmetros essenciais para o estudo dos aquíferos.

Parâmetro	Descrição	Fórmula
Porosidade	A porosidade pode ser classificada em porosidade primária e porosidade secundária. A porosidade primária ocorre geralmente em rochas sedimentares, dando origem aos aquíferos porosos. A porosidade secundária está ligada aos meios anisotrópicos, originando o aquífero fissural, no caso de fraturas e fissuras em rochas cristalinas (principalmente Ígneas e Metamórficas) e o aquífero cárstico, no caso da dissolução de rochas carbonáticas.	$n = \frac{V_v}{V_t}$ n = porosidade Total; V_v = volume de vazios; V_t = volume total.
Carga Hidráulica	Trata-se da energia mecânica de um líquido em movimento que é composta basicamente de três componentes: a energia cinética, a energia potencial gravitacional e a energia de pressão.	
Condutividade Hidráulica (K)	O coeficiente de proporcionalidade K que aparece na Lei de Darcy pode ser chamado de condutividade hidráulica e leva em conta as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma das partículas, arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica). A Condutividade Hidráulica depende das características do meio poroso e das propriedades dos fluidos. A condutividade pode ser expressa por m/s ou	$K = \frac{T}{B}$ K = condutividade hidráulica; T = Transmissividade; b = Espessura do aquífero

	cm/s. Ela pode ser determinada a partir de softwares, fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo.	
Transmissividade (T)	A Transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero.	$T = K \cdot b$ T= transmissividade; K= condutividade hidráulica; b= espessura do aquífero
Coeficiente de Armazenamento (S)	É a capacidade de o aquífero armazenar e transmitir água, dependendo das propriedades do meio poroso.	

Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (1984).

Os parâmetros mencionados estão diretamente interligados aos tipos de rocha e materiais inconsolidados, neste sentido Fetter (1988) aponta os diferentes sedimentos e suas respectivas Condutividades Hidráulicas (K) e porosidade total (n). (quadro 2).

Quadro 2 – Valores de Condutividade hidráulica (K) e porosidade total (n) em diferentes materiais.

Sedimentos	Condutividade Hidráulica (m/s)	Porosidade total (%)
Rochas sedimentares inconsolidadas		
Cascalho	$1 - 10^{-4}$	25-50
Areia bem selecionada	$10^{-3} - 10^{-5}$	20-35
Silte arenoso, areia fina	$10^{-5} - 10^{-7}$	10-20
Silte, areia siltica, argila arenosa	$10^{-6} - 10^{-8}$	35-50
Argila	$10^{-8} - 10^{-11}$	33-60
Rochas sedimentares consolidadas		
Arenito	$3 \times 10^{-10} - 6 \times 10^{-6}$	5-30
Folhelho	$10^{-13} - 2 \times 10^{-9}$	21-41
Calcário	$10^{-13} - 6 \times 10^{-6}$	0-20
Rochas Cristalinas		
Granito	$8 \times 10^{-9} - 10 \times 10^{-4(4)}$	0,1
Basalto	$2 \times 10^{-11} - 10 \times 10^{-7(40)}$	3-35
Rocha cristalina faturada	$8 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-4(4)}$	0-10

Fonte: Adaptado de Fetter (1988).

2.5 Parâmetros de comparação entre Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K), Vazão (Q) e Produtividade

Os aquíferos são considerados a unidade hidrogeológica fundamental sendo frequentemente subdivididos e seus limites não coincidem obrigatoriamente com os limites das unidades estratigráficas, pois uma determinada formação geológica frequentemente apresenta variações litológicas, locais ou regionais, alterando suas capacidades aquíferas, conforme Diniz *et al.*, (2012).

Desta forma, apoiando-se nos trabalhos de Struckmeier e Margat (1995) e Diniz *et al.*, (2012), os aquíferos apresentam as seguintes classes de produtividade, conforme (Quadro 3):

Quadro 3 – Classes de produtividade do aquífero.

Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Vazão (m ³ /h)	Produtividade
$\geq 4,0$	$\geq 10^{-02}$	$\geq 10^{-04}$	≥ 100	Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destacam em âmbito nacional.
$2,0 \leq Q/s < 4,0$	$10^{-03} < T < 10^{-02}$	$10^{-05} < K < 10^{-04}$	$50 \leq Q < 100$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.
$1,0 \leq Q/s < 2,0$	$10^{-04} < T < 10^{-03}$	$10^{-06} \leq K < 10^{-05}$	$25 \leq Q < 50$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.
$0,4 \leq Q/s < 1,0$	$10^{-05} < T < 10^{-04}$	$10^{-07} \leq K < 10^{-06}$	$10 \leq Q < 25$	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.
$0,04 \leq Q/s < 0,4$	$10^{-06} < T < 10^{-05}$	$10^{-08} < K < 10^{-07}$	$1 \leq Q < 10$	Geralmente baixa, porém localmente muito baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.
$< 0,04$	$< 10^{-06}$	$< 10^{-08}$	$< 1,0$	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.

Fonte: Diniz *et al.* (2012).

2.6 Vulnerabilidade de aquífero à contaminação

Neste tópico serão apresentados os conceitos de vulnerabilidade intrínseca e vulnerabilidade específica com base em autores da área.

2.6.1 Conceitos de vulnerabilidade Intrínseca e Específica

O termo vulnerabilidade foi utilizado inicialmente por Albinet e Margat (1970), referindo-se somente a capacidade de um aquífero resistir a um determinado grau de contaminantes dispersos na natureza. Entre os anos 1980 e 1990, o termo vulnerabilidade foi vastamente discutido e utilizado em diversas aplicações, nas quais o termo ganhava múltiplas interpretações ao ser conceituado (FRANCISCO, 2018). Foster e Hirata (1988) ao analisar a temática da vulnerabilidade reafirmam as proposições teóricas, mas acrescentam que as atividades desenvolvidas pelo homem se apresentam como um fator determinante para a elevação do alto grau de um aquífero, resultando assim na sua contaminação. Para Sobrinho *et al.*, (2015) “para o uso sustentável do aquífero é importante avaliar sua vulnerabilidade”.

A vulnerabilidade dos aquíferos é uma questão de destaque, isso ocorre devido à relevância diante da necessidade de termos disponíveis fontes alternativas de abastecimento público e população crescente. Nessas circunstâncias, Kasenow (2002) destaca que:

Além da crescente demanda por água, a escassez, a poluição, as catástrofes causadas por inundações e o envelhecimento das infraestruturas hídricas estão se tornando mais graves. Portanto, a necessidade de planejamento e gerenciamento de desastres está crescendo rapidamente. Esses problemas são especialmente mais significativos nos países em desenvolvimento. As sociedades desenvolvidas também estão se tornando mais vulneráveis, pois são altamente dependentes da água (Kasenow, 2002, tradução do autor).

O conceito de vulnerabilidade é usualmente empregado como sinônimo de fragilidade, sensibilidade ou suscetibilidade a alguma situação adversa. A vulnerabilidade está ligada a um conjunto de características do aquífero que determina o grau em que ele poderá ser afetado pela presença de determinado poluente (SILVA, 2004). A vulnerabilidade é utilizada para representar a característica intrínseca que determina a suscetibilidade de parte do aquífero a ser adversamente afetada por uma carga poluente imposta. A carga poluente pode ser controlada ou modificada, mas não a vulnerabilidade do aquífero (FOSTER *et al.*, 2002).

O conceito de vulnerabilidade natural pode ser interpretado como a suscetibilidade que um sistema apresenta à degradação por meio de um contaminante. Adota-se o conceito de

contaminante recomendado pela Academia de Ciências do Estado de São Paulo (ACIESP), como composto ou conjunto de substâncias que podem desencadear efeitos/impactos negativos ao ecossistema. Foster *et al.*, (1998) classifica a vulnerabilidade em específica ou intrínseca.

A vulnerabilidade específica relaciona-se com o conceito de risco sempre que traz como enfoque o perigo de uma substância poluente específica como fator de deterioração (AUGE, 2007).

Para Foster e Hirata (1988), a vulnerabilidade intrínseca está relacionada aos aspectos hidrogeológicos da área, enquanto a vulnerabilidade específica indica a susceptibilidade de um aquífero à contaminação levando em conta não só os aspectos físicos da área, mas também as características do contaminante.

2.6.2 Métodos de vulnerabilidade

Os métodos utilizados para determinar a vulnerabilidade dos aquíferos se baseiam em parâmetros hidrogeológicos e morfológicos do meio físico, às vezes de difícil aquisição. As vantagens de aplicar métodos de vulnerabilidades que possuem índices estabelecidos é de eliminar ou minimizar a subjetividade no momento da interpretação. Os métodos GOD e DRASTIC são os mais utilizados para caracterização da vulnerabilidade.

2.6.2.1 Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade de Aquíferos

A literatura apresenta diversos métodos para estimar a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, entre eles o método GOD (Foster e Hirata, 1993) e o DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). Ambos são amplamente utilizados no Brasil e no mundo, especialmente em contextos continentais, mas possuem limitações quando aplicados a zonas costeiras, onde a salinização é o principal risco.

O método GOD utiliza três parâmetros (tipo de aquífero, litologia da zona vadosa e profundidade do lençol freático) para gerar um índice de vulnerabilidade. Já o DRASTIC utiliza sete fatores hidrogeológicos com pesos distintos, gerando mapas de vulnerabilidade em ambiente SIG.

No entanto, para áreas costeiras, como o município de Raposa (MA), métodos específicos são mais adequados. Por essa razão, esta pesquisa adota o método GALDIT, por ser desenvolvido especificamente para avaliar a vulnerabilidade à intrusão salina em aquíferos

litorâneos, como discutido na próxima seção, enquanto os métodos GOD e DRASTIC avaliam outros tipos de contaminantes.

2.7 Método GALDIT

2.7.1 Histórico e desenvolvimento do método

O método GALDIT foi desenvolvido por CHACHADI, FERREIRA (2001), para mapear e avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos costeiros a intrusão da água do mar devido a grande retirada de água subterrânea para o abastecimento e outras atividades antrópicas nestas regiões. A presente metodologia foi desenvolvida no âmbito do projeto *EU-Índia INCO-DEV COASTIN* com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade de aquíferos costeiros à intrusão de água do mar CHACHADI, FERREIRA (2007).

Em cada contexto hidrológico estão os aspectos físicos que impactam o potencial da intrusão da água do mar. Os parâmetros mapeáveis de maior importância que controlam a intrusão da água do mar são: G - Ocorrência de Aquífero (tipo de aquífero: não confinado, confinado e confinado com vazamento); A – Condutividade Hidráulica do Aquífero; L – Altura do nível das águas subterrâneas acima do nível do mar; D – Distância da linha de costa (distância para o interior perpendicular à linha da costa); I – Impacto do estado atual da intrusão da água do mar e T – Espessura do aquífero que está sendo mapeado. A cada um dos parâmetros são atribuídos pesos numéricos – quadro 4:

O peso atribuído a cada parâmetro no índice GALDIT varia entre 1 e 4, estando relacionado à maior ou menor influência do parâmetro na vulnerabilidade.

Quadro 4 – Parâmetros GALDIT e Valores de coeficiente de ponderação.

PARÂMETROS	VALOR DO COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO
G – Ocorrência de Aquífero	1
A – Condutividade Hidráulica	3
C\$ L – Nível do Piezômetro (acima do nível do mar)	4
D – Distância da linha de costa	4
I – Impacto do estado atual da intrusão	1
T – Espessura do aquífero	2

Fonte: LNEC (2011).

Após caracterizar cada parâmetro e atribuir o seu valor correspondente, aplica-se a fórmula abaixo para calcular o índice GALDIT:

$$GALDIT = \frac{(1 \times G + 3 \times A + 4 \times L + 4 \times D + 1 \times I + 2 \times T)}{15}$$

Após a obtenção do valor resultante do cálculo, realiza-se o enquadramento da vulnerabilidade, sendo considerada vulnerabilidade elevada $\geq 7,5$; moderada entre 5 e 7,5; e baixa ≤ 5 .

Quadro 5 – Classes de vulnerabilidade

CLASSES DE VULNERABILIDADE	ÍNDICE GALDIT
Vulnerabilidade elevada	$\geq 7,5$
Vulnerabilidade moderada	5 – 7,5
Vulnerabilidade baixa	≤ 5

Fonte: LNEC (2011).

G – Ocorrência de Aquífero (tipo de aquífero) – As águas subterrâneas podem ser encontradas em diversas estruturas geológicas. Essas formações são denominadas de aquíferos que por sua vez são capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser utilizados como fonte de abastecimento para diferentes formas de uso (Feitosa *et al.*, 2008).

De acordo com CHACHADI, FERREIRA (2007), os aquíferos podem ser classificados em confinados, não confinados, confinados com vazamento ou limitados por um ou mais limites. A intrusão da água do mar depende dessas características básicas da ocorrência da água subterrânea.

Ainda segundo CHACHADI, FERREIRA (2007, p 2) “um aquífero não confinado em condições naturais seria mais afetado pela intrusão do que um aquífero confinado” pela razão do aquífero confinado está sob maior pressão superior da atmosfera. O aquífero confinado com vazamento é menos sensível à intrusão da água do mar em relação ao aquífero confinado, por possuir uma pressão hidráulica mínima por meio do vazamento de aquíferos subjacentes. Portanto, ao determinar valores ao parâmetro G deve-se considerar os tipos de aquíferos da área, a quadro 6 a seguir apresenta o valor atribuído para diferentes condições hidrogeológicas:

Quadro 6 – Classificação do parâmetro G – Ocorrência de Aquífero

Parâmetro	Peso	Variáveis do parâmetro	Valor das variáveis
Ocorrência de aquífero (tipo de aquífero)	1	Aquífero confinado	10
		Aquífero não confinado	7,5
		Aquífero confinado com vazamento	5
		Aquífero delimitado (limite de recarga e/ou impermeável	2,5

		alinhado paralelamente para a costa	
--	--	-------------------------------------	--

Fonte: LNEC (2011).

A – Condutividade Hidráulica do Aquífero – A condutividade hidráulica mede a capacidade de um meio poroso (rocha ou sedimento) de transmitir água. Para Terceiro et. al (2009, p. 4), a condutividade hidráulica do aquífero é utilizada “para medir a velocidade de fluxo de água no aquífero, para mar”. Este parâmetro influencia a dimensão da intrusão da água do mar, deste modo, quanto maior for a CH maior será o avanço da cunha salina sobre o aquífero.

Conforme Terceiro *et al.*, (2009) a cunha salina não tende a avançar somente nos períodos de estiagem, quando a recarga naturalmente é menor, mas em regiões onde a superexploração como ocorre em aquíferos costeiros, já que o uso de água doce causa o rebaixamento do nível do aquífero promove a intrusão salina para o continente, como aponta Novo (2007). Para CHACHADI, FERREIRA (2007) a condutividade hidráulica pode ser estimada a partir de dados de testes de bombeamento, bem como de registros litológicos. O Quadro 7 contém as diferentes classes e valores deste parâmetro.

Quadro 7 – Classificação do parâmetro A – Condutividade Aquífero do aquífero

Parâmetro	Peso	Variáveis do parâmetro		Valor das variáveis
Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	3	Alta	> 40	10
		Média	10 – 40	7,5
		Baixa	5 – 10	5
		Muito baixa	< 5	2,5

Fonte: LNEC (2011).

L – Nível do Piezômetro (acima do nível do mar) – Para CHACHADI, FERREIRA (2007), o nível da água subterrânea em relação à elevação média do mar é um fator muito importante na avaliação da intrusão marinha em uma área, principalmente porque determina a disponibilidade de pressão hidráulica para empurrar de volta à frente de água do mar.

Desta forma, quanto maior for o nível de água subterrânea acima do nível médio do mar, maior será a carga hidráulica e consequentemente menor o risco de intrusão marinha, em casos inversos, o sistema aquífero será mais vulnerável a intrusão. O Quadro 8 contém as diferentes classes e valores deste parâmetro.

Quadro 8 – Classificação do parâmetro L – Nível do Piezômetro

Parâmetro	Peso	Variáveis do parâmetro		Valor das variáveis
Nível do Piezômetro (m)	4	Alta	< 1.0	10
		Média	1.0 – 1.5	7,5
		Baixa	1.5 – 2.0	5

		Muito baixa	> 2.0	2,5
--	--	-------------	-------	-----

Fonte: LNEC (2011).

D – Distância da linha de costa – O impacto causado pela intrusão marinha diminui quando aumenta a distância perpendicular à linha da costa (CHACHADI, FERREIRA, 2007). A distância entre o aquífero e o mar é um dos principais fatores que controlam a possibilidade de intrusão salina. Esse parâmetro avalia quão próximo o sistema aquífero está do litoral, assumindo que quanto menor essa distância, maior será a influência da água do mar sobre o lençol freático.

Destaca-se que em áreas próximas ao mar, com baixas altitudes e relativamente planas a pressão da água do mar pode facilmente superar a pressão da água do aquífero, facilitando o avanço da cunha salina para o continente. O quadro 9 apresenta os valores empregados para este parâmetro.

Quadro 9 – Classificação do parâmetro D – Distância da linha de costa

Parâmetro	Peso	Variáveis do parâmetro		Valor das variáveis
Distância da linha de costa (m)	4	Muito pequeno	< 500	10
		Pequeno	500 - 750	7,5
		Médio	750 - 1000	5
		Longe	> 1000	2,5

Fonte: LNEC (2011).

I– Impacto do estado atual da intrusão da água do mar – Este parâmetro avalia a situação da intrusão marinha no momento da análise, ou seja, se já há indícios ou confirmação da intrusão no aquífero, CHACHADI e LOBO-FERREIRA (2001) recomendam a relação $Cl^- [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$, para avaliar a intrusão da água do mar nos aquíferos costeiros.

Para os elaboradores do método GALDIT CHACHADI, FERREIRA, (p. 6, 2007), “O cloreto é o íon dominante na água do mar e só está disponível em pequenas quantidades na água subterrânea, enquanto o bicarbonato, que está disponível em grandes quantidades na água subterrânea, ocorre em quantidades muito pequenas na água do mar” Martins (2019) recomenda usar a razão Ca^{2+}/Mg^{2+} em caso de dados $Cl^- [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$, o quadro 10 apresenta os valores deste parâmetro.

Quadro 10 – Classificação do parâmetro I – Impacto do estado atual da intrusão

Parâmetro	Peso	Variáveis do parâmetro $Cl^- [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$		Valor das variáveis
Impacto do estado atual da intrusão	1	Alto	> 2	10
		Médio	1.5 – 2.0	7,5
		Baixo	1 – 1.5	5

		Muito baixo	< 1	2,5
--	--	-------------	-----	-----

Fonte: LNEC (2011).

T – Espessura do aquífero – Conforme CHACHADI e LOBO-FERREIRA (2007), a espessura do aquífero ou a espessura saturada de um aquífero não confinado desempenha um papel importante na determinação da extensão e da magnitude da intrusão marinha em áreas costeiras. Quanto maior a espessura do aquífero, maior a espessura da água do mar e vice-versa. Tendo isso como diretriz, as seguintes classificações são dadas para várias faixas de espessura do aquífero (Quadro 11).

Quadro 11 – Classificação do parâmetro T – Espessura do aquífero

Parâmetro	Peso	Variáveis do parâmetro		Valor das variáveis
Espessura do aquífero (m)	2	Grande	> 10	10
		Médio	7.5 - 10	7,5
		Pequeno	5 – 7.5	5
		Muito pequeno	< 5	2,5

Fonte: LNEC (2011).

2.8 Aplicação do método GALDIT

O Método GALDIT, desenvolvido para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos a intrusão marinha, embora tenha sido criado para ser aplicado em regiões costeiras da Índia, tem sido utilizado no Brasil por diversos pesquisadores, já que características de aplicação do método (áreas costeiras e clima tropical), justificam a sua aplicabilidade em grande parte do litoral brasileiro.

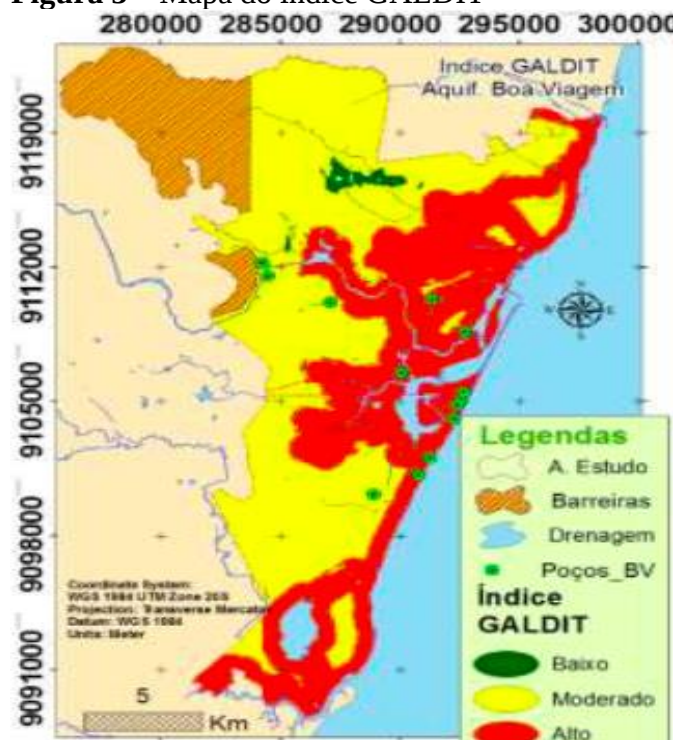
O presente método foi aplicado em várias partes do mundo como, por exemplo, Aquífero Monte Gordo, Portugal (LOBO FERREIRA *et al.*, 2005) Zona costeira de Goa (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2005), bacia hidrográfica do Pindaré (PEREIRA *et al.*, 2011) e Zona de costa da Guiné-Bissau (TERCEIRO e LOBO FERREIRA, 2010), Região Costeira da Índia (SATISHKUMAR *et al.*, (2016), Mediterrâneo (ZAAROUR, 2017) e outros.

No trabalho desenvolvido por Silva (2018), ao aplicar o método GALDIT, não gerou a interpolação dos dados obtidos de cada parâmetro para que fosse possível fazer a análise da vulnerabilidade espacialmente, mas obteve os valores dos respectivos índices e assim chegou ao grau de vulnerabilidade por meio da fórmula do Índice GALDIT = $TS / (\sum_{i=1}^6 W_i)$, o Índice GALDIT resultou na baixa vulnerabilidade para todos os 12 poços.

Em um artigo desenvolvido por Sobrinho *et al.*, (2015), os autores justificam o uso do GALDIT como o mais apropriado em comparação com outros métodos (GOD e DRASTIC), para mapear a vulnerabilidade à intrusão salina. Conforme os autores, nem sempre as áreas mais suscetíveis à intrusão são aquelas que se avizinham à costa, a salinização “pode ser conduzida pelas calhas dos rios e córregos que por influência dos movimentos de maré conduzem as águas salinas por alguns quilômetros para o interior do continente” (SOBRINHO *et al.*, 2015, p. 128). Além disso, as águas salinas podem alcançar os aquíferos freáticos por meio dos mangues estuarinos, e através da percolação podem atingir os aquíferos semiconfinados que estão abaixo destes.

A espacialização do índice GALDIT indicaram majoritariamente áreas de vulnerabilidade moderada, representada pela cor amarela e de vulnerabilidade alta indicada pela cor vermelha (figura 2). O método GALDIT considera não só o risco de um poluente vindo da parte superior (como outros métodos tradicionais), mas considera a contribuição lateral vindo do mar ou de corpos d’água superficiais salinizados.

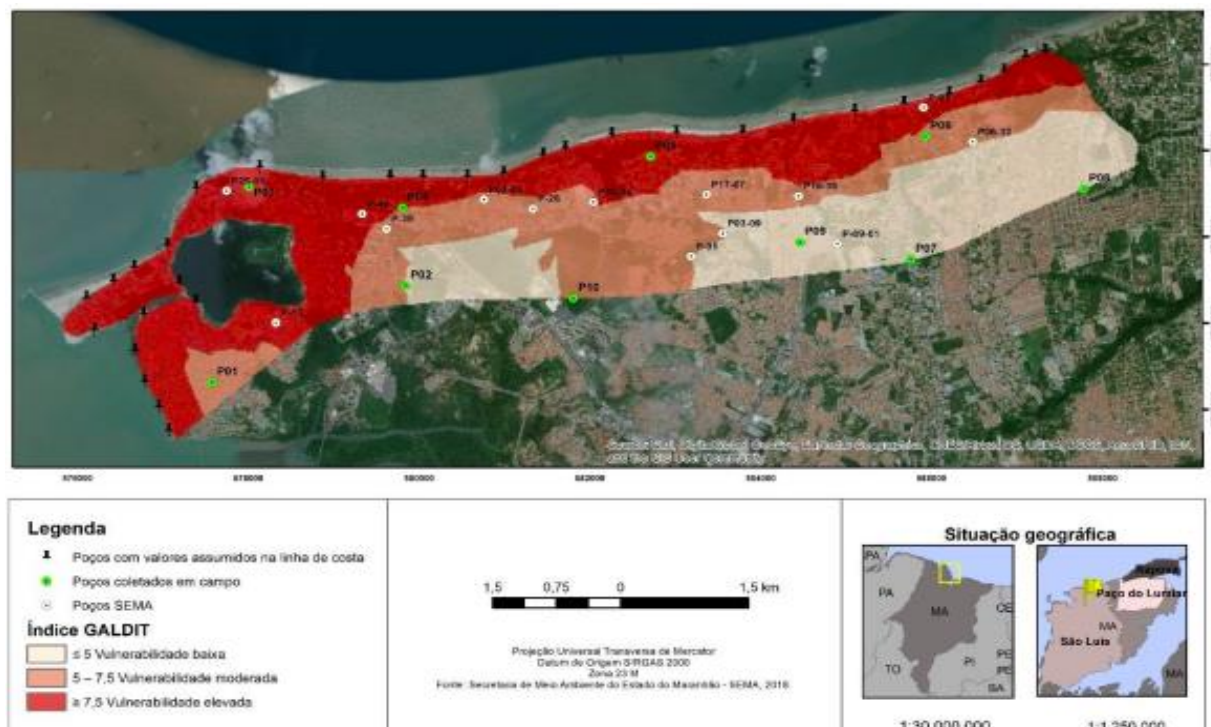
Figura 3 – Mapa do índice GALDIT



Fonte: Sobrinho (2015).

No estudo realizado por Castro, Pereira e Oliveira, (2022) na Franja costeira de São Luís (MA), identificou áreas de vulnerabilidade elevada, médio e baixa. Observa-se que as áreas mais sensíveis à intrusão marinha são as mais próximas à linha da costa (figura 4).

Figura 4 – Franja costeira de São Luís (MA): Carta de Vulnerabilidade à Intrusão Marinha – Método GALDIT.



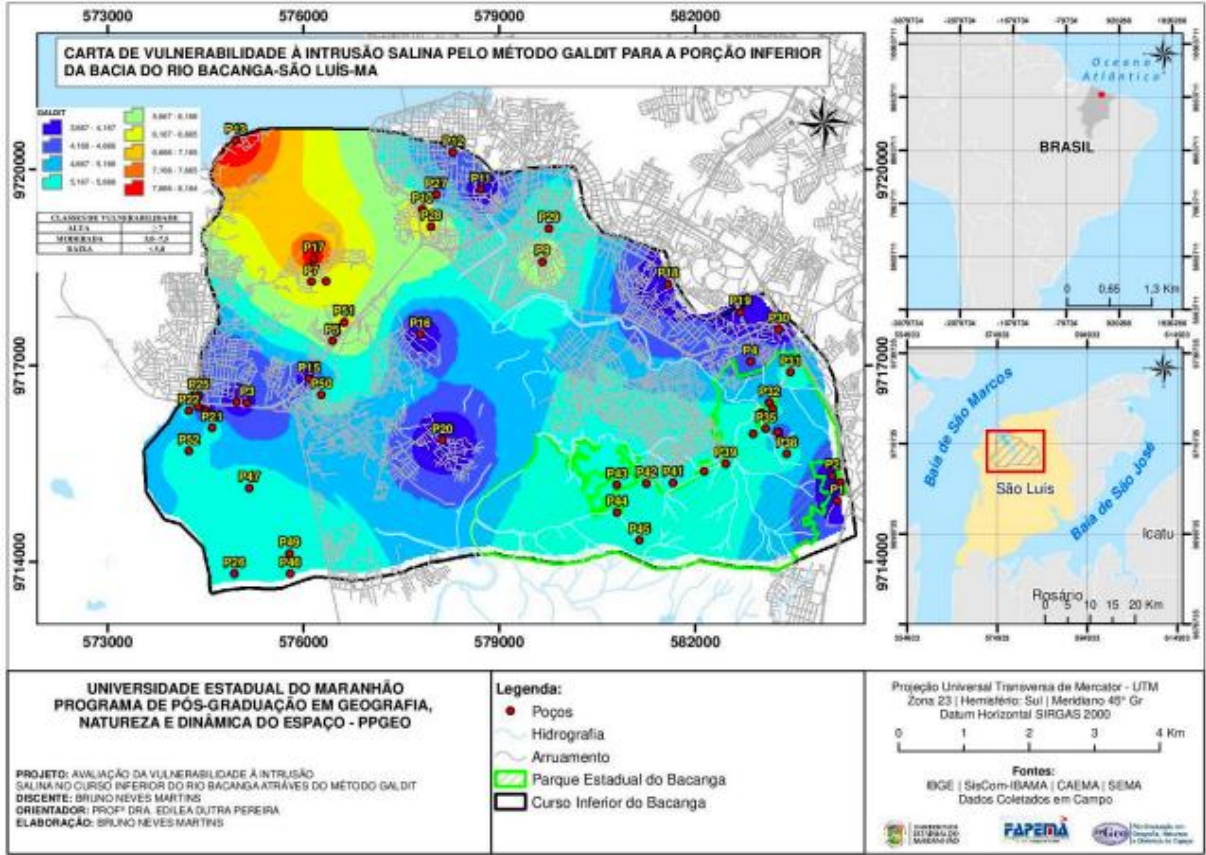
Fonte: Castro, Pereira e Oliveira (2022).

Os autores destacam que a intrusão salina pode ser facilitada pelas calhas dos rios Anil, Calhau e Pimenta, bem como por córregos adjacentes, os quais, sob influência das marés, permitem o avanço das águas salinas para o interior da cidade de São Luís. Esse fenômeno foi constatado a partir da análise de poços tubulares.

A análise espacial dos parâmetros do método GALDIT indica que as áreas com maior densidade de poços tubulares, especialmente aquelas situadas nas proximidades da faixa costeira, apresentam níveis médio e alto de vulnerabilidade à intrusão salina. Essa vulnerabilidade pode estar relacionada tanto à proximidade com o mar quanto à intensa exploração das águas subterrâneas, fatores que favorecem o avanço da cunha salina. A concentração de poços próximos ao litoral configura-se como um fator crítico, uma vez que contribui diretamente para a intrusão de água do mar nos aquíferos costeiros (Castro, Pereira e Oliveira, 2022).

A pesquisa desenvolvida por Matins (2018), no curso inferior do rio Bacanga, aponta “vulnerabilidade a intrusão salina alta registrada na área próxima a foz da bacia do rio Bacanga indica infiltração lateral da cunha salina”. E observou-se que o curso inferior da bacia do rio Bacanga se enquadra em sua maior extensão entre as vulnerabilidades moderadas a baixas (Figura 5).

Figura 5 – Carta de Vulnerabilidade à Intrusão Salina pelo método GALDIT do curso inferior da bacia do Rio Bacanga - São Luís- MA



Fonte: Martins, 2018.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste item é apresentada a descrição dos materiais e procedimentos utilizados, além das etapas empregadas no desenvolvimento do trabalho, para melhor identificação das condições geológico-geotécnicas, de modo a possibilitar a caracterização do meio físico na área estudada. O método científico que se fará uso é o hipotético-indutivo, que parte da observação e experimentação, tendo sua origem no problema, no qual procura soluções por meio de tentativas, hipóteses e teoria.

3.1 Levantamento e análise de material bibliográfico

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica e documental para fundamentação da dissertação por meio de livros, teses e dissertações, artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, utilizando o *Google Scholar* e Portal de Periódicos da CAPES CAF's (*Web of Science e Scopus*), na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações - BDTD, além de fontes oficiais como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, Laboratório de Estudos de Bacias – LEBAC/UFMA, além das informações levantadas em campo, fornecidas pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE.

3.2 Material cartográfico

Neste trabalho, foi utilizado no ambiente SIG, o Modelo Digital de Elevação (MDE) de resolução espacial de 12,5m, do satélite *Alos Palsar*, os limites territoriais do município de Raposa e da Ilha de São Luís foi utilizados dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB), das feições fisiográficas utilizou-se dados do Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE - MA) e do Serviço Geológico do Brasil (SGB), antiga CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, enquanto o limite estadual foi do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Para o desenvolvimento deste estudo foram usados parâmetros constantes nas literaturas que tratam do assunto e, depois foram realizadas as adaptações através da aplicação de técnicas de geoprocessamento envolvendo sistemas de informações geográficas (SIGs) e modelagem digital de elevação, utilizando-se o *ArcGis* 10.4 e *ArcGis* Pro.

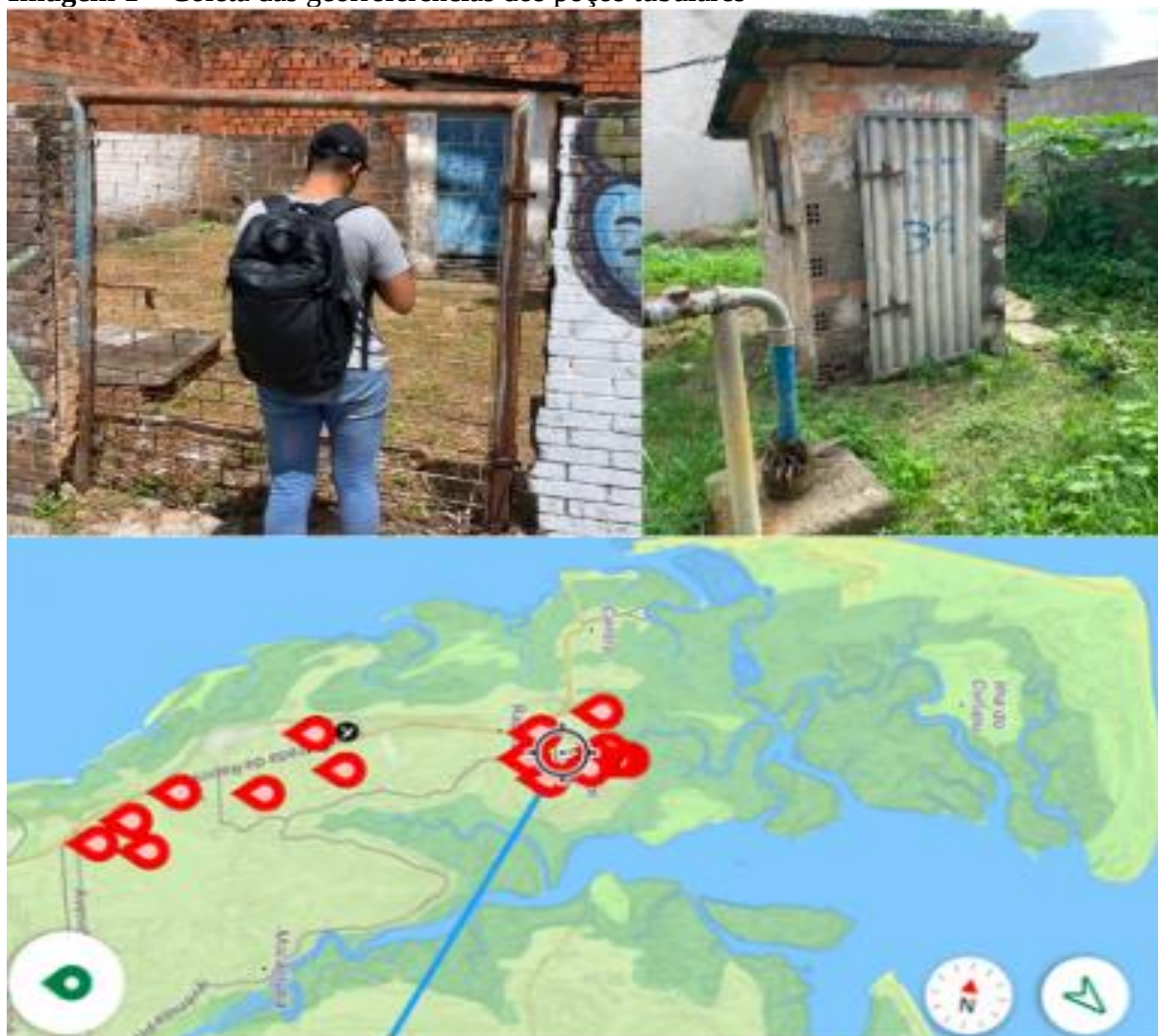
3.3 Trabalho de campo, coleta, organização e tratamento dos dados

Nesta etapa, os dados dos poços tubulares existentes na área da cidade de raposa foram adquiridos a partir do acervo do Serviço Autônomo de Água e Saneamento – SAAE.

A estatal, inicialmente, disponibilizou uma lista contendo 37 poços tubulares (trinta e sete) na área de estudo, posteriormente o SAAE disponibilizou dados de 25 poços (vinte um), no entanto, não tinham informações, como coordenadas geográficas essenciais para o mapeamento.

Em razão da ausência dessa informação, foi feito trabalho de campo nos dias 10, 11 e 13 de junho de 2025 com a finalidade de coletar as georreferências. A partir da lista dos poços, onde tinha o bairro e a rua, foi possível localizar os poços, foi priorizado aqueles que apresentavam informações para ser aplicadas na pesquisa. A coleta das coordenadas geográficas foi feita pelo aplicativo Avenza Maps (Figura 1).

Imagem 1 – Coleta das georreferências dos poços tubulares



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Os dados foram georreferenciados e organizados em planilhas Excel, com a presença de informações como: coordenadas geográficas, profundidade, vazão, nível estático, nível dinâmico, e outros. Além de analisar as características hidrogeológicas dos poços, foram tabulados os dados das análises físico-químicas da água dos poços. Ressalta-se ainda, a existência, em alguns casos, de perfil litológico e, o que viabilizará a classificação dos aquíferos em livre, semiconfinado e confinado, por exemplo.

Em outubro de 2025, foi realizado um novo trabalho de campo (Imagem 2) com o objetivo de coletar amostras de água subterrânea para análises físico-químicas de cloreto e bicarbonato, visando avaliar o estado atual da intrusão salina no município de Raposa.

Os trabalhos de campo foram executados em parceria com alunos de graduação e Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Maranhão – UFMA do Laboratório de Estudo de Bacias - LEBAC, onde foram realizados o mapeamento sistemático e a coleta de água subterrânea na área de interesse.

3.3.1 Coleta de água nos poços tubulares para análise físico-química

Os dados físico-químicos da água dos poços tubulares são necessários para a classificação do parâmetro I. As amostras de água dos poços tubulares da área de estudo foram coletadas (Imagem 1) após cinco minutos com a torneira aberta e, em seguida, encaminhadas ao Laboratório CERNITAS – Análises Ambientais e Diagnóstico Veterinário.

Foram analisados os teores de cloretos e bicarbonatos, os quais indicaram concentrações nas águas subterrâneas, proporcionando maior compreensão sobre o comportamento do fenômeno de avanço da intrusão salina e da resposta do aquífero frente à amplitude de maré, juntamente com os demais compostos inorgânicos presentes na rocha e na água subterrânea.

Imagem 2 – Coleta da água subterrânea em poços tubulares



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

3.5 Análise do perfil litológico e determinação dos dados hidrodinâmicos

Foram elaborados três perfis (Figuras 20, 21 e 22, seção 6.5) do substrato geológico através da análise dos dados da planilha da coluna estratigráfica de 12 (doze) poços tubulares que forneceram a indicação das características litológicas e hidrodinâmicas dos aquíferos Itapecuru e Barreiras e sua espessura ao longo do Município de Raposa.

Para a elaboração dos perfis litológicos, foram desenvolvidas as seguintes etapas: 1. Traçado de cada perfil passando pelos poços previamente definidos, com a finalidade de gerar o perfil de elevação, realizado no *Google Earth Pro* e posteriormente exportado em arquivo contendo os pontos; 2. Processamento do arquivo com os pontos do perfil de elevação no *GPS Visualizer*, que converteu os dados gerados no *Google Earth Pro* em planilha no *Excel*; 3. Cada ponto traçado no perfil passou a conter informações de elevação e coordenadas geográficas,

possibilitando a elaboração do perfil de elevação no *Excel*; 4. Após o tratamento dos dados no *Excel*, realizou-se a mensuração das profundidades e o desenho dos poços tubulares nos respectivos pontos do perfil.

3.6 Determinação do nível estático dos poços (NE)

O NE é a profundidade do nível da água dentro do poço, quando não está em bombeamento. Medido geralmente em metros (m) em relação à boca do poço. Os termos de outorgas utilizados descartam a distância da boca do poço em relação à cota do terreno.

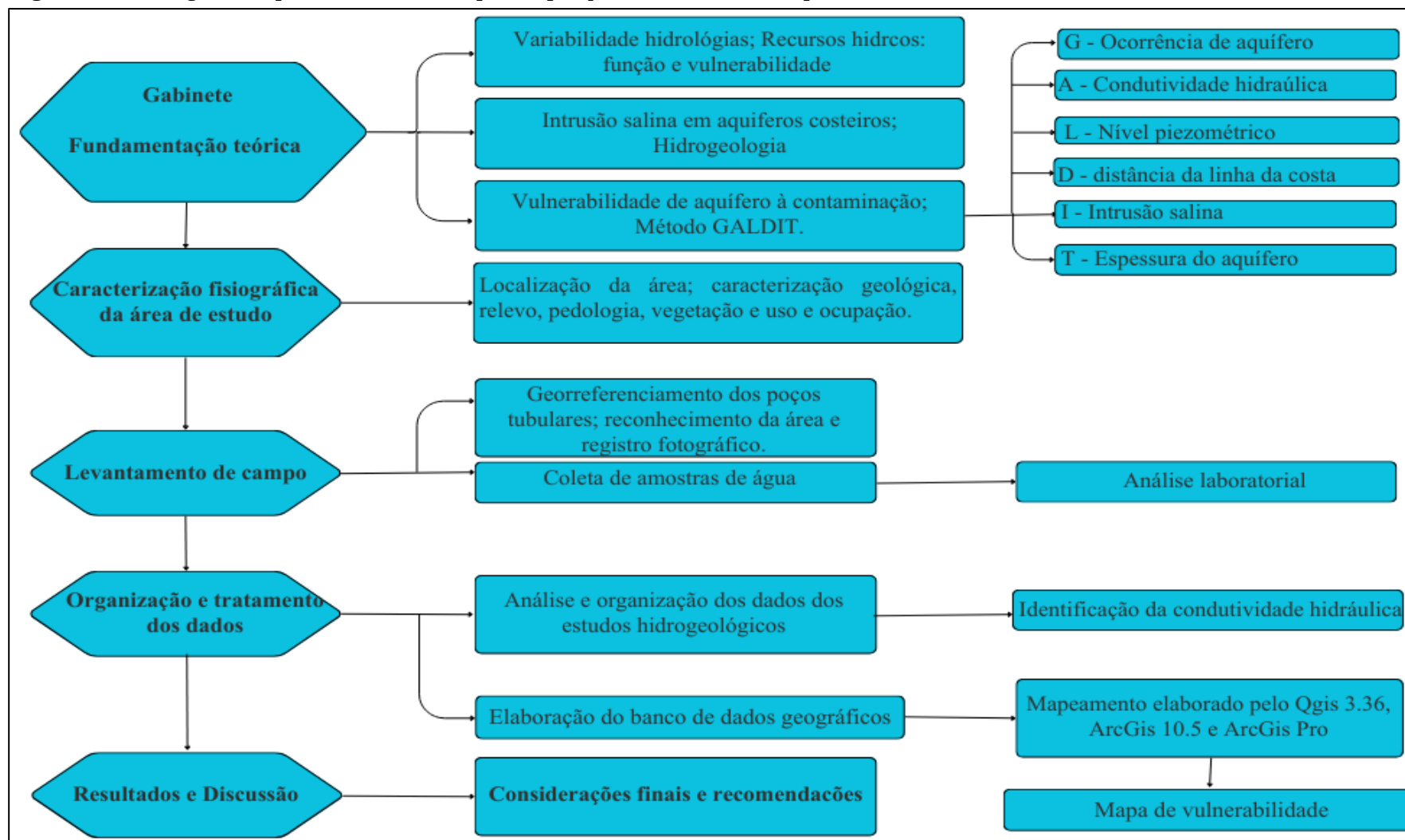
Essa etapa analisa o comportamento do aquífero aferindo o nível de água subterrânea. com essa informação será possível o atendimento da variável do parâmetro L (Nível acima do mar), o qual avalia o nível piezométrico.

3.7 Parâmetros de Condutividade Hidráulica (K)

Para determinar os parâmetros hidráulicos do aquífero, foi utilizado o método de Hantush e Jacob (1955), utilizando os testes de bombeamento para análise das características hidrodinâmicas de aquíferos semiconfinados e confinados. E para caracterizar o aquífero livre, foi analisado os termos de outorga para identificar características geológicas correspondentes ao aquífero e a profundidade do NA (nível da água). O levantamento dos dados referidos é importante para determinar os parâmetros G (ocorrência de aquífero) e A (Condutividade Hidráulica), este último foi obtido a partir do levantamento de dados hidrogeológicos da bacia do rio Paciência (Santos *et al.*, 2020).

As etapas da pesquisa foram representadas, de uma forma resumida, através do fluxograma exibido a seguir (figura 6).

Figura 6 – Fluxograma representativo das etapas da pesquisa na cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este item apresenta a caracterização dos principais componentes físico-naturais da área de estudo, com o objetivo de subsidiar a compreensão da dinâmica geoambiental da região.

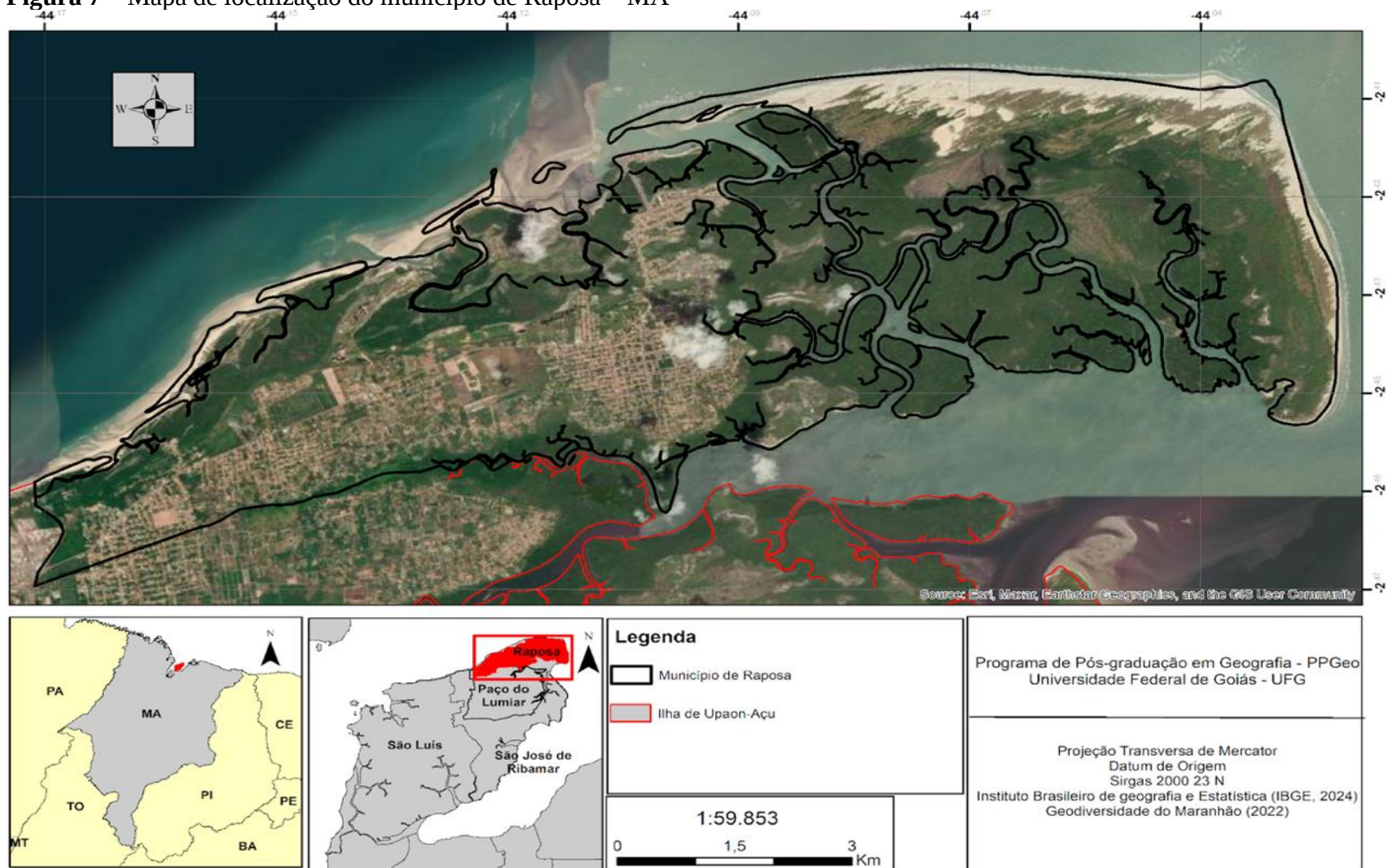
4.1 Localização geográfica e extensão da cidade de Raposa

A cidade de Raposa, localizada na mesorregião do Norte Maranhense, entre as coordenadas geográficas 2°24' e 2°28' S e 44°01' e 44°06' W (Figura 4), limita-se ao norte com o Oceano Atlântico e ao com os municípios de São José de Ribamar e Paço do Lumiar. Está a 30 km do centro de São Luís, pertence à Ilha de São Luís, juntamente com os municípios de São Luís, São José de Ribamar e Paço do Lumiar. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o município de Raposa, no ano de 2022, tinha 30.839 habitantes, com uma densidade populacional de 389,32 hab/km².

O município de Raposa, juntamente com os municípios de São Luís, São José de Ribamar e Paço do Lumiar, compõe a Ilha de São Luís. Emancipado de Paço do Lumiar em 1994, Raposa é conhecido entre os moradores da Ilha de São Luís por suas peculiaridades locais, tais como: a pesca, o artesanato, a renda de bilro e o turismo direcionado à Ilha de Curupu (Silva, 2021).

A sua história e a sua dinâmica socioeconômica atual diretamente ligada à pesca, a renda de bilros (pequenos utensílios de madeira) e ao turismo. Para Silva (2021), as atividades acima citadas garantem o sustento de parte considerável da população do município. O Município é composto por uma comunidade que se mantém basicamente da pesca artesanal, incluindo peixes, mariscos e crustáceos. Com o estabelecimento dos pescadores e consequente vinda de seus familiares, o local tornou-se uma vila de pescadores e posteriormente virou um município da Ilha de São Luís (Monteles et.al., 2009).

Figura 7 – Mapa de localização do município de Raposa – MA



Fonte: Dados de pesquisa, 2025.

4.2 Aspectos geológicos

A cidade de Raposa, situada na Ilha de São Luís, no norte do estado Maranhão, encontra-se sob a Bacia Costeira São Luís – Grajaú, do tipo *rift*, originada pela separação dos continentes africano e sul-americano ao final da fragmentação do continente *Gondwana*, no Cretáceo (Paz, 2005). A bacia possui uma espessura de 4.500 m, sendo composta por rocas paleozoicas, mesozoicas e cenozoica.

A Bacia São Luís – Grajaú tem na sua composição rochas da Bacia do Parnaíba, do cinturão de dobramentos Gurupi e Tocantins-Araguaia e do Cráton São Luís (Góes, 1995). Limita-se ao norte pela plataforma continental, ao sul pelos Altos Estruturais Arco Ferrer - Urbano Santos, a oeste pelo Arco de Tocantins, e a leste pelo Horst de Rosário (PEREIRA, 2006) e apresenta uma estrutura extensa de direção NW-SE, com falhas tectonicamente ativas do período Cretáceo até o recente (ROSSETTI, 2006).

A deposição de sedimentos na Bacia de São Luís começou com os materiais do Cretáceo da Formação Itapecurú, seguida pela Formação Terciário-Paleógeno, a Formação Barreiras e, por último, pelos sedimentos mais recentes da Formação Açuí (Pereira, 2006). O município de Raposa é constituído por rochas do Mesozoico, do Grupo Barreiras, e por depósitos superficiais do Quaternário, por Depósitos de pântanos e mangues e Depósitos Litorâneos.

4.2.1 Grupo Barreiras (N12b)

A Formação Barreiras é uma unidade geológica de natureza sedimentar que se estende por quase todo o litoral do Brasil, indo do Amapá ao Rio de Janeiro. O Formação Barreiras possui uma cobertura sedimentar terrígena continental e marinha (ARAI, 2006), de idade miocênica a pleistocênica inferior (SUGUIO; NOGUEIRA, 1999; VILAS BOAS; SAMPAIO; PEREIRA, 2001).

De acordo com Santos *et al.*, (2019, p. 54), os sedimentos do Grupo Barreiras são inconsolidados, apresentando coloração amarelada a avermelhada, com granulometria que varia de areia fina a argila, estrutura maciça e, por vezes, mosqueada. É comum a presença de lateritas, que podem estar concentradas em camadas ou dispersas ao longo do perfil, como exemplificado na Imagem 1.

Imagem 3 – Afloramento do Grupo Barreiras



Fonte: Ribeiro, 2016.

Autores como Arai (2006) e Ferraz e Valadão (2005) defendem a classificação do Barreiras como um grupo, uma vez que engloba ao menos duas sequências estratigráficas distintas, denominadas Barreiras Inferior e Barreiras Superior. Essa abordagem tem sido consolidada em publicações recentes, como Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão (CPRM, 2012), Geodiversidade do Estado do Maranhão (CPRM, 2013), Zoneamento Ecológico-Econômico do Maranhão (IMESC, 2019) e Geodiversidade da Ilha do Maranhão (CPRM, 2020), entre outras.

4.2.2 Formação Itapecuru

A Formação Itapecuru se expande por grande parte da Ilha de São Luís. Ocorre subsuperficialmente, excetuando-se na porção noroeste da Ilha onde aflora em dois pontos localizados no Farol de São Marcos e na Ponta da Madeira (Sousa, 2000).

Segundo Pereira (2006), a sua litoestrutura do período do Cretáceo foi subdividida em: Membro Inferior Psamítico e Membro Superior Alcântara. seguindo a mesma autora “O Membro Inferior Psamítico compõe-se por arenitos avermelhados e esbranquiçados, finos a médios, caulíníticos, com estratificação cruzada, silítos, calcarenitos e siltitos micáceos.” (PEREIRA, 2006, p. 66).

O Membro Alcântara é composto predominantemente por siltitos e folhelhos vermelhos, coesos e finamente laminados em plano paralelo, intercalados com bancos de calcários creme a esbranquiçados, de geometria tabular a lenticular. Essas rochas representam o último registro deposicional do Cretáceo Superior na plataforma (RODRIGUES *et al.*, 1994).

4.2.3 Depósito de pântanos e mangues (Q2pm)

Os Depósitos de Mangues (Q2pm) (Imagem 2), são do Holoceno e são mais representativos no litoral noroeste do Maranhão (VILLWOCK *et al.*, 2005). De acordo com Klein *et al.* (2012, p. 86-87), “os Depósitos de Mangue constituem extensas planícies lamosas de até 27 km de largura e ficam situados entre os limites de maré alta e baixa, assim sendo inundados regularmente pela maré semi-diurnas”.

Imagem 4 – Depósitos de Mangues na cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

De modo geral, os Depósitos de Mangues são formados por sedimentos lamosos de coloração acinzentada, com elevado teor de matéria orgânica (KLEIN *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2019). Esses depósitos compõem ambientes de elevada relevância ecológica, desempenhando um papel fundamental no equilíbrio dos ecossistemas costeiros e na manutenção da biodiversidade marinha.

4.2.4 Depósitos litorâneos (Q2I)

Trata-se de depósitos localizados na zona costeira, constituídos por areias finas, esbranquiçadas, quartzosas, bem selecionadas e com presença de minerais pesados. Esses sedimentos ocorrem ao longo da faixa litorânea, formando dunas móveis e fixas, geralmente nas formas de barcanas e dunas transversais, originadas pela ação dos ventos predominantes de nordeste (NE), sob influência, principalmente, das marés.

Aos Depósitos Litorâneos, Veiga Junior (2000), esclarece que se localizam na faixa costeira, compondo os depósitos arenosos de toda zona de praia da planície costeira atual, levemente inclinada em direção ao mar, submetida à ação das marés. As praias são compostas por areias esbranquiçadas, de granulometria fina a média, bem selecionadas.

Esses depósitos litorâneos são amplamente encontrados no litoral do Maranhão, em praias da zona costeira como Olho D'Água, Panaquatira e Raposa (na Ilha de São Luís); Baronesa e Mamuna (em Alcântara); Carutapera (na Ilha dos Lençóis); Bate Vento (em Cururupu); Quaxanduba (em Icatu), entre outras.

4.2.5 Caracterização Hidrogeológica dos aquíferos Barreiras e Itapecuru no Maranhão

Na Ilha de São Luís, segundo Rodrigues *et al.*, (1994), a unidade hidrogeológica predominante na área é o aquífero Itapecuru, o qual é conhecido por não ser um bom aquífero para exploração de água subterrânea, apesar de fornecer água para o abastecimento de pequenas áreas. Esta formação possui limitações em armazenar água subterrânea. Em contrapartida, o aquífero Barreiras destaca-se por ser favorável a exploração de áreas com espessa camada de sedimentos Neógenos, os quais são essencialmente arenosos.

Os aquíferos Barreiras e Itapecuru estão entre as principais unidades hidrogeológicas explotadas no estado do Maranhão, especialmente na região costeira onde se insere o município de Raposa

O Aquífero Barreiras apresenta espessura que pode variar de 18 a 38 metros e é composto por sedimentos de granulometria finas a médias, com níveis intercalados de argilas (Pereira, 2006). Os níveis arenosos apresentam pequena espessura, o que favorece o rápido deslocamento das águas subterrâneas, que, por sua vez, tendem a infiltrar-se rapidamente para o aquífero semiconfinado ou aflorar em áreas de descarga situadas ao longo das encostas e nos grotões da região (COSTA, 2003)

Segundo a classificação adaptada por Diniz (2012), o aquífero Barreiras possui produtividade geralmente baixa, podendo ser localmente moderada, o que o enquadram nas Classes 3 e 4 de produtividade. Isso significa que seus poços apresentam, em geral, vazões entre 0,4 e 2,0 L/s, com transmissividades variando de 10^{-4} a 10^{-6} m²/s e condutividades hidráulicas entre 10^{-5} e 10^{-7} m/s.

Tais condições são adequadas ao abastecimento local e uso doméstico, mas limitadas para usos mais intensivos ou abastecimento urbano ampliado. Sua presença na zona costeira o torna especialmente relevante no contexto da análise de vulnerabilidade à intrusão salina, uma vez que a interação com o lençol freático raso e a proximidade do mar elevam seu grau de exposição a processos de salinização.

Já o Aquífero Itapecuru (K2it) é constituído por sedimentos consolidados de idade Cretácea, com predominância de arenitos intercalados por siltitos e argilitos. Possui espessura média de 130 metros, e, apesar de seu maior volume geológico, compartilha com o Barreiras características de produtividade geralmente baixa, também enquadrando-se nas Classes 3 e 4. A vazão dos poços situados nesse aquífero geralmente varia entre 0,4 e 2,0 L/s, com transmissividade estimada na faixa de 10^{-4} a 10^{-6} m²/s.

Mesmo com suas características litológicas, o Aquífero Itapecuru conforme Rodrigues *et al.* (1994) tem seu potencial hidrogeológico classificado como satisfatório para poços tubulares com demanda de vazão inferior a 40m³/h e profundidades de até 250 metros.

Através da tabela com os parâmetros dos poços tubulares da Ilha de São Luís, Rodrigues *et al.* (1994) elenca os valores médios encontrados nessa formação (Tabela 1):

Tabela 1 –Valores médios dos parâmetros dos poços do Aquífero Itapecuru na Ilha de São Luís – Ma.

Profundidade (m)			Nível Estático (m)			Rebaixamento (m)		
Mínima	Média	Máxima	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
36	85	185	0,5	19	51	0,5	9	56

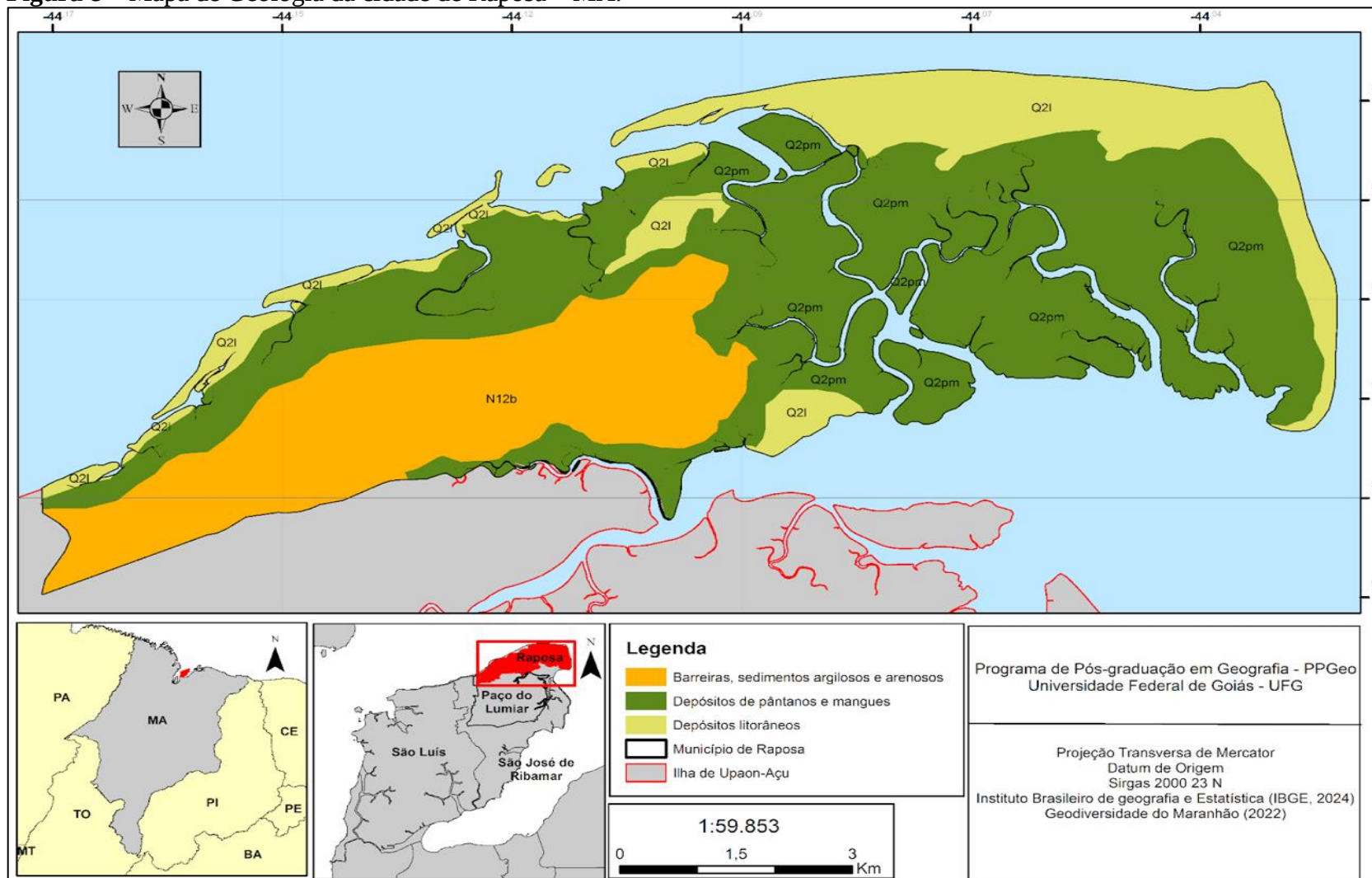
Fonte: Rodrigues *et al.*, (1994).

Com relação às constantes hidrodinâmicas para o Aquífero Itapecuru, foram determinadas por Rebouças e Silva (1972) na área do Itaqui, em teste realizado pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA, uma Transmissividade ($T = 7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), Condutividade Hidráulica ($K = 1,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) e um Armazenamento de $S = 3,5 \times 10^{-2}$.

Assim como o Barreiras, o Itapecuru é utilizado predominantemente para abastecimento local, sendo frequente sua utilização por sistemas de poços tubulares nos municípios da faixa costeira. O aquífero Barreiras é considerado livre, enquanto o Itapecuru é considerado semi-confinado e confinado, sendo recarregados diretamente pelas precipitações, e apresentam características litológicas e estruturais que influenciam diretamente na sua produtividade e vulnerabilidade.

A baixa a moderada produtividade desses dois aquíferos, aliada à ausência de dados históricos sistemáticos e à crescente pressão antrópica sobre os recursos hídricos subterrâneos na faixa litorânea, reforça a necessidade de avaliação da vulnerabilidade hidrogeológica nas áreas urbanas e periurbanas, sobretudo em contextos sujeitos à intrusão salina. Ambos os sistemas aquíferos devem ser objeto de monitoramento contínuo e detalhado, a fim de subsidiar políticas de gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos no litoral maranhense.

Figura 8 – Mapa de Geologia da cidade de Raposa – MA.



Fonte: dados da pesquisa, 2025.

4.3 Geomorfologia

A geomorfologia, a geologia e a pedologia desempenham um papel fundamental nos diagnósticos ambientais, uma vez que praticamente todas as atividades humanas ocorrem sobre diferentes formas de relevo e tipos de solo, os quais influenciam diretamente os impactos gerados. Segundo Guerra e Marçal (2015), o conhecimento geomorfológico constitui uma abordagem eficaz para a compreensão dos sistemas físicos, podendo inclusive contribuir para a avaliação da vulnerabilidade ambiental.

Na Ilha de São Luís, o relevo apresenta altitudes variando entre 40 e 60 metros, onde predominam formações de tabuleiros; em altitudes entre 20 e 30 metros ocorrem colinas suavemente dissecadas, enquanto nas cotas mais baixas, de 0 a 5 metros, são observadas planícies fluviomarinhas (PEREIRA, 2006).

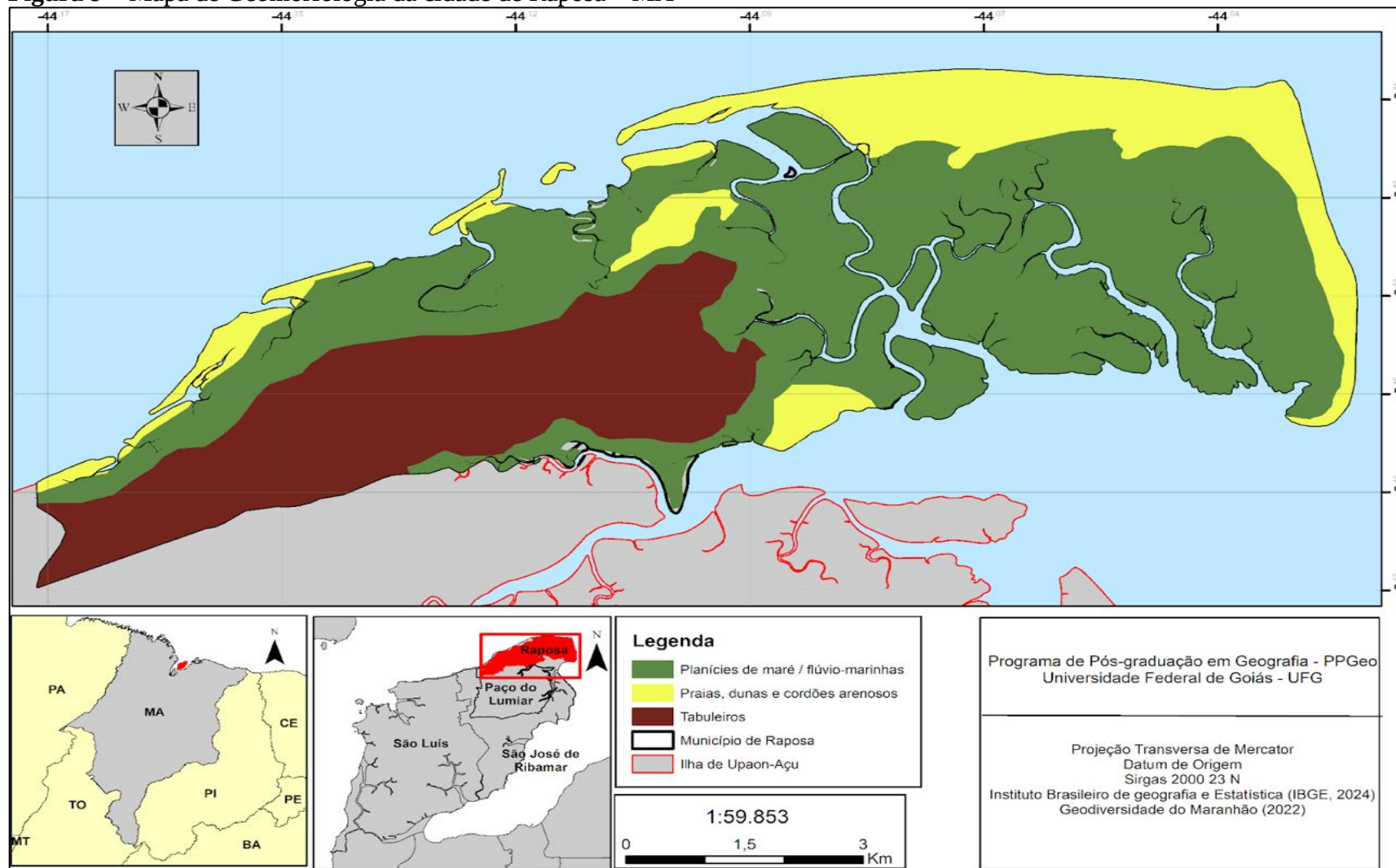
A geomorfologia da cidade de Raposa – MA é formada pelas unidades do relevo: Planície flúvio-marinha, Praias, dunas e cordões arenosos e Tabuleiros com Topos Planos, dados referentes a Silva (2012). Destaca-se que as áreas de tabuleiro é onde está presente as maiores concentrações urbanas do município, as planícies flúvio-marinha é marcada pela presença de mangues.

O relevo de tabuleiros e tabuleiros dissecados estão associados à unidade geológica Barreiras, com alternância irregular entre camadas de sedimentos de composição diversa (BARROS; BANDEIRA, 2020). São áreas relativamente planas e suavemente onduladas (Figura 6). De acordo Silva (2012), os tabuleiros com topos planos vêm sendo intensamente ocupados pelas populações e, devido à sua relevância para os processos de recarga dos aquíferos na Ilha, tornam-se áreas que demandam estudos sistemáticos voltados à compreensão da evolução de sua morfologia.

Outra feição geomorfológica presente na área de estudo é a planície flúvio-marinha, que são “ambientes de contato entre os sistemas deposicionais continentais e marinhos intensos processos físicos, químicos, geológicos e biológicos” (Guedes, 2016, p. 822). As áreas de planície flúvio-marinha (Figura 6), correspondem a grande parte do território do município.

De acordo com a Resolução nº 303/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), as dunas são definidas como unidades geomorfológicas de natureza arenosa, geralmente com morfologia semelhante a cômodos ou colinas, formadas pela ação eólica. Essas feições podem ocorrer tanto em áreas litorâneas quanto no interior do continente, estando parcial ou totalmente recobertas por vegetação. As dunas quando estão recobertas pela vegetação são denominadas de dunas fixas.

Figura 9 – Mapa de Geomorfologia da cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

4.4 Pedologia

O solo, material mineral e/ou orgânico inconsolidado na superfície da terra que serve como meio natural para o crescimento e desenvolvimento de plantas terrestres (CURI *et al.*, 1993). (...) são constituídos por misturas de argila, calcário, areia, matéria orgânica, água, ar e microrganismos” (MARANHÃO, 2002, p. 20). Conforme Chaves e Guerra (2006), o solo é resultado da interação entre material de origem, organismos, topografia, clima e tempo. Os solos que predominam em Raposa são: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Gleissolo Tiomórfico (Órtico solódico e típico e Órtico sálico e solódico), Latossolo Amarelo Distrófico típico e Neossolo Quartzarênico Órtico típico, conforme o Figura 7.

O Argissolo é de origem mineral, caracterizado pela presença de horizonte B textural (EMBRAPA, 2018). Os Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos apresentam saturação por bases inferior a 50% na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B. Possuem profundidade variável e coloração que oscila entre tons de vermelho e amarelo, sendo raramente acinzentados. Esses solos ocorrem, predominantemente, em áreas de tabuleiros costeiros. São profundos, moderadamente drenados, bem estruturados e com boa capacidade de retenção de água. No entanto, devido à presença de um horizonte adensado na subsuperfície, a escavabilidade torna-se limitada (BARROS; BANDEIRA, 2020).

Os Neossolos Quartzarênicos Órticos são caracterizados pela ausência de horizontes genéticos bem desenvolvidos, exceto pelo horizonte A, de natureza orgânico-mineral. Apresentam textura predominantemente arenosa, elevada acidez e baixa fertilidade natural (MARANHÃO, 1998). Na área de estudo, estes solos ocorrem ao longo da faixa costeira, abrangendo praias, dunas ativas e paleodunas, distribuindo-se por diferentes áreas do município.

Os Neossolos Quartzarênicos estão associados a planícies de maré e campos de dunas móveis e fixas. São solos predominantemente quartzosos, com cerca de 95% de quartzo, apresentando elevada porosidade, drenagem excessiva e baixa retenção de água. Essas características conferem alta suscetibilidade à erosão e favorecem a lixiviação de nutrientes, especialmente nitratos (Spera, 1999; Santos, 2018).

Segundo a EMBRAPA (2018), os Gleissolos são solos minerais e hidromórficos que apresentam horizonte glei localizado até 50 cm da superfície, ou entre 50 cm e 150 cm de profundidade, desde que este horizonte esteja diretamente abaixo de horizontes A ou E (com ou sem sinais de gleização), ou ainda sob um horizonte hístico cuja espessura seja insuficiente

para a classificação como Organossolo. Além disso, esses solos não possuem textura exclusivamente arenosa em todos os horizontes até os primeiros 150 cm de profundidade.

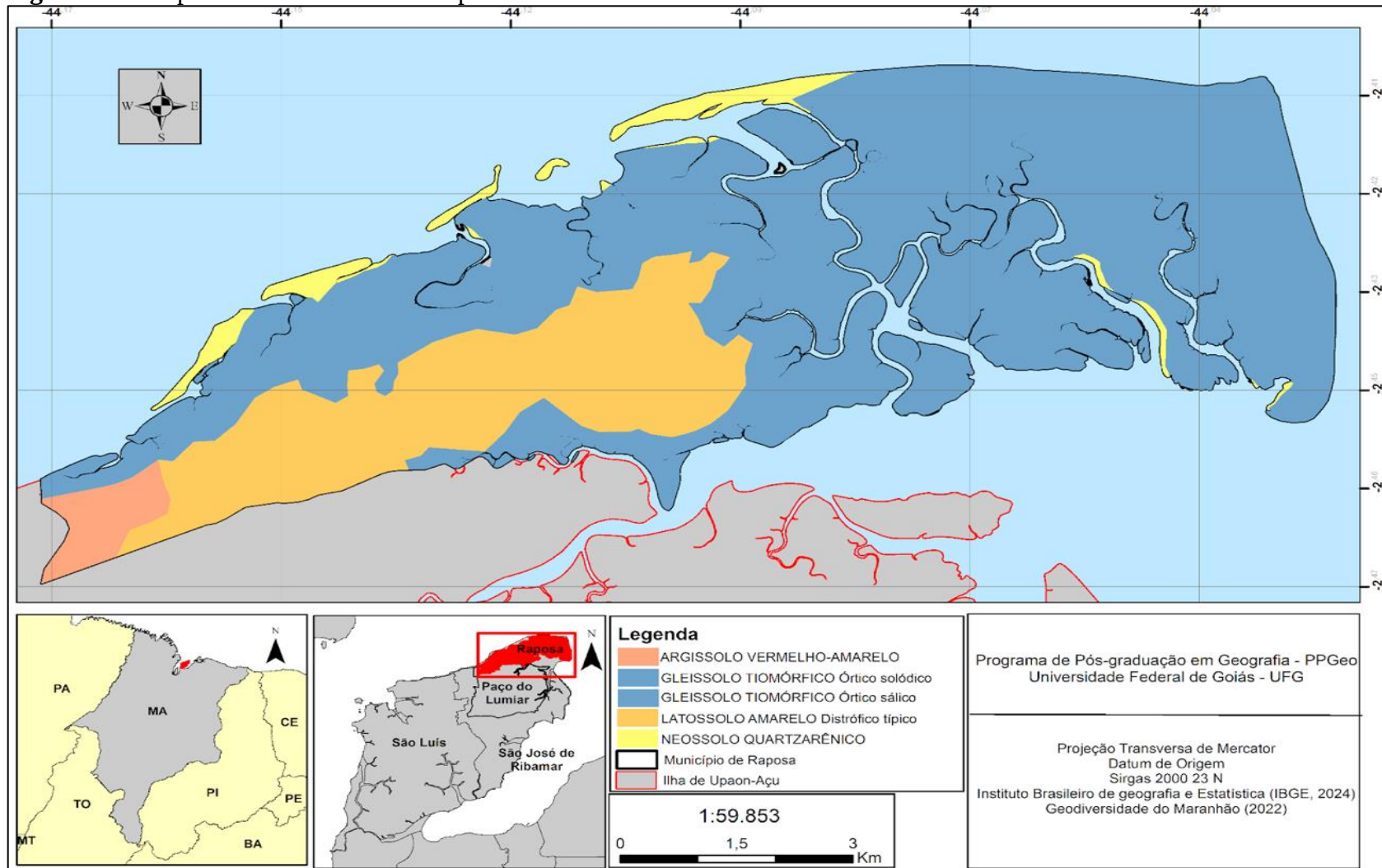
Os Gleissolos ocorrem em áreas de planície de inundação — no caso dos Gleissolos Tb Distróficos, e em ecossistemas de manguezal como os Gleissolos Sálcos. Na planície de inundação, esses solos permanecem constantemente saturados por água, exceto quando são submetidos a drenagem artificial. É comum que se desenvolvam em depósitos sedimentares recentes localizados próximos a cursos d'água, assim como em regiões de relevo plano, como terraços fluviais, lacustres ou marinhos (SANTOS *et al.*, 2018).

Os solos de mangue, classificados como Gleissolos Sálcos, são caracterizados por uma elevada concentração de sais solúveis, ocorrência frequente de alagamentos e localização típica em áreas próximas às desembocaduras dos rios, sob forte influência das marés. São solos pouco evoluídos, com drenagem deficiente e alta presença de matéria orgânica. Apresentam textura variando entre argilosa e arenosa, sendo recobertos por vegetação típica de manguezal. Na região de Raposa, os depósitos de mangue apresentam baixa espessura e são compostos por sedimentos finos, como argila e silte. Esses depósitos são ricos em matéria orgânica e ocorrem sobre o relevo característico de planícies fluviomarinhas (BARROS e BANDEIRA, 2020).

Os Latossolos estão amplamente distribuídos pelo território brasileiro, sendo encontrados em praticamente todas as regiões do país. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), esses solos podem ser subdivididos em quatro classes distintas (subordens), conforme suas colorações e teores de óxidos de ferro (IBGE, 2015). Segundo a EMBRAPA (2013), os latossolos apresentam um alto grau de intemperismo, sendo considerados solos muito evoluídos, com boa drenagem natural e formados por processos pedogenéticos intensos. Seu perfil é profundo e bastante homogêneo quanto à cor, textura e estrutura, dificultando a distinção entre horizontes diagnósticos. Em geral, possuem baixa fertilidade natural.

Na região litorânea brasileira, os Latossolos Amarelos se desenvolvem a partir de sedimentos do Grupo Barreiras. Devido à forte coesão entre os horizontes A e B, esses solos já foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Coeso, conforme apontado por Jacomine (1996). No município de Raposa, os latossolos estão presentes nos topos dos tabuleiros costeiros.

Figura 10 – Mapa de solo da cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

4.5 Uso e ocupação do solo e vegetação

Na área de estudo, predomina a vegetação composta por espécies de mangue e restinga (Figura 8, página 41), concentradas principalmente na porção leste do município. O mangue caracteriza-se como uma vegetação de caráter edáfico de primeira ocupação, instalada em terrenos de deposição de aluviões flúvio-marinhos, geralmente nas embocaduras dos rios (IBGE, 2012). É formado por plantas lenhosas do tipo halófitas facultativas, capazes de tolerar a entrada de sal pelas raízes (Calegário, 2012), estando, portanto, plenamente adaptadas a esse ambiente.

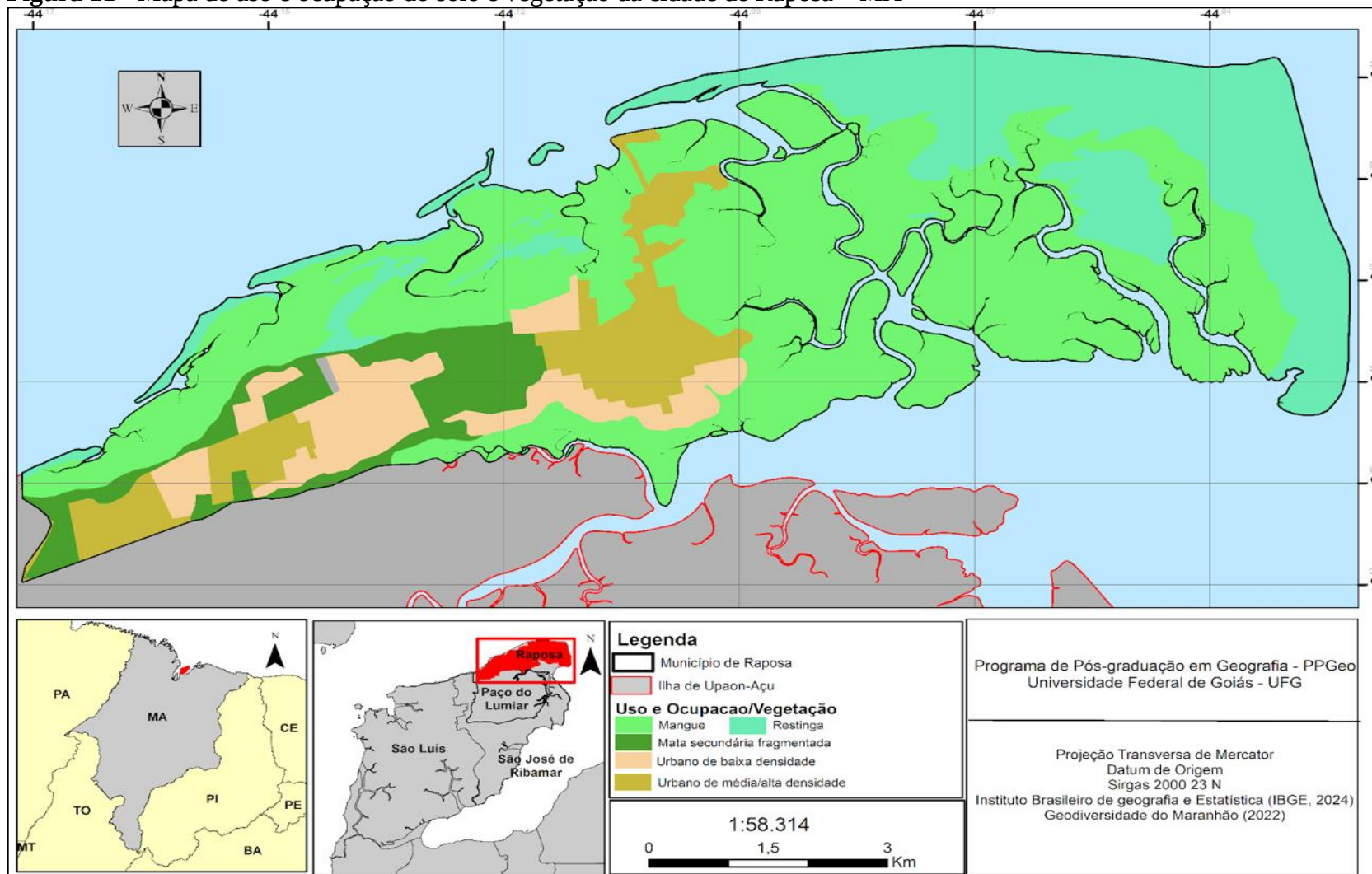
Outro tipo de vegetação presente no município é a restinga, encontrada na faixa litorânea e influenciada por fatores oceanográficos. Essas formações, também conhecidas como pioneiras de influência marinha (VELOSO; GÓES FILHO, 1982), desenvolvem-se sob a ação de ventos, ondas e spray salino (Gomes *et al.*, 2022).

Além disso, o substrato arenoso, quartzoso e oligotrófico confere ao ambiente condições adversas ou estressantes para o desenvolvimento vegetal. Esses elementos justificam a classificação do IBGE (2012) como parte do complexo vegetacional edáfico de primeira ocupação, neste caso, de influência marinha.

Nas áreas de tabuleiro costeiro, conforme apontam Barros e Bandeira (2020), ocorre a presença de uma mata secundária fragmentada. Esses fragmentos resultam do processo de subdivisão da vegetação secundária em porções menores, a qual, por sua vez, corresponde a um estágio avançado de recuperação ecológica.

Na ilha de São Luís, a fragmentação da mata secundária intensificou-se em decorrência da expansão urbana contínua. Esse processo tem conferido a essa tipologia vegetal uma maior vulnerabilidade à supressão, sobretudo pela pressão exercida pela urbanização, que avança sobre áreas anteriormente ocupadas por cobertura florestal.

Figura 11 - Mapa de uso e ocupação do solo e vegetação da cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados e discutidos os resultados alcançados a partir do desempenho sistemático dos procedimentos metodológicos apresentados.

5.1 Distribuição dos poços tubulares na área de estudo

As informações sobre os poços tubulares localizados no município de Raposa (MA) foram obtidas a partir da base de dados do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), que disponibilizou os estudos hidrogeológicos outorgados para a área de estudo.

Os poços administrados pela autarquia estão distribuídos espacialmente por todo o perímetro urbano do município. Do ponto de vista geológico, a área encontra-se inserida na Formação Barreiras, do período Neógeno, caracterizada por sedimentos inconsolidados com coloração variando do amarelo ao vermelho, e granulometria que vai de areia fina a argila.

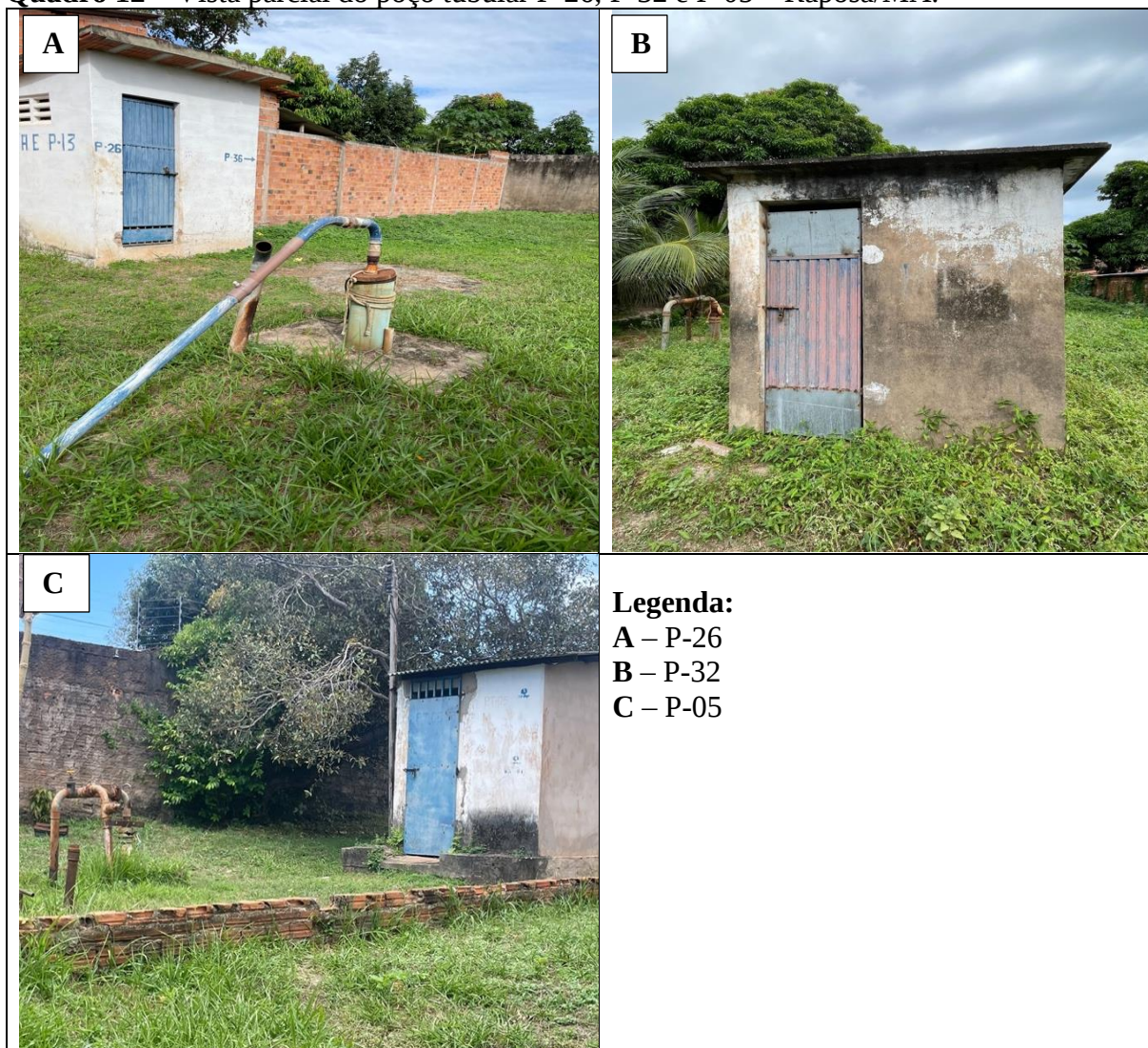
No que se refere ao contexto geomorfológico, os poços estão situados predominantemente em áreas de tabuleiros, formas de relevo relativamente planas ou suavemente onduladas, com cotas altimétricas que variam entre 20 e 60 metros. A Figura 9 apresenta a distribuição espacial desses poços.

Inicialmente, o SAAE forneceu uma listagem contendo 37 (trinta e sete) poços tubulares distribuídos na área de estudo, dos quais 4 (quatro) encontram-se desativados. Posteriormente, foram disponibilizados os estudos hidrogeológicos de 25 (vinte e um) desses poços. No entanto, nem todos continham informações suficientes ou parciais para serem aproveitados na presente pesquisa.

Também foi realizado um levantamento de registros no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). No entanto, os poços identificados nessa base de dados não apresentavam informações adequadas para a aplicação na presente pesquisa.

Após a análise dos estudos hidrogeológicos referentes aos 25 (vinte e um) poços tubulares disponibilizados, constatou-se que apenas 12 (doze) deles possuem perfil litoestratigráfico suficientemente detalhado. Os demais 13 (treze) poços carecem de informações consistentes sobre a litologia e a espessura das camadas, o que inviabiliza sua utilização nas análises propostas (Quadro 12).

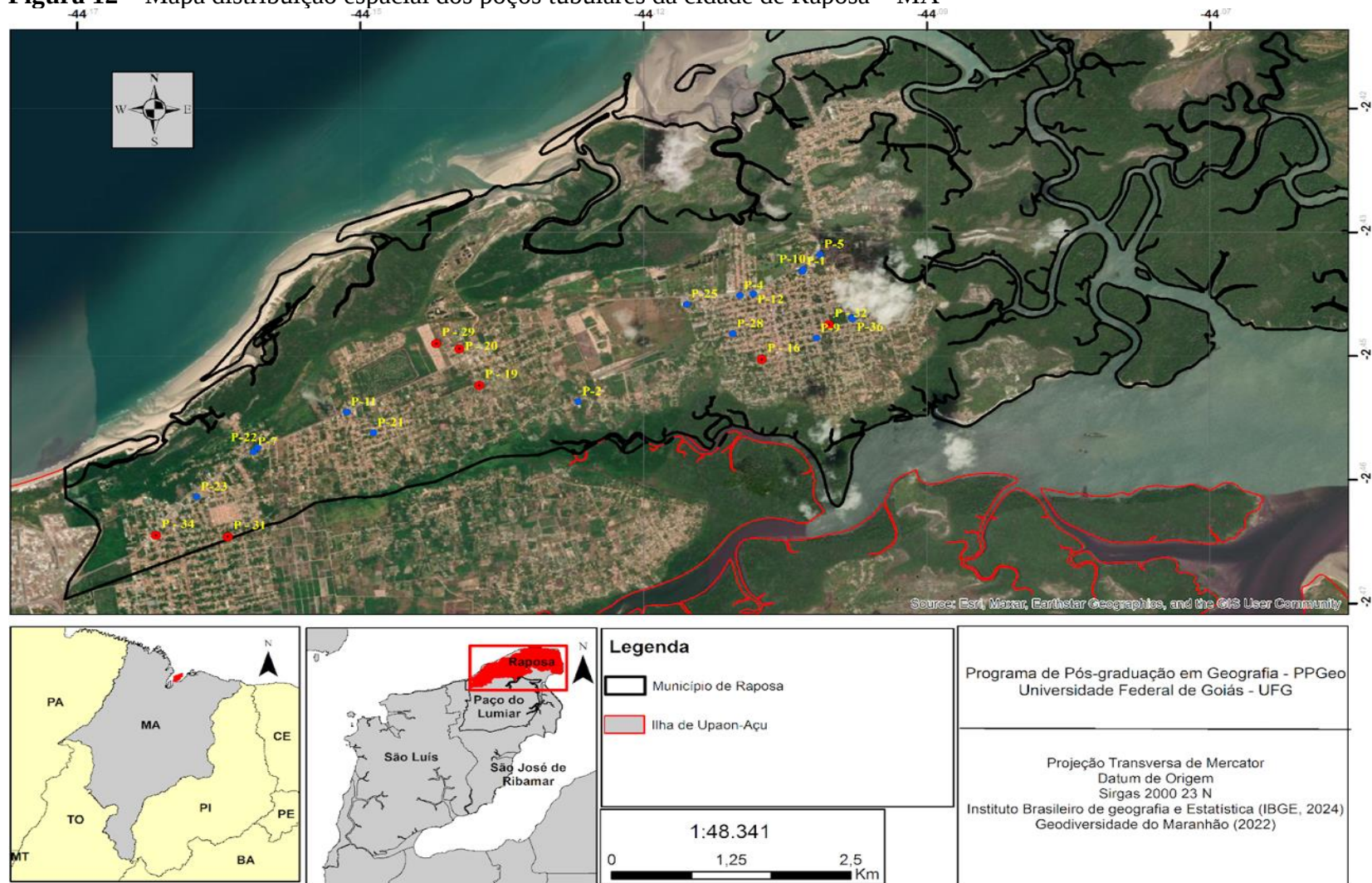
Quadro 12 – Vista parcial do poço tubular P-26, P-32 e P-05 – Raposa/MA.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

A Figura 12 apresenta a distribuição espacial dos poços tubulares na área de estudo. Os poços que dispõem de dados hidrodinâmicos estão representados por pontos azuis, enquanto aqueles sem informações hidrodinâmicas disponíveis são indicados por pontos vermelhos. A expressiva ausência desses dados evidencia uma lacuna relevante e acende um alerta para a gestão e o monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos no município.

Figura 12 – Mapa distribuição espacial dos poços tubulares da cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Apesar dessa limitação, todos os poços analisados apresentam dados referentes ao Nível Estático (NE) e ao Nível Dinâmico (ND), que foram considerados na avaliação hidrodinâmica.

5.2 Análise dos dados hidrodinâmicos

A análise dos dados hidrodinâmicos dos poços da cidade de Raposa evidencia um quadro preocupante de deficiência informacional, que compromete significativamente a compreensão da dinâmica do aquífero local e, conseqüentemente, a gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos. A maioria dos poços apresenta lacunas importantes em parâmetros básicos como vazão, nível estático (NE), nível dinâmico (ND), profundidade total e perfil litológico (Tabela 3).

Dos 37 poços identificados, menos de um terço possui dados de vazão disponíveis, e menos de 25% apresentam informações sobre os níveis estático e dinâmico. Além disso, somente cerca de 40% possuem registros de profundidade e pouco mais de um terço apresentam perfil litológico identificado. Esse cenário revela uma forte limitação na capacidade de caracterização hidrodinâmica do sistema aquífero, dificultando análises de recarga, produtividade e comportamento frente a pressões antrópicas ou ambientais.

Além da escassez de dados, observa-se uma concentração das informações em determinadas áreas, como nos bairros Vila Bom Viver, Jussara e Alto do Farol, enquanto outras regiões, a exemplo de Cumbique, Jardim das Oliveiras e Vila Paraíso, não apresentam praticamente nenhum dado hidrodinâmico. Essa distribuição desigual prejudica a avaliação integrada do sistema aquífero e dificulta os diagnósticos especializados de vulnerabilidade, especialmente em áreas mais afastadas ou em processo de expansão urbana.

Outro ponto crítico diz respeito à inconsistência de alguns dados registrados. Há casos em que os níveis estático e dinâmico apresentam valores coincidentes ou com variações pouco plausíveis, o que pode indicar falhas na medição ou ausência de testes adequados de bombeamento. Em outras situações, observa-se rebaixamento acentuado do nível dinâmico sem informações complementares sobre o tempo de bombeamento, tipo de aquífero ou condutividade hidráulica, o que compromete a interpretação dos resultados.

Tabela 2 – Dados Hidrodinâmicos dos Poços da cidade de Raposa.

Poços	Bairro	Latitude	Longitude	Vazão (m/3)	NE (m)	ND (m)	Prof. (m)	Perfil Litológico
P-1	Capote	2°26'19.21"S	44°06'13.46"W	31	13,65	20,65	62	Não
P-2	Itapeua	2°27'07.89"S	44°07'29.29"W	15,6	5	8	39	Não
P-3	Bulão	2°26'39.49"S	44°06'05.23"W	14	27	32,2	57	Não
P-4	Vila Nova	2°26'28.28"S	44°06'34.57"W	45	9,3	12,2	75	Não
P-5	Ponta Verde	2°26'12.89"S	44° 6'7.40"W	36	16,85	19,8	82	Não
P-6	Alto do farol	-	-	45	9,2	12,3	75	Não
P-7	Araçagi	2°27'27.10"S	44°07'18.52"W	36	11,5	14	64,5	Não
P-8	-	-	-	-	-	-	-	-
P-9	Vila Bom Viver	2°26'44.20"S	44° 6'8.69"W	36	11,2	13,8	100	Sim
P-10		2°26'18.51"S	44°06'13.09"W	14943	15,58	16,76	80	Sim
P-11	Alto do farol	2°27'11.78"S	44°08'47.45"W	7542	36,85	38	90	Sim
P-12	Vila Nova	2°26'27.57"S	44° 05'30.08"W	7542	36,85	38	81,2	Sim
P-13	Maresia	2°26'36.52"S	44° 5'56.75"W				100	Sim
P-14	Bulão	-	-	10,2	25	30	80	Sim
P-15	Vila Maresia	-	-	-	-	-	-	-
P-16	Jardim das Oliveiras	-	-	-	-	-	-	-
P-17	Cumbique	-	-	-	-	-	-	-
P-18	Cumbique	-	-	-	-	-	-	-
P-19	Alto da Base	2°27'1.86"S	44° 8'2.65"W	-	-	-	-	-
P-20	Dom. da Sorte	-	-	-	-	-	-	-
P-21	Alto do Sol Nascente	2°27'19.53"S	44°08'38.50"W	-	36	42	80	Sim
P-22	Araçagi	2°27'25.07"S	44°09'17.66"W	17	-	27,5	54	Não
P-23	Vila São João	2°27'43.47"S	44°09'38.24"W	20.000	24	32	80	Sim
P-24	Res. Talita	-	-	-	-	-	-	-

P-25	Itapeua	2°26'31.0"S	44°06'52.45"W	14,94	25,73	27,72	95	Sim
P-26	Maresia	2°26'36.53"S	44°05'56.62"W	-	-	-	100	Sim
P-27	Ponta Verde	-	-	-	-	-	-	-
P-28	Vila Nova	2°27'43.47"S	44°6'36.92"W	16,16	10,05	18,32	77	Sim
P-29	Atlantic Residence	2°26'44.60"S	44° 8'19.39"W	-	-	-	-	-
P-30	Caúra	-	-	-	-	-	-	-
P-31	Res. Talita	2°27'58.38"S	44°9'27.70"W	-	-	-	-	-
P-32	Bulão	2°26'39.10"S	44°06'04.38"W	-	-	-	-	-
P-33	Cumbique	-	-	-	-	-	-	-
P-34	Piramide	2°27'57.91"S	44°9'51.99"W	-	-	-	-	-
P-35	Rec. Dos Poetas	-	-	-	-	-	-	-
P-36	Vila Maresia	2°26'36.95"S	44°05'56.52"W	16,16	33,92	37	80	Sim
P-37	Residencial Vista ao Mar	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

A situação verificada evidencia uma fragilidade estrutural na gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município, fruto da ausência de políticas locais de monitoramento, fiscalização e cadastro sistemático de poços. Em uma cidade costeira, onde o aquífero é naturalmente vulnerável à salinização e à contaminação por efluentes, a inexistência de um banco de dados atualizado e confiável compromete não apenas o planejamento ambiental, mas também a segurança hídrica da população.

Nesse sentido, torna-se urgente a implementação de medidas como a realização de campanhas de medição padronizadas, o georreferenciamento dos poços, a instalação de piezômetros de monitoramento e a integração das informações locais ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), além da promoção de ações educativas e de capacitação técnica para os atores envolvidos na gestão das águas subterrâneas.

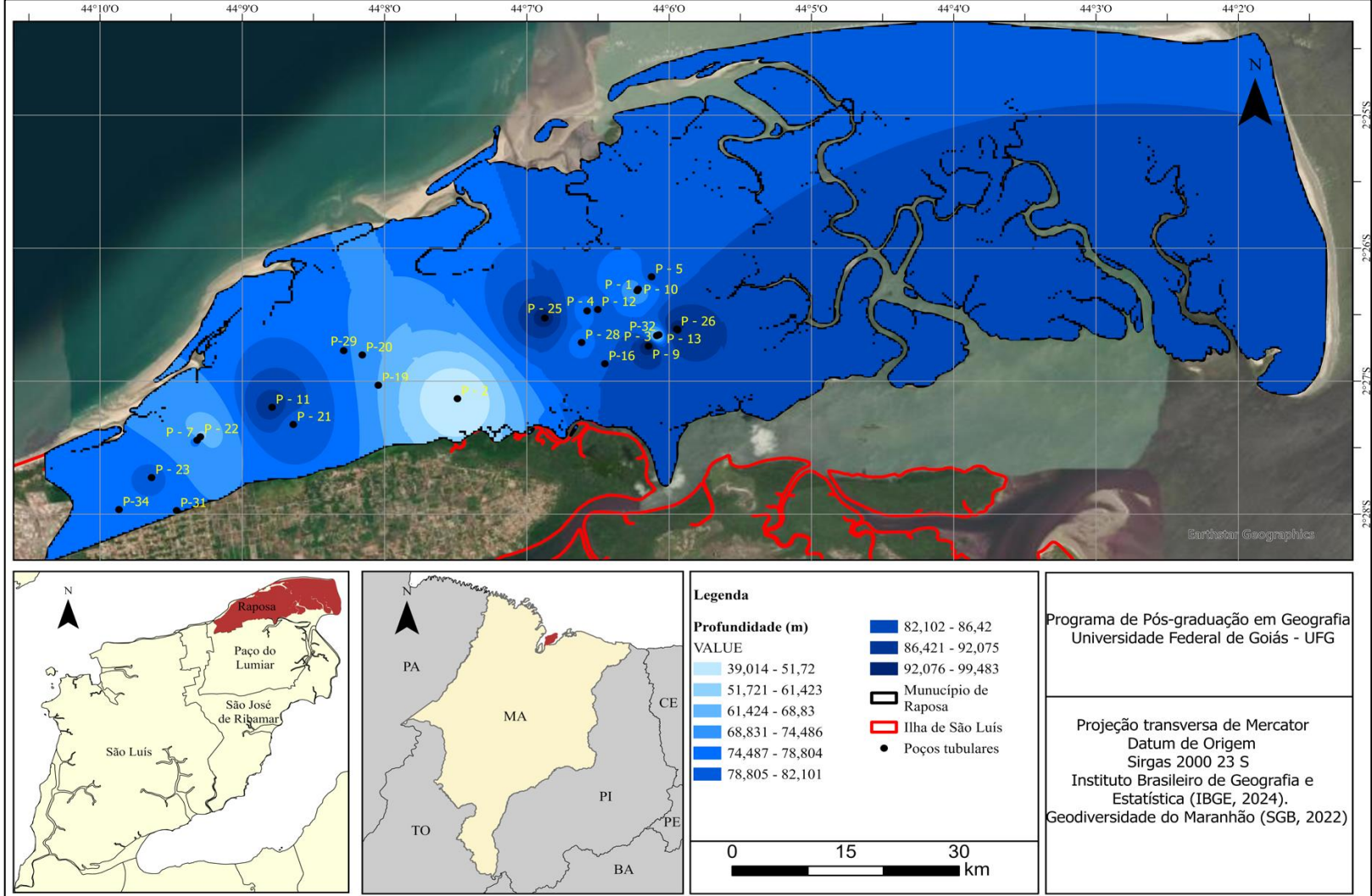
Observa-se que os poços tubulares (P-01, P-02, P-03, P-04, P-05, P-07, P-09, P-10, P-11, P-12, P-13, P-14, P-21, P-22, P-23, P-25, P-26, P-28 e P-36), apresentam profundidade que variam de 39m a 100m de profundidade. Esses poços estão localizados em áreas tabuleiros que são áreas de recarga de aquíferos, com altitudes que variam de 40-65 metros.

A análise espacial do mapa de profundidade dos poços tubulares no município de Raposa/MA (Figura 12), evidencia um padrão de variação relacionado à topografia e à posição geográfica. Observa-se que as menores profundidades (39,0 a 51,7 m) estão concentradas em áreas mais centrais e próximas das zonas de recarga, associadas aos tabuleiros. Nessas áreas, o topo do aquífero encontra-se mais próximo da superfície, favorecendo a infiltração direta da água da chuva.

Em contrapartida, as maiores profundidades (acima de 92 m) localizam-se em setores mais próximos das áreas de recarga e consequentemente das zonas de menor altitude. Essa distribuição pode indicar uma maior espessura do pacote sedimentar ou a presença de camadas confinantes, que obrigam a perfuração mais profunda para atingir o aquífero de interesse.

Quanto mais profundo é o poço tubular, mais cedo ele poderá ser afetado pela água salgada. Desta maneira, recomenda-se que a exploração da água do poço ocorra em regime de bombeamento intermitente, ou seja, permitindo a recomposição do sistema e não permitindo a entrada da cunha salina no poço (Silva e Gomes, 2007; Brito *et al.*, 2021).

Figura 13 – Mapa de profundidade (m) dos Poços tubulares do município de Raposa/MA.



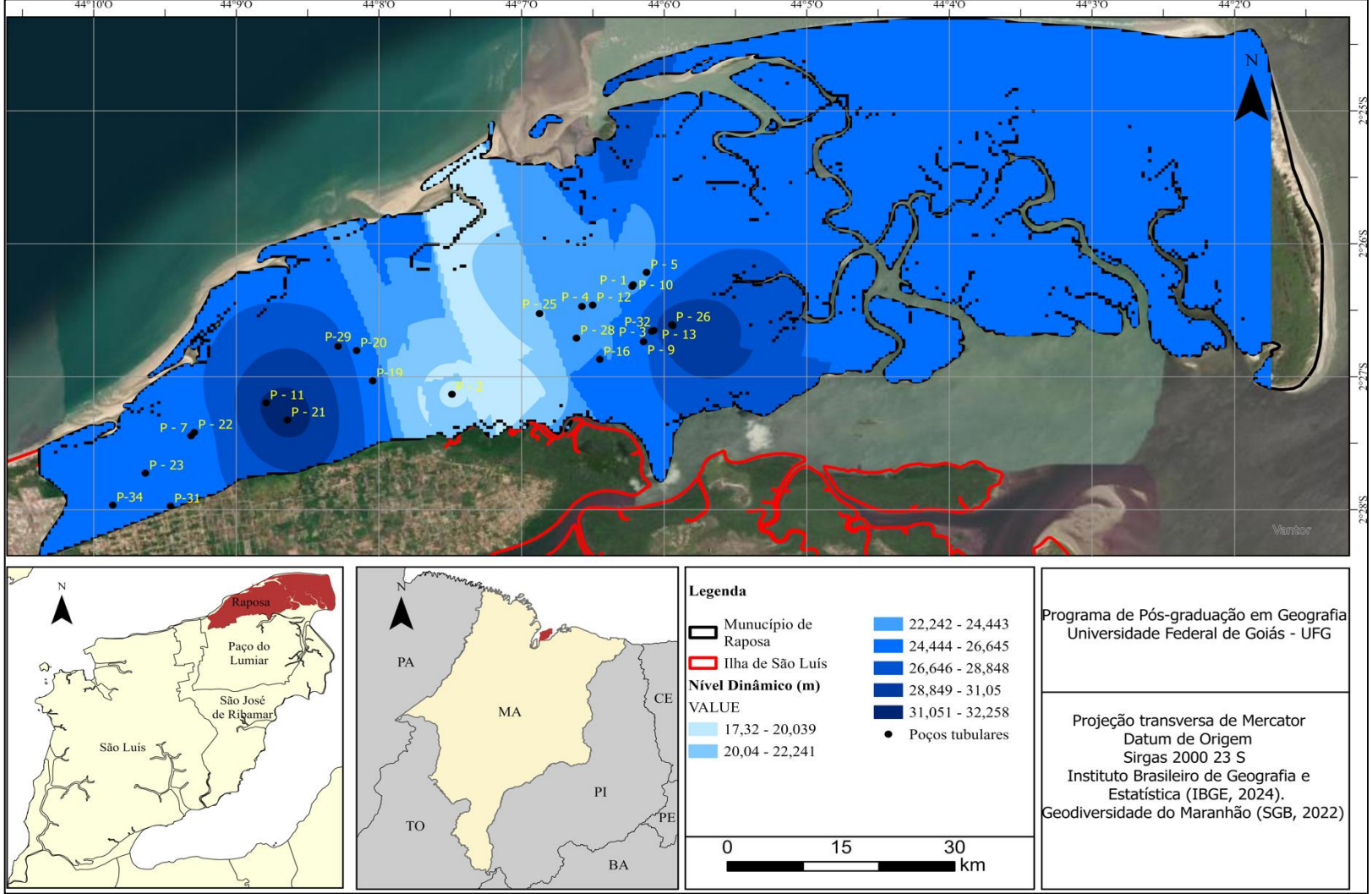
Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Além disso, a proximidade de alguns poços em relação à linha de costa exige atenção especial quanto ao risco de intrusão salina, especialmente naqueles com profundidades intermediárias e localizados em cotas mais baixas. Essa ameaça pode se intensificar em períodos de seca prolongada ou de superexploração, comprometendo a qualidade da água.

A distribuição espacial e a profundidade dos poços reforçam a importância de um manejo integrado dos recursos hídricos subterrâneos, considerando não apenas a disponibilidade quantitativa, mas também a proteção das áreas de recarga e a prevenção contra a salinização e contaminação dos aquíferos.

A análise da profundidade dos poços também permite compreender o comportamento do nível dinâmico do município. A comparação entre a distribuição espacial da profundidade dos poços tubulares e os valores de nível dinâmico no município de Raposa/MA evidencia uma relação direta entre esses dois parâmetros (Figura 13).

Figura 14 – Mapa do nível dinâmico dos Poços tubulares do município de Raposa/MA.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

As áreas onde os poços apresentam menores profundidades de perfuração (39,0 a 51,7 m) coincidem, em geral, com zonas de nível dinâmico mais raso (17,3 a 22,2 m), o que indica maior proximidade do topo do aquífero e maior eficiência na recarga. Essa configuração está associada principalmente a regiões centrais e de cotas mais elevadas, próximas aos tabuleiros, onde a infiltração da água da chuva ocorre de forma mais efetiva (Figura 13).

Por outro lado, nas porções onde as profundidades dos poços superam 92 m, observam-se também níveis dinâmicos mais profundos (acima de 28 m), caracterizando áreas de menor recarga e possivelmente com maior espessura do pacote sedimentar ou presença de camadas confinantes. Essas condições são mais comuns em setores mais afastados das áreas de recarga e em cotas mais baixas, incluindo regiões próximas à linha de costa, onde ainda há o risco potencial de intrusão salina. A correspondência espacial entre profundidade e nível dinâmico reforça a necessidade de considerar ambos os parâmetros na gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

5.3 Área de influência de maré

A maré é um fenômeno amplamente conhecido, especialmente por populações que vivem em áreas costeiras e dependem do mar, sendo perceptível pela oscilação do nível da água junto à costa. No município de Raposa, observa-se um regime de maré semi-diurna, caracterizado por duas preamares e duas baixa-mares ao longo do dia, conforme apresentado na tabela 3, que indica os respectivos horários das marés na região.

Tabela 3 – Tábua de marés no município de Raposa – MA.

Dia	Tabela de mares Raposa					
	1ª Maré	2ª Maré	3ª Maré	4ª Maré		
quinta 27	05:10 ▼ 1.74 m	11:45 ▲ 4.78 m	17:39 ▼ 2.06 m		▲ 05:38	▼ 17:53
sexta 28	00:06 ▲ 4.88 m	06:20 ▼ 1.78 m	12:48 ▲ 4.83 m	18:55 ▼ 1.96 m	▲ 05:38	▼ 17:54
sábado 29	01:13 ▲ 4.91 m	07:30 ▼ 1.7 m	13:51 ▲ 4.98 m	20:04 ▼ 1.73 m	▲ 05:38	▼ 17:54
domingo 30	02:19 ▲ 5.03 m	08:32 ▼ 1.54 m	14:52 ▲ 5.2 m	21:03 ▼ 1.41 m	▲ 05:39	▼ 17:54
segunda 1	03:22 ▲ 5.22 m	09:25 ▼ 1.34 m	15:48 ▲ 5.46 m	21:55 ▼ 1.09 m	▲ 05:39	▼ 17:55
terça 2	04:20 ▲ 5.43 m	10:14 ▼ 1.15 m	16:40 ▲ 5.7 m	22:43 ▼ 0.8 m	▲ 05:39	▼ 17:55
quarta 3	05:13 ▲ 5.61 m	11:00 ▼ 1 m	17:29 ▲ 5.9 m	23:29 ▼ 0.59 m	▲ 05:40	▼ 17:56

Fonte: <https://pt.tideschart.com/Brazil/Maranhao/Raposa/>

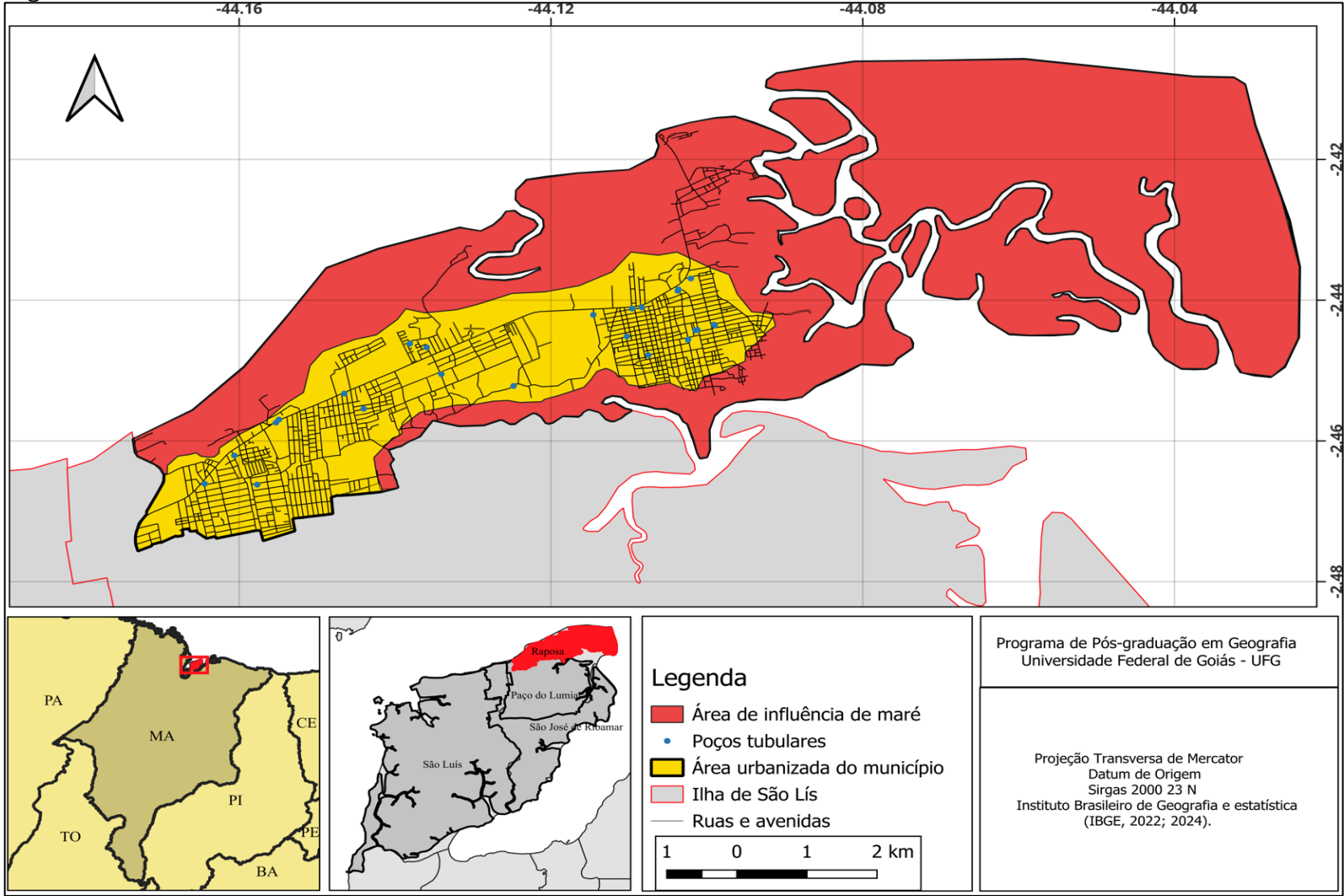
Conforme Braga (2002), as flutuações de maré podem gerar movimentos de grande relevância hidrogeológica em ambientes costeiros. A interação entre os corpos hídricos superficiais e os aquíferos vulneráveis à oscilação das marés provoca variações nos níveis d'água subterrânea, além de modificar aspectos químicos da composição da água dos aquíferos.

De acordo com Diniz, Arraes e Feitosa (2012), a zona de flutuação de maré constitui um fenômeno de grande relevância hidrológica em ambientes costeiros, uma vez que a interação entre aquíferos e corpos hídricos superficiais vulneráveis às oscilações marés exerce influência direta no nível da água subterrânea. O alcance da influência marinha nesses aquíferos é condicionado por fatores como a condutividade hidráulica e a amplitude local das oscilações de maré.

A extensa área destacada como zona de influência de maré evidencia que os efeitos das oscilações de maré não se restringem apenas a linha da costa, mas penetram significativamente pelos canais estuarinos, rios com baixa declividade e áreas de manguezal. Durante os períodos de maré alta ocorre a elevação temporária do nível hidráulico marinho, criando um gradiente favorável ao deslocamento da água salgada, propagação da cunha salina pelos cursos d'água, principalmente onde há baixa energia fluvial.

Esses fatores favorece o deslocamento lateral e vertical da água salgada, permitindo que a influência salina alcance áreas continentais afastadas da costa. Observa-se também, que a área de influência de maré acompanha a rede de drenagem, esta, funcionando como corredores naturais da intrusão.

Figura 15 – Área de influência de maré.



Fonte: dados da pesquisa, 2025.

6 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA APLICANDO O MÉTODO GALDIT

Neste capítulo, serão caracterizados os parâmetros do método GALDIT, conforme proposto por Chachadi e Ferreira (2001), a partir dos dados hidrodinâmicos dos poços tubulares: tipo de aquífero, condutividade hidráulica, nível piezométrico, impacto da intrusão marinha e espessura do aquífero.

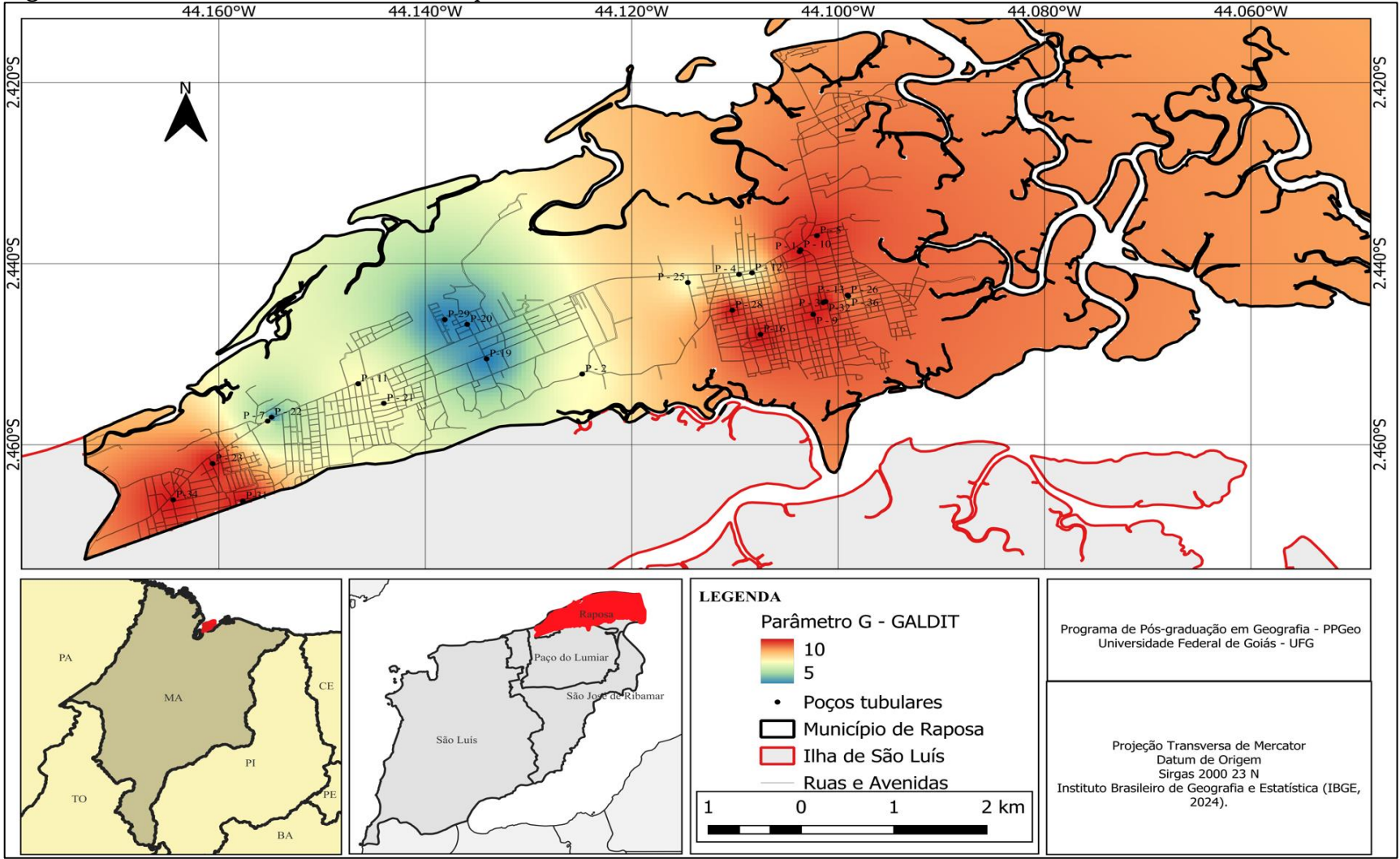
6.1 Parâmetro G – Ocorrência do aquífero

Na área de estudo, ocorrem dois aquíferos principais: o aquífero Barreiras e o aquífero Itapecuru. O aquífero Barreiras aflora em grande parte da Ilha de São Luís, principalmente em falésias, colinas, encostas e topos de tabuleiros. É classificado como livre, por apresentar sedimentos arenosos inconsolidados e parcialmente consolidados, compostos por areia fina a média com intercalações de silte e argila.

Já o aquífero Itapecuru, presente nas camadas inferiores, é de caráter semiconfinado e formado por sedimentos consolidados, com predomínio de arenitos intercalados com siltitos e argilitos. De acordo com a figura 16, as áreas mais vulneráveis considerando o tipo de aquífero é a região mais central da cidade de raposa que concentra o maior contingente populacional e que estão mais próximas das áreas de mangue e áreas a leste.

Dessa forma, considerando os critérios do método GALDIT (Chachadi e Ferreira, 2001), o valor atribuído ao parâmetro G (ocorrência do aquífero) será 10 para aquífero confinado, 7,5 para aquíferos livres e 5,0 para aquíferos semiconfinados. A figura 16 espacializa os valores de vulnerabilidade do parâmetro.

Figura 16 – Parâmetro G – Ocorrência do Aquífero



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

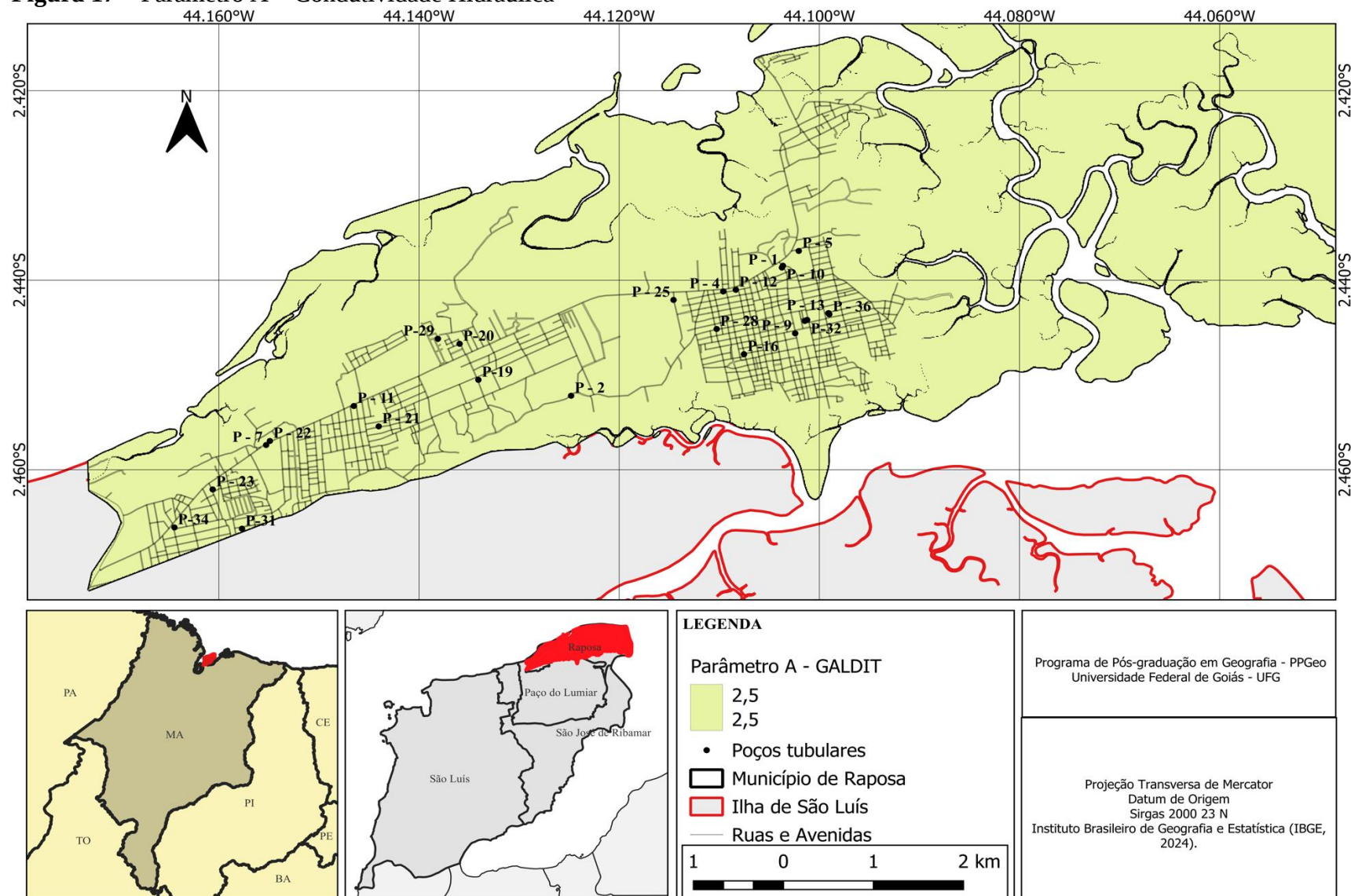
6.2 Parâmetro A – Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (K) é uma propriedade que expressa a velocidade com que a água se movimenta no solo. De acordo com Ferraz *et al.*, (2019), a condutividade hidráulica (K) é um parâmetro essencial para a análise do fluxo da água subterrânea, pois influencia diretamente a vazão e a velocidade do escoamento, sendo, portanto, fundamental nos estudos de áreas contaminadas.

Os dados do parâmetro de condutividade hidráulica foram interpolados e reclassificou-se os valores dos índices do parâmetro A. Conforme estudos hidrodinâmicos aplicados na bacia do Rio Paciência a condutividade hidráulica foram de 0,60 a 0,94 m/dia pontos levantados (Santos *et al.*, 2020).

Para toda a área de estudo foi atribuído o valor de 2,5 devida a condutividade hidráulica ser <5 m/dias em todos os poços tubulares, esse valor indica uma baixa condutividade. Possuindo assim, segue a representação espacial do parâmetro A, conforme a figura 17.

Figura 17 – Parâmetro A – Condutividade Hidráulica



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

6.3 Parâmetro L – Nível do Piezômetro

O nível piezométrico corresponde à cota do nível da água subterrânea medida em relação ao nível do mar. Esse parâmetro é importante porque permite avaliar a carga hidráulica disponível para conter ou recuar o avanço da cunha salina.

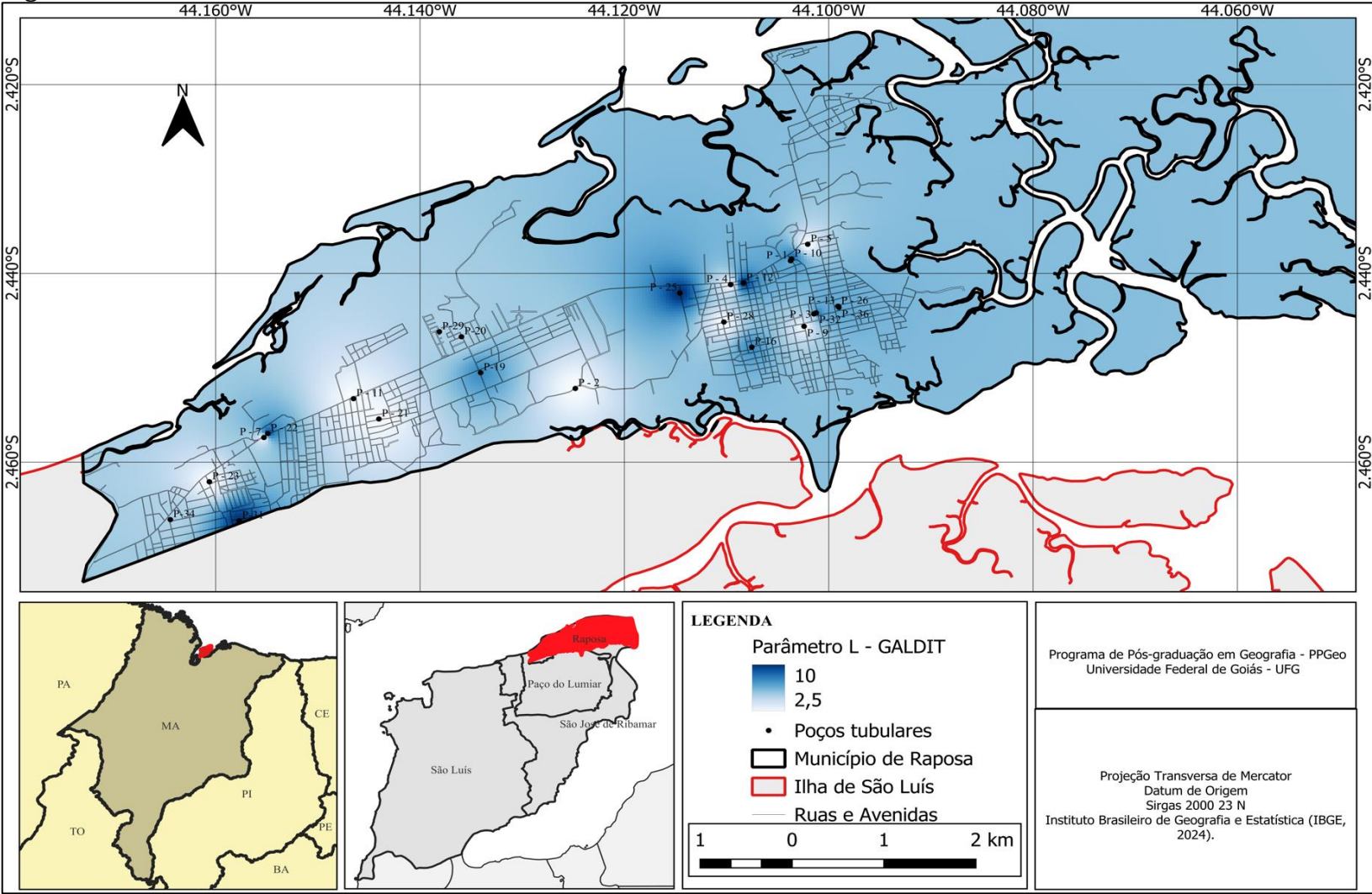
Na área de estudo, foram interpolados os valores reais das cotas piezométricas, que variam de 28,84 m a -23,22 m. De acordo com Chachadi e Ferreira (2001), essa variação indica valores de vulnerabilidade de 2,5 a 10 para o parâmetro L (Figura 18).

Tabela 4 – Dados hidrodinâmicos da área de estudo - Raposa – MA.

Poço	COTA	NE	NP	Valor atribuído
P-01	15,2	13,65	1,55	5
P-02	12,2	5	7,2	2,5
P-03	36,29	27	9,29	2,5
P-04	16,13	9,3	6,83	2,5
P-05	22,85	16,85	6	2,5
P-07	14,9	11,5	3,4	2,5
P-09	40,04	11,2	28,84	2,5
P-10	15,2	15,58	-0,38	10
P-11	44,5	36,85	7,65	2,5
P-12	13,63	36,85	-23,22	10
P-13	35,99	38	-2,01	10
P-21	39,22	36	3,22	2,5
P-22	19,89	23,61	-3,72	10
P-23	39,40	24	15,4	2,5
P-25	8,0	25,73	-17,73	10
P-26	35,72	24,88	10,84	2,5
P-28	14,93	10,05	4,88	2,5
P-36	35,06	33,92	1,14	7,5

Fonte: Dados da Pesquisa, 2025.

Figura 18 – Parâmetro L – Nível do Piezômetro.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

6.4 Parâmetro D – Distância da linha da costa

Este parâmetro considera a distância, em linha reta, entre o poço tubular e a linha da costa ou áreas com presença de vegetação halófila (indicadoras de água salobra a salgada). O objetivo é avaliar a influência das marés sobre a água subterrânea.

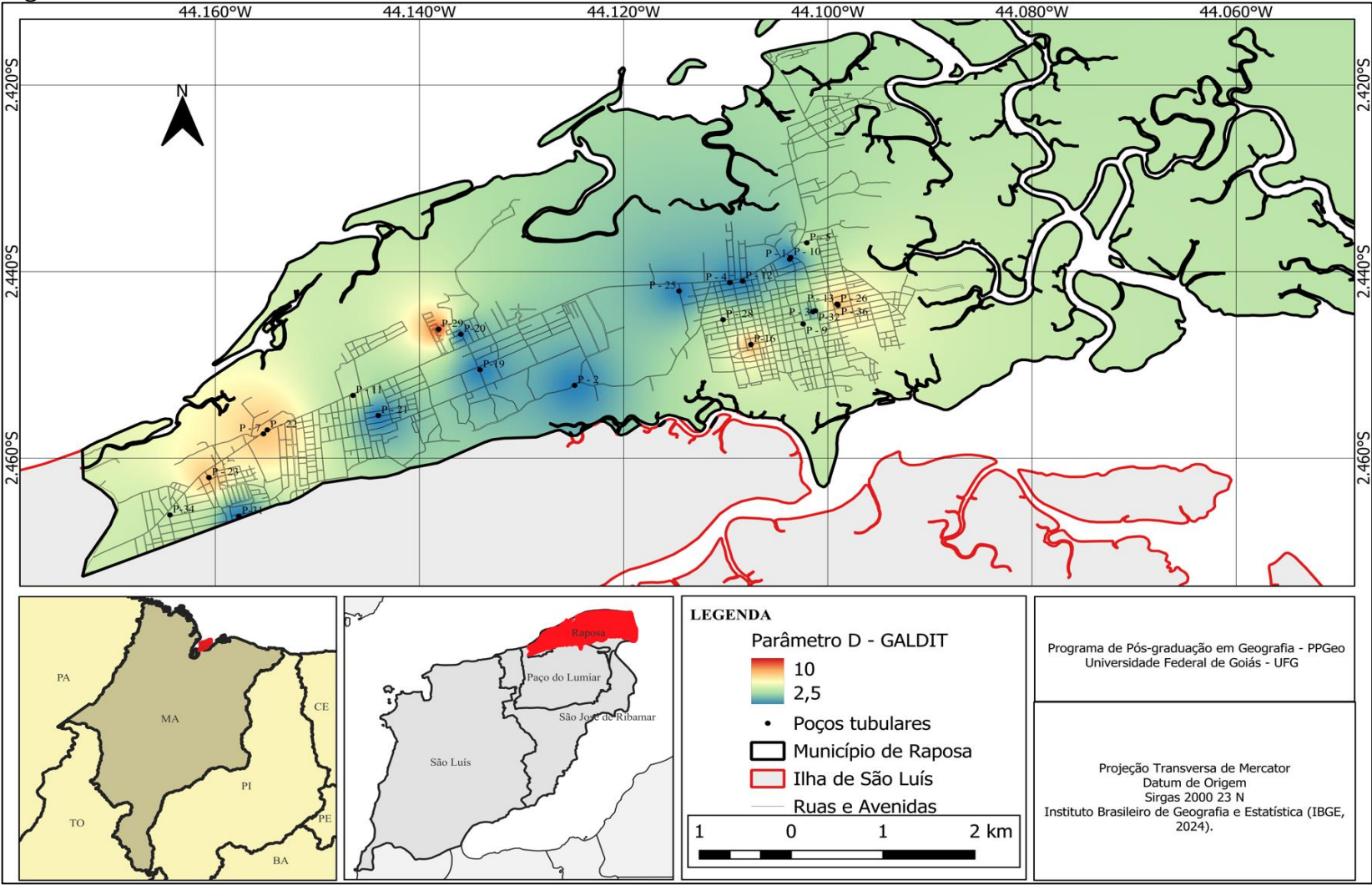
Na área de estudo, as distâncias variam de 567 metros (P-23) a 1.596 metros (P-04), o que, segundo Chachadi e Ferreira (2001), corresponde a valores de vulnerabilidade de 2,5 a 10 (Tabela 5; Figura 19).

Tabela 5 – Distância dos poços tubulares em relação a Linha de Costa - Raposa – MA.

Poço	Distância (m)	Valor atribuído
P-01	1.186	2,5
P-02	1.004	2,5
P-03	1.124	2,5
P-04	1.596	2,5
P-05	981	5
P-07	694	7,5
P-09	939	5
P-10	1.158	2,5
P-11	883	5
P-12	1.569	2,5
P-13	644	7,5
P-16	747	7,5
P-19	1.524	2,5
P-20	1.078	2,5
P-21	1.269	2,5
P-22	677	7,5
P-23	567	7,5
P-25	1.269	2,5
P-26	648	7,5
P-28	936	5
P-29	910	5
P-31	1.094	2,5
P-32	907	5
P-34	800	5
P-36	660	7,5

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Figura 19 – Parâmetro D – Distância da linha da costa.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

6.5 Parâmetro I – Impacto do estado atual da intrusão salina – razão $\text{Cl}^-/[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$

As águas naturais contêm um conjunto de sais em solução, apresentando concentrações mais elevadas nas águas subterrâneas quando comparadas às águas superficiais. Isso ocorre porque essas águas possuem maior capacidade de incorporar quantidades expressivas de materiais solúveis presentes no solo e nas rochas por onde circulam. No entanto, essas concentrações também variam de acordo com o comportamento geoquímico dos compostos químicos envolvidos.

Para avaliar o estado atual da intrusão marinha na cidade de Raposa, o método GALDIT recomenda o uso da razão $\text{Cl}^-/[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$ na caracterização do parâmetro I. O parâmetro I representa o desequilíbrio que pode ocorrer entre a água do mar e a água doce, em decorrência de alterações no equilíbrio hidráulico em condições naturais, resultantes da atividade antropogênica já existente na área.

Após a análise físico-química das amostras de água coletadas durante o trabalho de campo e a aplicação da razão $\text{Cl}^-/[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$, observou-se que, dos 25 poços analisados, 11 apresentaram valores de vulnerabilidade classificados como média a alta, de acordo com os índices 7,5 e 10 do parâmetro I do método GALDIT. Destacam-se, nesse contexto, os poços P-01, P-02, P-03, P-05, P-07, P-09, P-10, P-22, P-26, P-32 e P-36, conforme apresentado na Tabela 6.

Foram atribuídos valores de vulnerabilidade ao parâmetro I do método GALDIT, variando entre 2,5 e 10, em função dos resultados obtidos da razão $\text{Cl}^-/[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$. A partir da interpolação desse parâmetro, tornou-se possível a espacialização dos dados, cujos resultados são apresentados na Figura 18.

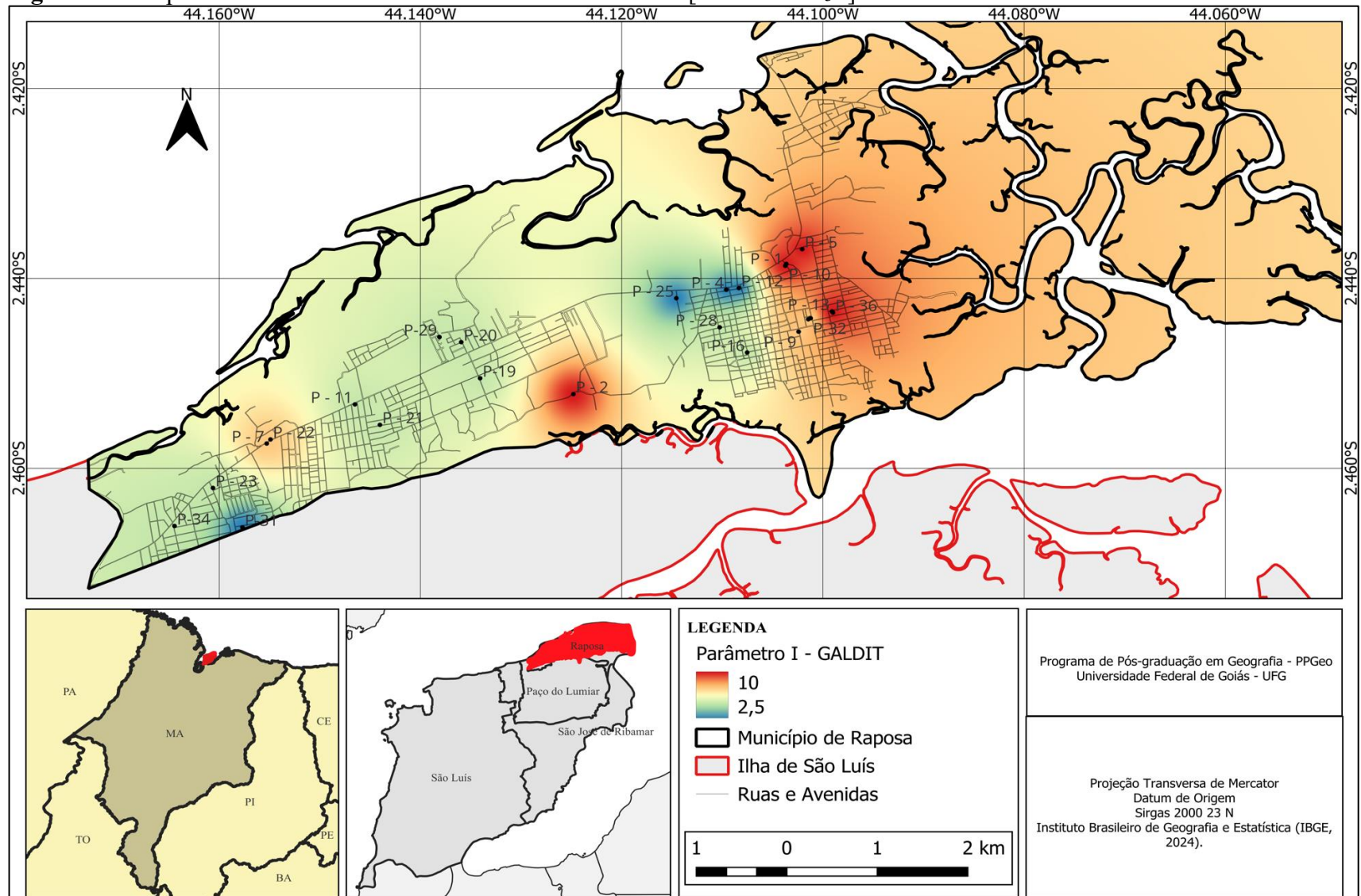
Tabela 6 – Dados dos parâmetros físico-químicos das águas dos poços tubulares coletadas Raposa – MA

Poço	Cl^- mEq/l	HCO_3^- mEq/l	$\frac{\text{Cl}^-}{\text{HCO}_3^-}$	Valor atribuído
P-01	1,10	0,22	5	10
P-02	4,5	1,33	3,3	10
P-03	0,82	0,50	1,64	7,5
P-04	1,1	1,30	0,84	2,5
P-05	1,27	0,15	8,4	10
P-07	0,71	0,36	1,97	7,5
P-09	0,69	0,41	1,68	7,5

P-10	1,10	0,22	5	10
P-11	1,74	1,57	1,10	5
P-12	1,1	1,30	0,84	2,5
P-13	1,08	0,53	2,03	10
P-16	1,58	1,14	1,3	5
P-19	0,67	0,55	1,21	5
P-20	0,75	0,66	1,13	5
P-21	1,74	1,57	1,1	5
P-22	0,71	0,36	1,97	7,5
P-23	1,22	1,15	1,06	5
P-25	1,1	1,30	0,84	2,5
P-26	1,08	0,53	2,03	10
P-28	1,58	1,14	1,38	5
P-29	0,75	0,66	1,13	5
P-31	0,35	0,49	0,71	2,5
P-32	0,82	0,50	1,64	7,5
P-34	1,31	1,23	1,06	5
P-36	1,08	0,53	2,03	10

Fonte: dados da pesquisa, 2025

Figura 20 – Impacto do estado atual da intrusão salina – razão $\text{Cl}^-/[\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}]$



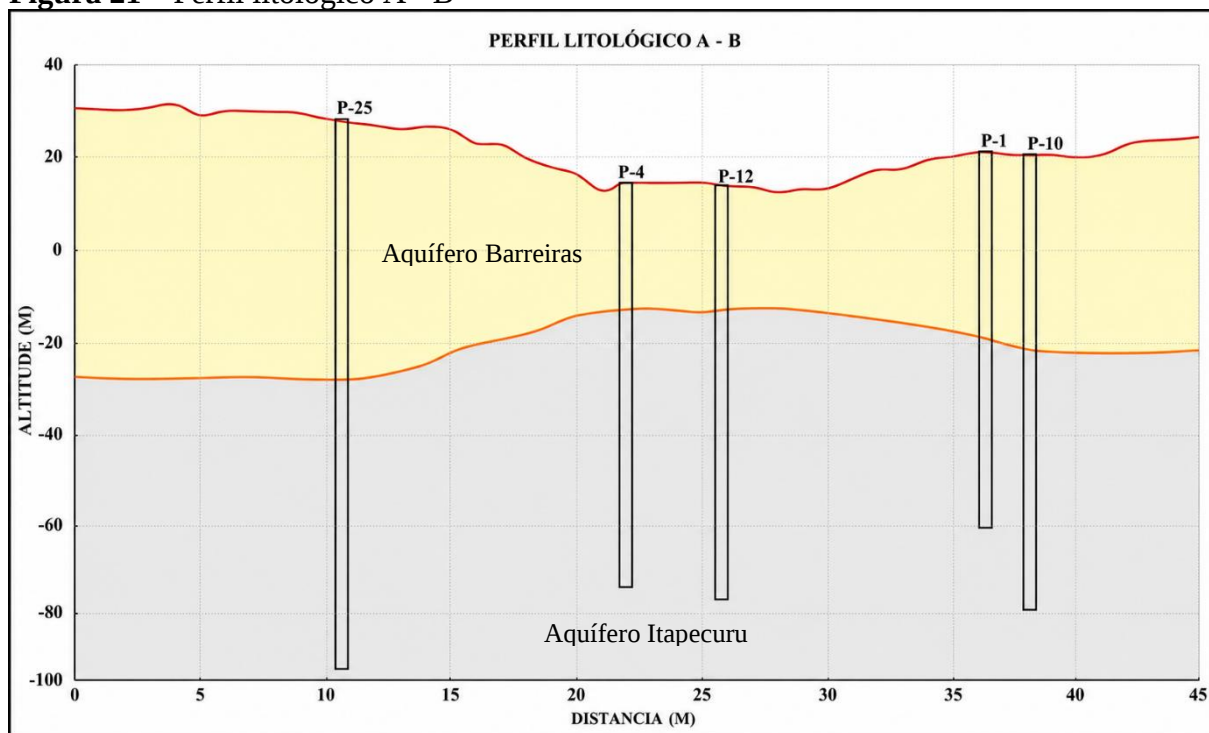
Fonte: Dados da pesquisa, 2025

6.6 Parâmetro T – espessura do aquífero

As características litológicas e a espessura dos aquíferos Barreiras e Itapecuru foram analisadas a partir dos dados de 12 (doze) perfis litológicos. Foram elaborados três perfis a partir dos dados: A-B, C-D e E-F (Figuras 18, 19 e 20), para descrever o comportamento dos aquíferos na área de estudo. O aquífero Barreiras do período Neógeno na cidade de Raposa é apresenta arenitos finos a conglomeráticos, regularmente selecionado, friável, angulosos, com nível de lateritas ocasionalmente, de coloração branca creme, amarelo claro, róseo claro e intercalações marrom claro.

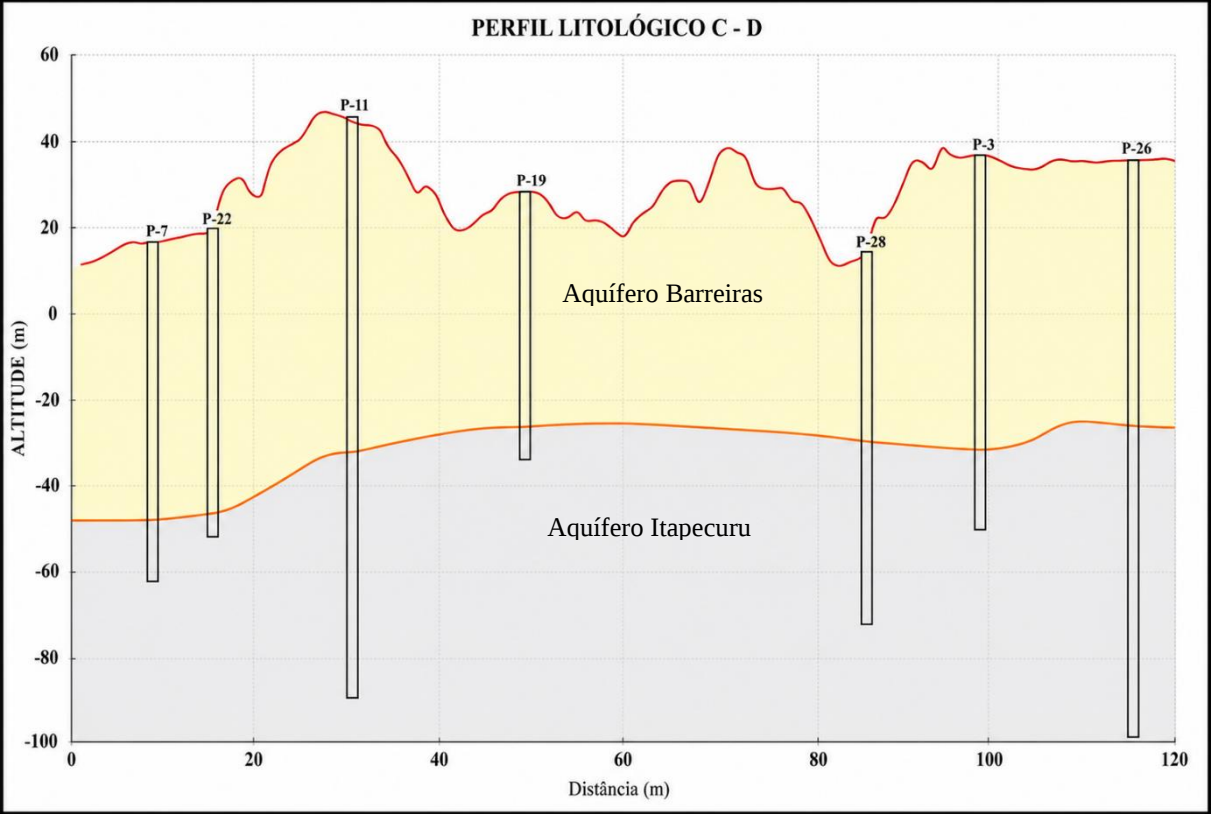
A maior espessura aquífero Barreiras no município atinge aproximadamente 60 metros na área de tabuleiro no poço P-36 (Figura 20). O contato com o Grupo Itapecuru ocorre de forma brusca a gradacional geralmente passando da litologia arenosa para a argilosa e areno-argilosa. O aquífero Itapecuru apresenta-se na área argila siltosa de coloração cinza e siltito arenoso marrom com argilas esverdeadas. Este aquífero está mais espesso nos poços P-10, P-12, 21, e P-26. A espessura média do aquífero Barreiras foi de 31,7 m. Desta forma, adota-se o valor 10 conforme (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2001).

Figura 21 – Perfil litológico A - B



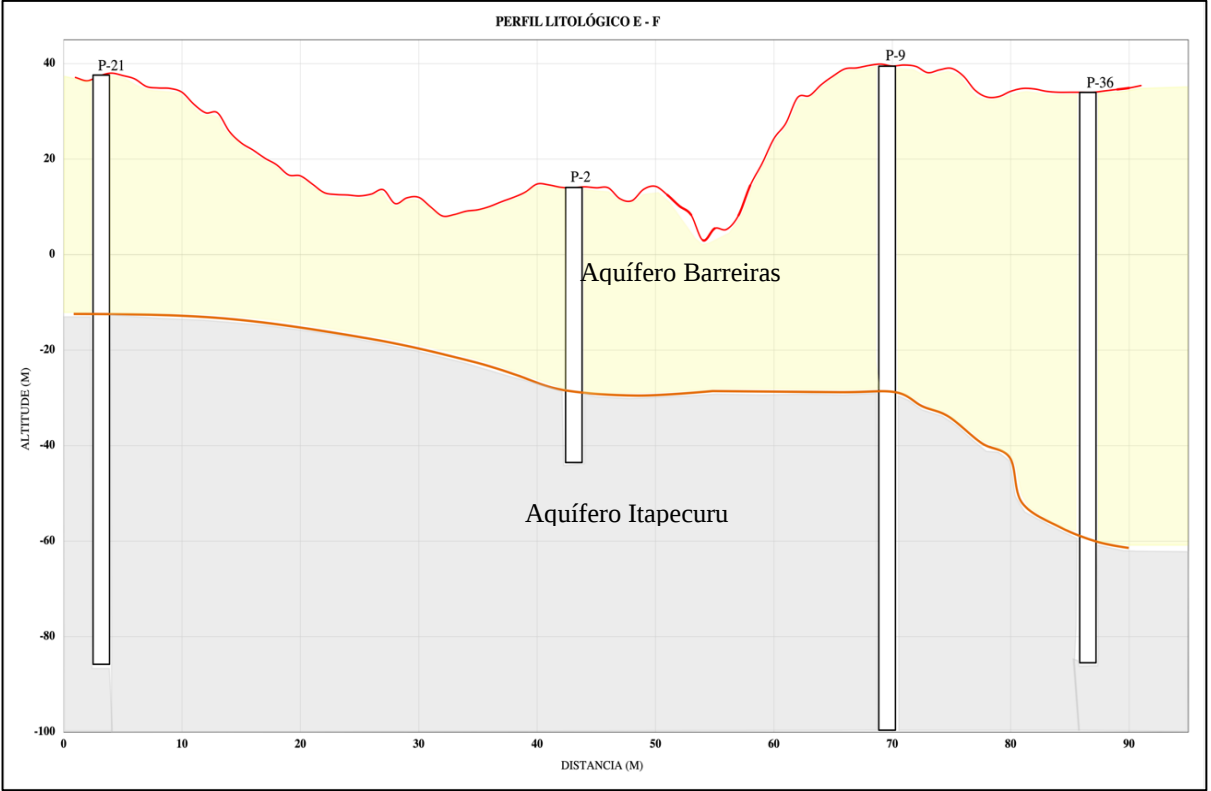
Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Figura 22 – Perfil litológico C - D



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

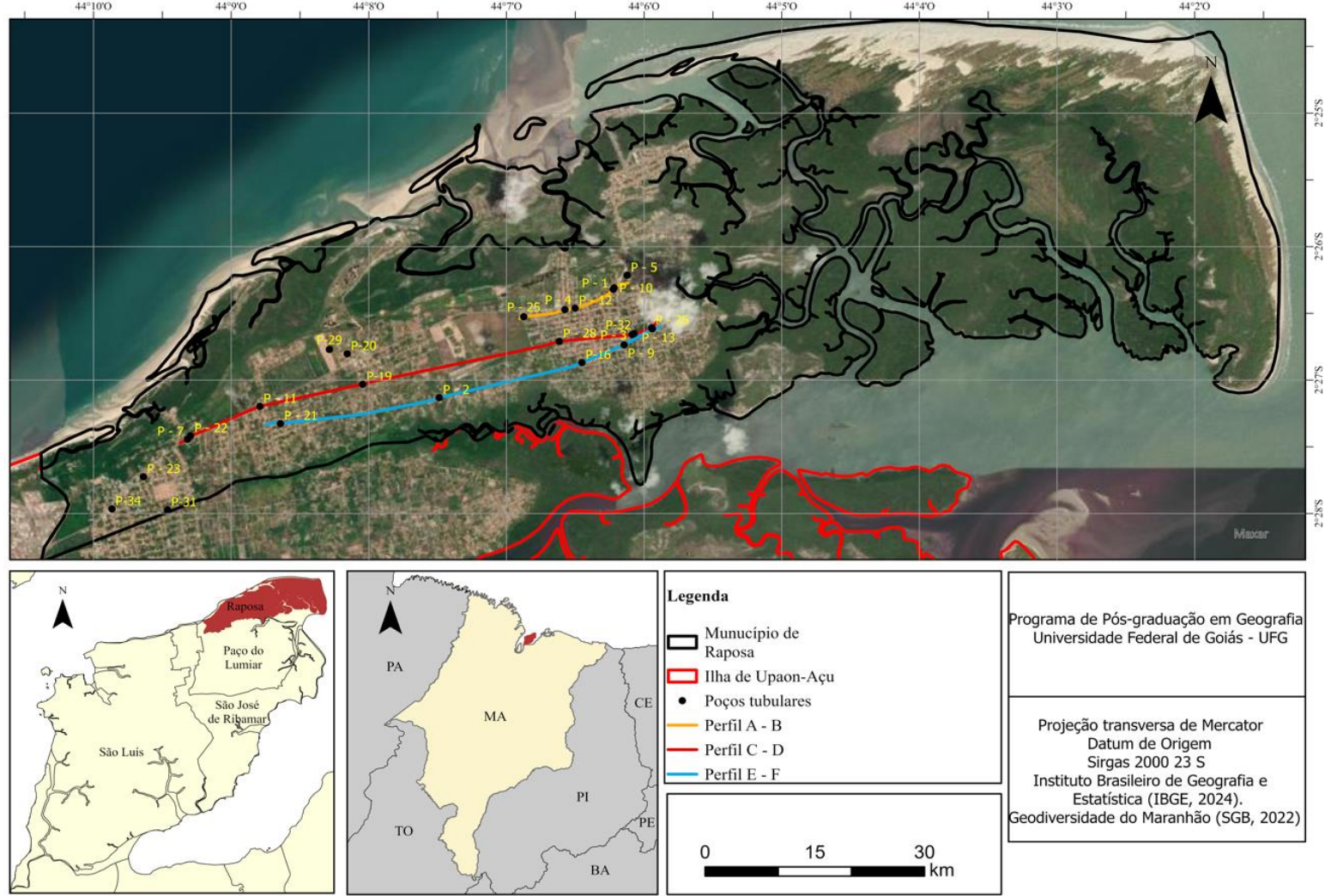
Figura 23 – Perfil litológico E - F



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

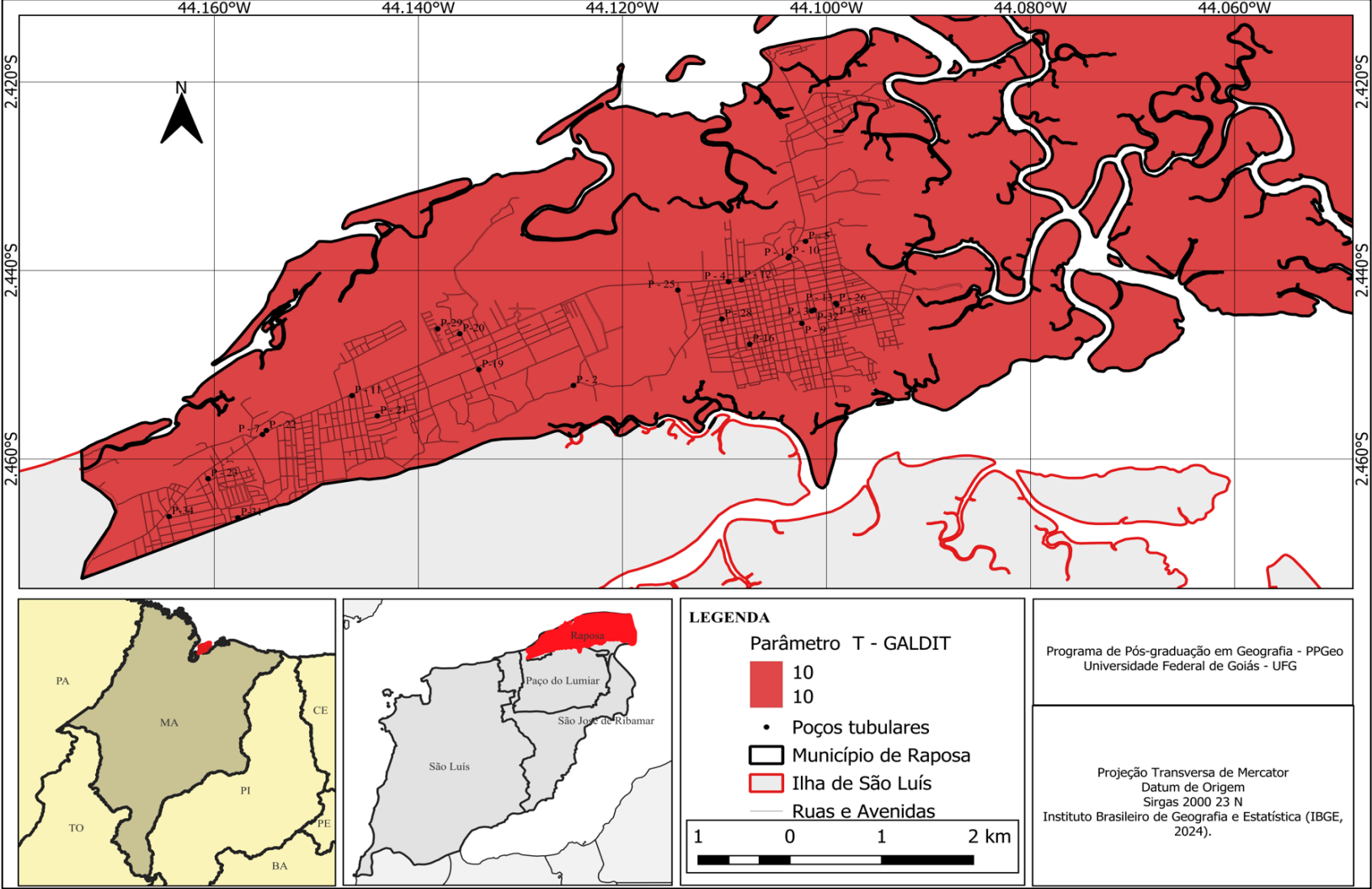
A Figura 23 apresenta a localização dos perfis litológicos traçados para que fosse possível estimar a espessura do aquífero presente na área de estudo a fim de estimar o índice de vulnerabilidade do método GALDIT (Figura 24).

Figura 24 – Mapa dos perfis litológicos (A-B, C-D e E-F)



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Figura 25 – Parâmetro T – espessura do aquífero.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

6.7 Vulnerabilidade à intrusão marinha na cidade de Raposa – MA

O método GALDIT considera as águas provenientes do mar ou de corpos d'água superficiais salinizados. No caso do município de Raposa, além da influência marinha, destacam-se os estuários da bacia do rio Paciência; assim, para a espacialização do método GALDIT, foram considerados os limites da linha de praia e os limites dos afluentes e subafluentes da bacia do rio Paciência.

Com cada um dos índices GALDIT mapeados em formato raster e poligonal em ambiente SIG, foi possível realizar a classificação da área costeira em diferentes categorias de vulnerabilidade à intrusão da água do mar.

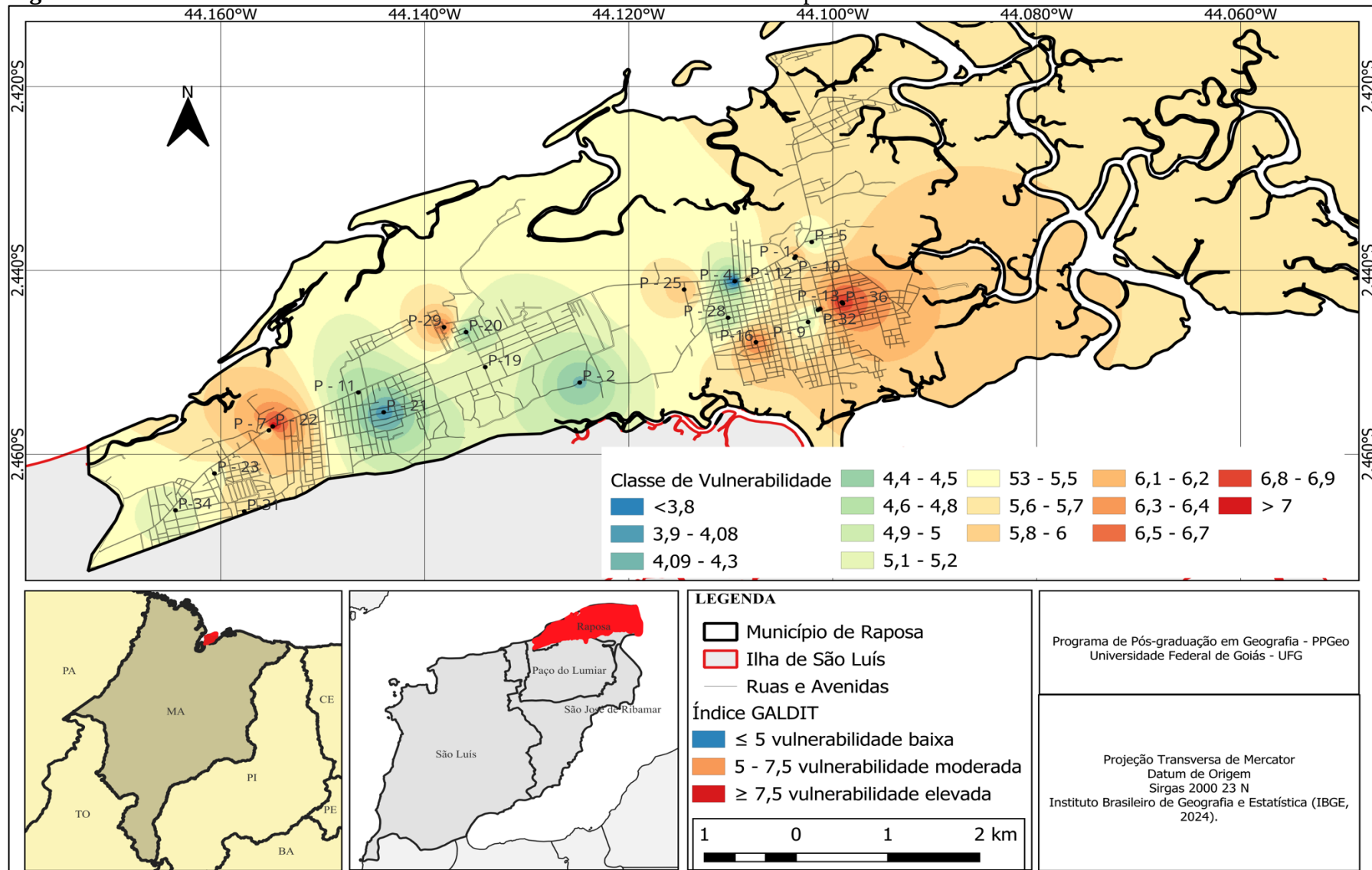
Os valores atribuídos aos parâmetros variam de 2,5 a 10, correspondendo, respectivamente, a condições de vulnerabilidade à intrusão salina baixa e elevada. De modo geral, esses valores são definidos com base em tabelas que estabelecem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o valor do parâmetro associado (Quadros 6, 7, 8, 9, 10 e 11). Os coeficientes de ponderação variam entre 1 e 4 (Quadro 4), sendo relacionados, respectivamente, aos parâmetros de menor e maior influência sobre a vulnerabilidade (Quadro 5; Figura 24).

O município de Raposa apresentou vulnerabilidade elevada ($\geq 7,5$) à intrusão salina em distintos setores da cidade, especialmente na porção leste e centro-leste, bem como na faixa sudeste e sul do território municipal. Ressalta-se que a ocorrência da intrusão nessas áreas está diretamente relacionada à proximidade com o oceano e à influência das marés da bacia do rio Paciência.

Os poços tubulares que registram elevada vulnerabilidade à intrusão marinha são: P-07, P-13, P-16, P-26, P-29 e P-36, a maioria desses poços estão situados em áreas mais urbanizadas da cidade de Raposa. Por sua vez, os poços P-01, P-03, P-10, P-12, P-19, P-23, P-31, P-32 e P-34 apresentam vulnerabilidade moderada, indicando que as áreas onde se encontram esses poços demandam atenção e monitoramento (Figura 26).

Observou-se a indicação de baixa vulnerabilidade nos poços P-02, P-04, P-05, P-09, P-20, P-21 e P-28 (Figura 26), os quais se encontram distribuídos nos setores oeste e sudoeste. Esses poços apresentam menor grau de vulnerabilidade por estarem mais distantes da linha de costa e das áreas sob influência direta das marés.

Figura 26 – Índice final de vulnerabilidade do método GALDIT da cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

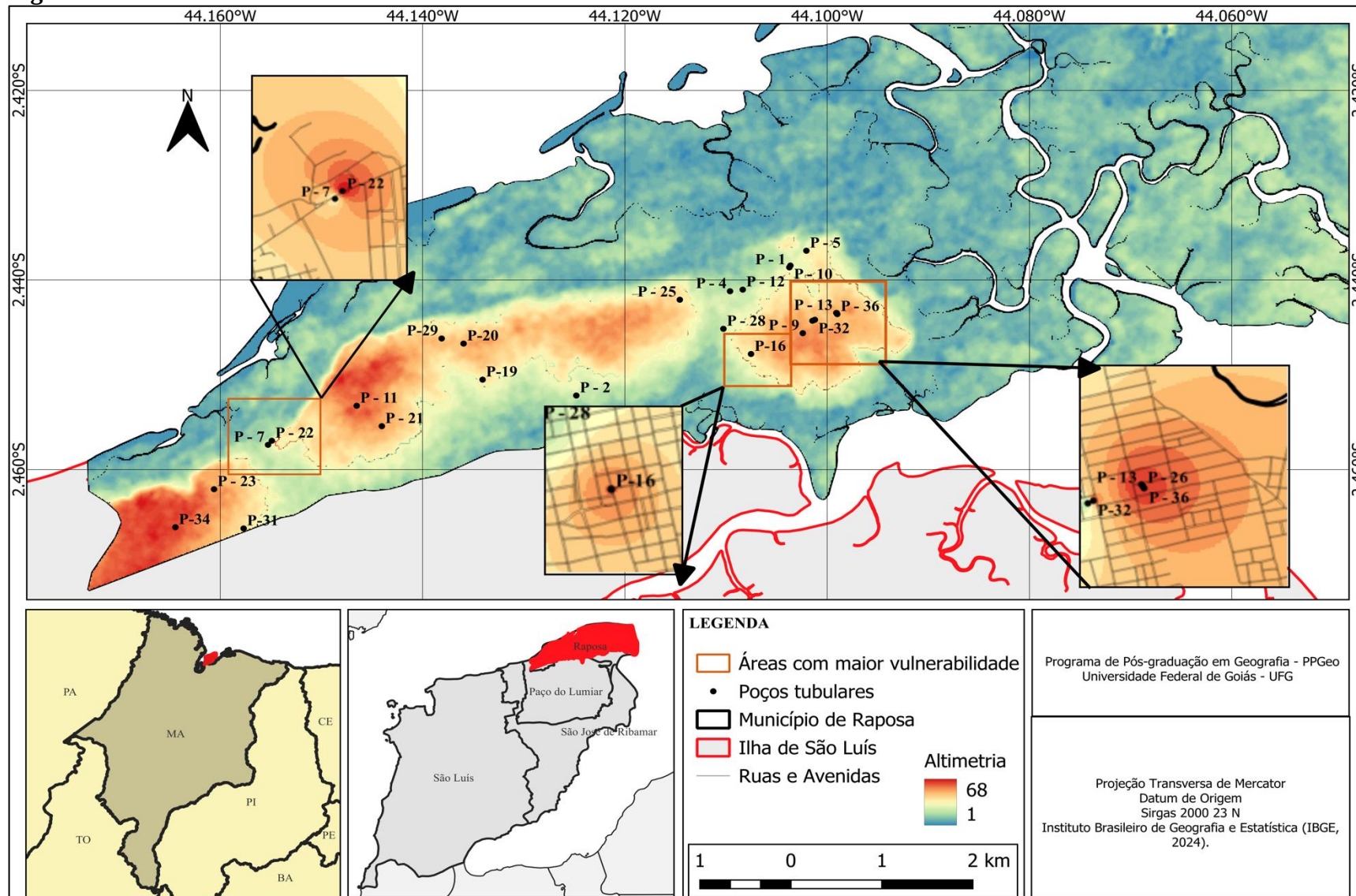
As áreas identificadas como mais vulneráveis (Figura 26) localizam-se, em sua maioria, nos setores mais elevados dos tabuleiros (Figura 27). No entanto, alguns fatores influenciaram a distribuição do índice de vulnerabilidade GALDIT no município de Raposa, destacando-se, principalmente, a litologia da área e a proximidade com as zonas sob influência das marés.

Conforme a Figura 17, que apresenta o índice de vulnerabilidade do parâmetro **A**, relacionado à condutividade hidráulica, observam-se valores mais elevados em áreas com maiores cotas altimétricas. Tal comportamento está associado à presença de sedimentos arenosos bem selecionados, os quais favorecem a infiltração e a percolação da água no solo.

A predominância de sedimentos de granulometria fina a média nas camadas sedimentares contribui para a penetração da água salobra no aquífero, especialmente durante os períodos de maré alta. Esse avanço influencia diretamente os resultados do parâmetro **I** (Figura 20), no qual foi possível identificar a presença da cunha salina a partir das análises físico-químicas realizadas nas amostras de água dos poços tubulares.

Outro fator que contribui para a vulnerabilidade moderada a elevada nessas áreas é a maior concentração populacional do município, sugerindo que a intensa exploração das águas subterrâneas pode influenciar o índice de vulnerabilidade (Figura 27). O aumento da demanda hídrica implica maior frequência e intensidade de bombeamento dos poços tubulares, o que reduz a pressão hidráulica exercida pela água doce em relação à água salgada no subsolo, favorecendo o avanço da intrusão salina. A figura 27 destaca as áreas vulneráveis à intrusão salina considerando a altimetria.

Figura 27 – Áreas com maiores cotas altimétricas mais vulneráveis à intrusão salina



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

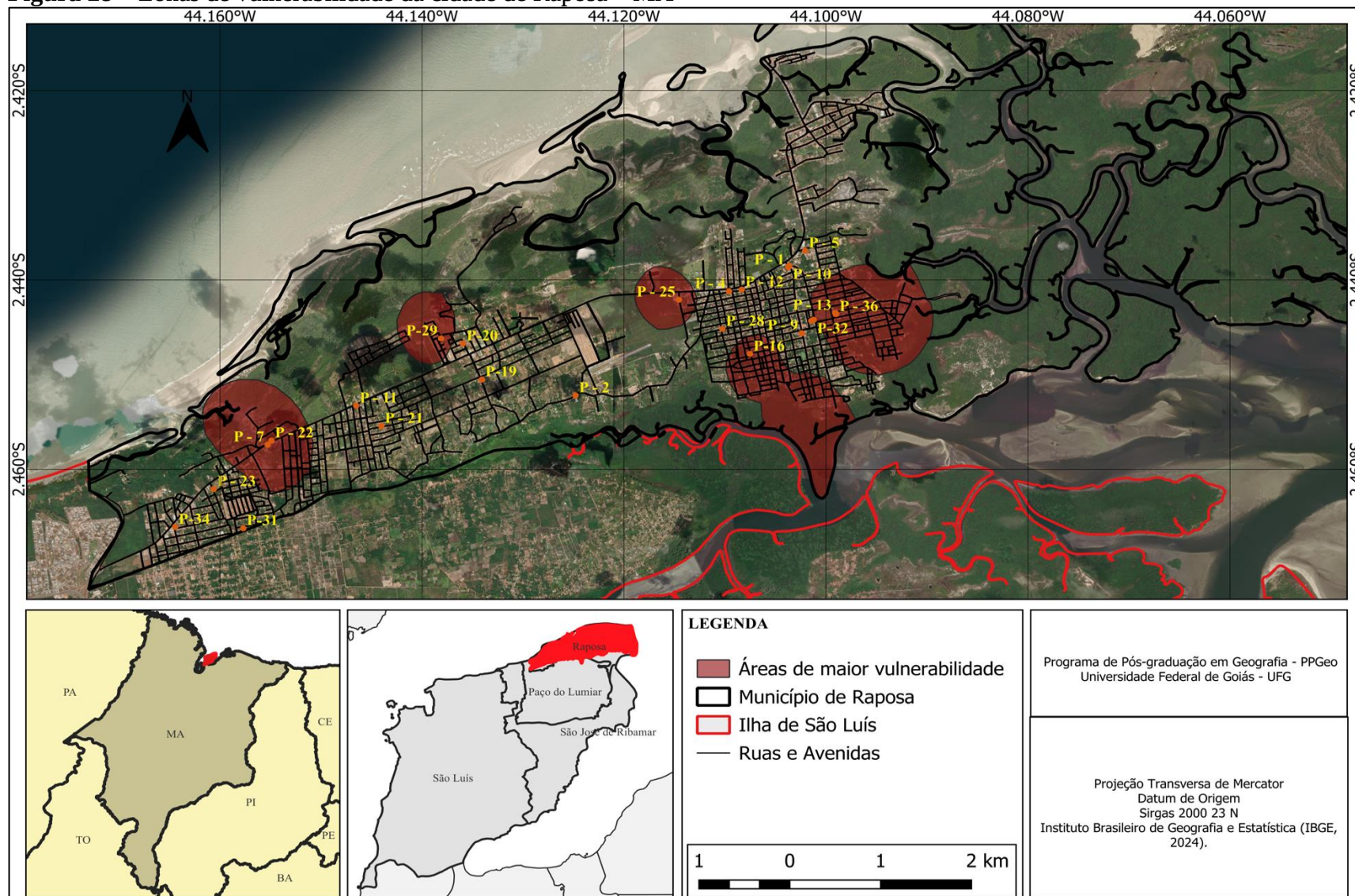
6.7.1 Zoneamento de áreas vulneráveis a intrusão salina

Após a interpolação do índice de vulnerabilidade GALDIT (Figura 26) foi demonstrada as áreas de maior vulnerabilidade à intrusão salina na cidade de Raposa. A figura 28 apresenta a delimitação espacial das áreas de maior vulnerabilidade à intrusão marinha no município de Raposa, destacadas em tonalidade vermelha sobre a base de imagem de satélite. Observa-se que essas zonas encontram-se distribuídas de forma pontual e concentrada, sobretudo nos setores leste, centro-leste, sul e sudeste e em trechos do oeste do município, evidenciando uma forte relação com a proximidade da linha de costa e com os ambientes estuarinos associados à bacia do rio Paciência.

As áreas destacadas coincidem, em grande parte, com porções urbanizadas e com a presença de poços tubulares classificados com elevada vulnerabilidade, indicando que a intrusão salina nesses setores está relacionada tanto a condicionantes naturais quanto à pressão antrópica exercida sobre os aquíferos. A proximidade com canais de maré e estuários favorece a propagação da cunha salina em direção ao continente, especialmente em contextos de desequilíbrio hidráulico induzido pela exploração das águas subterrâneas.

Dessa forma, a figura 28 evidencia áreas críticas que demandam maior atenção no planejamento e na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que concentram poços sujeitos a maior risco de salinização. A identificação dessas zonas é fundamental para subsidiar ações de monitoramento, controle da exploração e definição de estratégias mitigatórias, visando à preservação da qualidade das águas subterrâneas no município de Raposa.

Figura 28 – Zonas de vulnerabilidade da cidade de Raposa – MA



Fonte: Dados da pesquisa, 2025

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O município de Raposa, situado no nordeste da Ilha de São Luís, é majoritariamente abastecido por água subterrânea por meio de poços tubulares. A cidade possui 37 (trinta e sete) poços, dos quais apenas 33 (trinta e três) estão em operação, responsáveis pelo abastecimento de toda a população municipal, estimada em 32.156 habitantes, segundo dados do IBGE (2025). São administrados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), autarquia vinculada ao Governo do Estado do Maranhão.

Dos 33 poços tubulares em funcionamento no município, apenas 25 apresentou algum tipo de dado passível de aproveitamento na pesquisa, sendo que, em 12 deles, foi possível obter perfis litológicos mais detalhados. Ressalta-se que esse cenário de escassez de informações hidrogeológicas compromete a gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos e evidencia problemas estruturais relacionados aos poços tubulares em Raposa. Essa deficiência na gestão pode gerar impactos negativos, resultando na redução do bem-estar da população que depende desse recurso.

A ausência ou a não disponibilização de dados hidrogeológicos referentes aos poços tubulares está em desacordo com a Portaria nº 0069/2020, que estabelece critérios técnicos mínimos para a perfuração, realização de testes de bombeamento, entre outros procedimentos, bem como com a normativa nº 03/2023, a qual prevê sanções em casos de descumprimento. A perfuração irregular, aliada à falta de acompanhamento técnico, potencializa os riscos de intrusão salina, especialmente em um contexto caracterizado pela variabilidade hidrológica sazonal e pelo uso intensivo das águas subterrâneas que incidem sobre a área de estudo.

Os poços tubulares estão distribuídos por toda a área urbana do município de Raposa, instalados predominantemente sobre os tabuleiros, feições geomorfológicas caracterizadas por cotas altimétricas entre 30 e 65 metros, com superfícies planas ou suavemente onduladas. Essas áreas são circundadas pela planície flúvio-marinha, marcada pela presença de gleissolos, extensas áreas de mangue, trechos de estuários, e apresentam salinidade elevada, agravada nos períodos de estiagem. A pesquisa evidencia a influência das marés no município, resultante da interação entre os afluentes da bacia do rio Paciência e o oceano, condição que atua como fator determinante no processo de intrusão salina.

Após a aplicação da metodologia GALDIT, verifica-se que as áreas com maior vulnerabilidade à intrusão salina correspondem aquelas mais próximas das zonas sob influência das marés e da linha de costa, combinação que intensifica a ocorrência desse fenômeno. Nesse contexto, a intrusão pode ser favorecida pelos canais fluviais pertencentes à bacia do rio

Paciência e por trechos estuarinos que conduzem as águas marinhas em direção ao interior do município de Raposa, como evidenciado nos poços P-07, P-13, P-16, P-22, P-25, P-26, P-29 e P-36.

O mapeamento do índice GALDIT, a partir da integração dos parâmetros, indica que áreas com maior concentração populacional e maior densidade de poços tubulares, especialmente aquelas situadas mais próximas da linha de costa e sob influência das marés, apresentam vulnerabilidade moderada a elevada à intrusão marinha. Esse cenário pode estar relacionado tanto à proximidade com o oceano quanto à intensa exploração das águas subterrâneas, que favorece o avanço da cunha salina.

Destaca-se que os parâmetros que exerceram maior influência no índice GALDIT foram o parâmetro A (condutividade hidráulica), o parâmetro L (nível piezométrico) e o parâmetro D (distância da linha de costa), evidenciando que os pesos atribuídos a esses fatores (3, 4 e 4, respectivamente) têm papel significativo na definição e na configuração do mapa de vulnerabilidade.

Portanto, recomenda-se a implementação de ações de gestão e planejamento territorial alinhadas às características geológicas e geotécnicas do município de Raposa. Torna-se igualmente necessária a gestão adequada das áreas de tabuleiros, uma vez que essas feições constituem zonas de recarga dos aquíferos, fundamentais para a manutenção das reservas hídricas do município e da Ilha do Maranhão. Trata-se de áreas mais elevadas e relativamente planas, onde a pressão da especulação imobiliária é intensa e desordenada.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a vulnerabilidade à intrusão salina no município de Raposa configura-se como um problema emergente, intensificado pela escassez de dados sistematizados e pela gestão inadequada dos recursos hídricos subterrâneos no município. A aplicação do método GALDIT possibilitou a identificação das áreas mais suscetíveis à intrusão salina, tornando viável a adoção de medidas mitigatórias voltadas à proteção do município frente a esse processo.

Além da identificação das áreas mais vulneráveis, a aplicação do método GALDIT permitiu avaliar o comportamento dos parâmetros utilizados na composição do índice, evidenciando sua adequação à realidade hidrogeológica do município de Raposa. Observou-se que os parâmetros A (condutividade hidráulica), L (nível piezométrico) e D (distância da linha de costa), que possuem maiores pesos no método, mostraram forte correspondência com as áreas onde a vulnerabilidade se apresentou mais elevada. No entanto, verificou-se que, no contexto local, a influência das marés e a presença de canais estuarinos associados à bacia do rio Paciência potencializam o efeito desses parâmetros, sugerindo que a dinâmica

hidrodinâmica costeira exerce papel ainda mais relevante na configuração da vulnerabilidade aquífera.

A adoção de medidas mitigatórias pode reduzir os riscos associados à intrusão salina, contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos subterrâneos no município de Raposa. Destacam-se:

- Atualização dos dados hidrodinâmicos e hidrogeológicos dos poços tubulares, com a sistematização de informações referentes aos perfis litológicos, testes de bombeamento e histórico de operação, de modo a subsidiar a tomada de decisões técnicas;
- Avaliação dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea (pH, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais), fundamentais para a análise da qualidade e da potabilidade da água;
- Racionalização do bombeamento dos poços tubulares e incentivo ao uso sustentável dos recursos hídricos pela população, visando à redução do desperdício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, ANA. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília, ANA, 74 p. 2005.

ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes ALLER, L. *et al.* **DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting**. USEPA Report 60002-85/018. United States Environmental Protection Agency (USEPA) Environmental Research Laboratory; Ada, Oklahoma. 1985.

ALLER, L. *et al.* **DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting**. USEPA Report 600/02-87/035. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Environmental Research Laboratory; Ada, Oklahoma. 1987.

ALMEIDA, G. M. **Estudo do Aquífero Costeiro de Maricá–RJ: Instrumentação e Investigação do Comportamento da Cunha Salina**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado–Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ALMEIDA, GM DE; SILVA JÚNIOR, GC DA. **Fatores hidrogeológicos no estudo da intrusão salina em aquíferos costeiros da região litorânea do município de Maricá - RJ**. Anuário Instituto de Geociências, v. 2, pág. 104–117, 2007.

ANA. Atlas Brasil. **Abastecimento Urbano de Água**. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Home.aspx>. Acesso: 10/10/2024.

ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP: série científica**, São Paulo, v. 6, n. 2, p.1-6, outubro 2006. Disponível em: < <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/27419>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

ARAÚJO, Karen Vendramini de; CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno; FREIRE, Diolande Ferreira Gomes; OLIVEIRA, Rafael Mota de; MAIA, Saulo Robério Rodrigues; SOUSA, Joel Pedrosa; LIMA NETO, Inácio Ocinaí de. Vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha em aquífero costeiro do Estado do Ceará. **Derbyana**, [S. l.], v. 44, 2023. DOI: 10.14295/derb.v44.794. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/794>. Acesso em: 6 mai. 2025.

AUGE, M. **Vulnerabilidad de acuíferos: conceptos y métodos**. Servicio Geológico Minero Argentino – SEGEMAR. Serie Contribuciones Técnicas Ordenamiento Territorial nº7. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires, 2007.

BACCI, Denise de La Corte; PATACA, Ermelinda Moutinho. Educação para a água. **Estudos avançados**, v. 22, p. 211-226, 2008.

BARROS, José Sidiney; BANDEIRA, Íris Celeste Nascimento. **Geodiversidade da ilha do Maranhão**. Levantamento da geodiversidade: nota explicativa. Teresina: CPRM, 2020. 149 p.

BRAGA, C. E.; LAGE, I. C.; SILVA JUNIOR, G. C. ; FREITAS, A. D. ; BENTO, E. S.. O Comportamento Hidroquímico e Hidrodinâmico de Aquífero Sob Influência do Efeito-Maré. **Águas Subterrâneas**, 2002. Disponível em: file:///Users/leonilsonlima/Downloads/22727-Texto%20do%20artigo-3082-82167-10-20110823.pdf . Acessado: 22 de out. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. (2001). Resolução CNRH nº 15, de 11 de janeiro de 2001. Brasília, DF. 2001.

BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2000]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19984.htm. Acesso em: 26 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal. 1997.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021. Anexo Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano.

BRITO, Evandro de Oliveira; FRANCO, Paola Bianca Gomes Tabaranã; OLIVA, Pedro Andrés Chira. Utilização da ferramenta Ground Penetrating Radar (GPR) e da modelagem 3-D para a detecção da interface de interação água doce/salgada da Vila do Bonifácio, Praia de Ajuruteua (Bragança-PA)/Use of the Ground Penetrating Radar (GPR) tool and 3-D modeling to detect the sweet/salt interaction interface in Vila do Bonifacio, Praia de Ajuruteua (Bragança-PA). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 14185-14224, 2021.

BRITO, I.M., 2001. **Geologia Histórica**. Uberlândia: Editora da Universidade Federal de Uberlândia. 412 p.

BUENO, Arthur Renato de Assis. **Avaliação de diversos poços tubulares profundos da região noroeste do estado de São Paulo**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019.

CABRAL, J. J. S. P.. **INTRUSÃO SALINA EM AQUÍFEROS COSTEIROS: UMA ANÁLISE PELO MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p 03-05, 1985. (Dissertação de Mestrado).

CALEGÁRIO, G. **Aspectos estruturais da vegetação do manguezal do estuário do Rio São João, RJ**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

CAMPOS, José Eloi, e Manuela Freire Galvão. “**Bacias hidrogeológicas: conceitos e aplicações**”. *Derbyana*, vol. 44, julho de 2023.

CASTRO, Renata Maria Sousa; PEREIRA, Ediléa Dutra; DE OLIVEIRA, Manuel Mendes. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA EM AQUÍFEROS COSTEIROS PELO MÉTODO GALDIT: FRANJA COSTEIRA DE SÃO LUÍS (MA) – BRASIL. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 23, n. 89, p. 221–240, 2022. DOI: [10.14393/RCG238960399](https://doi.org/10.14393/RCG238960399). Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/60399>. Acesso em: 22 jun. 2025.

CHACHADI, A.G. LOBO-FERREIRA, J.P. **Sea Water Intrusion Vulnerability Mapping of Aquifers Using GALDIT Method**. Proceedings of the Workshop on Modelling in Hydrogeology, Anna University, Chennai, 143-156, 2001.

CHACHADI, A.G; LOBO-FERREIRA, J.P. **Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 2— GALDIT Indicators Description**, Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrogeology and Management of Water Resources, Portugal, 11–14, July 2005.

CHACHADI, A.G; FERREIRA, J.P.L. Sea water intrusion vulnerability using GALDIT method: Part 2 – GALDIT indicators description. In Ferreira, J.P.L; Vieira, J. (eds) – *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, 2007, pp. 172-180.

CHAVES, L. H. G.; GUERRA, H. O. C. **Solos agrícolas**. Campina Grande: EDUEFCG, 2006. 178p.

Chronidou, D.; Tziritis, E.; Panagopoulos, A.; Oikonomou, E.K.; Loukas, A. A Modified GALDIT Method to Assess Groundwater Vulnerability to Salinization—Application to Rhodope Coastal Aquifer (North Greece). **Water**, 14, 3689, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w14223689>>. Acesso em: 19 set. 2025.

COSTA, Ana Marcilene Ribeiro; WAICHMAN, Andréa; DOS SANTOS, Euler Erlanger Aparício. Uso e qualidade da água subterrânea na cidade de Manaus. **Águas Subterrâneas**, 2004.

COSTA, H. O. S. **Análise Hidrológica Aplicada à Gestão Águas – região oeste da ilha de São Luis- Ma**. 2003, 68 f. Especialização em meio ambiente e recursos hídricos – Universidade Estadual do Maranhão, São Luis, 2003.

CRUZ, A.; SILVA JÚNIOR, G. C.; ALMEIDA, GM de. Modelagem hidrogeoquímica do aquífero freático da restinga de Piratininga, Niterói-RJ. In: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo**. 2006. p. 141-160.

CURI, N.; Larach, J.O.I.; Kämpf, N.; Moniz, A.C.; Fontes, L.E.F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.
CUSTODIO, E. Groundwater problems in coastal áreas. Capítulo 2, UNESCO, Belgica, ISBN: 92-3-102415-9. 1987.

d' eausouterraine. Bulletin BRGM, 1970.

DINIZ, J. A. O.; PAULA, T. L. F. de; MONTEIRO, A. B.; FEITOSA, A. C.; CARDOSO, A. de C.. Taxonomia Hidrogeológica – Unidades Básicas de Referência. **Anais. XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas – ABAS**, 2012.

Feitosa, F. A. C., *et al.* **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. In: Feitosa, F. A. C. *et al.* (3ª Ed.). Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, 2008. 812 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. FERRAZ, C. M. L.; VALADÃO, R. C. **Barreiras: formação ou grupo? (contribuições da análise geomorfológica do litoral sul da Bahia e das “chapadas” do Jequitinhonha)**. In: CONGRESSO ABEQUA, 10., 2005, Guarapari, ES. **Resumos [...]** Guarapari, ES: ABEQUA, 2005.

FERRAZ, FERNANDO DE MEDEIROS; MIYASHIRO, NILTON JORGE; RIYIS, MARCOS TANAKA; CUNHA, RODRIGO CÉSAR DE ARAUJO. Determinação da Condutividade Hidráulica em Ensaios de Campo: Infiltração em Sondagens e Slug test em Poços de Monitoramento. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2019. DOI: 10.14295/ras.v0i0.29635. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29635>. Acesso em: 5 out. 2025.

Fetter C.W. **Applied hydrogeology**. New Jersey, Prentice-Hill, (ed) 1994. p.588.

FETTER, Charles Willard. **Applied Hidrogeology**. 2. ed. Toronto: Merrill, 1988.

Foster S. S. D., Chilton P. J. 2003. **Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation**. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series B: Biological Sciences, v. 358, n. 1440, p. 1957-1972. 2003. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1380>.

FOSTER, S. S. D. HIRATA, R. C. A. Groundwater pollution risk assessment: a
FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Avaliação do risco de poluição das águas subterrâneas: uma metodologia baseada em dados existentes**. Organização Mundial de Saúde, Organização Pan-americana de Saúde, Centro Pan-americano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais. Lima, 78 p.1988.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Edição brasileira: SERVIMAR – Serviços Técnicos Ambientais Ltda., Banco Mundial. 104 p. 2006.

FRANCISCO, R. F. **Contribuição metodológica à estimativa da vulnerabilidade natural e perigo de contaminação de aquíferos livres granulares**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro. 175f. 2018.

GEODIVERSIDADE DA ILHA DO MARANHÃO BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Org.). – Teresina: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 2013.

GEODIVERSIDADE DA ILHA DO MARANHÃO. BARROS, José Sidney; BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (Orgs.). – Teresina: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 2020.

GÓES, A. M. **A formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba.** Universidade de São Paulo. São Paulo. p. 171, 1995. (Tese de Doutorado).

GOFFERMANN, M. **Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS.** 2013. 142 f. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <file:///D:/Documents/Downloads/000915714%20(1).pdf>. Acesso em: 27 nov. 2024.

GOMES, M. C. V.; JÚNIOR, C. B.; VALDATI, J.; SILVA, M. P. **Vegetação de restinga: condicionantes pedológicos e geomorfológicos em costa de alta energia (Florianópolis-SC).** Geosul, v. 37, n. 83, p. 72–91, 2022.

GRASSI, Marco Tadeu. **Águas no planeta Terra /Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola.** Edição especial – maio 2001.

GUEDES, D. R. da C. Planície flúvio-marinha do Rio Grande do Norte: uma abordagem geossistêmica. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 2, p. 821–831, 2016. DOI: 10.21680/2447-3359.2016v2n0ID10530. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10530>. Acesso em: 19 jun. 2025.

GUERRA, Antonio José Teixeira; MARÇAL, Mônica dos Santos. (ORG.). **Geomorfologia ambiental.** 3ª. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 189 p

HAMZEHLOO, A. *et al.* **Modelling saline intrusion using dynamic mesh optimization with parallel processing.** Advances in water resources, v. 164, n. 104189, p. 104189, 2022.

HIRATA, Ricardo, Suhogusoff, A. V., Marcellini, S. S., Villar, P. C., & Marcellini, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento.** . [São Paulo]: Instituto Trata Brasil. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf>. Acesso em: 26 maio. 2025.

Hydrogeology, Anna University, Chennai, 143-156, 2001.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira: Sistema fitogeográfico, Inventário das formações florestais e campestres, Técnicas e manejo de coleções botânicas, Procedimentos para mapeamentos.** Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro: 2012.

JACOMINE, P.T.K. **Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros.** In: Reunião técnica sobre solos coesos dos tabuleiros costeiros; Pesquisa e desenvolvimento para os tabuleiros costeiros. Cruz das Almas, 1996. Anais. Aracaju, EMBRAPA - CPATC/EMBRAPA - CNPMF/EAUFBA/IGUFBA. 1996. p.13-26.

KASENOW, M. **Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis.** Colorado: Water Resources Publication, 2002.

KLEIN, Evandro Luiz; LOPES, Elem Cristina dos Santos; ANJOS, Gisele Corrêa; TEIXEIRA, Sheila Gatinho; MOURA, Elyana Melo. Unidades litoestratigráficas. _In: **GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO MARANHÃO**: Sistema de Informações Geográficas (SIG): texto explicativo dos mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Maranhão. KLEIN, Evandro Luiz; SOUSA, Cristiane Silva de. Belém: Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 2012, cap. 3, p.41-88.

LEPSCH, Igo F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de textos, 2ª edição, São Paulo, 2016.

MARANHÃO, Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro. Macrozoneamento do Golfão Maranhense. Diagnóstico Ambiental da Microrregião da Aglomeração Urbana de São Luís e dos Municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário. Apostila. SEMA/MMA/PNMA: Estudo de Pedologia/Cobertura Vegetal; São Luís, 2002.

MARANHÃO. Universidade Estadual do Maranhão. **Atlas do Maranhão**. 2ª edição. São Luís: UEMA/LABGEO, 2002.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63: 83-96, 2008.

MARTINS, Bruno Neves. **Avaliação da vulnerabilidade à intrusão salina no curso inferior do Rio Bacanga através do método Galdit**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

MAVRIOU, Z.; KAZAKIS, N.; PLIAKAS, F.-K. Assessment of Groundwater Vulnerability in the North Aquifer Area of Rhodes Island Using the GALDIT Method and GIS. **Environments**, v. 6, n. 5, p. 56, 2019. DOI: [10.3390/environments6050056](https://doi.org/10.3390/environments6050056) Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3298/6/5/56>>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MEINZER, O. E. **Quantitative methods of estimating groundwater supplies**. Bull Geol Soc Am 31:329–338. 1920.

Methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Model-Case Study in Goa. Jalvigyan Sameeksha, 20, 2005.

Monteles, J. S; Castro, T. C. S; Viana, D. C. P; Conceição, F. S; França, V. L & Funo, I. C. S. A. (2009). **Percepção sócio-ambiental das marisqueiras no município de Raposa-MA**. Revista Brasileira de Engenharia de Pesca. 4 (2) 34-45.

NOVO, M.E. **Alterações climáticas e seus impactos nos recursos hídricos subterrâneos em ilhas de pequena dimensão (caso de estudo: Açores - Ilha Terceira)**. Universidade dos Açores, Doutorado em Engenharia do Ambiente. 2007.

of Aquifers Using GALDIT Method. Proceedings of the Workshop on Modelling in

Paz, J. D. S. **Fácies, Petrografia e Geoquímica da Formação Codó, Neo-Aptiano, Bacia de São Luís-Grajaú**. Universidade Federal do Pará. Belém. p. 10-11, 2005. (Tese de Doutorado).

PEREIRA, Ediléa Dutra. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do reservatório Batatã - São Luís (MA). 2006. xviii, 141 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.

PEREIRA, E. D., Martins, T., Henriques, M. J., Ferreira, J. P. L., Querner, E. **Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação da Água Subterrânea e da Intrusão Marinha na Bacia Hidrográfica do Rio Pindaré-Ma Utilizando o Método DRASTIC e GALDIT**". 10º SILUSBA, 2011, 10 pp.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha; BRAGA JR., Benedito P. F.; TUNDISI, José Galizia (org.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.

RODRIGUES, T. L. N. *et al.* (Org) **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**: São Luís, Folha SA-23-2-A, Cururupu Folha SA-23-X-C, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM, 1994, 185 p.

SANTOS, G. I. F. A. dos; RIBEIRO, D. de Q.; CRUZ, W. L. da; PEREIRA, E. D. Levantamento das características hidrogeológicas do Aquífero Bar-reiras e Itapecuru na bacia hidrográfica do Rio Paciência-MA. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 34, n. 1, 2020. DOI: 10.14295/ras.v34i1.29811. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29811>. Acesso em: 6 dez. 2025.

[SANTOS JÚNIOR, O. F.](#); [COUTINHO, R. Q.](#); SEVERO, R. N. F. **Propriedades Geotécnicas dos Sedimentos da Formação Barreiras no Litoral do Rio Grande do Norte**. Geotecnia (Lisboa), v. 134, p. 87-108, 2015.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. Ed., ver. e ampl. – Brasília, DP: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, J. H. S.; PEREIRA, E. D. ; LIMA, L. G. ; RANGEL, M. E. S. ; COSTA, H. O. ; SILVA, J. X. ; SANTOS, G. I. F. A. ; GRACA, J. P. ; SILVA, S. S. ; MORENO, M. G. ; MACEDO, J. F. ; SERRA, S. L. _ _s Bases Naturais do Bioma Amazônico no Estado do Maranhão: Geologia, Geomorfologia e Hidrogeologia. In: **SUMÁRIO EXECUTIVO DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DO ESTADO DO MARANHÃO** (ZEE): etapa Bioma Amazônico. CATUNDA, Paulo Henrique de Aragão; DIAS, Luiz Jorge Bezerra da Silva (orgs.). São Luís: Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC), 2019, cap. 2, p. 30-91.

SANTOS, Raquel Toste Ferreira dos. **Mudanças climáticas e a zona costeira: uma análise do impacto da subida do nível do mar nos recursos hídricos – o caso do Canal de São Francisco – Baía de Sepetiba – RJ**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2012.

Silva B. T. A. & Gomes C. C. 2007. Intrusão marinha em poços de exploração de água subterrânea, na beira-mar de Fortaleza – Ceará. In: 17º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, Anais[...], p. 1-20.

SILVA, Alex Nunes. **Geossímbolos da vida em Raposa, Maranhão: entre redes, rendas e barcos**. Revista Ciência Geográfica, v. XXV, p. 1553-1570, 2021.

SILVA, Alex Nunes. Toponímias e Questões Espaço-Culturais: Identidades em Raposa - MA. **Geografia (Londrina)**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 285–303, 2020. DOI: 10.5433/2447-1747.2021v30n1p285. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/40045>. Acesso em: 22 de jul. 2025.

SILVA, Q. D. da. **Proposta de zoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do Tibiri, São Luís – MA**. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

SILVA, Q.D. **Mapeamento Geomorfológico Da Ilha Do Maranhão**. Tese (Doutorado em Geografia), FCT – UNESP, Presidente Prudente, 2012.

SOBRINHO, A. F. C.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Uso do índice GALDIT para avaliação da vulnerabilidade à salinização do aquífero Boa Viagem – Região metropolitana do Recife**. Revista Águas Subterrâneas No 29(1). ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, p. 116-128, 2015.

SOUSA, Sergio Barreto de. **SISTEMA AQUÍFERO DA ILHA DO MARANHÃO (MA) * (AQUIFER SYSTEM OF THE MARANHÃO ISLAND, MARANHÃO, BRAZIL)**. Águas Subterrâneas, [S. l.], 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/view/24101>. Acesso em: 23 fev. 2025.

SOUZA, JOÃO CARLOS SIMANKE. **Associação Brasileira de água Subterrânea**. Fevereiro, 2001, p.11.

SPERA, Silvio Tulio *et al.* **Solos areno-quartzosos no cerrado: características, problemas e limitacoes ao uso**. Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E), 1999.

STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. **Hydrogeological Maps A Guide and a Standard Legend**. Hannover: International Association of Hydrogeologists,. (International contributions to hydrogeology, v. 17, 1995.

SUMÁRIO EXECUTIVO DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DO ESTADO DO MARANHÃO (ZEE): etapa Bioma Amazônico. CATUNDA, Paulo Henrique de Aragão; DIAS, Luiz Jorge Bezerra da Silva (orgs.). São Luís: Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC), 2019.

Tayer, T. C. 2016. **Avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico da APA de Lagoa Santa, MG, utilizando o método COP**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 172.

TERCEIRO, P., FERREIRA, J.P.L. **Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas**

(CIAS). Relatório científico da componente LNEC do ano 2010. Relatório 286/2010-NAS, 2010, 23 pp.

Todd D. K., Mays L. W. 2005. **Groundwater hydrology. Third edition, John Wiley and Sons, Inc.**, Hoboken, 652 p.

Vaz S. R. **Estudo comparativo da intrusão salina em aquíferos costeiros da região dos lagos e Norte Fluminense – Estado do Rio de Janeiro.** (2017) Mestrado (dissertação), UFRJ, Museo Nacional. 64p. 2017.

VEIGA JÚNIOR, J.P. **São Luís NE/SE, folhas SA-23-X e SA-23-Z: estados do Maranhão e Piauí.** Brasília, DF: CPRM, 2000. p. 5-23. Escala 1:500.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

VELOSO, H. P.; GÓES-FILHO, L. **Fitogeografia Brasileira: classificação fisionômico ecológica da vegetação neotropical.** Bol. Tecn. Proj. RADAMBRASIL, ser. Vegetação 1: 3-79, 1982.

VILLWOCK, J. A. *et al.* Geologia e geomorfologia de regiões costeiras. *In: SOUZA, C. R. G. et al. (Eds.) Quaternário do Brasil.* Ribeirão Preto, SP: Holos, 2005. p. 94-107.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** EditoraUFMG, 1996.

WEST, D. C.; MELLO, C. L. **DISTRIBUIÇÃO DA FORMAÇÃO BARREIRAS NA REGIÃO SUL DO ESPÍRITO SANTO E SUA RELAÇÃO COM A DEFORMAÇÃO NEOTECTÔNICA.** Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 21, n. 1, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1667. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1667>. Acesso em: 17 fev. 2025.

WHITEHEAD, Alfred North. Natureza e pensamento. *In: WHITEHEAD, Alfred North. O conceito de natureza.* Tradução Júlio B. Fischer. 1. ed brasileira. São Paulo: Martins Fontes, 1994, cap. 1, p. 5-32.