

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – ICET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA PARA RECURSOS AMAZÔNICOS – PPGGCTRA

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA NO MUNICÍPIO
DE ITACOATIARA/AM

DAIANA THALISY DA SILVA MITOUSO

ITACOATIARA - AM

2025

DAIANA THALISY DA SILVA MITOUSO

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA NO MUNICÍPIO
DE ITACOATIARA/AM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos.

Orientador: Máximo Alfonso Rodrigues Billacrê

ITACOATIARA - AM

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

- M684a Mitouso, Daiana Thalisy da Silva
Análise da vulnerabilidade hídrica subterrânea no município de
Itacoatiara/AM / Daiana Thalisy da Silva Mitouso. - 2025.
109 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Máximo Alfonso Rodrigues Billacrês.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos,
Itacoatiara, 2025.
1. Águas subterrâneas. 2. Vulnerabilidade. 3. Risco. 4. Gestão hídrica. 5.
Itacoatiara. I. Billacrês, Máximo Alfonso Rodrigues. II. Universidade
Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia para Recursos Amazônicos. III. Título
-



Daiana Thalisy da Silva Mitouso

**Análise de Vulnerabilidade hídrica
subterrânea no município de Itacoatiara/AM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos, área de concentração Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Recursos Amazônicos.

Aprovado(a) em 29.09.25.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br MAXIMO ALFONSO RODRIGUES BILLACRES
Data: 29/09/2025 17:00:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Máximo Alfonso Rodrigues Billacrês (Presidente e Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br ALEX MARTINS RAMOS
Data: 29/09/2025 18:47:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alex Martins Ramos

Documento assinado digitalmente
gov.br FRANCISCO DAVY BRAZ RABELO
Data: 30/09/2025 12:30:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Davy Braz Rabelo

"O Senhor é a minha rocha, a minha fortaleza e o meu libertador; o meu Deus, a minha rocha, em quem me refúgio; o meu escudo, a força da minha salvação, e o meu alto refúgio." (Salmos 18:2).

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, cuja presença constante me concedeu força, garra e motivação para seguir em frente. Foi Ele meu amparo, meu acalento e minha paz nos momentos de incerteza.

Aos meus pais, Olizandra e Aldemir, e ao meu padrasto, Ananias, pelo apoio incansável aos meus sonhos e por me inspirarem a ser, a cada etapa, a melhor versão de mim mesma. Aos meus irmãos, Letícia, Lucas, Vinícius e Vitor, pelas risadas que tornaram mais leve a vida acadêmica. Dedico também aos meus avós, Gracilete, Clarice (in memoriam) e Gilberto, pelos conselhos, cuidados e amor incondicional. Estendo minha gratidão às minhas tias e aos meus tios, que, mesmo com a distância sempre torceram e vibraram minhas conquistas.

Ao meu parceiro, amigo e namorado, Flávio, pelo apoio em absolutamente tudo, por ser meu conforto nos momentos difíceis e por me incentivar a continuar mesmo diante das adversidades. Sou igualmente grata à família que ganhei por meio dele: meus sogros, Rita e Nilo. Aos meus cunhados, Eliza, Danilo e Daniel, e à pequena Flavinha, que me enche de alegria. A todos vocês, agradeço o carinho e suporte ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Máximo Billâcres, expresso profunda gratidão pelos conselhos, pela paciência, confiança e pelos direcionamentos fundamentais ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Obrigada por compartilhar seu tempo, sua sabedoria e dedicação.

Aos meus queridos amigos Camila, Gabriel, Manoel, que desde o início desta jornada estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e companhia. Agradeço também as minhas amigas Lana e Deicy, cuja presença mesmo à distância sempre trouxe força e aconchego, além de boas risadas. A contribuição de cada um de vocês foi essencial, e sou profundamente grata pelo tempo, pela dedicação e pela amizade que sempre me ofereceram.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), pela oportunidade de formação, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio institucional e financeiro, que possibilitaram a realização desta etapa com maior determinação.

A cada pessoa que, de alguma forma, fez parte desta trajetória, deixo registrada minha sincera e eterna gratidão.

RESUMO

As águas subterrâneas representam a principal fonte de abastecimento em diversos municípios do Amazonas, cuja dependência desse recurso pode estar vulnerável por limitações no saneamento básico e pela presença de atividades potencialmente poluidoras. Este estudo analisou a vulnerabilidade hídrica subterrânea integrando os métodos consagrados de análise de vulnerabilidade em aquíferos sendo eles o GOD e POSH, aliados a ferramentas de geoprocessamento e à análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo nos anos de 1990, 2008 e 2023. A pesquisa foi desenvolvida a partir de dados secundários do SIAGAS, IBGE, MapBiomas e observações na área de interesse, possibilitando a identificação de áreas críticas. Os resultados mostraram que os poços amazonas rasos apresentaram maior suscetibilidade à contaminação, com índices de vulnerabilidade variando de moderada a extrema (0,24 a 0,72) no método GOD, enquanto o método POSH apontou maior risco associado as áreas urbanas e a sede do município em função da precariedade no saneamento e das próprias atividades antrópicas consideradas fontes pontuais como os lixões, postos de combustíveis, psicultura, cemitérios e indústrias. A análise multitemporal evidenciou a redução da cobertura florestal e o crescimento das áreas de pastagem que eram de 272.710 hectares (1990) passaram a ser 562.810 hectares (2023) um aumento de 106,38%, enquanto as áreas urbanas representam cerca de 12.522 hectares (1990) para 19.082 hectares (2023) um crescimento de 53,39 %, comprometendo a recarga hídrica e aumentando a pressão sobre os aquíferos. A sobreposição entre áreas de alta permeabilidade do solo e fontes poluidoras reforça a condição de sobrecarga hidráulica no município. Conclui-se que a expansão desordenada do uso do solo e a fragilidade da gestão ambiental ampliam a vulnerabilidade hídrica subterrânea, destacando a necessidade de políticas públicas integradas de saneamento, monitoramento e ordenamento territorial para garantir a sustentabilidade dos mananciais subterrâneos no município.

Palavras-chave: Águas subterrâneas, Vulnerabilidade, Risco, Gestão hídrica, Itacoatiara.

ABSTRACT

Groundwater represents the main source of water supply in several municipalities of Amazonas State, whose dependence on this resource may be vulnerable due to limitations in basic sanitation and the presence of potentially polluting activities. This study analyzed groundwater vulnerability by integrating two well-established aquifer vulnerability assessment methods, GOD and POSH, combined with geoprocessing tools and a spatio-temporal analysis of land use and land cover for the years 1990, 2008, and 2023. The research was based on secondary data from SIAGAS, IBGE, MapBiomas, and field observations, enabling the identification of critical areas. The results showed that shallow dug wells (*poços amazonas*) presented the highest susceptibility to contamination, with vulnerability indices ranging from moderate to extreme (0.24 to 0.72) using the GOD method, while the POSH method indicated higher risk associated with urban areas and the municipal center, mainly due to the precariousness of sanitation and the presence of point sources such as dumps, gas stations, fish farming, cemeteries, and industries. The multitemporal analysis revealed a reduction in forest cover and an expansion of pasture areas from 272,710 hectares (1990) to 562,810 hectares (2023), an increase of 106.38%, while urban areas grew from 12,522 hectares (1990) to 19,082 hectares (2023), a 53.39% increase, compromising aquifer recharge and intensifying pressure on groundwater resources. The overlap between highly permeable soils and pollution sources reinforces the condition of hydraulic overload in the municipality. It is concluded that unplanned land use expansion and weak environmental management increase groundwater vulnerability, highlighting the need for integrated public policies on sanitation, monitoring, and territorial planning to ensure the sustainability of groundwater resources in the municipality.

Keywords: Groundwater, Vulnerability, Risk, Water management, Itacoatiara.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Água

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais

CERH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Amazonas

GOD - Groundwater Hydraulic Confinemente

IPAAM - Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas

PNRH - Política Nacional dos Recursos Hídricos

POSH - Pollution Occurrence and Spill Hazard

SAAE - Sistema Autônomo de Água e Esgoto

SAGA - Sistema Aquífero Grande Amazônia

SEMA - Secretaria do Meio Ambiente do Amazonas

SIAGAS - Sistema de Informação de água Subterrânea

SGB - Serviço Geológico do Brasil

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo da densidade populacional em relação a disponibilidade hídrica por região.....	30
Tabela 2. Amostra dos dados hidrogeológicos dos poços cadastrados no SIAGAS.....	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Definição das classes de vulnerabilidade	22
Quadro 2. Classificação da carga de contaminantes em fontes difusas.....	23
Quadro 3. Classificação da carga de contaminantes em fontes pontuais.....	24
Quadro 4. Principais métodos de classificação de vulnerabilidade em aquíferos.....	40

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização do município de Itacoatiara destacando sua área urbana	19
Figura 2. Método GOD para classificar a vulnerabilidade de contaminação de aquíferos	22
Figura 3. Interface da plataforma SIAGAS	23
Figura 4. Representação esquemática da localização dos tipos de aquíferos no perfil do solo e sua superfície potenciométrica	29
Figura 5. Representação esquemática do município de Itacoatiara sob a delimitação da área total do SAGA	30
Figura 6. Organograma do sistema de gerenciamento de recursos hídricos.....	34
Figura 7. Distribuição espacial dos poços cadastrados no Brasil	48
Figura 8. Gráfico da segregação dos poços analisados	49
Figura 9. Espacialização dos poços distribuídos em Itacoatiara.....	50
Figura 10. Situação dos poços em Itacoatiara. A) Poço da comunidade Vila Batista; B) Poço da Comunidade Jamanã; C) Poço da Comunidade Nossa Senhora das Graças; D) Poço da Comunidade Rio Arari; E) e F) Poços do SAAE na zona urbana de Itacoatiara	50
Figura 11. Gráfico da distribuição de poços tubulares e poços amazonas em Itacoatiara	51
Figura 12. Gráfico da distribuição das profundidades dos poços	52
Figura 13. Gráfico da segregação dos poços analisados	51
Figura 14. Distribuição dos usos da água em Itacoatiara	45
Figura 15. Distribuição percentual dos índices atribuídos aos parâmetros G, O e D pelo método GOD na área de estudo	54
Figura 16. Distribuição espacial do índice GOD	57
Figura 17. Mapa da distribuição de fontes difusas no território de Itacoatiara.....	60
Figura 18. Percentual da destinação do esgoto sanitário em Itacoatiara	62
Figura 19. Situações de lançamento direto de efluentes sem tratamento em Itacoatiara.	63
Figura 20. Construções de fossas no município de Itacoatiara. A) Fossa séptica em área urbana; B) fossa rudimentar ou buraco em comunidades C) Fossa séptica em comunidade	64
Figura 21. Delimitação da área de várzea denominada aningal.....	65
Figura 22. A1 e B1 representam o alagamento em via pública de Itacoatiara após evento de chuva intensa.	66
Figura 23. Mapa da distribuição de fontes pontuais e difusas no território de Itacoatiara.....	68
Figura 24. Formas de acondicionamento de resíduos em Itacoatiara.....	70
Figura 25. Vazadouros do município de Itacoatiara. a) e b) Lixão da área urbana de Itacoatiara; c) e d) Lixão de Novo Remanso; e) Lixão de Lindóia e f) Lixão de Lindóia.	71
Figura 26. Disposição de resíduos nas comunidades rurais de Itacoatiara.....	72
Figura 27. Esquematização de derramamento de combustível.....	74
Figura 28. Postos de combustíveis em diferentes pontos do município.....	75
Figura 29. Esquematização de sepultamentos no solo. a) por inumação; b) por tumulação.	76
Figura 30. Mapa de localização do principal cemitério de Itacoatiara.....	78
Figura 31. Fazendas de psicultura espalhadas pelo município de Itacoatiara.	80
Figura 32. Mapa da capacidade de infiltração dos solos e suas respectivas fontes pontuais de contaminação.....	81
Figura 33. Mapa do risco potencial de contaminação	82
Figura 34. Mapa pedológico do município de Itacoatiara	85
Figura 35. Mapa de uso do solo do ano de 1990.....	87
Figura 36. Mapa de uso do solo do ano de 2008.....	88
Figura 37. Mapa de uso do solo do ano de 2023.....	89
Figura 38. Gráfico da distribuição de área a diferentes formações em 1990.....	93
Figura 39. Gráfico da distribuição de área a diferentes formações em 2008.....	94
Figura 40. Gráfico da distribuição de área a diferentes formações em 2023.....	95
Figura 41. Variação multitemporal do uso do solo em Itacoatiara (1990,2008 e 2023).	96

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMÁTICA	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivos gerais	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 METODOLOGIA.....	18
1.4.1 Área da pesquisa	18
1.4.2 Caracterização física da área de estudo.....	20
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
1.5.1 Métodos de avaliação da vulnerabilidade hídrica subterrânea	22
2. CAPÍTULO I - Gestão dos recursos hídricos subterrâneos	28
2.1 FUNDAMENTOS HIDROGEOLÓGICOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	28
2.1.1 Sistema aquífero Grande Amazônia	29
2.2 LEGISLAÇÃO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	31
2.2.1 Política Nacional dos Recursos Hídricos	31
2.2.2 Plano Estadual de Recursos hídricos	35
CAPÍTULO II - Análise do risco e vulnerabilidade hídrica subterrânea	37
3.1 RISCO, VULNERABILIDADE E SUAS CONSEQUÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS	37
3.1.1 Risco e vulnerabilidade associado aos recursos hídricos subterrâneos	39
3.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA.....	41
3.3 SITUAÇÃO DOS POÇOS E USOS DA ÁGUA	44
3.4 MÉTODO GOD APLICADO EM ITACOATIARA	52
3.5 MÉTODO P.O.S.H.....	59
3.5.1 Fontes difusas de contaminação	59
3.5.2 Fontes pontuais de contaminação	67
3.5.3 Risco potencial de contaminação	81
CAPÍTULO III – Análise espaço-temporal do uso do solo em Itacoatiara	84
4.1 CARACTERISTICAS DO SOLO.....	84
4.2 ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	86
4.3 IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	90
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA MULTITEMPORAL.....	92
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
REFERÊNCIAS	98
ANEXO.....	104

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam mais da metade das fontes de abastecimento mundial. Esse percentual aumenta especialmente em regiões onde o acesso a água superficial é limitado ou tem a qualidade comprometida (UNESCO, 2022). No entanto, esses mananciais vêm sendo submetidos a pressões cada vez mais intensas em função das atividades antrópicas. Dentre eles, destaca-se o crescimento acelerado da população, a contínua demanda industrial e agrícola por recursos hídricos além da precariedade dos serviços de saneamento básico, contribuem significativamente para o aumento da vulnerabilidade dos aquíferos (Silva, 2024).

O Brasil se destaca no cenário mundial por sua expressiva disponibilidade hídrica, sobretudo de águas subterrâneas sendo responsável por uma parcela significativa da água doce no planeta, no entanto, a gestão desses recursos ainda é marcada por ineficiências. Segundo Oliveira (2022), aproximadamente 80% da água utilizada em atividades humanas retorna aos corpos hídricos sem qualquer tipo de tratamento, o que intensifica a pressão sobre os processos naturais de autodepuração.

Na região norte, particularmente no estado do Amazonas, persistem falhas na gestão e, principalmente, na proteção dos recursos hídricos subterrâneos, o estado possui uma taxa de 14,6% no atendimento da rede de esgoto e de 20,2% em seu tratamento (SNIS, 2022). Estima-se também que uma parcela de 18,3% da população não tem acesso à rede de abastecimento de água (SNIS, 2022). De acordo com Tsutya (2010), essa ineficiência no atendimento aos domicílios acarreta medidas individuais como a perfuração de poços sem respaldo técnico, que compromete a qualidade da água, representando um risco à contaminação dos aquíferos.

Trabalhos como o de Li *et al.*, (2021), discorrem sobre os tipos de contaminantes naturais e antropogênicos presentes em aquíferos de diferentes países nos continentes africanos, europeus e asiáticos. Por sua vez, May *et al.* (2018), ressalta dificuldade em fazer a remediação dos aquíferos pela falta de conhecimento de todas as características químicas e físicas dos aquíferos e suas reações. Estudos sobre a contaminação das águas subterrâneas e suas vulnerabilidades tornaram-se imprescindíveis para o desenvolvimento de conceitos metodologias de identificação e proteção elencados por Le Grand (1964), Aller et al (1987), Foster & Hirata (1988), Hirata & Fernandes (2008), Cutrim & Campos (2010).

As áreas de risco de contaminação estão associadas tanto a características geológicas locais como atividades antrópicas desenvolvidas sobre a superfície. Tais características definem o grau de suscetibilidade dos mananciais à contaminação. É, portanto, essencial identificar as atividades potencialmente poluidoras na região, as quais podem ser classificadas como fontes pontuais sendo de localização específica e de fácil monitoramento, mas também podem ser difusas quando são originadas de múltiplas fontes tornando-se mais complexo o processo de localização e monitoramento (Giampá; Gonçalves, 2013; Peixoto, 2020).

Devido as condições de confinamento, a identificação da contaminação dos aquíferos pode ser tardia (Freeze e Cherry, 2017). Estudos com dados secundários e estimativas extraídas a partir das características do aquífero são realizados para auxiliar na proteção desses recursos hídricos. A partir de então, metodologias foram implementadas no estudo da vulnerabilidade dos aquíferos como auxílio das geotecnologias. Neste estudo serão aplicados os métodos GOD e POSH pois têm sido amplamente utilizados na construção de mapas temáticos utilizados no monitoramento de aquíferos, especialmente em contexto de escassez de dados primários que ocorre com frequência em regiões de difícil acesso e cobertura limitada.

Neste contexto, o município de Itacoatiara localizados na região central do estado do Amazonas, é abastecido majoritariamente por meio da captação subterrânea (Soares, 2024). O município é o segundo mais populoso do estado e vem apresentando crescimento urbano e expansão de atividades agrícolas. Contudo, o saneamento básico é precário e o município ainda realiza a disposição inadequada de resíduos em lixões e terrenos baldios ou por meio da queima de lixo, e apenas dois bairros contam com coleta e tratamento de esgoto, representando uma cobertura mínima da área urbana (Hannah, 2020).

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo reunir e analisar informações sobre os principais pontos de fragilidade dos mananciais subterrâneos no município de Itacoatiara. Busca-se identificar as áreas mais suscetíveis a contaminação, por meio do uso de metodologias consagradas de avaliação da vulnerabilidade hídrica com auxílio de ferramentas de geoprocessamento. Além disso, o trabalho pretende compreender como as atividades humanas de uso e ocupação do solo e ausência de saneamento básico influenciam na qualidade da água subterrânea com o intuito de subsidiar estratégias de gestão e proteção desse recurso essencial.

1.1 PROBLEMÁTICA

A vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos a diferentes fontes de contaminação tem se intensificado em função do crescimento urbano e as diferentes atividades exercidas para o seu desenvolvimento. Fatores antrópicos como mineração, funcionamento inadequado de estações de tratamento de esgoto e a disposição incorreta dos resíduos sólidos em lixões promovem a percolação de compostos químicos e metais pesados, aumentando os riscos de contaminação mesmo em aquíferos confinados (Oliveira Júnior *et al.* 2020).

Um exemplo clássico do impacto dessas práticas sobre as águas subterrâneas é descrito no livro *Primavera Silenciosa*, de Rachel Carson (1969), no qual pesticidas utilizados em atividades agrícolas atingiram os poços rasos e geraram sérias consequências como danos às plantações, adoecimento de animais e trabalhadores, após investigações os estudos revelaram a presença de diversos compostos tóxicos que comprometeram a qualidade das águas subterrâneas e superficiais dessa localidade evidenciando os riscos da negligência no uso de produtos químicos.

No Brasil, a problemática da contaminação subterrânea também tem sido documentada. De acordo com Almeida *et al.*, (2010), no interior de São Paulo foram identificados compostos orgânicos voláteis como tetracloroeteno (PCE), e tricloroeteno (TCE) advindos das indústrias de galvanoplastia e metalurgia. Segundo o autor, essas substâncias comprometeram a qualidade da água de diversos poços particulares, exigindo medidas emergenciais de controle e remediação, além do impacto ambiental essa situação também representou um risco à saúde humana e a segurança hídrica.

No contexto amazônico, recentes estudos também identificaram pontos de contaminação das águas subterrâneas no município de Novo Airão, a pesquisa analisou 21 poços tubulares e 4 nascentes no ambiente urbano e os resultados encontrados foram altos níveis de substâncias que são frequentemente associadas a atividades antrópicas e ausência de saneamento, grande parte da contaminação foi associada a percolação de compostos de origem das fossas sépticas e fossas rudimentares como o nitrato (Ribeiro *et al.*, 2024).

Uma grande parcela dos municípios do Amazonas como Itacoatiara, Pauini e Urucará o sistema de captação subterrânea é a principal forma de obtenção de água para abastecimento, gerando uma dependência de qualidade e disponibilidade hídrica (Soares *et al.*, 2024; Azevedo 2006; Azevedo 2019). Entretanto, o Amazonas possui uma das

piores taxas de saneamento associada à falhas de monitoramento pois apenas aqueles poços que são geridos por autarquias como o Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Itacoatiara passam por análises físico-químicas e microbiológicas mensais enquanto os poços particulares não possuem a mesma periodicidade de análises da água.

O município de Itacoatiara, localizado na região central do estado do Amazonas, destaca-se como o segundo mais populoso do estado, com um crescimento demográfico de 19,3% em relação ao último censo (IBGE, 2022). Seu abastecimento de água ocorre, majoritariamente, por meio de captação subterrânea (Hannah, 2020), tornando-o altamente dependente da qualidade e disponibilidade desse recurso. Contudo, a área apresenta indicadores insatisfatórios de saneamento básico, tanto na zona urbana quanto na área rural.

1.2 JUSTIFICATIVA

A crescente preocupação com a qualidade das águas subterrâneas tem motivado diversas pesquisas ao redor do mundo, principalmente em áreas sujeitas a pressões antrópicas e intensas. Estudos realizados no Marrocos (Ait Lahssaine *et al.*, 2024), Egito (Abu Bakr, 2020), Nigéria (Emberga *et al.*, 2023) e em aquíferos livres do Brasil (Batista *et al.*, 2016); (Feijó *et al.*, 2025), evidenciam o grau de vulnerabilidade destes sistemas, a carga de contaminantes associada a diferentes atividades humanas e os níveis de risco que comprometem a segurança hídrica das populações, esses estudos reforçam a importância de compreender a dinâmica dos aquíferos e implementar metodologias adequadas de avaliação, prevenção e gestão das águas.

Nas regiões onde a captação subterrânea é majoritária como nos municípios do interior do Amazonas, torna-se mais urgente a produção de dados e ferramentas que apoiam a gestão sustentável desses recursos. Os mananciais subterrâneos costumam fornecer água de qualidade próximo aos padrões de padrões de potabilidade sendo realizada em muitos casos apenas um tratamento simplificado (Nanes, 2012). Além disso, esses mananciais subterrâneos desempenham um papel fundamental na manutenção dos ecossistemas aquáticos, alimentando corpos hídricos superficiais e garantindo a continuidade de ciclos ecológicos desta forma a contaminação dessas fontes compromete não apenas o abastecimento urbano, mas o equilíbrio ambiental.

A vulnerabilidade hídrica subterrânea, segundo Hirata e Fernandes (2008), é determinada pelas características físico-químicas e geológicas dos aquíferos, essa

combinação de fatores controlam o potencial de contaminação. Apesar de ser um tema discutido há bastante tempo, questionamentos ainda devem ser resolvidos mas são dificultados pela complexidade ao acesso a esses sistemas e suas diferentes características e interações com o ambiente (Hirata e Ferreira, 2001).

Com o avanço das tecnologias e do conhecimento técnico científico surgiram métodos e modelos capazes de identificar, classificar e mapear as áreas mais suscetíveis à contaminação, apresentados nos estudos de Tavares *et al.*, (2009); Toniolo *et al.*, (2022) e Moraes *et al.* (2024). Esses trabalhos demonstram que além do monitoramento é fundamental promover ações preventivas com base em diagnósticos técnicos e precisos.

Esse estudo visa contribuir com o avanço do conhecimento científico sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas na Amazônia, visto que há escassez de dados específicos sobre municípios do interior que considerem as particularidades hidrogeológicas da região. Os resultados desta pesquisa poderão subsidiar ações de planejamento urbano, políticas públicas de saneamento básico e estratégias de preservação ambiental voltadas à proteção dos aquíferos que abastecem diretamente à população.

Diante da carência de informações sintetizadas sobre as condições do aquífero que abastece o município de Itacoatiara aliada à expansão urbana e as limitações da infraestrutura sanitária, é imprescindível compreender os fatores de risco e as áreas de maior vulnerabilidade à contaminação. Dessa forma esse estudo busca contribuir para o conhecimento técnico sobre os recursos hídricos subterrâneos do município, oferecendo subsídios para políticas públicas mais eficazes e para a preservação de um recurso vital à população local.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos gerais

Analizar a vulnerabilidade do manancial subterrâneo que abastece o município de Itacoatiara.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar áreas susceptíveis a vulnerabilidade hídrica subterrânea;
- Identificar as atividades potencialmente poluidoras e que representam um risco aos mananciais subterrâneos de Itacoatiara;

- Analisar espaço-temporralmente as mudanças no uso e ocupação do solo das áreas de vulnerabilidade de recursos hídricos.

1.4 METODOLOGIA

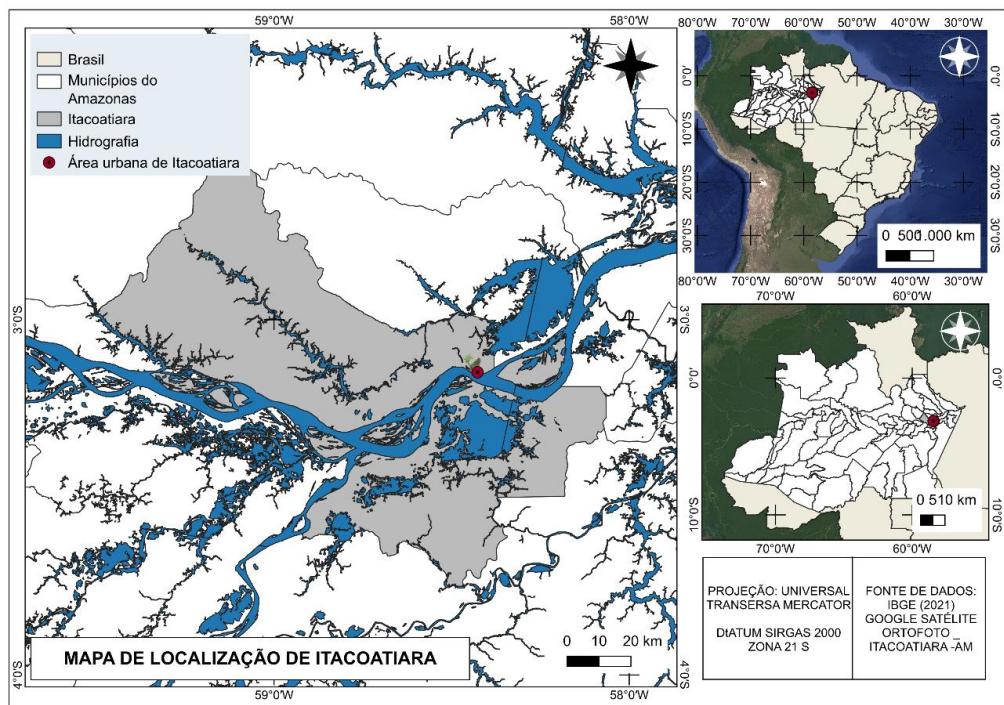
Esta pesquisa se caracteriza como um estudo descritivo, de abordagem quantitativa e qualitativa, inserido no campo das ciências aplicadas com base em técnicas sistemáticas e exploratórias. Segundo Marconi e Lakatos (1990), a pesquisa descritiva busca observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los, sendo adequada quando se parte de uma base teórica já consolidada sobre o tema. Assim, o trabalho será delineado com base em hipóteses fundamentadas na escrita dos capítulos e direcionadas a uma área geográfica específica.

As técnicas metodológicas empregadas compreendem: a) pesquisa documental e bibliográfica com levantamento de dados secundários disponíveis em bases como SIAGAS, IBGE, ANA e órgãos municipais; b) análises computacionais, utilizando programas como Quantun Gis e aplicação de métodos para avaliação da vulnerabilidade hídrica; e c) observações de campo, visando complementar as análises com registros fotográficos no local de estudo.

1.4.1 Área da pesquisa

O presente estudo será desenvolvido no município de Itacoatiara, no estado do Amazonas (Figura 1). Essa localidade possui significativa importância estratégica, situada a aproximadamente 275 km da capital, Manaus, com um acesso viário principal estabelecido pela Rodovia Estadual AM-010. De acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), conforme o Censo Demográfico de 2022, o município abrange uma área territorial de 8.891,979 km² e registrou uma população de 103.598 habitantes (IBGE, 2022). Esses dados demográficos e territoriais qualificam Itacoatiara como o segundo município mais populosos de todo o estado do Amazonas, ficando atrás somente da Capital, destacando sua relevância como um polo regional.

Figura 1. Mapa de localização do município de Itacoatiara destacando sua área urbana.



Fonte: Autoria própria (2025).

O município de Itacoatiara apresenta posição estratégica no contexto regional do estado do Amazonas, devido à sua ligação direta a capital, Manaus, pela rodovia AM-010, a 173 km em linha reta e por via fluvial. Faz fronteira com os municípios de Silves, Itapiranga, Uricurituba, Boa Vista do Ramos, Autazes, Nova Olinda do Norte, Careiro, Manaus e Rio Preto da Eva, contribuindo para o dinamismo da circulação de pessoas e mercadorias. Essa conectividade favorece o transporte de cargas e impulsiona o desenvolvimento socioeconômico da região, refletindo na posição de Itacoatiara como detentor do quinto maior Produto Interno Bruto (PIB) do estado e o primeiro entre os municípios do entorno (IBGE, 2021).

Além de sua relevância econômica, Itacoatiara também se destaca como polo regional de serviços públicos. Na área da saúde conta com infraestrutura que inclui Unidade Básica de Saúde (UBS), Unidade de Pronto Atendimento (UPA) e hospital de médio porte com capacidade de atendimento à população local e aos municípios vizinhos. No setor educacional abriga instituições públicas e privadas de ensino superior e como a Universidade do Estado do Amazonas (UEA), a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e o Instituto Federal do Amazonas (IFAM), O que reforça a sua importância como centro de formação e capacitação profissional na região.

1.4.2 Caracterização física da área de estudo

Geomorfologia

O município está inserido em uma zona de transição entre as sub-regiões do Baixo Amazonas e Médio Solimões, no centro leste do estado. Essa localização influencia diretamente sua conformação geomorfológica, composta predominantemente por relevo plano, típico das planícies amazônicas. Pequenas elevações em áreas de terra firme contrastam com vastas áreas de várzea de comportamento sazonal (Souza, 2022).

Essa configuração geomorfológica exerce influência direta sobre o regime hidrológico local, afetando uso e ocupação do solo, a dinâmica do escoamento superficial e os processos de recarga dos aquíferos subterrâneos que são aspectos essenciais para avaliação da vulnerabilidade hídrica do município.

Clima

O clima é um fator ambiental de extrema importância para compreender os processos hidrológicos e as dinâmicas dos solos, esse fator também tem influência nas áreas de várzea na Amazônia e molda a estrutura econômica em virtude de suas modificações sazonais (EMBRAPA, 2003). Estudos na Amazônia Central mostram que a recarga anual dos aquíferos pode variar entre 24% e 35% da precipitação, dependendo do volume pluviométrico e de eventos climáticos interanuais, como El Niño (Brito et al., 2020).

O município de Itacoatiara está inserido em uma região de clima equatorial úmido, classificado com Af segundo a classificação de Köppen. Esse tipo de clima é caracterizado por elevadas temperaturas médias ao longo do ano, variando entre 26 a 28°C, e por um índice pluviométrico anual superior a 2.500 mm, com chuvas bem distribuídas durante todos os meses do ano, além disso a alta umidade relativa do ar e a baixa amplitude térmica também são marcantes nesse regime (INMET, 2024).

Esse tipo de comportamento climático favorece a recarga natural dos aquíferos, especialmente em áreas com solos permeáveis e que possuem a preservação da vegetação natural. No entanto, a associação de chuvas intensas e ausência de cobertura vegetal pode intensificar os processos de erosão e transporte de poluentes para o subsolo, especialmente em áreas urbanizadas (EMBRAPA, 2025). Assim, o clima exerce uma

dupla função que pode ser benéfica ao promover a disponibilidade hídrica, mas pode trazer prejuízos ao aumentar os riscos à qualidade da água.

Pedologia

A pedologia é uma ciência com um objeto de estudo bem definido que deriva das palavras *Pedon* (lugar onde se pisa) e *Logos* (discurso ou razão), a partir dessas bases temos uma ciência que estuda especificamente os solos a partir de suas características morfológicas, físicas, químicas e biológicas, sua relação atmosfera/biosfera e suas dinâmicas de transformações sobre a litosfera (Queiroz Neto, 1984).

No município de Itacoatiara os Gleissolos são caracterizados por estarem saturados em água, por isso são encontrados abundantemente nas margens dos rios ou em áreas de várzea e alagadiças. Também há a classe dos Plintossolos Háplicos que são ricos em minérios de ferro e alumínio e são encontrados em área com pouca drenagem. Os Neossolos Flúvicos são solos jovens constituídos de diversos materiais orgânicos e inorgânicos. Por fim, temos os solos mais encontrados na região os Latossolos Amarelos, eles possuem boa drenagem tornando-o de bom manejo para agricultura mas em contrapartida podem aumentar o risco de contaminação (EMBRAPA, 2003).

Hidrografia

O município de Itacoatiara está localizado na bacia do Rio Amazonas, sendo caracterizado por uma ampla rede hidrográfica, que influencia diretamente no regime das vazões, na drenagem local e na dinâmica ambiental urbana e rural. Dentre os principais corpos hídricos que se destacam no município temos o Rio Urubu, Lago Canaçari, Lago de Serpa, Paraná do Serpa, Paraná Trindade, funcionando como elementos naturais de drenagem abastecimento e como a destinação do esgoto urbano em áreas sem cobertura de saneamento básico (Hinnah, 2020).

Os corpos hídricos superficiais de Itacoatiara apresentam uma sazonalidade que varia em função do regime hidrológico com períodos de cheias e seca dos rios, bem como elevações expressivas no nível da água entre os meses de fevereiro e julho. Esse comportamento influencia diretamente o lençol freático, os processos de recarga natural dos aquíferos e a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos principalmente em áreas de várzea e de contato direto com fontes de poluição difusa (Santos *et al.*, 2025).

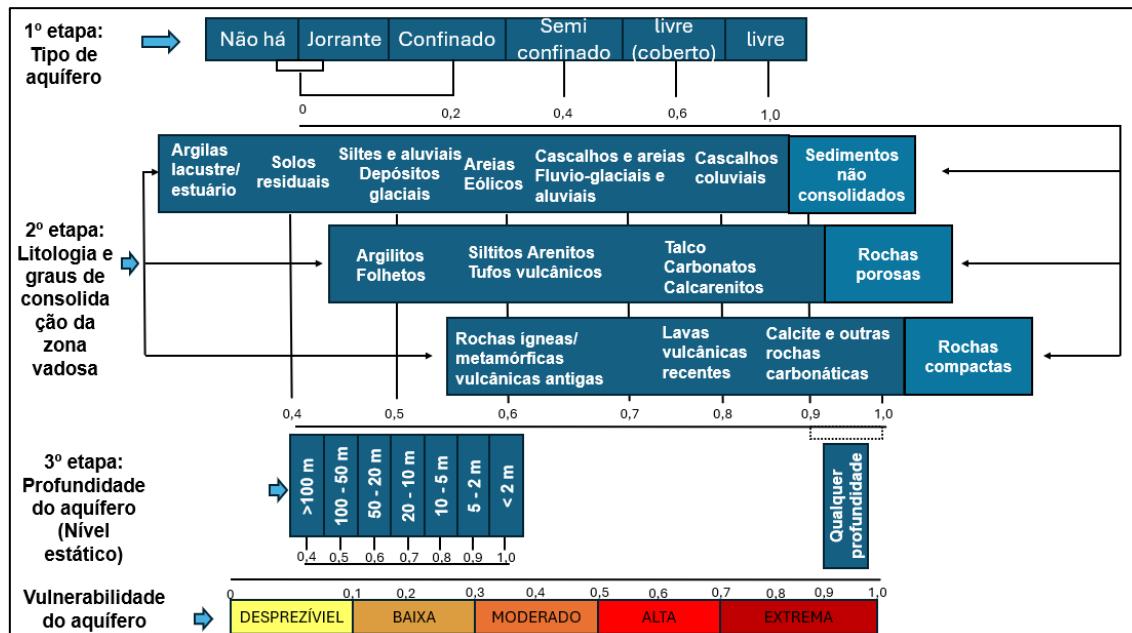
De acordo com informações do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), no município há uma quantidade significativa de poços cadastrados, entre eles os poços rasos, que são escavados manualmente ou perfurados de forma simplificada em profundidades inferiores a 5 metros, captando água de aquíferos livres. Quando existe uma associação de permeabilidade do solo, exposição às atividades antrópicas, como exemplo fossas rudimentares, depósito de resíduos sólidos e atividades agropecuárias, os poços perfurados em suas adjacências tornam-se vulneráveis a contaminação.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

1.5.1 Avaliação da vulnerabilidade hídrica subterrânea

A metodologia utilizada neste trabalho foi o GOD, criada por Foster e Hirata (1988), intitulado Groundwater occurrence (Ocorrência de água subterrânea) Overall lithology (litologia geral) Depth to water (profundidade do nível da água), ou apenas método GOD (Figura 2). É utilizado para avaliar o maior ou menor potencial de vulnerabilidade do aquífero a partir da análise de três parâmetros relacionados às suas características que variam de acordo com as suas características hidrogeológicas podendo ser acentuadas pelas condições e pressões antrópicas exercidas.

Figura 2. Método GOD para classificar a vulnerabilidade de contaminação de aquíferos



Fonte: Adaptado de Foster e Hirata (1995).

A Figura 2 esquematiza o diagrama do método GOD, que auxilia sua aplicação, nele cada parâmetro possui índices que variam conforme as características específicas de cada área analisada, sendo o “G” variando de 0 a 1 referente ao tipo de confinamento do aquífero, “O” variando de 0,4 a 1 e correspondendo a litologia encontrada e o parâmetro “D” que varia de 0,4 a 1 por meio da profundidade do nível estático do aquífero.

A coleta de informações foi realizada através da plataforma do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), do serviço geológico do Brasil, na interface do SIAGAS (Figura 3), em seu painel de apresentação é possível obter um panorama geral de poços cadastrados através de um sistema online dentro da plataforma na aba “visualizar mapas” e colocar outras informações para sobrepor pontos e cruzar informações.

Neste trabalho a aba de interesse está em “pesquisa” e selecionado o tipo geral, esse comando nos levará a interface de filtros da região de interesse em qualquer localidade brasileira. A filtragem realizada dentro da própria plataforma no ano de 2024 retornou 272 poços cadastrados em Itacoatiara, posteriormente foi realizada uma análise de cada um desses poços e somente 147 poços foram selecionados para este trabalho, por conterem as informações mínimas necessárias para realizar a metodologia proposta.

Figura 3. Interface da plataforma SIAGAS

Código do Ponto	UF	Município	Localidade
1300000406	AM	Itacoatiara	CENTRO

Fonte: SIAGAS (2024).

Após a coleta de dados, estes foram posteriormente tabulados em uma planilha Excel, neste documento foram criadas colunas com o código dos poços, suas coordenadas geográficas em Universal Transverse Mercator (UTM) para ser processadas no programa

de geoprocessamento gratuito Qgis versão 3.34.9, outra coluna foi criada para cada um dos parâmetros analisados, foi criada uma com o resultado da aplicação da Equação 1, contendo o índice GOD e a última coluna com o resultado da sua classificação, sendo que os valores próximos a 0 indicam menor vulnerabilidade e valores próximos de 1 indicam maior vulnerabilidade (Foster; Hirata, 1988).

$$\text{Equação 1:} \quad IV = G * O * D$$

Após a tabulação dos dados e atribuição dos índices aos seus respectivos parâmetros foi aplicada a “Fórmula 1” dentro do Excel para obter uma coluna com cada índice GOD. No quadro abaixo temos as classificações variando de extrema a insignificante, a variação do índice de cada categoria e a definição prática de cada tipo de vulnerabilidade para elencar discussões.

Quadro 1. Definição das classes de vulnerabilidade.

CLASSE	ÍNDICE	DEFINIÇÃO PRÁTICA
EXTREMA	0,7 – 1,0	Vulnerável a muitos poluentes impactando rapidamente em diversos cenários de contaminação.
ALTA	0,5 – 0,7	Vulnerável a muitos poluentes com exceção dos com pouca mobilidade e persistência.
MODERADA	0,3 – 0,5	Vulnerável a alguns poluentes e somente quando continuamente lançados a fonte.
BAIXA	0,1 – 0,3	Vulnerável somente à contaminantes de longo prazo de conservação e quando lançados continuamente
INSIGNIFICANTE	0,0 – 0,1	Camadas confinadas em fluxo vertical descendente não significante.

Fonte: Foster e Hirata (1995).

Dentro do programa de geoprocessamento Qgis será aplicada uma técnica de interpolação espacial em que valores locais conhecidos são utilizados para estimar os locais desconhecidos (Hernandez *et al.* 2021). Para esta técnica foi necessário inserir no programa os pontos conhecidos que são os poços com suas respectivas coordenadas, o formato do arquivo aceito é o separado por vírgula (CSV), a malha amostral utilizada é a delimitação do município.

Para realizar a modelagem dos dados foi necessário utilizar o complemento de interpolação IDW disponível na caixa de ferramentas, com isso foi realizada a interpolação desses dados, com o cruzamento das informações o programa gerou a

especialização dos índices GOD pelo território de Itacoatiara. Essa ferramenta é muito utilizada na área das Geociências e muito promissora na análise da vulnerabilidade hídrica subterrânea sendo adotado como metodologia nos trabalhos de Rego *et al.* (2021) e Barros *et al.* (2023). A potencia utilizada nessa interpolação foi 2, e o método utilizado foi o linear, no processo de simbologia foi utilizado o modo quartil com 9 classes que representam o gradiente de cores dos índices adotados.

Avaliação do risco potencial de contaminação subterrânea no município de Itacoatiara

Para realizar a avaliação do risco potencial no município foi adotado o método POSH (Pollutant Origem Sucharge Hidraulically), proposto por Foster et al. (2002), este método oferece uma abordagem simplificada a classificação de fontes potenciais de contaminação. Baseia-se na probabilidade da presença de contaminantes provenientes de fontes pontuais ou difusas e existência de sobrecarga hidráulica. A classificação final é obtida por meio da análise de três critérios principais: o tipo de atividade desenvolvida, a carga hidráulica associada e a capacidade de geração de contaminantes. Como resultado, as fontes são categorizadas em três níveis de carga de contaminantes podendo ser carga a reduzida, moderada ou elevada (Cutrim; Campos, 2010).

A identificação dos potenciais focos de risco para a aplicação do método POSH no município foi realizada por meio de uma abordagem integrada, combinando a análise de dados de imagens de satélite e a validação em campo. O primeiro passo consistiu na delimitação das fontes de contaminação difusas, sendo necessário o uso da extensão MAPBIOMAS no programa QGIS. Este procedimento possibilitou a classificação espacial das atividades de uso e cobertura do solo, abrangendo categorias como áreas urbanas/artificiais, pastagens e floresta natural, cada uma dessas atividades foram classificadas conforme o quadro abaixo.

Quadro 2. Classificação da carga de contaminantes em fontes difusas

TIPO DE USO DO SOLO	CARGA DE CONTAMINANTES
Área artificial	Elevado
Saneamento no local	Elevado

Pastagem natural	Moderado
Mosaico de área agrícola	Moderado
Mosaico de vegetação campestre/florestal com área agrícola	Moderado
Pastagem com manejo	Reduzido
Corpo d'água continental	Reduzido
Vegetação florestal	Reduzido

Fonte: Adaptado de Rios (2020).

Para as fontes pontuais de contaminação foram realizadas análises de satélite (Google Earth, Google Satelite e Google Maps) bem como visitas no local e pesquisas em banco de dados para obter as coordenadas de lixões, postos de combustíveis, psiculturas, cemitérios e indústrias, posteriormente foram criadas tabelas Excel em formato Valores Separados por Virgulas (SCV), para cada atividade com as coordenadas, o tipo de atividade e com a respectiva classificação baseada no Quadro 3.

Posteriormente foram atribuídos os níveis de contaminação (elevado, moderado ou reduzido) às fontes pontuais utilizando os critérios do método POSH, o mesmo procedimento foi aplicado às fontes difusas. Definidas as áreas de fontes difusas e pontuais, essas informações foram integradas em um ambiente SIG para elaboração de mapas temáticos representando os respectivos níveis de risco potencial de contaminação.

Quadro 3. Classificação da carga de contaminantes em fontes pontuais

ELEVADO	MODERADO	REDUZIDO
<ul style="list-style-type: none"> • Fábrica de produtos plásticos • Indústrias eletrônicas • Processamento de metal • Produtos farmacêuticos • Produtos químicos orgânicos • Lixão 	<ul style="list-style-type: none"> • Posto de combustível • Fábricas de papel • Produtos de perfumaria e cosmética • Fábricas de detergente e sabão • Fabricação de artefatos de borracha • Fábricas de fertilizante • Destinação de resíduo em aterro 	<ul style="list-style-type: none"> • Cemitério • Extração de materiais inertes • Processamento de materiais não metálicos • Manufaturas de alimentos e bebidas • Abate de animais

Fonte: Rios (2020).

Após a delimitação e classificação das fontes de contaminação, essas informações foram integradas em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). O programa adotado para o processamento e aplicação da metodologia foi o QGIS Desktop (versão 3.34.9). No ambiente do SIG, foram elaboradas as camadas temáticas que representam e classificam os níveis de potencial de risco de contaminação associado a cada fonte de poluição identificada.

Para a análise multitemporal das dinâmicas de uso e cobertura do solo no município de Itacoatiara, foi utilizado o programa QGIS, com a instalação da extensão MapBiomass. A partir desse recurso, foram selecionados os anos de 1990, 2003 e 2008, definidos como períodos de interesse para o estudo. Para cada ano, estabeleceu-se uma classificação composta por dez categorias de uso do solo, tais como áreas de vegetação, áreas artificiais e áreas de pastagem, entre outras. A visualização das classes foi organizada com base no guia de cores disponibilizado pela própria plataforma MapBiomass, garantindo a padronização das informações.

Na etapa seguinte, procedeu-se à quantificação das mudanças de uso e cobertura do solo. Para isso, foi empregada a ferramenta “r.report” disponível na caixa de ferramentas do QGIS, cuja função é calcular as áreas correspondentes aos pixels de uma camada raster selecionada. A execução dessa ferramenta gerou, para cada ano analisado, um arquivo de texto no formato “txt”, contendo a listagem das classes de uso do solo e suas respectivas áreas em km².

Por fim, os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas, de forma a possibilitar a sistematização e comparação entre os diferentes períodos analisados. Essa etapa foi fundamental para a posterior discussão e interpretação dos resultados, permitindo compreender a dinâmica temporal das transformações ocorridas no território de Itacoatiara.

2. CAPÍTULO I - Gestão dos recursos hídricos subterrâneos

2.1 FUNDAMENTOS HIDROGEOLÓGICOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas são aquelas armazenadas em perfis litológicos saturados localizados abaixo do nível freático (Freeze; Cherry, 2017). De acordo a Resolução CONAMA 396/2008 essas águas ocorrem de forma natural ou artificial no subsolo, sendo assim enquadradas como recursos hídricos subterrâneos.

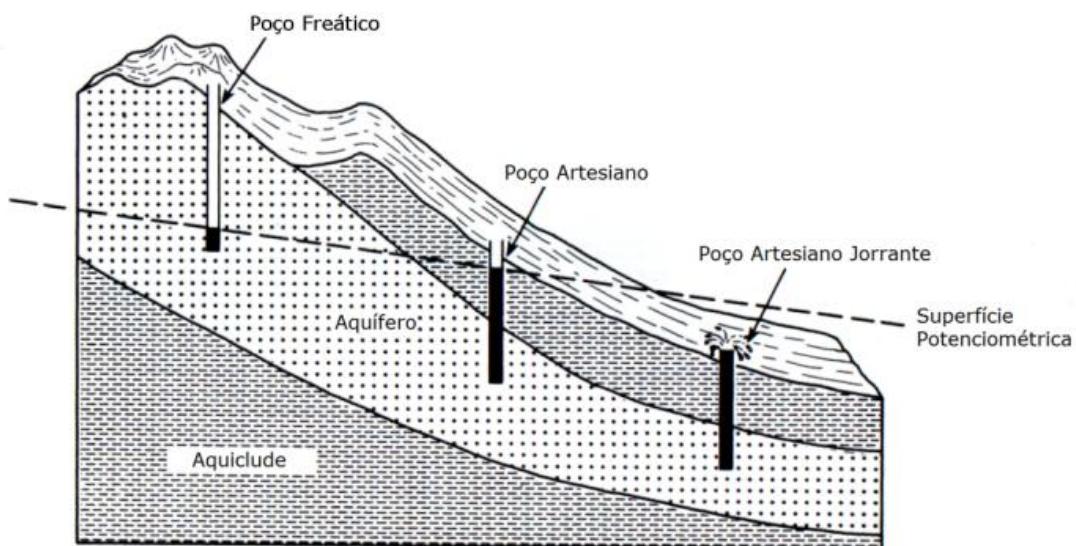
Os aquíferos são constituídos por grupos de componentes rochosos preenchidos por água e recarregados a partir das infiltrações (Silva *et al.*, 2013). Quando os aquíferos são submetidos às forças de adesão e gravidade eles conseguem realizar a manutenção do fluxo dos rios e lagos bem como da umidade do solo (Canova; Salazar, 2018).

De acordo com Giampá e Gonçales (2013), os aquíferos podem ser livres, quando apresentam camadas porosas e zona saturada sob condições de pressão atmosférica, aquífero confinado quando a camada aquífera que se encontra entre duas outras possivelmente impermeáveis, aquífero suspenso definido pelo um acúmulo de água acima do nível regional freático e por fim aquífero semiconfinado quando há uma camada confinante descontínua ou relativamente permeável.

Este tipo de manancial é muito utilizado como reservatório natural de água e zona de suporte de água para as zonas urbanas, tornando-se estratégico em áreas de escassez hídrica ou áreas mais isoladas em que há dificuldades na cobertura de abastecimento como em municípios do Amazonas (Seraphim, 2018). Essas reservas subterrâneas dispõem tanto de área de recarga através do processo infiltração e armazenamento como áreas de descarga através de nascentes e outros corpos d'água (Vicente, 2018).

De acordo com o serviço Geológico do Brasil (SGB, 2018), existem diferenças entre as unidades hidrogeológicas como os aquíferos, que são geralmente compostos por arenitos e areias, possuem porosidade e permeabilidade que possibilitam tanto o armazenamento quanto a eficiente movimentação da água, tornando a extração viável (Figura 4). Por sua vez, o aquitarde, apesar de possuir litologia porosa, apresenta baixa permeabilidade e vazão pouco eficiente para fins de abastecimento. Já os aquicluides possuem tendência de reserva hídrica, mas são essencialmente impermeáveis, o que impede o transporte de água em condições naturais. Por fim, os aquifuges, devido às suas características litológicas, são formações que não armazenam e nem transportam água.

Figura 4. Representação esquemática da localização dos tipos de aquíferos no perfil do solo e sua superfície potenciométrica.



Fonte: Adaptado de Fetter (2000).

Freeze e Cherry (2017), destacam que, no caso de aquíferos confinados, a superfície potenciométrica é o elemento fundamental para a compreensão do fluxo da água subterrânea. Esses perfis representam o nível ao qual a água subiria em um poço perfurado no aquífero confinado, sendo, portanto, o indicativo da direção e do gradiente de fluxo. A representação dessa superfície que pode ser feita por meio da plotagem de dados em um mapa, sendo especialmente eficaz em aquíferos com geometria predominantemente horizontal, onde os resultados apresentam melhor precisão e ajuste espacial.

2.1.1 Sistema aquífero Grande Amazônia

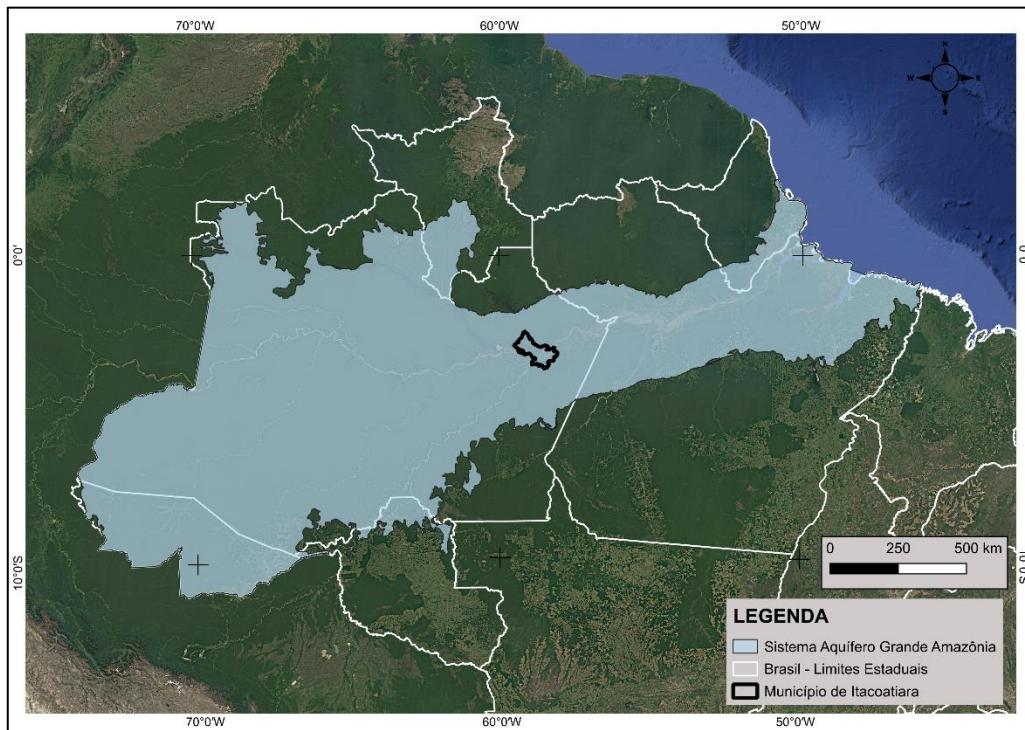
O Sistema Aquífero Grande Amazônia (SAGA), é uma das mais extensas e importantes reservas de água subterrânea da América do Sul. Localiza-se entre duas grandes bacias sedimentares Marajó e Acre, mas sua constituição geológica é bastante complexa, pois recebe influências de diversas outras formações sedimentares e litológicas que contribuem para a sua estrutura dinâmica.

Entre essas formações destacam se Alter do Chão, Solimões, Içá, Monte Alegre, Curiri, Nova Olinda, Barreirinha, Itaituba, Irerê e Maecuru (Lages *et al.* 2023). Essa diversidade de unidades geológicas confere ao SAGA características geológicas

heterogêneas, com variações na porosidade, permeabilidade e capacidade de armazenamento de água tornando um sistema com múltiplas zonas de recarga e fluxo.

O SAGA ocupa uma área significativa da região norte do Brasil, abrangendo a maior parte do território dos estados do Amazonas e do Acre, além de se estender por porções de outros estados vizinhos (Figura 5). No estudo realizado por Abreu *et al.*, (2013), foi avaliada a capacidade de armazenamento hídrico desse sistema, o levantamento resultou em uma estimativa de volume superior a 160 mil km³ de água subterrânea disponível, mesmo utilizando os valores mais modestos nos cálculos. Essa expressiva reserva hídrica destaca a relevância do SAGA não apenas como fonte estratégica para abastecimento humano e desenvolvimento regional, mas também como elemento-chave para a conservação ambiental e a gestão sustentável dos recursos hídricos na Amazônia.

Figura 5. Representação esquemática do município de Itacoatiara sob a delimitação da área total do SAGA.



Fonte: Autoria própria (2025).

Esse sistema de águas subterrâneas possui importância estratégica fundamental para a região amazônica, tanto do ponto de vista ambiental quanto socioeconômico. Estima-se que a sua reserva alcança cerca de 37.900 km³ somente na bacia amazônica,

totalizando aproximadamente 162.000 km³ quando considerada todas as suas extensões (Abreu *et al.*, 2013). Essa vasta quantidade de água armazenada torna o aquífero um dos maiores reservatórios subterrâneos do planeta, desempenhando diversas funções entre elas suporte à umidade atmosférica e a estabilidade dos ecossistemas locais.

Apesar da relevância do SAGA, ainda existem lacunas significativas de conhecimento sobre as suas características hidrogeológicas, como fluxo, recarga, qualidade da água e dinâmica de uso. De forma geral, presume-se que a qualidade da água seja de boa qualidade, devido a baixa densidade populacional em grande parte da região. No entanto, a ausência de estudos detalhados pode esconder seu cenário atual, pois o estado possui apenas um aterro controlado ativo e o restante dos 62 municípios do Amazonas possuem lixões à céu aberto, fossas rudimentares outras problemáticas relacionadas a atividades humanas (Guimarães *et al.* 2023).

2.2 LEGISLAÇÃO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

2.2.1 Política Nacional dos Recursos Hídricos

O Brasil é um país com os maiores volumes de água em território no mundo. Seus rios principalmente da bacia amazônica são extensos e profundos. Mas alguns desafios na gestão hídrica ainda persistem no Brasil, destacam-se o aumento da população das áreas urbanas, o extenso espaço territorial e a existência de muitas áreas isoladas como na região norte a ineficiência da gestão sustentável desse recurso, que abre margem para o domínio do capitalismo sobre o ambiente.

Diante das problemáticas enfrentadas na gestão e proteção da água no Brasil, foi criada a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) instituída pela Lei nº 9.433/1997 foi um grande marco no que tange a proteção desses recursos que passou a ser definido como um bem público e limitado, que deve ser gerido de forma integrada e descentralizada (Brasil, 1997).

A PNRH visa garantir água em qualidade e quantidade suficiente para as atuais e futuras gerações, para atingir esse objetivo ela estabeleceu o modelo de gestão participativa e diferentes atores e órgãos públicos desempenham o papel de protetores desse recurso, sendo seu dever denunciar quaisquer irregularidades (Brasil, 1997).

Outro ponto importante da PNRH foi a criação de instrumentos como a outorga dos recursos hídricos e a cobrança pelo seu uso, estabelecendo que o Estado adota

políticas de controle e reforçando o objetivo do uso da água de forma equilibrada, promovendo a sensibilização e valoração desse recurso (Brasil, 1997).

Um dos princípios fundamentais da PNRH é o reconhecimento da água como um bem de domínio público, ou seja, pertencente a todos. Embora o Brasil possua uma das maiores disponibilidades de água doce do mundo, o acesso da população a esse recurso é marcado por desigualdades significativas. Isso ocorre devido à distribuição geográfica irregular da água no território nacional (Tabela 1), o que torna o acesso fácil em algumas regiões e mais escasso em outras (Soares & Signor, 2021).

Tabela 1. Comparativo da densidade populacional em relação à disponibilidade hídrica por região

Região	Disponibilidade hídrica	Concentração populacional
Nordeste	3,3%	54.644.582 pessoas
Sudeste	6%	84.847.187 pessoas
Sul	6,5%	29.933.315 pessoas
Centro Oeste	15,7%	16.287.809 pessoas
Norte	68,5%	17.349.619 pessoas

Fonte: Adaptado de ANA (2020) IBGE (2022).

Na tabela acima observa-se a distribuição desproporcional de disponibilidade hídrica em relação a concentração populacional dos estados brasileiros, sendo agravante na região nordeste com a menor porcentagem de água e com a segunda maior população, ela apresenta grande insegurança hídrica e cerca de 78,4% dos municípios decretaram emergência durante a estiagem nos anos de 2003 e 2016 (ANA, 2021).

A região Norte por sua vez, apresenta dados com uma disponibilidade hídrica favorável, mas no diagnóstico de distribuição dessa água realizado pela ANA a região é classificada como um dos maiores déficits de atendimento na cobertura, sendo ineficiente no abastecimento de água, necessitando de cerca de 5.001 a 50.000 ligações por sede para ser mais eficiente (ANA, 2021).

O uso múltiplo das águas é um dos princípios da PNRH, sendo um tópico difícil de ser abordado, pois ele está inserido sob diferentes vertentes ideológicas como a sustentabilidade e o desenvolvimento econômico que discutem a melhor estratégia para abastecer a população em uma sociedade capitalista (Braz Junior *et al.* 2022). A principal problemática tem sido a alta demanda por água, nem mesmo a Bacia Amazônica uma das regiões mais abundantes deste recurso escapa deste cenário de exploração hídrica, que

pode gerar prejuízos irreversíveis no futuro, tornando essencial a participação de todos os atores no seu processo de gestão (Rodrigues *et al.* 2024).

A gestão descentralizada e participativa foi um dos princípios inovadores da PNRH destacando que assim como a água é um bem de domínio público ela é responsabilidade de toda sociedade civil, usuários dessa água e seus diferentes atores que juntamente com os Comitês de Bacias devem preservar esse recurso (Brasil, 1997). Dentre os desafios encontrados na gestão dos recursos hídricos destaca-se a extensa área territorial, o enquadramento desses corpos d'água para sua correta utilização levando em consideração sua qualidade e quantidade disponível e a falta de um monitoramento efetivo dos parâmetros das bacias hidrográficas (Padovesi-Fonseca & Silva De Faria, 2022).

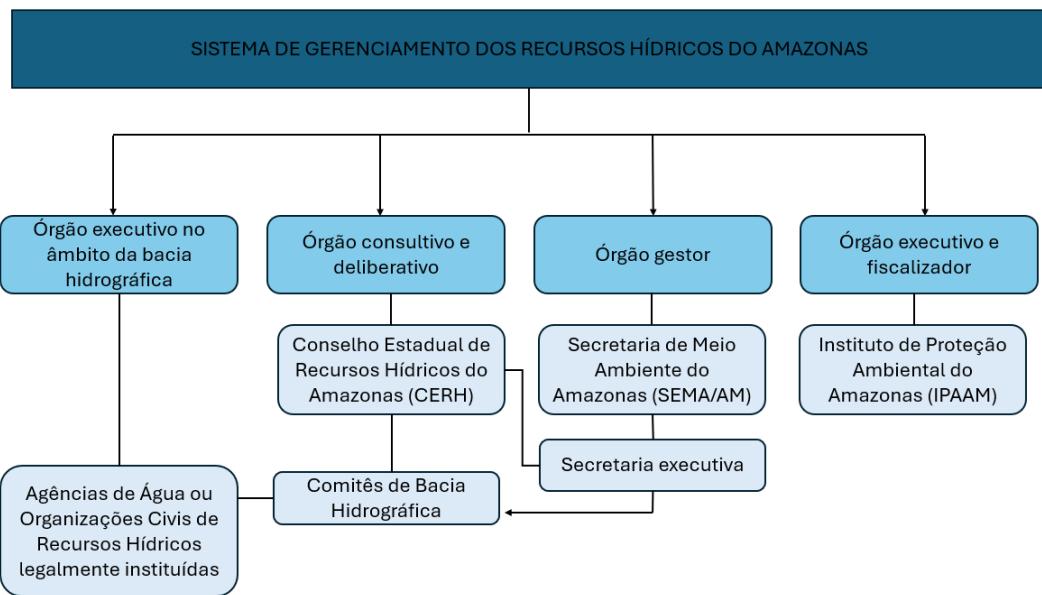
A gestão dos recursos hídricos de forma descentralizada em uma megametrópole como São Paulo possui algumas fragilidades que se agravam na delimitação do território e arranjos normativos que se sobrepõem ou se flexibilizam em áreas limítrofes, isso ocasiona uma controversa nos sistemas de governança ambiental (Orsi, *et al.*, 2021). Nesta linha a gestão dos recursos hídricos em uma extensa área, sendo alguma pouco exploradas como Amazonas torna esse processo mais complexo.

A grande disponibilidade hídrica superficial e subterrâneas no Amazonas cria a percepção equivocada que elas são fontes inesgotáveis e de menor relevância em comparação a grandes metrópoles que enfrentam altos índices de poluição, mas este território possui os maiores déficits no saneamento básico e infraestrutura nas áreas urbanas e se agravando nos municípios (Bordalo, 2017).

O Estado do Amazonas no âmbito de gestão das águas instituiu a Política de Recursos Hídricos em 2001, através da Lei Estadual nº2.712, de 28 de dezembro de 2001, que promoveu a criação do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos que posteriormente seria revogada em virtude da Lei Estadual nº 3.167, de 27 de agosto de 2007 que é o principal instrumento normativo juntamente com o Decreto nº 28.678/2009 que regulamenta esta lei.

A lei Estadual segue os objetivos estabelecidos pela PNRH assim como os instrumentos que estabelecem a criação do Plano Estadual, a o enquadramento dos corpos de água a outorga de usos de recursos hídricos a cobrança pelo recurso hídrico o zoneamento dos corpos hídricos são instrumentos que fortalecem essa lei. Dentre as normativas criadas para a gestão dos recursos hídricos no Amazonas estabeleceu-se um arranjo institucional desse sistema (Figura 6).

Figura 6. Organograma do sistema de gerenciamento de recursos hídricos



Fonte: Adaptado de ANA (2023)

O Sistema de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Amazonas é composto por quatro órgãos centrais que atuam de forma integrada para fortalecer a governança e o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos no estado. Entre eles destaca-se o Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Amazonas (CERH), que possui uma estrutura consultiva e deliberativa voltada à formulação e articulação da política estadual de recursos hídricos. Este conselho é instituído pelo Art. 64 da Lei Estadual nº 2.712/2001, sendo responsável por estabelecer normas e diretrizes, além de compor um colegiado com representação multisetorial.

O órgão gestor do sistema é representado pela Secretaria do Meio Ambiente do Amazonas (SEMA), que tem como funções principais o planejamento, a coordenação e a formulação das políticas ambientais do estado, incluindo a gestão dos recursos hídricos. No interior da SEMA, existe uma estrutura executiva que organiza e distribui as funções entre os diversos e sistemáticos como florestas, áreas protegidas, recursos pesqueiros, monitoramento ambiental e especialmente de recursos hídricos.

Por sua vez, o Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM), atua como órgão executivo e fiscalizador, desempenhando um papel essencial na operacionalização da política de recursos hídricos. É o principal responsável pela emissão de outorgas de direito de uso da água em domínio estadual, além de executar atividades de licenciamento ambiental, fiscalização, monitoramento e pesquisas relacionadas tanto às águas

superficiais quanto as águas subterrâneas, acompanhando seu uso, sua qualidade e eventuais vulnerabilidades.

2.2.2 Plano Estadual de Recursos hídricos

Nas diretrizes da Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) está prevista a criação de planos estaduais, em que muitas regiões se comprometeram a desenvolver esse documento, como o Estado do Amazonas que está sob a orientação desta política para gestão de suas águas, principalmente as subterrâneas, em virtude de sua demanda para o abastecimento local, dessa forma foi criado o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Amazonas (PERH).

O objetivo do PERH é proteger os recursos hídricos do Amazonas, investindo em pesquisas e projetos direcionados a preservar a qualidade da água e identificar os pontos de vulnerabilidade no estado. Esse plano foi voltado principalmente aos mananciais que abastecem a capital e os municípios, e suas aplicações devem ser direcionadas para promover o uso múltiplo da água em processos industriais e na agricultura fortalecendo o uso da água de forma sustentável.

Este plano estabelece as metas do PERH, baseadas nas normativas instituídas para o estado. A primeira meta visa elaborar metodologias que irão instituir a base legal para conseguir de forma efetiva realizar a gestão dos recursos hídricos no Amazonas. Articulações já foram realizadas para o andamento desta meta como a definição de atribuições aos respectivos órgãos gestores, executores e fiscalizadores além da criação de dois comitês de bacias hidrográficas com a finalidade de gestão das águas.

A segunda meta tem como objetivo investigar o panorama atual das condições dos recursos hídricos no estado. Esta meta é desafiadora pois o Amazonas possui uma grande extensão territorial e diferentes cursos d'água dificultando estudos na área, mas a grande preocupação são os mananciais subterrâneos, responsáveis por abastecer mais da metade dos municípios, sua condição confinada torna trabalhoso o acesso à informações sobre suas qualidades, potencialidades e possíveis pontos de vulnerabilidade. No entanto, a colaboração entre pesquisadores das áreas de geociências, hidrogeologia, geoprocessamento e gestão de recursos hídricos, aliada ao investimento em estudos específicos, pode contribuir significativamente para preencher as lacunas.

A terceira meta do PERH tem como objetivo descentralizar a gestão no estado através da capacitação de atores sociais pertencentes a diferentes comunidades, autarquias

do poder público e os usuários a cada um devem ser estabelecidos os papéis de responsabilidade sobre este recurso, promovendo uma governança com equidade e permitindo a autonomia dos municípios no que concerne à disciplina do uso do solo e suas interferências na qualidade da água.

A quarta meta tem como objetivo apresentar a realidade do estado do Amazonas explanando o atual cenário de qualidade da água. Apesar do grande volume e imponência hídrica reconhecida, o estado apresenta sérios problemas com a qualidade da água. Em Manaus, rios como Taruma-açu, Puraquequara e os igarapés uranos como o Quarenta, apresentam altos índices de contaminação devido a despejo de esgoto doméstico e efluentes industriais (Pascoaloto *et al.*, 2020). No interior do estado, a situação da qualidade das águas subterrâneas também é preocupante.

Municípios como Itacoatiara, Parintins e Manacapuru enfrentam riscos à qualidade das águas subterrâneas e adoecimento da população devido à disposição inadequada de resíduos sólidos em lixões à céu aberto, ausência de saneamento básico e atividade antrópicas sem controle ambiental (Lima *et al.*, 2024). Esses lixões geram cargas significativas de contaminantes e metais pesados que se infiltram no solo até atingirem os lençóis freáticos. Esse tipo de disposição final inadequada dos resíduos é recorrente em praticamente todos os municípios do Amazonas, agravando ainda mais a vulnerabilidade hídrica subterrânea da região (Alves *et al.*, 2020).

A quinta a meta trata da sustentabilidade financeira da gestão dos recursos hídricos, a qual ainda se mostra uma realidade distante no Amazonas devido à falta de articulação institucional para implantar e monitorar os instrumentos de gestão. Para viabilizar essa independência, foi criado o Fundo Estadual de Recursos Hídricos por meio da Lei nº 3.167, que prevê ações como compensações financeiras, aplicação de multas e a cobrança pelo uso da água. Esses mecanismos, se efetivamente implementados, poderiam suprir, ainda que parcialmente, as demandas financeiras relacionadas às atividades de gestão dos recursos hídricos no estado.

A sexta e última meta consiste na gestão integrada dos recursos hídricos através da articulação entre a bacia hidrográfica do Rio Amazonas e os países e estados vizinhos. Essa integração é essencial para uma gestão eficiente, considerando que o rio nasce no Peru e percorre diversos territórios até desaguar no Oceano Atlântico, no estado do Pará. Assim, um gerenciamento eficaz deve considerar toda a extensão do percurso das águas, promovendo a cooperação interestadual e internacional. Os objetivos de governança, portanto, devem buscar convergência, mesmo entre diferentes entes federativos.

CAPÍTULO II - Análise do risco e vulnerabilidade hídrica subterrânea

3.1 RISCO, VULNERABILIDADE E SUAS CONSEQUÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS

A definição de risco adotada neste trabalho é a descrita por Castro *et al* (2005, p.12) que “refere-se à probabilidade de ocorrência de processos no tempo e no espaço, não constantes e não determinados e à maneira como estes processos afetam (direta ou indiretamente) a vida humana”. O mesmo autor ainda ressalta que existem algumas classificações associadas a adjetivos que as diferem e definem como o risco natural, tecnológico, antropogênico e ambiental.

O risco natural para Rebelo (2003), corresponde aquele tipo de risco que não tem relação com o homem advindo exclusivamente do ambiente e suas mudanças naturais ao longo dos anos como os riscos climáticos, riscos geomorfológicos, movimentação de massa e outros tipos de acontecimentos de ordem natural. Neste cenário Girão *et al.* (2018) reforça a ideia de que o risco natural está associado as características físicas e de fragilidade do local, ou seja, antes de qualquer tipo de intervenção aquela região enfrenta suas próprias dificuldades.

Existem vários riscos causados pela ação humana sobre o meio ambiente, entre eles destaca-se o risco tecnológico, que pode abranger diferentes elementos ao longo dos processos e cadeias produtivas desde a extração da matéria prima até a chegada dos produtos aos consumidores. Esse tipo de risco também está relacionado a atividades agrícolas, científicas e industriais (Castro *et al.* 2005). Para Sevá Filho (1988), o risco tecnológico pode ser analisado a partir de três componentes principais: o processo de produção (envolvendo recursos, equipamentos, maquinário); o processo de trabalho (relacionado às interações entre direções empresariais e estatais e assalariados); e a condição humana, que abrange tanto os aspectos individuais quanto coletivos, bem como o ambiente em que estão inseridas.

O risco antropogênico é aquele associado a natureza humana, de condições sociais e produtivas que coexistem (Dagnino; Junior, 2007). Pinto *et al.* (2007, p. 98-99), ainda define duas subcategorias, os riscos construídos classificados com “transformações espaciais construídas sobre o espaço natural” e o risco produtivo que é associado a “atividades econômicas e as atividades não-econômicas, a partir de informações a respeito das atividades produtivas e as formas de produção”.

Por sua vez, o risco ambiental engloba tanto o risco natural quanto aquele modificado pelas ações humanas (Dagnino; Junior, 2007). De acordo com a conceituação de Veyret e Meschinet de Richemond (2007, p.63), os riscos ambientais “resultam da associação entre os riscos naturais e os riscos decorrentes de processos naturais agravados pela atividade humana e pela ocupação do território.”

O conceito de risco atravessa diferentes camadas e veredas da sociedade estando associado a ela, pois engloba o ambiente e todos seus limites, criando conexões para tentar encontrar suas causalidades e justificar os fenômenos que estão cada vez mais presentes nos centros urbanos afetando consistentemente espaços densamente urbanizados (Almeida, 2012). O risco e a vulnerabilidade não são termos tão distintos de acordo com Yunes e Szymanski (2001, p.28) pois “a vulnerabilidade opera apenas quando o risco está presente; sem risco, vulnerabilidade não tem efeito”. Diante disso Janczura (2012) ressalta que o termo vulnerabilidade está comumente associado a situações que predispõem o estresse.

Para Metzger *et al.* (2006) e Schoter *et al.* (2004) a vulnerabilidade está associada ao termo susceptibilidade que é determinada por três fatores principais, o grau de exposição (quanto mais exposto maior a susceptibilidade), a sensibilidade (medida da reação dos ecossistemas a mudanças) e capacidade de resposta da sociedade (adotar rápidas medidas e ações diante das mudanças ambientais).

A vulnerabilidade ambiental, por sua vez, foi definida por Aquino *et al.* (2017, p.15) com sendo “o grau em que um sistema natural é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos das interações externas”. O mesmo autor ainda discorre acerca da vulnerabilidade que advém de situações, como as modificações no meio ambiente resultado de ação humana em casos que o recurso ou o meio afetado predispõem de fragilidades que dificultam a recuperação de seu estado natural. Maior e Cândido (2014), destacam que a desigualdade brasileira favorece a ocorrência dos desastres em regiões periféricas por ser um local fragilizado naturalmente que sofre impactos de atividades antrópicas.

A falta de políticas públicas direcionadas a melhorar a relação da população com o meio ambiente cria vulnerabilidades, gerando maior impacto na população de baixa renda que são marginalizados pelas suas condições de educação e moradia advinda de governos que as negligenciaram, criando um ambiente de vulnerabilidade socioambiental em que as obriga a viverem sob condições que prejudicam sua saúde e o ambiente com habitações irregulares e sem condições básicas de saneamento (Maior e Cândido, 2014).

Dentro do contexto de vulnerabilidade, temos os recursos hídricos, que após a ação de um agente contaminante pode resultar em uma incapacidade do sistema de voltar as suas condições iniciais antes da ocorrência do evento (Tucci; Chagas, 2017). Estes autores ainda ressaltam que diversas situações como uma prévia vulnerabilidade social, econômica e ambiental, aliado a pressões, incertezas governamentais e efeitos naturais antrópicos podem fomentar o processo de vulnerabilidade hídrica gerando uma falha na proteção do sistema e da população dependente dele.

Por sua vez, a vulnerabilidade hídrica subterrânea ocorre em meio ao desenvolvimento de algumas atividades que geram pressões nesse recurso, como explorações hídricas maiores que as taxas de recargas, sobrecarregando o aquífero e ocasionando rebaixamento dos lençóis freáticos, explorações irregulares e ilegais como também a percolação de contaminantes gerados a partir uso inadequado do solo (Cabral; Santos, 2006).

3.1.1 Risco e vulnerabilidade associado aos recursos hídricos subterrâneos

Os recursos hídricos estão entre os elementos mais imprevisíveis da natureza, especialmente aqueles confinados, em que as informações dependem, em grande parte de estimativas e inferências indiretas. Apesar da limitação, é fundamental que esses aquíferos sejam objeto de estudos aprofundados sobre sua vulnerabilidade, a fim de garantir o acesso à água potável em quantidade e qualidade adequadas. Essa medida é essencial para assegurar a segurança hídrica, principalmente diante de eventos provocados por causas naturais ou antrópicas, que podem comprometer a disponibilidade e a integridade desses recursos (Paungartten; Santos, 2023).

As águas subterrâneas são importantes sistemas estratégicos de captação de água, em um cenário de crises hídricas e falhas no sistema de distribuição, esses reservatórios naturais sofrem com as condições de sazonalidades, evaporações e frequentes inundações enfrentadas por diversas cidades que geram transtornos aos sistemas de captação de água superficial (Diniz *et al.* 2021). Todavia, a exploração de água subterrânea demandada pela sociedade gera pressões aos recursos hídricos, uma vez que, a demanda de consumo do estilo de vida, do setor agropecuário e a condição socioeconômica são agentes que estimulam a ocorrência de vulnerabilidades, bem como causas emergentes, como as mudanças climáticas (Aquino *et al.* 2017).

Em um contexto histórico Da & Rebouças (2002), relatam que o abastecimento a partir de fontes subterrâneas no Brasil ficou popular no século XX devido seu custo ser reduzido em comparação a outras formas abastecimento, permitindo que áreas mais isoladas sejam beneficiadas com água de qualidade para seu uso. Das legislações e investimentos voltados para a gestão dos recursos hídricos, a maioria tem enfoque nas águas superficiais, dando continuidade às práticas de invisibilidade para fontes subterrâneas, que estão sob constantes pressões antrópicas(Zoby *et al.* 2002).

O mesmo autor ainda reforça que a conduta de exclusão do gerenciamento e políticas voltadas para as águas subterrâneas criam uma lacuna que impede a proteção efetiva desses recursos, a falta de interesse por parte dos gestores torna ainda mais difícil contornar essa realidade (Zoby *et al.* 2002).

O aumento nos níveis de poluição ambiental é outro ator que vêm sobrecarregando as matrizes aquáticas, que não conseguem realizar o processo de autodepuração na mesma proporção que são afetadas. Inerente a isso, há o aumento da população em áreas sem infraestrutura, áreas de risco ou com alguma fragilidade ambiental que demanda por uma água em quantidade e qualidade adequada (Fernandes *et al.* 2008).

Outra problemática negligenciada é a utilização das águas subterrâneas por poços particulares sem outorga ou monitoramento, que ainda são realizadas de forma não controlada e alguns operam em péssimas condições, o fato de estar confinada alavanca as dificuldades no monitoramento (Da & Rebouças, 2002).

Essas falhas refletem a ineficiência da gestão urbana e dos recursos naturais, sendo um dos principais fatores que contribuem para a vulnerabilidade dos recursos hídricos, que estão caminhando para a escassez em virtude de sua exploração e atividades que estão diretamente relacionados à contaminação da água (Júnior *et al.* 2022).

Na busca por mitigar essas deficiências da gestão das águas foi criado a gestão integrada dos recursos hídricos que busca de forma sustentável atender os interesses e necessidades de todos os seus usuários sem comprometer as futuras gerações tendo gestores e diferentes atores sociais contribuindo para um crescimento econômico que acompanhe a proteção do meio ambiente (Veyret, 2012).

Na linha da gestão de águas Veyret (2012, p.172) descreve que a gestão social da água:

“Engloba o conjunto dos princípios e providências que visam associar os diferentes atores da água (privados e públicos) na busca do equilíbrio entre

recurso e necessidade de água e na perspectiva da melhor integração dos riscos ligados à água no nível das práticas individuais e coletivas”.

Portanto esse sistema de gestão visa a participação de todos os grupos com interesses semelhantes, para tomadas de decisão e implementação de políticas buscando o equilíbrio entre a demanda da sociedade e a necessidade de proteção dos recursos naturais (Botelho *et al.* 2007).

Para conseguir propor ações é necessário caracterizar e identificar na área de estudo suas fraquezas e pontos de sensibilidade ambiental, para as deficiências não se tornem grandes problemáticas. Dessa forma, estudos de vulnerabilidades das águas subterrâneas são instrumentos fundamentais para seu processo de caracterização do corpo hídrico, permitindo o planejamento de uso e ocupação do solo (Paungartten; Santos, 2023).

3.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA

No campo do conhecimento geográfico existem grandes áreas de estudo como aquelas que identifica uma possível ameaça, principalmente quando isso afeta de forma significativa o ambiente. Entretanto ainda há desafios a serem superados como a mensuração dos riscos, vulnerabilidades e a busca por novas metodologias aliado a tecnologias de projeções de risco para áreas e recursos com fragilidades (Almeida, 2012).

A avaliação da vulnerabilidade hídrica subterrânea é um estudo que ganha cada vez mais notoriedade advindo do impacto das cidades sobre os recursos naturais, esses impactos são caracterizados pela introdução de uma carga de contaminantes em um ambiente vulnerável. Dessa forma, localidades que dependam da água subterrânea como fonte de abastecimento principal precisam realizar esse acompanhamento, pois a contaminação desse recurso acaba inviabilizando seu uso e acarretando problemáticas ambientais e sociais (Peixoto, 2020).

A gestão dos recursos hídricos é a melhor estratégia para driblar adversidades resultantes de contaminações. A PNRH estabelece em seus instrumentos que a contaminação das águas precisa de ações preventivas para que não haja gastos exorbitantes em um futuro processo de tratamento (Brasil, 1997). Para contornar essa situação, busca-se mecanismos para identificar previamente as áreas mais vulneráveis de um manancial e a partir desses resultados traçar estratégias de proteção para mitigar impactos em níveis irreversíveis.

Segundo Foster *et al.*, (1988), a suscetibilidade de um aquífero pode ser determinada pela associação do conjunto de características intrínsecas das camadas do solo que diferem daquelas da superfície do aquífero saturado. É importante destacar que além da vulnerabilidade intrínseca que considera apenas as características do aquífero com ou sem a presença do contaminante, também há a vulnerabilidade específica que relaciona a vulnerabilidade do aquífero diretamente com a presença de alguma carga de contaminante (Miguel, 2004).

O mapeamento da vulnerabilidade é uma ferramenta que consegue através da utilização de programas de modelagens e sistemas de informações geográficas como Qgis quantificar a fragilidade de determinado local, com a visualização dessas áreas vulneráveis o processo de planejamento ambiental se torna mais eficiente (Rahman, 2008). Diante dessa importância, várias metodologias de análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas foram criadas e a seleção de cada método varia conforme a necessidade e a disponibilidade de dados. Algumas das principais metodologias podem ser verificadas no Quadro 3.

Quadro 3. Principais métodos de classificação de vulnerabilidade em aquíferos

Método	Característica	Referência
DRASTIC	Integra sete parâmetros hidrogeológicos: profundidade do lençol, recarga, tipo de solo, topografia, tipo de material da zona não saturada, condutividade hidráulica. Permitem integrar diversos parâmetros caracterizados da porção subterrânea e sua especificidade.	Aller <i>et al.</i> , (1985)
GOD	Método conceitual simples, baseado em três parâmetros: tipo de aquífero, grau de confinamento e profundidade. É amplamente utilizado por sua aplicação prática e rápida.	Foster; Hirata (1988)
SINTACS	Baseado no método DRASTIC, porém com estrutura mais complexa e pesos adaptáveis conforme o tipo de poluição.	Civita <i>et al.</i> , (1990)
AVI	Baseado em dois parâmetros físicos dos aquíferos: espessura das camadas acima do freático e condutividade hidráulica de cada camada, fornecendo uma estimativa da proteção natural.	Van Stempvoort (1993)
DRASTIC-LU	É um método variante do DRASTIC que incorpora o uso e ocupação do solo como fator agravante da vulnerabilidade	Secunda <i>et al.</i> , (1998)

IS	Método utilizado para caracterizar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição agrícola.	Francés <i>et al.</i> , (2001); Paralta et al., (2001); Ribeiro (2005)
GOD-S	Variante do GOD voltada à contaminação específica, como exemplo o nitrato, integrando o tipo de contaminante ao modelo original.	Hirata (2003); Foster & Hirata (1995).
EPPNA	Método baseado no tipo de aquífero e material geológico associado, com foco na vulnerabilidade natural.	Plano nacional da água (1998); Artuso et al., (2004)
EKV	Classificação para aquíferos livres, baseada na profundidade da superfície freática e na condutividade vertical da zona não saturada.	Auge (2004)
POSH	Metodologia simplificada utilizada em conjunto com Sistemas de Informações Geográficas (SIG), analisa a probabilidade de contaminantes e a sobrecarga hidráulica.	Foster <i>et al.</i> , (2006).

Fonte: Elaborado pelo autor.

No estudo de Franco e Arcos (2020) realizado em Rio Branco-AC, houve um histórico de urbanização desordenada e a falta de infraestrutura local, consequentemente os moradores iniciaram a perfuração de poços escavados e a construção de fossas rudimentares, visando analisar a vulnerabilidade do aquífero Rio Branco foi aplicada a metodologia GOD para análise de 15 poços da região. Os resultados foram 20% alta vulnerabilidade e 80% de extrema-vulnerabilidade o autor atrela esses resultados principalmente a litologia, atividades antrópicas e ocupações irregulares.

Duarte *et al.*, (2019), aplicou a metodologia GOD na área urbana da capital do Amazonas, Manaus, para avaliar a vulnerabilidade natural do aquífero Alter do Chão na área de maior adensamento populacional da região norte. Após análise de 1492 poços os resultados indicaram 41% de baixa vulnerabilidade, 35% de média vulnerabilidade e 24% de alta vulnerabilidade na área de estudo. A ocupação desordenada do solo é uma grande problemática uma vez que há pouca infraestrutura, atrelado a isso a tendência de direção dos fluxos da região norte para o sul pode ser um agravante pois a região norte abriga depósitos de resíduos sólidos e o Distrito Industrial que não dispõe de tratamento de efluentes.

Em seu estudo Cutrim e Campos (2010), utilizaram os métodos POSH e DRASTIC para realizar a determinação da vulnerabilidade na cidade de Rondonópolis, no estado de Mato Grosso. Foram analisados 34 poços e os resultados encontrados foram de 44% de vulnerabilidade desprezível, cerca de 35% de vulnerabilidade moderada e 21%

de alta vulnerabilidade no Aquífero de Furnas. Neste trabalho também foi avaliado o perigo de contaminação classificado em três tipos de fontes pontuais sendo elas as fontes urbanas (postos de combustíveis e cemitérios) de moderado a reduzido potencial de contaminação, as lagoas de tratamento de esgoto industrial que tem potencial de contaminação reduzido, mas sua localização está sob uma área de alta vulnerabilidade e as fontes lineares que possuem alta capacidade de geração de contaminantes.

As metodologias utilizadas para analisar a vulnerabilidade hídrica subterrânea serão o Groundwater Hydraulic Confinemente (GOD), proposta por Foster e Hirata (1988) e o método Pollution Occurrence and Spill Hazard (POSH) proposto por Foster *et al.* (2002), ambos requerem parâmetros mais simplificados para sua execução. Ambos os métodos geram um grau de susceptibilidade a contaminação dos aquíferos e estes resultados podem ser apresentados por meio das técnicas de geoprocessamento e são excelentes instrumentos para o início da avaliação de vulnerabilidade desses mananciais a qualidade de seus dados diretamente relacionados a eficiência do resultado (Batista *et al.*, 2016).

3.3 SITUAÇÃO DOS POÇOS E USOS DA ÁGUA

Classificação dos poços

O abastecimento a partir de fontes subterrâneas ficou popular no século XX devido seu custo ser reduzido em comparação a outras formas abastecimento, ele também permite que áreas mais isoladas sejam beneficiadas com água de qualidade para seu uso (Rebouças, 1998). A principal forma de captação subterrânea é através de poços tubulares, que variam de nível de profundidade, mas alguns alcançam os aquíferos confinados e são livremente utilizados para abastecer indústrias, cidades e a agricultura (Zoby e Matos, 2002).

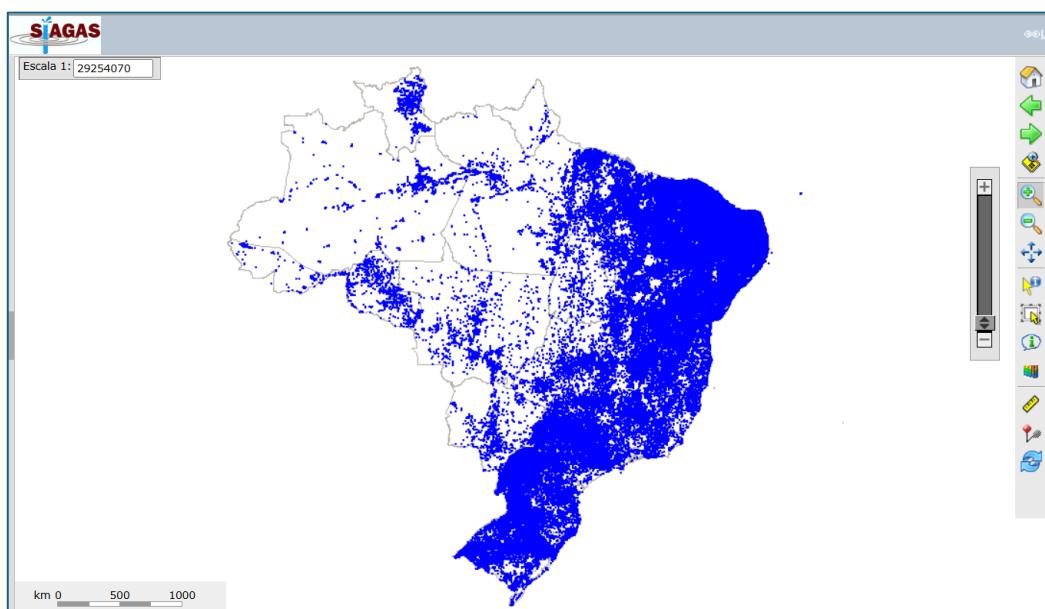
Os poços são classificados de acordo com suas características construtivas e hidráulicas. Os poços tubulares, também podem ser chamados de poços artesianos ou profundos, são definidos por uma estrutura com canalizações de pequeno diâmetro e profundidades variáveis, que podem atingir centenas de metros, sendo amplamente empregados para a extração de grandes volumes hídricos (Santo *et al.*, 2019).

Os poços escavados ou poços amazonas como é denominado em algumas regiões são aqueles construídos de forma manual e se caracterizam pelo grande diâmetro e pequena profundidade (Vasconcelos, 2014). Essas estruturas captam água diretamente de lençóis freáticos rasos, sendo hidraulicamente simples e o seu volume hídrico depende da

força mecânica exercida para bombear a água, são extremamente vulneráveis à contaminação superficial advindas de fontes antrópicas.

No Brasil o principal local para se obter dados e informações sobre os poços é através do Sistema de Informação de água Subterrânea (SIAGAS) é uma plataforma desenvolvida e mantido pelo CPRM, que abriga dados de poços tubulares de várias cidades brasileiras. Esses dados são atualizados por uma equipe técnica autorizada e estão disponíveis como uma base de dados a nível nacional para comunidade em geral, descentralizando o acesso à informação. Atualmente são mais de 380 mil (383.011 em fevereiro de 2025; poços cadastrados em todo Brasil e mais de 9 mil poços (9.981) cadastrados no estado do Amazonas (Figura 7).

Figura 7. Distribuição espacial dos poços cadastrados no Brasil



Fonte: CPRM (2025).

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil - SGB o SIAGAS é de suma importância para o desenvolvimento sustentável no âmbito dos recursos hídricos, pois foi criado para coletar, armazenar e disponibilizar informações georreferenciadas das águas subterrâneas e suas características hidrogeológicas. Através da extração desses dados qualitativos é possível realizar a interpretação para elaboração e visualização de diferentes tipos de mapas que auxiliam na gestão das águas subterrâneas.

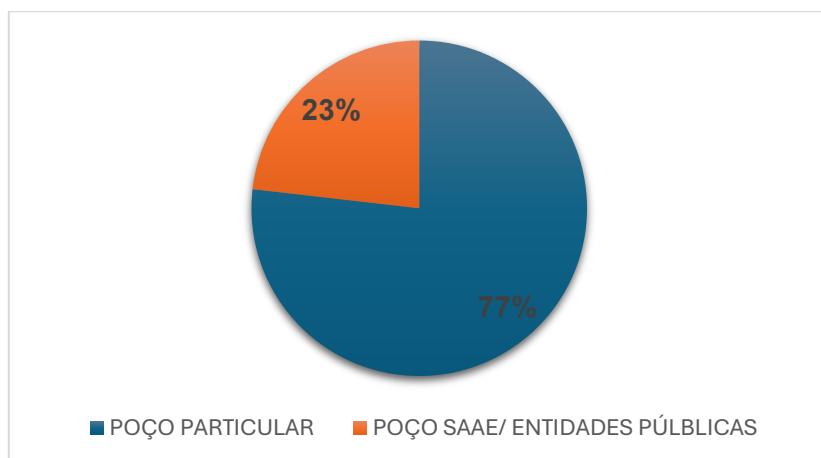
Os dados do perfil dos poços tubulares obtidos no SIAGAS são necessários para a caracterização do sistema aquífero da área de estudo, pois esses perfis possuem

diferentes características hidrogeológicas como litologia, nível estático e profundidade que influenciam em sua vulnerabilidade (Santos *et al.*, 2013); (Bandeira *et al.*, 2021).

A plataforma SIAGAS foi essencial para obter os dados do perfil dos poços tubulares da área de estudo. De acordo com Maia (2010), é possível caracterizar o sistema aquífero que abrange a área como sendo livre com porosidade intergranular, compreendidos pelos sedimentos arenosos da Formação Depósito Aluvionar na parte superior, e na parte inferior pela Formação Içá, formado à margem do rio Madeira. Com esses dados foi possível dar seguimento na análise da vulnerabilidade em Itacoatiara.

Na plataforma SIAGAS foram obtidas informações sobre os poços cadastrados no município, eles são majoritariamente abastecidos com aquíferos classificados como livres. Outra informação coleta na plataforma foi sobre a responsabilidade desses poços, no município foram encontrados registros tanto de uso particular quanto de uso público pertencentes a diversos tipos de órgãos (Figura 8).

Figura 8. Gráfico da segregação dos poços analisados



Fonte: Adaptada de SIAGAS (2024)

A Figura 8 apresenta os dois tipos de uso, sendo os poços de uso e responsabilidade do SAAE, poços do Governo do Estado e da Prefeitura Municipal. e o de uso particular que pertencem à pessoas físicas (residências), empresas, hotéis, órgãos particulares, igrejas, escolas e outras associações. Esse quantitativo representa que há uma parcela muito maior de poços que são de uso particular, entretanto eles são responsáveis por sua gestão e operação, pois assim como o SAAE tem a obrigatoriedade de realizar suas análises semanalmente, os poços particulares devem ter a mesma preocupação com a qualidade da água consumida.

Aspectos construtivos e uso dos poços

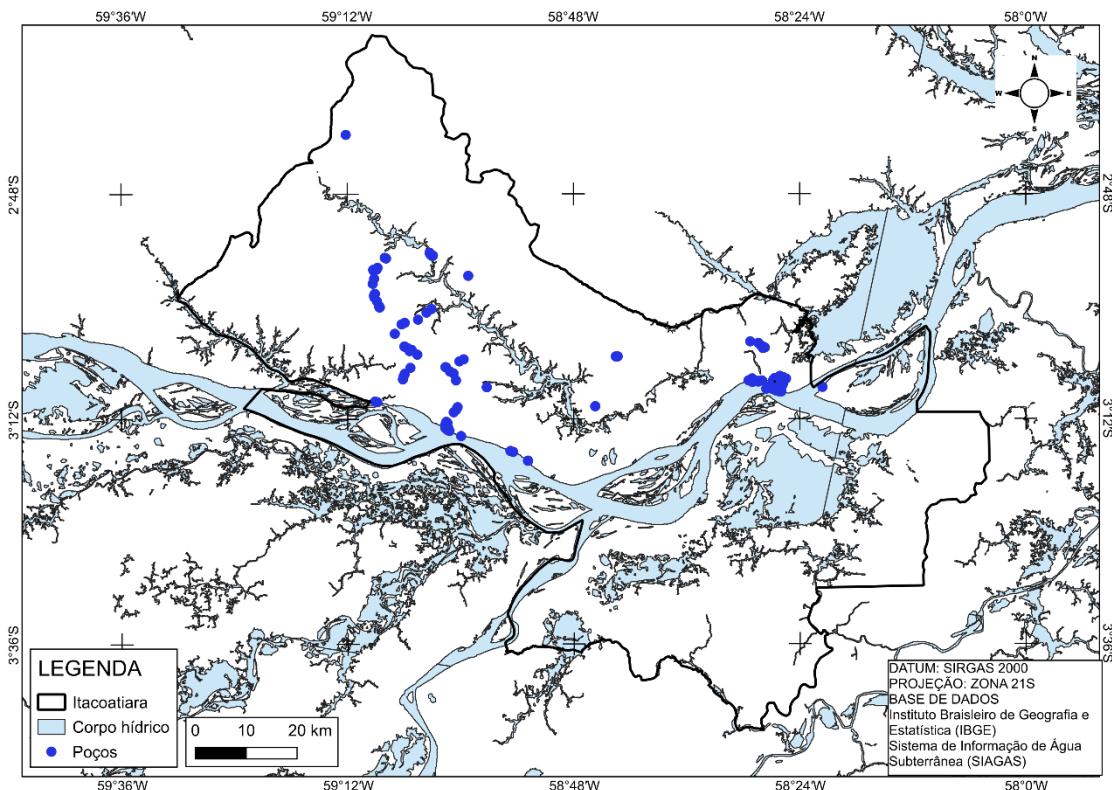
A perfuração de poços é uma atividade utilizada no abastecimento público de uma cidade e conduzida pelas companhias de saneamento, para realizar essa obra é necessário elaborar um projeto que contenha o acompanhamento técnico e estudos ambientais visando identificar se o potencial hídrico subterrâneo da região é suficiente para atender a demanda hídrica, se o projeto for viável é necessário passar por algumas etapas de construção e implementação, além da aprovação de outorga para utilização desse recurso (Sales *et al.* 2014).

A atividade de construção de poços é largamente utilizada em locais sem assistência da rede geral ou que estão sob condições precárias deste atendimento da rede de distribuição, essa prática deve caminhar com as exigências construtivas e ambientais, pois facilita o acesso de contaminantes ao manancial subterrâneo (Peroni *et al.* 2021).

No município de Itacoatiara existem poços dispersos pelo seu território, na Figura 9 é possível identificar suas localizações. A área com maior concentração está na sede do município, em que os pontos azuis (representando os poços) se sobrepõem devido a quantidade. Mas também existem perfurações de poços nas vilas mais desenvolvidas como Novo Remanso, Engenho e Lindóia.

Alguns desses poços subterrâneos são geridos pelo Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), responsável pelo sistema de abastecimento água. Entretanto, esse sistema não atende toda a população, necessitando por vezes de sistemas individuais de captação de água subterrânea e outras comunidades também utilizam bombas de sucção para transportar a água dos rios até suas residências, mas esses parâmetros não são garantidos e variam em razão do período de cheias e vazantes (Pantoja, 2015).

Figura 9. Espacialização dos poços distribuídos em Itacoatiara.



Fonte: Autor (2025)

Em Itacoatiara, a necessidade da utilização de água de poços resulta da falta de um sistema de abastecimento em que o manancial superficial seja o protagonista. Mas criar esse tipo de sistema demanda investimento, equipe técnica e um comprometimento de órgãos públicos e autoridades. Em razão disso, temos uma parcela de poços captando água de mananciais subterrâneos de diferentes localidades urbanas e rurais do município.

É notório que os poços de responsabilidade do SAAE, na parte mais urbanizada da cidade possuem uma maior proteção contra as intempéries do ambiente (sol, chuva, vento e poeira), além de proibir a manipulação de pessoas não autorizadas, garantido uma maior segurança hídrica. Afinal as pessoas que trabalham no SAAE conseguem ter um maior acesso, isso é representado na Figura 10 (e) e (f), a existência uma infraestrutura adequada.

Por sua vez, existem poços que não são de responsabilidade do SAAE, mas que extraem esse recurso da mesma fonte (Figura 10). Logo, analisar a situação desses outros poços também é importante, pois existe muita falta de informação, visto que, não se tem informações suficientes sobre aspectos construtivos e um monitoramento regular da

qualidade da água, pois suas construções são advindas de programas do governo ou união entre os próprios moradores, que são responsáveis por sua operação.

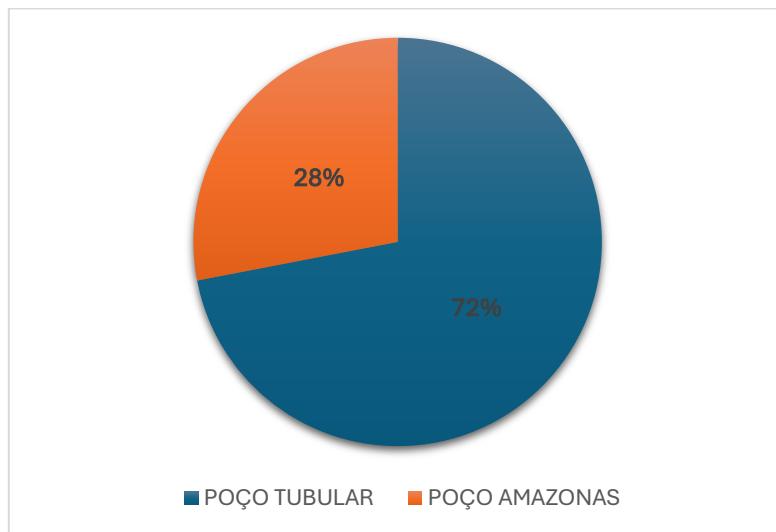
Figura 10. Situação dos poços em Itacoatiara. A) Poço da comunidade Vila Batista; B) Poço da Comunidade Jamanã; C) Poço da Comunidade Nossa Senhora das Graças; D) Poço da Comunidade Rio Arari; E) e F) Ambos são poços do SAAE na zona urbana de Itacoatiara.



Fonte: Autoria própria (2025)..

Os poços possuem duas classificações mais usuais, sendo eles os poços tubulares que podem ser os artesianos ou semiartesianos, muito utilizados para gerar grandes volumes hídricos (Tsutya, 2010). O segundo tipo mais encontrado, são os poços escavados que possuem diferentes denominações para cada região, eles podem ser obtidos através de perfis litológicos mais rasos, o seu volume hídrico depende da força mecânica exercida para bombear a água ambos os tipos são encontrados em Itacoatiara (Figura 11).

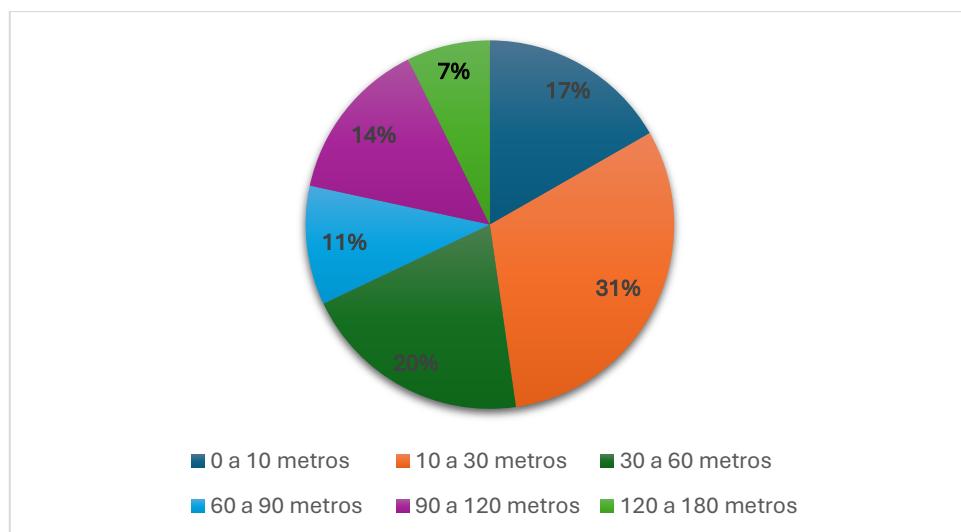
Figura 11. Gráfico da distribuição de poços tubulares e poços amazonas em Itacoatiara.



Fonte: Adaptada de SIAGAS (2024).

Os poços tubulares são aqueles construídos sob grandes profundidades que se aproximam dos cem metros necessitando de projetos e equipamentos específicos para sua execução, para seu funcionamento, sendo necessário a instalação de uma bomba submersa (Santos *et al.*, 2020). O município possui cerca de 72% de poços tubulares distribuídos em áreas urbanas e rurais, quanto a profundidade é bem variável. A Figura 12, representa o gráfico das porcentagens das profundidades dos poços, o maior quantitativo é de poços de 10 a 30 metros com 31%, seguido de 20% de poços de 30 a 60 metros e na terceira posição poços de 0 a 10 metros de profundidade.

Figura 12. Gráfico da distribuição das profundidades dos poços



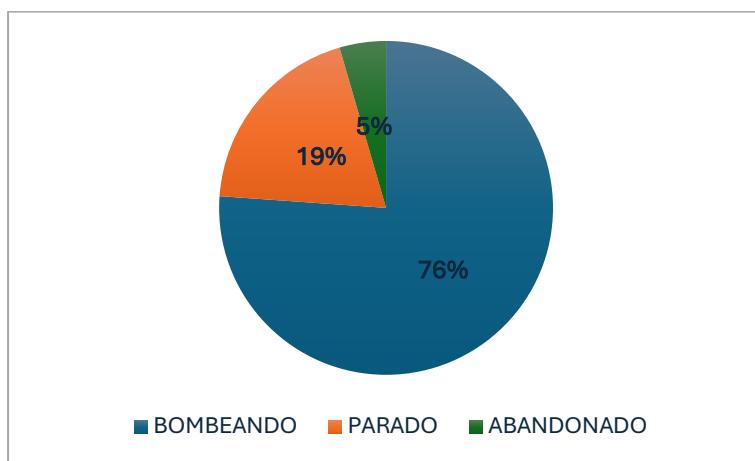
Fonte: Adaptada de SIAGAS (2024).

No município de Itacoatiara também foram identificados poços escavados ou “amazonas”, como são denominados na região, a profundidade deles varia de 1 a 8 metros, são poços com aproximadamente 30 anos de construção encontrados nas áreas urbanas e principalmente nas zonas rurais do município onde o acesso é mais precário, entretanto sua característica rasa compromete a qualidade, sendo encontrado com frequência a presença de coliformes totais e fecais em amostras de poços rasos (Rosa *et al.* 2022).

Dentre os principais fatores que ocasionam a contaminação de poços tem-se a localização inadequada, a perfuração em locais próximos a áreas vulneráveis como fossas sépticas e rudimentares, cemitérios, lixões e outros (Schultz *et al.* 2025). Outro fator é a falta de investimento, a utilização desde sua concepção de materiais de baixa qualidade ou materiais que não são recomendados para tal finalidade, além da manutenção inadequada e baixa incidência de análise de parâmetros de água, sendo realizados de forma esporádica (Santos e Silva Filho, 2024).

Durante o processo de análise dos poços, foram classificadas algumas informações relevantes como situação de cada poço (Figura 13), analisada a partir dos 147 poços selecionados na plataforma SIAGAS. Há uma quantidade significativa de mais de 70% de poços bombeando, mas há uma preocupação com os poços que estão parados ou abandonados, visto que eles ainda são uma ligação direta com os mananciais subterrâneos e devem ser monitorados.

Figura 13. Gráfico da situação dos poços analisados

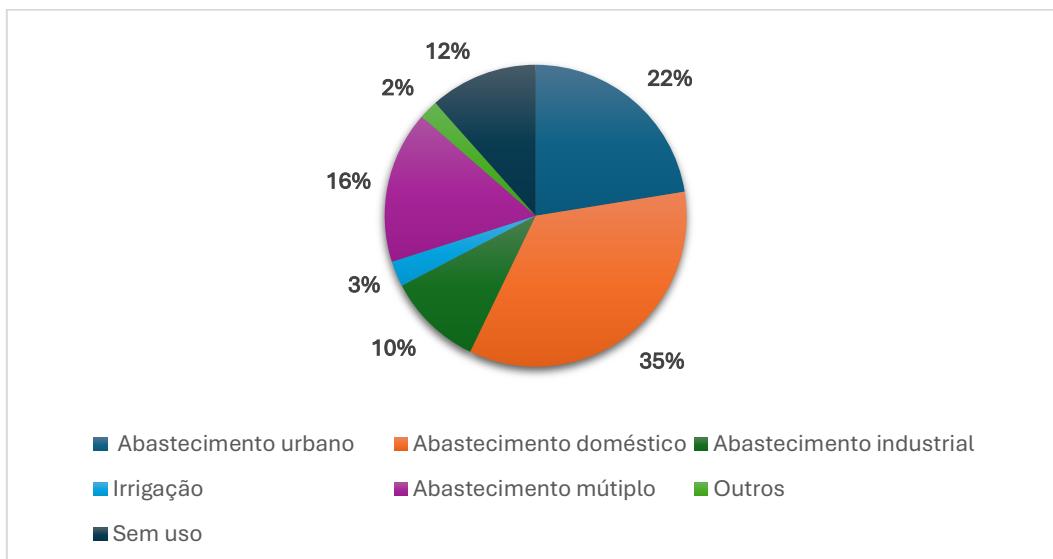


Fonte: Adaptado de SIAGAS (2024).

Os poços classificados como parados na Figura 13, representam 19%, eram utilizados em sua maioria para abastecimento urbano, domésticos e uso múltiplo, representando uma perda juntamente com a porcentagem de poços abandonados com 5% representam outra grande perda, visto que eram utilizados em abastecimento doméstico e abastecimento múltiplo, mas não se tem informações dos motivos que levaram paralização desses poços.

Na plataforma SIAGAS também foi possível retirar informações sobre os tipos de uso da água, há um maior percentual para abastecimento doméstico, que pode ser associado a quantidade de poços de uso particular na área urbana e rural. Com 22% temos os poços para abastecimento urbano, considerando o abastecimento de áreas residenciais, áreas comerciais e seus outros usos (Figura 14). As menores porcentagens de uso são para a classe “outros” e para irrigação, então é um quantitativo pequeno, mas é importante destacar que a água de outros usos, usos múltiplos ou mesmo de abastecimento doméstico podem compor para aumentar esse quantitativo.

Figura 14. Distribuição dos usos da água em Itacoatiara



Fonte: Adaptado de SIAGAS (2024).

3.4 MÉTODO GOD APLICADO EM ITACOATIARA

A problemática da vulnerabilidade hídrica subterrânea envolve diferentes aspectos, pois trata-se de um recurso natural cuja susceptibilidade à contaminação é de difícil identificação direta. Esse cenário torna-se ainda mais complexo devido a fatores como as características geológicas, o uso e ocupação do solo e as atividades antrópicas

desenvolvidas na região, uma vez que cada um desses elementos exerce influência significativa sobre os aquíferos, também há questões como alterações nas características físicas e químicas da água subterrânea que podem representar um dano expressivo ao meio ambiente e a saúde pública (Foster & Hirata, 1998; Aller *et al.*, 1987).

O município de Itacoatiara está situado sobre uma das maiores reservas hídricas subterrâneas do planeta, o Sistema Aquífero Grande Amazônia (SAGA) (Lages *et al.*, 2023). O abastecimento público de água é realizado principalmente por meio de captações subterrâneas operadas pelo Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), que atende uma parcela grande parte da população local. Essa dependência dos mananciais subterrâneos, reforça a necessidade de avaliar os riscos de contaminação, pois também é necessário considerar a crescente expansão urbana e uso agrícola do município, cujas atividades podem comprometer a qualidade dos mananciais subterrâneos (Mendes *et al.*, 2021).

Neste contexto, este trabalho buscou aplicar uma metodologia que visa identificar espacialmente os locais mais susceptíveis à contaminação subterrânea por atividades antrópicas que são ou podem ser exercidas no município. A primeira etapa da análise consistiu na elaboração de uma tabela com dados brutos extraídos do Sistema de informações de águas subterrâneas (SIAGAS).

Posteriormente foram realizados os tratamentos para adequar os dados encontrados a cada um dos índices é tudo GOD. Este método atribui índices de vulnerabilidade com base em parâmetros hidrogeológicos, como a ocorrência de aquíferos, a cobertura de proteção e a profundidade do nível estático. Dessa forma, foi possível estabelecer o índice da vulnerabilidade hídrica subterrânea para o município de Itacoatiara, fornecendo subsídios para a compreensão da relação entre as características naturais do Aquífero e expressões decorrentes do uso do solo.

Tabela 2. Amostra dos dados hidrogeológicos e índice GOD dos poços cadastrados no SIAGAS.

Códigos	Lat_ut m	Long_ut m	Nível_ estático	Profundida de	Parametro- 1_G	Parametro _2_O	Parametro _2_D	Índice_ GOD	Classificação _GOD
1300000406	339615	9652605	7	32,5	0,6	0,7	0,8	0,33	Moderada
1300000408	339397	9654110	3.3	20	1	0,7	0,9	0,63	Ata
1300000411	340108	9653343	12	161	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000412	340108	9653312	12	162	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000414	339678	9652329	5.5	118	0,6	0,8	0,8	0,38	Moderada

1300000415	340789	9652423	13	126	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000416	348878	9652433	12	159	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000417	340694	9653958	14	158	0,6	0,8	0,8	0,38	Moderada
1300000418	340078	9653251	21	170	0,6	0,7	0,7	0,29	Baixa
1300000685	339461	9652267	12	45	0,6	0,8	0,8	0,38	Moderada
1300000687	340234	9651654	1,3	60	1	0,5	1	0,50	Moderada
1300000689	340664	9653559	10	12	0,6	0,7	0,8	0,33	Moderada
1300000692	255094	9701958	4,5	83	1	0,8	0,9	0,72	Extrema

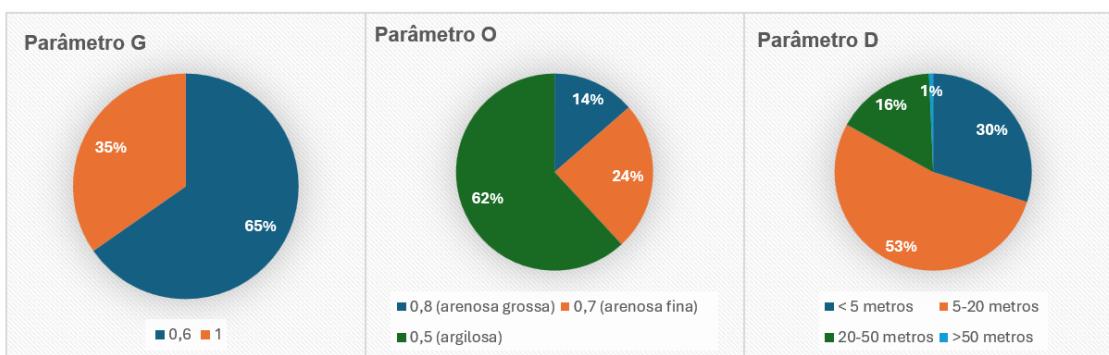
Nota: Tabela parcial, contendo apenas parte dos 147 poços avaliados. A tabela completa encontra-se no Anexo A.

Fonte: Adaptada de SIAGAS (2024).

A tabela 2 apresenta parte do conjunto de dados utilizados na aplicação do método GOD, nela contém informações referentes aos parâmetros hidrogeológicos dos poços cadastrados no SIAGAS. Ao todo foram analisados 147 poços presentes no município de Itacoatiara, com diferentes usos da água, profundidade e níveis estáticos. Esses dados subsidiarão a distribuição de peso se índices de vulnerabilidade de acordo com os critérios metodológicos.

A análise dos parâmetros do método GOD evidencia a heterogeneidade das condições hidrogeológicas nos poços avaliados (Figura 15). O parâmetro G, se refere ao grau de confinamento, demonstrou predominância do índice 0,6 associado à aquíferos livres com nível estático superior a 5 m em relação à superfície. Entretanto, em 35% dos poços observou-se índice 1, caracterizando aquíferos rasos e, portanto, com maior suscetibilidade à contaminação. Esse resultado demonstra que, embora a maior parcela da área apresente boas condições de proteção, existe uma porção a ser considerada classificada em situação de maior fragilidade.

Figura 7. Distribuição percentual dos índices atribuídos aos parâmetros G, O e D pelo método GOD na área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2025).

No caso do parâmetro O (Figura 15), que considera a litologia da zona não saturada, verificou-se predominância de solos argilosos, com índice 0,5 representando uma condição mais favorável à atenuação de contaminantes devido à baixa permeabilidade. Em contrapartida, 38% dos poços apresentaram cobertura arenosa, com índices de 0,7 (24%) e 0,8 (14%), refletindo maior vulnerabilidade em razão da elevada permeabilidade e da baixa capacidade de retenção de poluentes. Dessa forma, a litologia mostra-se um fator chave de proteção natural em grande parte da área, embora ainda haja extensões consideráveis com menor capacidade de filtragem.

O parâmetro D (Figura 15), relacionado à profundidade do nível freático, apresentou maior variabilidade. A parcela significativa dos poços (53%) foi classificada com profundidade entre 5 e 20 m (índice 0,8), seguida por 30% com profundidade inferior a 5 m (índice 0,9), indicando vulnerabilidade alta a muito alta nessas áreas. Apenas 16% dos poços apresentaram profundidade intermediária entre 20 e 50 m (índice 0,7) e uma fração mínima (1%) ultrapassou 50 m (índice 0,6), o que representaria menor risco de contaminação. Esses resultados reforçam que a maior parte do aquífero estudado possui lençol freático relativamente raso, o que o torna particularmente sensível a fontes potenciais de poluição.

A análise em conjunto dos parâmetros GOD demonstra que a vulnerabilidade natural da área é condicionada principalmente pela profundidade reduzida do nível estático e pela ocorrência significativa de solos arenosos em determinadas localidades. Embora a predominância de solos argilosos exerça papel protetor, a combinação de aquíferos livres, profundidades rasas e coberturas arenosas em parte dos poços resulta em condições de vulnerabilidade intrínseca moderada a alta, corroborando estudos recentes que aplicaram o método GOD em áreas tropicais com características semelhantes (Silva et al., 2021; Salgado et al., 2022; Pérez-Alarcón et al., 2023).

Visando minimizar potenciais distorções na interpolação espacial dos índices GOD, foi necessário realizar um recorte da área de estudo (Figura 16). A etapa inicial da pesquisa considerou toda a extensão territorial do município, mas a distribuição espacial dos pontos amostrais apresentou baixa densidade na região que possui áreas de várzea e rios que cortam essa área, excluído comunidades e populações que vivem naquela região, mas que seus poços não estão cadastrados.

Outro viés da pesquisa foi o interpolador a ser utilizado, inicialmente foi adotado a krigagem ordinária, mas esse método geoestatístico poderia gerar superestimativas e

padrões artificiais, especialmente em áreas com poucos dados, como Itacoatiara, pois esse método depende fortemente da estrutura de dependência espacial e da robustez do variograma (Isaaaks; Srivasta, 1989).

Diante dessa limitação, optou-se por restringir a área analisada às regiões com maior concentração de pontos medidos. Essa decisão aumentou a representatividade estatística da interpolação e reduziu a probabilidade de extrapolações indevidas. Além disso, adotou-se o método Inverse Distance Weighting (IDW) para gerar a superfície contínua dos índices GOD. O IDW, por ser um método determinístico e não exigir a modelagem de um variograma, apresenta comportamento mais adequado em simulações com número reduzidos de amostras ou distribuição irregular, preservando a influência local dos pontos e evitando a criação de padrões suavizados (Li; Heap, 2014).

Esses três parâmetros que compõem o método GOD, permitem estimar o grau de vulnerabilidade natural dos aquíferos. É um método amplamente aplicado em diferentes contextos hidrogeológicos no Brasil e no exterior (Silva et al., 2021). A Figura 16 apresenta a distribuição espacial desses parâmetros para o município de Itacoatiara, evidenciando que áreas de maior vulnerabilidade se concentram predominantemente na porção norte. Essa região caracteriza-se pela menor profundidade do nível estático e pela presença mais intensa de atividades antrópicas associadas à expansão urbana e agrícola.

Os valores interpolados variaram entre 0,192 indicando menor vulnerabilidade e 0,720, que corresponde à maior vulnerabilidade e possui tons mais avermelhados. Na sede o município, a quantidade de pontos amostrais permitiu identificar que essa área enfrenta uma dualidade de pontos com baixa vulnerabilidade e pontos com extrema vulnerabilidade, aumentando o risco de contaminação quando associados as atividades antrópicas, incluindo falhas em sistemas de saneamento, fossas sépticas e rudimentares e lixões.

A Vila de Lindóia situa-se em uma zona que apresenta valores intermediários variando entre 0,35 e 0,36 representados por tons esverdeados e amarelados. Essa região caracteriza-se por vulnerabilidade moderada, sugerindo uma diminuição da espessura da zona não saturada e um nível estático relativamente menos profundo. A presença de áreas agrícolas e expansão rural contribui para aumentar pressões antrópicas, reforçando a necessidade de monitoramento do uso e ocupação do solo.

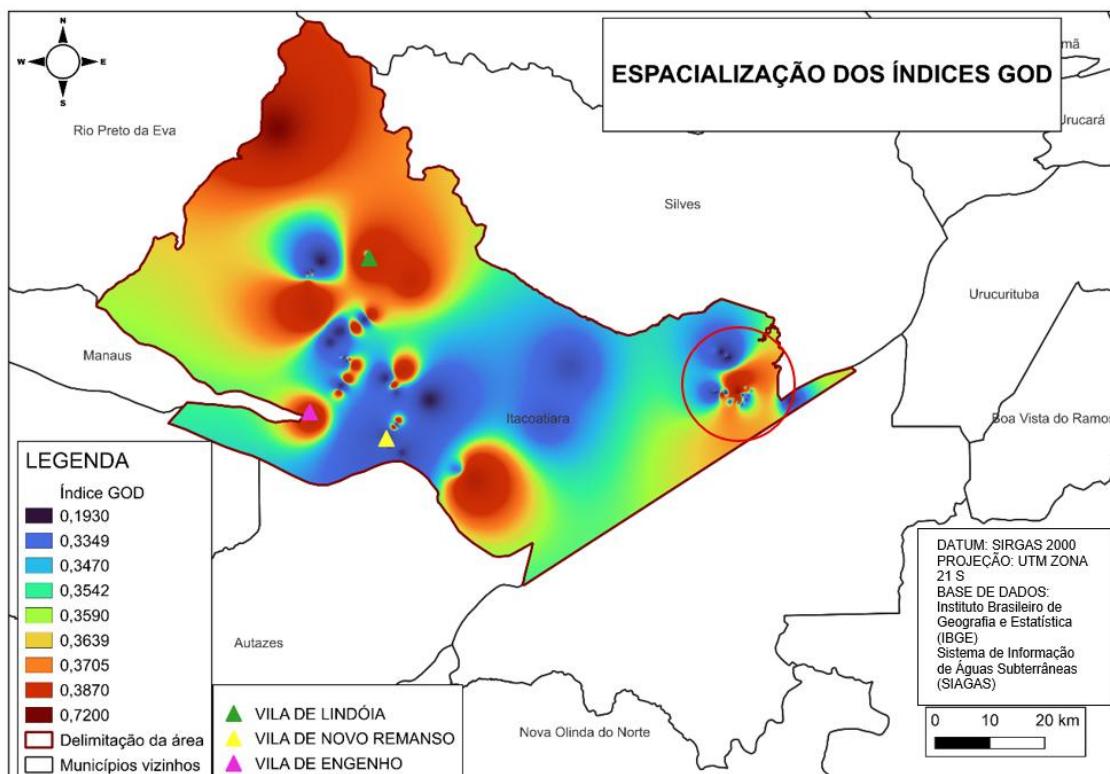
A Vila de Novo Remanso está inserida em uma área com tonalidades alaranjadas, com índices entre 0,36 e 0,38, indicando vulnerabilidade de moderada a moderadamente alta. Além das características hidrogeológicas locais, essa vila apresenta maior influência

de atividades agropecuárias e ocupações dispersas, que podem favorecer processos de infiltração de contaminantes, especialmente em áreas com solos mais permeáveis, conforme discutido por Foster et al. (2002) em estudos sobre avaliação de risco em aquíferos.

A Vila do Engenho, localizada ao sul, encontra-se próxima a uma das maiores manchas de vulnerabilidade representadas na interpolação, atingindo valores próximos ao limite superior do intervalo analisado de 0,38 a 0,72. Isso indica a maior vulnerabilidade natural entre as localidades estudadas, provavelmente relacionada à presença de níveis freáticos rasos, solos com maior permeabilidade e menor espessura das camadas protetoras do aquífero. Nessas áreas, o risco potencial associado à presença de fossas sépticas e práticas agrícolas é significativamente maior, corroborando o que é apontado em estudos recentes de vulnerabilidade hídrica (Silva et al., 2021).

A análise confirma a importância de relacionar as condições hidrogeológicas locais com as atividades de uso e ocupação do solo pois a vulnerabilidade não depende apenas das características do aquífero, mas também das pressões antrópicas, como fossas, postos de combustíveis e lixões que incidem sobre ele (Mendes et al., 2021).

Figura 8. Distribuição espacial do índice GOD



Fonte: Autoria própria (2025).

Os poços classificados como de alta vulnerabilidade tendem a estar associados a condições hidrológicas que favoreçam um fluxo vertical de contaminação, como níveis estáticos mais rasos, profundidades reduzidas ou mesmo ausência de barreiras litológicas. Esses fatores facilitam o contato entre a superfície e a zona saturada, aumentando a suscetibilidade a infiltração de poluentes principalmente em áreas urbanas e de maior pressão antrópica. Estudos recentes realizados nos aquíferos amazônicos reforçam que a expansão urbana desordenada e o saneamento básico precário ampliam o risco de degradação da qualidade da água subterrânea (Souza *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2023).

Os poços com baixa vulnerabilidade estão geralmente associados a maiores profundidades do nível estático alinhado a camadas geológicas mais espessas o que confere maior proteção natural ao aquífero. Essa situação é corroborada pelo estudo de Cunha et al., (2021) que observou em suas análises no nordeste brasileiro que a litologia e a profundidade são fatores determinantes para a redução do risco de contaminação.

Por sua vez a predominância da classe moderada sugere que o Aquífero em Itacoatiara possui uma condição de equilíbrio, mas é com ponto de vulneráveis a preções externas sobretudo relacionadas ao uso e ocupação do solo. Com isso é importante destacar que áreas próximas a atividades como postos de combustíveis, lixões e PSI culturas apresentam um risco potencial podendo elevar o índice de vulnerabilidade caso não tenha o controle e o monitoramento adequado.

Dessa forma os resultados obtidos confirmam a relevância do uso do método GOD como ferramenta de apoio à gestão hídrica principalmente em municípios com poucas informações, depois permite identificar áreas prioritárias para o monitoramento da qualidade da água subterrânea. Além disso esse estudo reforça a necessidade de integração entre planejamento urbano, gestão de resíduos e políticas de saneamento básico a fim de reduzir as expressões antrópicas sobre os aquíferos e garantir não apenas para a geração atual como prédios futuras gerações água em quantidade e qualidade adequada para o consumo da população.

3.5 MÉTODO P.O.S.H.

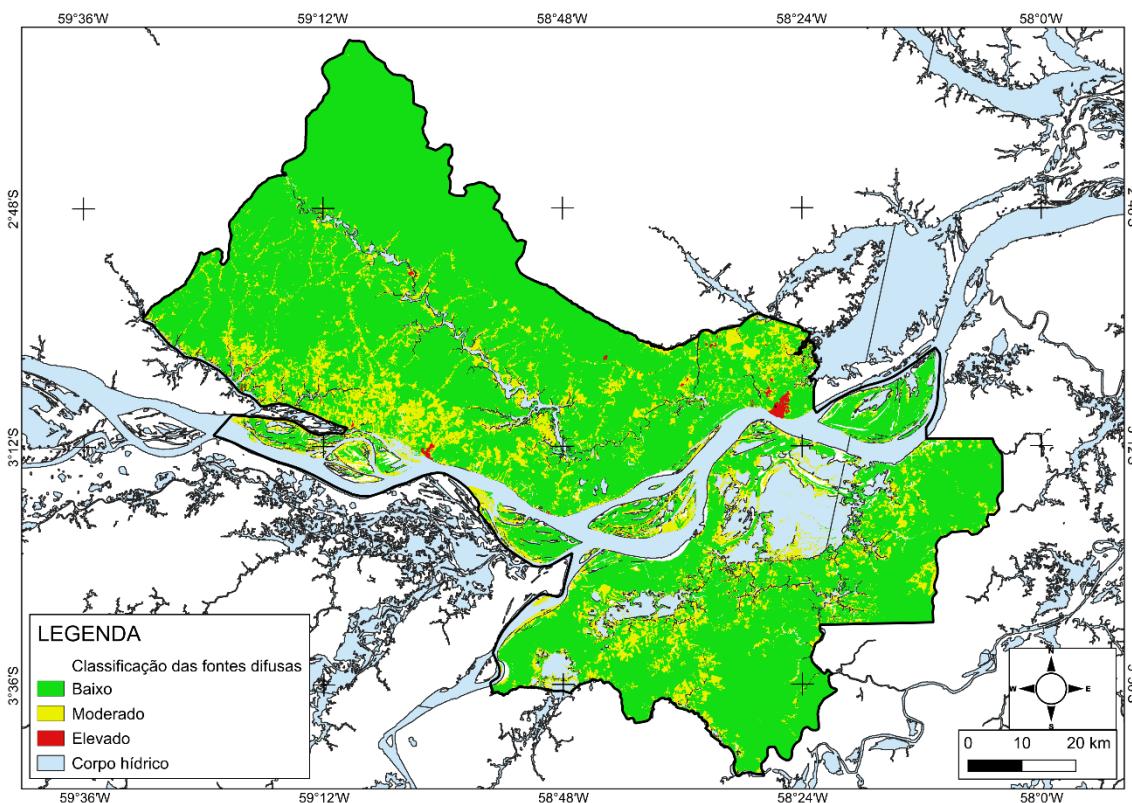
3.5.1 Fontes difusas de contaminação

O método POSH avalia de forma complementar o método GOD, pois o POSH tem o interesse maior nas atividades antrópicas que são realizadas sobre os aquíferos, essas atividades são classificadas em dois tipos de fontes de contaminação sendo as fontes pontuais e difusas em associação com sua capacidade de transporte hidráulico. Sua aplicação possibilita identificar áreas de risco elevado em ambientes onde os atributos estruturais do aquífero são apenas parte do problema dando maior ênfase aos aspectos antropogênicos (Silva *et al.*, 2021; Carvalho & Hirata, 2022).

As fontes difusas são entendidas como aqueles que realizaram algum tipo de modificação em grande escala no ambiente. Nesse aspecto atividades como a agricultura, principalmente aqueles que não realizam o manejo adequado do solo e a urbanização de áreas sem infraestrutura, com falta de saneamento básico são as que apresentam as taxas mais significativas de classificação de fontes difusas pois elas representam um risco de contaminação aos aquíferos.

Para a análise das fontes difusas foram utilizadas informações do MAPBIOMAS, em que classificaram as fontes difusas em baixo, moderada e elevada susceptibilidade a contaminação. As fontes difusas considerada baixo foram bem representativas no mapa (Figura 17), indicando que o município possui grandes áreas com pouca ou nenhuma atividade que venha ser contaminante para os aquíferos. Entretanto, as fontes moderadas possuem uma acentuada presença em virtude atividades principalmente da agricultura, pois Itacoatiara possui um forte incentivo na produção de culturas como abacaxi e mandioca (Teixeira, 2025). A classe considerada elevada possui alguns pontos específicos no mapa que estão associados principalmente as áreas artificiais que possuem um maior adensamento populacional, essa situação se torna mais preocupante ao associar as condições deficientes de infraestrutura e saneamento básico.

Figura 9. Mapa da distribuição de fontes difusas no território de Itacoatiara



Fonte: Autoria própria (2025).

Uma das características da urbanização região amazônica foi que os centros urbanos crescerem próximos aos corpos hídricos devido a facilidade na obtenção de água e logística de transporte, em Itacoatiara o cenário se repete, no mapa acima temos algumas fontes de contaminação em áreas mais planas ou até baixas do município que alagam nos períodos de cheia, a atividade mais preocupante são os lixões localizados nas Vilas de Lindoia, Engenho e Novo Remanso e na principal área urbana do município em que se concentram a maior parte das atividades. Algumas das principais fontes difusas encontradas no município destaca-se:

Saneamento

São vários os problemas de saneamento encontrados no município de Itacoatiara. De acordo com o estudo de Hinnah (2020), o município enfrenta sérias falhas de saneamento básico como ausência de coleta e tratamento de efluentes, destinação final ambientalmente adequada dos resíduos, inexistência de rede de drenagem urbana e falhas no sistema de abastecimento de água. Esse conjunto de problemáticas provocam pressões

ao ambiente, e a falta de gerenciamento dessas atividades pode levar a contaminação do solo e dos corpos hídricos.

Os efluentes líquidos são definidos como todos aqueles despejos líquidos resultantes de atividades industriais que envolvem a água de lavagens, de refrigeração poluídas, esgoto doméstico e as águas pluviais contaminadas (NBR 9800/1987). Os efluentes industriais são compostos com altas cargas de contaminantes que se não houver tratamento adequado são lançados in natura na rede de esgoto, no solo e corpos hídricos elevando sua propagação de contaminação sobre os recursos naturais conforme explicita a Política Nacional do Meio Ambiente, sob a Lei Federal nº 6.938/1981(Brasil, 1981). Apesar das exigências e legislações são poucas as regiões que possuem coleta e tratamento adequado do esgoto como as periurbanas e rurais, adotando as fossas sépticas para o tratamento preliminar desse material (Albuquerque e Silva, 2024).

No Brasil são gerados cerca 9,1 mil toneladas de esgoto por dia, desse montante 45% não recebe tratamento adequado e 27% da população não possui coleta e tratamento, sendo lançados no meio ambiente e comprometendo a qualidade sanitária de uma área de mais de 110 mil km de extensão de mananciais (ANA, 2022).

De acordo com a ANA (2022), o percentual de efluente não tratados no Brasil é de 45%, mas Itacoatiara possui um índice acima do panorama nacional de cerca de 80,3% de efluentes que não recebem o tratamento adequado e possuem destinação incorreta sendo precursor da contaminação ambiental (IBGE, 2010).

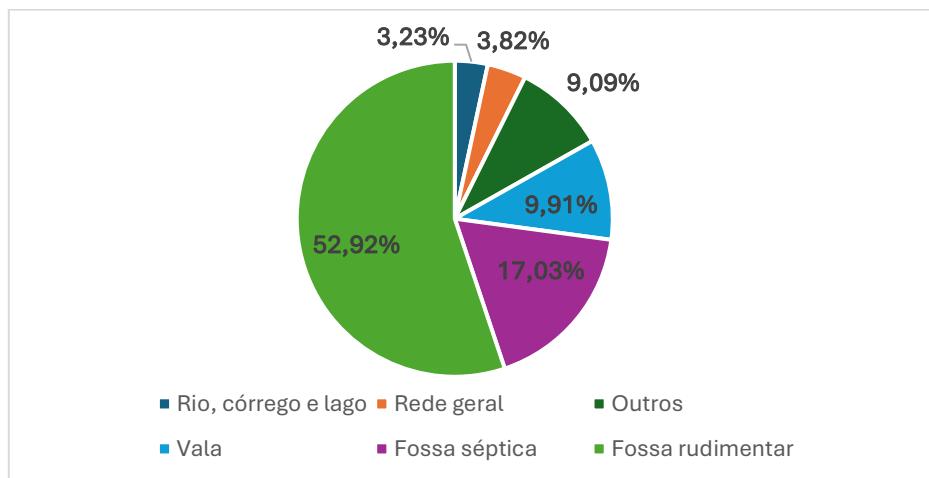
Os efluentes são fontes de contaminação aos recursos naturais e à saúde pública devido a sua carga de matéria orgânica e subprodutos que podem entrar em contato com os mananciais subterrâneos através de vazamentos na rede de esgoto e percolação de material gerado pelas fossas negras que são abundantes em locais sem saneamento básico (Brandão e Santos, 2025).

A alta carga de contaminantes e microrganismos patogénicos pode vir a comprometer a água subterrânea de Itacoatiara gerando vulnerabilidades tanto ambientais quanto de saúde pública conforme demonstra o estudo de Arraes (2020), que associa as falhas no saneamento básico do município de Itacoatiara com a incidência doenças diarreicas e parasitoses em homens e mulheres de diferentes faixas etárias. Essas relações deixam explícito que a contaminação das fontes subterrâneas não prejudica apenas o recurso hídrico como a integridade da saúde humana.

O estudo realizado por Hinnah (2020) aponta que há uma rede coletora com 4 km de extensão no município coletando o esgoto e o direcionando para Estação de

Tratamento de Esgoto (ETE), esta possui uma capacidade de 12 m³ e utiliza o sistema de tratamento biológico, esse fluxo é a realidade somente de dois bairros planejados o Poranga e Jacarezinho que foram criados a partir do projeto do governo federal “Minha Casa Minha Vida” o restante dos domicílios utilizam fossas sépticas e fossas rudimentares como é apresentado na figura abaixo.

Figura 10. Percentual da destinação do esgoto sanitário em Itacoatiara.



Fonte: Adaptado de Hinnah (2020).

Este panorama reflete nas condições de infraestrutura do município, na Figura temos registros de algumas localidades. Na Figura 19 a) e b) temos a forma como os efluentes de águas cinzas são lançados no ambiente, é possível identificar que próximo tem plantações de bananeiras sendo um protótipo de fossa ecológica na comunidade Jamanã. Nas figuras c) e e), são identificadas canalizações de lançamento de efluentes in natura em comunidades como Costa do Surubim e Nossa Senhora das Graças. As figuras d), f) g) e h) são registros de efluentes sendo lançados nas calçadas e ruas na área urbana do município.

Figura 11. Situações de lançamento direto de efluentes sem tratamento em Itacoatiara.



Fonte: Autoria própria (2025).

A destinação inadequada dos efluentes coloca em risco a segurança hídrica pois o vazamento ou a disposição direta das águas residuárias sob o solo promove a percolação da carga orgânica até o lençol freático e os poços rasos são os mais afetados, facilitando a transmissão de doenças de veiculação hídrica advinda desse contato, a população que depende exclusivamente das fontes subterrâneas para o abastecimento público são as principais afetadas com infecções bacterianas advindas de coliformes totais e fecais (Silveira *et al.*, 2023).

Na análise da qualidade de água de poços rasos os autores de Jesus e Caires (2025), encontraram discordâncias dos resultados das análises físico-químicas e microbiológicas em comparação aos padrões de potabilidade, considerando a amostra imprópria para consumo humano e ainda levantou suspeita de a fonte de contaminação serem fossas rudimentares que se encontravam nas imediações do local de coleta das amostras, pois havia presença de bactérias *Escherichia coli* que são encontradas nas fezes.

Em Itacoatiara há diferentes tipos de fossas que foram construídas por meio de obras individuais, como fossas rudimentares e sépticas distribuídas pelo município. Nas áreas com maior adensamento populacional há diferentes tipos de fossas na parte interna e externa dos domicílios conforme a Figura 20.A. Em comunidades como Jamanã também foi identificado fossas sépticas e fossas rudimentares em áreas mais isoladas,

essa situação também é semelhante à de comunidades como Nossa Senhora das Graças, local de registro da Figura 20.C.

Figura 12. Construções de fossas no município de Itacoatiara. A) Fossa séptica em área urbana; B) fossa rudimentar ou buraco em comunidades C) Fossa séptica em comunidade



Fonte: Autoria própria (2025).

A pluma de contaminação se torna mais difusa em centros urbanos devido a concentração populacional e são através de ensaios em laboratório que concentrações de indicadores como o nitrato, podem ser encontrados aliado aos estudos microbiológicos que tem a Escherichia coli como microrganismo indicador da presença de fezes (Jesus e Caires, 2025). De acordo com Monteiro *et al.*, (2019), a concentração urbana aumenta o percentual de efluentes e mesmo em locais que possuem o tratamento de esgoto há um aumento de compostos orgânicos nos corpos hídricos receptores.

O município de Itacoatiara possui um adensamento populacional significativo com mais de 100 mil habitantes e apresenta condições de saneamento básico precárias entre ela a coleta e tratamento de esgoto que não consegue atender nem a metade da população (IBGE, 2022). No panorama de grande parte da área urbana do município e das comunidades rurais o esgoto não recebe o tratamento adequado, consequentemente vai ser disposto *in natura* no ambiente, contaminando os lençóis freáticos e comprometendo a qualidade da água (Lima *et al.*, 2022).

As doenças advindas de contaminantes que estão associados a falta de saneamento básico são reflexo das falhas de políticas públicas que deveriam mitigar esses problemas, em decorrência a esse cenário, a população que vive em áreas de risco está sujeita a eventos como enchentes, deslizamento e surto de doenças pois o ambiente é propício aumentando a vulnerabilidade dessa população em relação a outras localidades sem o

fator de risco (Maior e Cândido, 2014). Na área de estudo existe um grupo de pessoas vivendo em uma área denominada Aningal (Figura 21) que está mais vulnerável que o restante da região.

Figura 13. Delimitação da área de várzea denominada aningal.



Fonte: Autoria própria (2025).

O Aningal uma área de várzea da planta nativa aninga, está localizado no bairro do Jauary I e ocupa uma área de km, o local é rodeado por habitações de uma população de baixa renda que não possui acesso ao saneamento apresentando esgoto a céu aberto e sem o suporte do governo do município, pois esta área foi condenada pela defesa civil e os moradores intimados a desmanchar as casas pois receberam novas moradias em outra localidade através programas sociais, mas a falta de intervenção na área fez a população retornar ou ser ocupada por novos moradores pois a área é próxima ao centro e ao porto da cidade (Schwade, 2014).

No âmbito da drenagem urbana, observa-se que o município de Itacoatiara carece de obras estruturais adequadas de escoamento das águas pluviais. Esse déficit é agravado pelas características geomorfológicas locais, uma vez que grande parte das ruas apresenta topografia plana, com pouca ou nenhuma declividade, dificultando o escoamento superficial. Como resultado, a água tende a se acumular nas vias, formando pontos de alagamento recorrentes. Essa situação é ainda mais evidente na região central da cidade,

onde, após eventos de chuvas intensas, são comuns os episódios de acúmulo de água e inundações urbanas, como ilustrado na Figura 22.

Figura 14. A1 e B1 representam o alagamento em via pública de Itacoatiara após evento de chuva intensa.



Fonte: Autoria própria (2025).

A deficiência no sistema de drenagem urbana impacta diretamente a mobilidade, a qualidade de vida da população e pode contribuir para a degradação do pavimento e proliferação de doenças relacionadas à água estagnada. Assim, torna-se necessária a implementação de medidas de planejamento e infraestrutura de drenagem que considerem tanto soluções convencionais (galerias, bocas de lobo, sarjetas) quanto alternativas sustentáveis, como técnicas de drenagem urbana sustentável, capazes de mitigar os impactos das precipitações intensas (Tucci, 2008; Canholi, 2014; ANA, 2020).

Agricultura

A agricultura representa uma parcela significativa do PIB nacional se consolidando como um dos pilares da economia, o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de produtos como soja, cana-de-açúcar e milho que somam um total de mais de 500 mil de toneladas produzidas (IBGE, 2023).

Em Itacoatiara são produzidas culturas de ciclo curto como a macaxeira (*Manihot esculenta*), mandioca (*Manihot esculenta*), cará (*Dioscorea alata*), hortaliças como, a couve (*Brassica oleraceae*), alface (*Lactuca sativa*), coentro (*Coriandrum sativum*), cebolinha (*Allium fistulosum*). Culturas de ciclo médio banana (Musa sp.) da variedade

BR Conquista e nanicão, abacaxi (*Ananas comosus*). Além de culturas de ciclo longo como pupunha (*Bactris gasipaes*), laranja (*Citrus* sp.), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), cacau (*Theobroma cacao*), tucumã (*Astrocaryum aculeatum*). Bem como produtos extrativistas como o tucumã, a castanha (*Bertholletia excelsa*), o açaí (*Euterpe oleracea*), andiroba (*Carapa guianensis*) e bacaba (*Oenocarpus bacaba*).

Esta é uma das atividades que mais consomem água doce no mundo, seus impactos sobre os recursos hídricos subterrâneos ocorrem de forma quantitativa quando não há gestão adequada desses recursos e sua extração excessiva pode ocasionar rebaixamento dos lençóis freáticos (Moura, 2004), gerando dificuldades de acesso a esse recurso por pequenos agricultores que geralmente possuem poços rasos. Outro viés são os impactos de ordem qualitativa ocasionados pelo uso indiscriminado de defensores agrícolas e fertilizantes que possuem substâncias como nitratos e pesticidas que diante das condições do solo podem percolar até as fontes subterrâneas e comprometer a qualidade da água de abastecimento dessa localidade (Ribeiro *et al.* 2024).

O risco associado aos recursos hídricos subterrâneos inicia através do uso do solo, as atividades de ocupação humana para moradia, indústria e agricultura devem ser planejadas, pois existem áreas naturalmente frágeis que diante das menores perturbações ambientais podem sofrer alterações significativas, com isso a artificialização da paisagem faz com que o solo deixe de exercer sua função aumentando o escoamento da água da chuva, comprometendo a filtração e recarga das fontes subterrâneas (Ceconi *et al.* 2018).

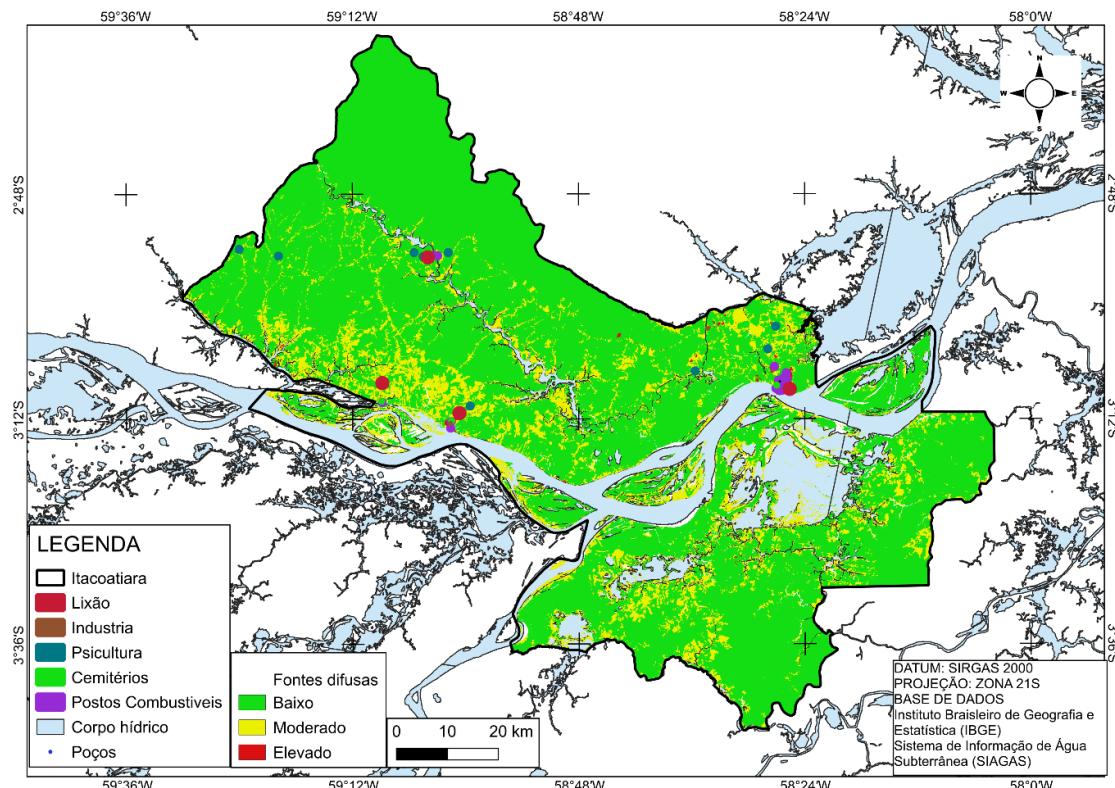
3.5.2 Fontes pontuais de contaminação

As fontes pontuais de poluição correspondem a locais específicos e identificáveis onde os efluentes líquidos ou resíduos sólidos são gerados e lançados diretamente no ambiente, geralmente sem tratamento adequado. Esses pontos podem incluir fossas rudimentares, ligações clandestinas de esgoto, descargas em cursos d'água, postos de combustíveis, lixões, cemitérios e sistemas de drenagem urbana contaminados. Devido ao caráter localizado, essas fontes tornam-se áreas críticas de risco de contaminação dos solos e aquíferos subterrâneos, podendo comprometer a qualidade da água destinada ao abastecimento humano (Hirata; Fernandes, 2018).

A identificação e o monitoramento dessas fontes são fundamentais para a avaliação da vulnerabilidade hídrica subterrânea, visto que permitem relacionar pressões antrópicas específicas ao risco de poluição difusa em escala municipal. Nesse contexto,

o mapeamento de atividades potencialmente poluidoras e sua sobreposição a áreas de recarga dos aquíferos constitui uma ferramenta essencial para o planejamento e a gestão ambiental (Tucci, 2008; ANA, 2020). Na Figura 23 é possível observar que estas áreas estão também associadas a fontes pontuais como lixões, postos de combustíveis, cemitérios e indústrias tornando essa área vulnerável.

Figura 15. Mapa da distribuição de fontes pontuais e difusas no território de Itacoatiara



Fonte: Autoria própria (2025).

Dentre as atividades que foram consideradas como fontes pontuais de contaminação para o método POSH foram classificadas as cinco que mais apresentam algum tipo de influência negativa sobre as águas subterrâneas e que possuem quantidades significativas dentro do município de Itacoatiara, estas atividades são:

Resíduos sólidos

O aumento da população e o acesso facilitado à compra de bens e serviços corrobora o consumismo, fortalecendo um dos grandes desafios para o século XXI, os resíduos sólidos. A sociedade caminha em direção a economia circular que propõem a

mudança no comportamento, valores e educação do consumidor nas indústrias ele requer menos matéria prima e melhor aproveitamento energético (Martins e Almeida, 2022).

Esse sistema de geração e descarte cíclico, que consiste no reaproveitamento do resíduo após o descarte, retornando à cadeia produtiva como matéria-prima e continuando o processo de fabricação, diminuído a necessidade de exploração dos recursos naturais, e, consequentemente reduzindo as parcelas de resíduos sólidos que iriam para aterros sanitários e lixões (Santos *et al.*, 2025).

Os resíduos sólidos são temas de discussão a muitos anos, pois são uma problemática aparente que percorre toda a sociedade. Para auxiliar em sua gestão foi criada a Política Nacional dos Resíduos sólidos – PNRS, ela define os resíduos sólidos como:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (Brasil, 2010).

Durante a análise desses resíduos é necessário verificar suas características, nesse contexto a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT instituiu a NBR 10004 (2004), ela classifica os resíduos em classe I como aquele material perigoso que não deve se misturar aos de classe II não-perigosos, também é importante verificar quais são inertes ou não inertes, pois esses padrões auxiliam na sua gestão. É através dessa classificação que estes resíduos podem ser considerados para reutilização, reciclagem e após esgotada todas as formas de aproveitamento ir para o aterro sanitário.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), o acondicionamento adequado dos resíduos deve ser realizado de modo a permitir a coleta e transporte sem causar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Contudo, a realidade de muitos municípios da região amazônica como Itacoatiara, demonstra a dificuldade de implantação efetiva da gestão integrada de resíduos sólidos, por questões como ausência de infraestrutura adequada e pela insuficiência de campanhas de educação ambiental voltadas à população (Silva; Nascimento, 2020).

A Figura 24 apresenta as diferentes formas de acondicionamento dos resíduos sólidos urbanos observados no município de Itacoatiara. Nota-se que o acondicionamento inadequado é uma prática recorrente em diversos pontos da cidade, seja pelo acúmulo de

sacos e entulhos nas calçadas e vias públicas, seja pelo descarte em terrenos baldios e áreas verdes (lixearias viciadas). Em alguns casos, mesmo quando há lixeiras comunitárias instaladas, os resíduos não são depositados corretamente, resultando em acúmulo de lixo no entorno, o que agrava problemas sanitários e ambientais.

Figura 16. Formas de acondicionamento de resíduos em Itacoatiara.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os principais locais utilizados para a destinação dos resíduos sólidos no Brasil são os aterros sanitários e lixões. Segundo a Abrema (2024), os aterros sanitários foram projetados com intuito de receber apenas rejeitos, entretanto assim como os lixões a maioria acabam recebendo todo tipo de resíduo, diminuindo a vida útil desse sistema, o estudo ainda aponta a que a 41% dos resíduos são dispostos de maneira inadequada no ambiente, principalmente em lixões acarretando na contaminação do ar, do solo e das águas subterrâneas.

O chorume, substância gerada pela decomposição da massa de resíduos, possui altas concentrações de metais pesados, compostos orgânicos e amônia (Viotti e Gavasci, 2015). O lixiviado entra em contato com os recursos hídricos subterrâneos principalmente pela ação da chuva e pela infiltração através das camadas do solo (Leite, 2021).

A disposição final de resíduos é uma grande questão no Amazonas, pois cerca de 91,9% dos seus municípios utilizam lixões para o descarte de resíduos (IBGE, 2023). Por sua vez, a região detém o maior volume hídrico subterrâneo do Brasil e um dos maiores do mundo e garantir a segurança hídrica subterrânea dessa região é de extrema

importância, pois muitos habitantes principalmente ribeirinhos não têm acesso a água de qualidade e atividades antrópicas são as principais responsáveis (Mendonça *et al.* 2023). Em Itacoatiara uma dessas atividades de grande impacto ambiental são os lixões (Figura 25).

Figura 17. Vazadouros do município de Itacoatiara. a) e b) Lixão da área urbana de Itacoatiara; c) e d) Lixão de Novo Remanso; e) Lixão de Lindóia e f) Lixão de Engenho.



Fonte: Autoria própria (2025).

De acordo com Guimarães *et al.* (2023), a falta de cercamento e guarita torna os lixões locais de fácil acesso em que qualquer tipo de resíduo é depositado, o autor reforça a necessidade de pontos de monitoramentos da qualidade da água em locais estratégicos do vazadouro para acompanhar possíveis níveis de contaminação.

No município de Itacoatiara os resíduos são destinados nesses vazadouros municipais com uma cobertura nas áreas urbanas e nas vilas são depositados no lixão sem qualquer tipo de tratamento mecânico (Guimarães *et al.* 2023). Nas comunidades rurais geralmente são depositados em terrenos baldios, fundo de quintal ou queimados (Santos, 2023). Mas nenhuma dessas formas é ambientalmente adequada, tornando os mananciais subterrâneos vulneráveis a contaminação por esses resíduos.

Figura 18. Disposição de resíduos nas comunidades rurais de Itacoatiara.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 26, temos a queima de resíduos na comunidade Vila Batista, essa queima geralmente no quintal de cada casa onde cada família realiza esse processo no seu lixo, o mesmo acontece na Figura 26.c, na comunidade Sagrado Coração de Jesus. A Figura 26.d apresenta a forma de disposição da comunidade Jamanã que fica localizada na estrada, essa condição força os comunitários a acumularem os resíduos enquanto aguardam o caminhão de lixo vir em alguns dias da semana para fazer a coleta e encaminhar para o vazadouro do município.

Indústria

A indústria desempenha papel central no desenvolvimento econômico e social, mas também constitui uma das principais fontes de poluição ambiental. A complexidade dos compostos manipulados nesses empreendimentos torna os resíduos e efluentes industriais particularmente perigosos, como se observa em Manaus, onde o Polo Industrial contribui significativamente para a contaminação de corpos hídricos urbanos, como exemplo o Igarapé do Quarenta, historicamente impactado pelo lançamento de efluentes e resíduos sólidos (Freitas et al., 2019).

O município de Itacoatiara integra a Região Metropolitana de Manaus (RMM) e apresenta vantagens logísticas estratégicas, como a rodovia AM-010, o porto fluvial e a proximidade com a capital amazonense. Essas condições favorecem a instalação de indústrias de diferentes portes, algumas já em funcionamento. Entretanto, a ausência de rede de esgoto e de estações de tratamento de efluentes industriais torna o cenário preocupante, visto que pequenas falhas podem gerar impactos de grande escala nos recursos hídricos subterrâneos.

Entre as indústrias locais, destacam-se os frigoríficos, responsáveis pelo abate de parte das cerca de 40 mil cabeças de gado produzidas anualmente no município (IBGE, 2023). Essas atividades geram grandes volumes de resíduos com altas cargas orgânicas, além de fósforo, nitrogênio e gordura, elevando os níveis de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e exigindo tratamento especializado (Pacheco, 2008; Souza e Siqueira, 2023). A ausência de informações públicas sobre o tratamento adequado desses efluentes em Itacoatiara representa um risco significativo.

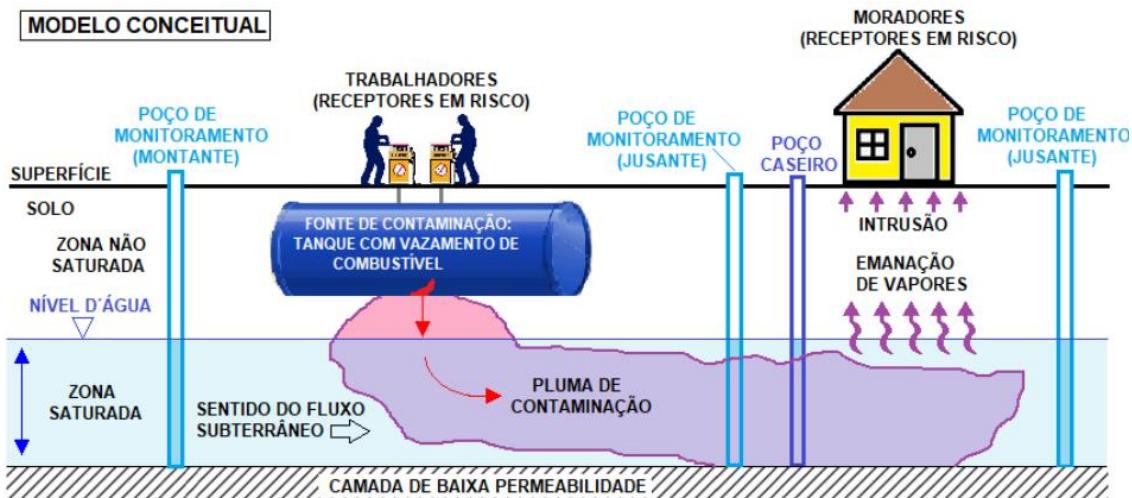
Outro setor relevante é o de laticínios e alimentos, que utiliza elevados volumes de água e gera efluentes de alta carga orgânica. Estudos demonstram que muitas dessas indústrias na região amazônica operam sem estações de tratamento de efluentes (ETE) ou, quando as possuem, apresentam funcionamento deficitário (Silva et al., 2018). Em Itacoatiara, a rede coletora é restrita e não possui porte para atender toda a população, agravando o risco de despejo inadequado.

O setor do beneficiamento da madeira também representa fontes potenciais de poluição hídrica subterrânea, pois essas atividades envolvem etapas de lavagem, corte e, em alguns casos, tratamento químico, que podem liberar resíduos sólidos e efluentes líquidos no ambiente. Esses resíduos, quando mal manejados, podem infiltrar-se no solo e alcançar os aquíferos, elevando a carga poluidora local. Além disso, a disposição inadequada de aparas e restos de madeira favorece a geração de chorume e a alteração da qualidade da água subterrânea, comprometendo tanto a disponibilidade quanto o uso seguro desse recurso (Garcia et al., 2001).

Poços de combustíveis

Os hidrocarbonetos são os principais compostos presentes no petróleo e em seus derivados, sendo altamente tóxicos e de difícil degradação, com risco elevado de contaminação das águas subterrâneas. O vazamento em tanques de armazenamento, defeitos em sistemas subterrâneos ou falhas de manutenção são as principais fontes de poluição nesses estabelecimentos (Figura 27), podendo gerar plumas de contaminação que se deslocam de acordo com o fluxo subterrâneo e impactam áreas distantes de sua origem (Cardoso et al., 2017).

Figura 19. Esquematização de derramamento de combustível



Fonte: Aquino e Aquino (2024).

No Brasil, os postos de combustíveis estão entre as atividades que mais contribuem para a contaminação do solo e da água subterrânea. De acordo com a CETESB (2014), cerca de 74% das áreas contaminadas no estado de São Paulo estão relacionadas a esse setor, superando indústrias e áreas de disposição de resíduos. Em nível nacional, acidentes com derivados de petróleo também são recorrentes, mesmo com a adoção de normas técnicas de prevenção, como a Resolução CONAMA nº 273/2000 e as normas da ABNT voltadas ao setor (ABNT NBR 15594, NBR 15428, entre outras).

No município de Itacoatiara, os postos de combustíveis se distribuem tanto na zona urbana quanto ao longo da rodovia AM-010 e em vilas próximas. Apesar de sua presença marcante no território, não existem relatórios públicos ou acessíveis que demonstrem um sistema de monitoramento e fiscalização das instalações, o que aumenta a preocupação em relação ao risco ambiental. Em regiões amazônicas com aquíferos rasos e solos arenosos, como ocorre em parte de Itacoatiara, a vulnerabilidade natural do aquífero torna ainda mais crítica a possibilidade de contaminação (Oliveira; Loureiro, 1998).

Os postos de combustíveis são considerados atividades de alto impacto ambiental, por possuírem sistemas de tanques de armazenamento e realizarem atividades de troca de óleo, esses compostos ao entrarem em contato com o solo e as águas subterrâneas geram altos níveis de contaminação, visando mitigar esse impacto a área de remediação de áreas contaminadas vem se destacando em pesquisas e tecnologias (Lopes e Souza, 2021). Em

Itacoatiara há presença de alguns poços de combustíveis, não apenas em sua área urbana como na estrada AM-010 e nas vilas.

No município a atividade de postos de combustíveis é bem disseminada, e não se tem informações de monitoramento e inspeções de segurança e qualidade em relatórios públicos ou artigos municipais. No estudo de Bezerra *et al.* (2023), foi identificado que mesmo em áreas com menor densidade populacional havia risco de contaminação associado aos postos de combustíveis representavam existentes na área. Em Sobral 95% dos postos são localizados em áreas com grande adensamento populacional a menos de 1 km e apresentavam corpos hídricos nas redondezas, esses estabelecimentos manuseiam substâncias como BTEX, metais pesados, fenóis, compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos e a maioria encontrava-se com a licença vencida e apresentava riscos de contaminação (Gomes *et al.* 2021).

Fale deeses postos de itacoatiara

Figura 20. Postos de combustíveis em diferentes pontos do município.



Fonte: Autoria própria (2025).

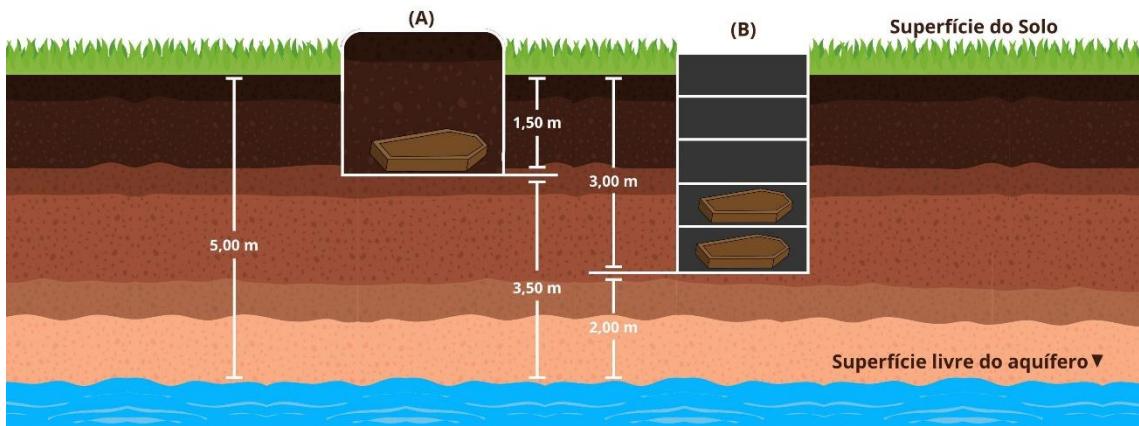
Estudos em municípios amazônicos semelhantes reforçam essa preocupação. Moraes e Oliva (2019), ao analisarem postos de combustíveis no Pará, identificaram que a idade dos empreendimentos (10 a 23 anos) estava associada a maior risco de vazamento e indícios de contaminação de águas subterrâneas. Bezerra et al. (2023) também destacam que mesmo áreas de baixa densidade populacional pode apresentar risco elevado devido à presença de postos de combustíveis em regiões sem fiscalização adequada.

Cemitérios

O sepultamento de cadáveres é uma prática proveniente da idade média que representa uma forma dos familiares se despedirem de uma maneira solene dos entes que faleceram, mantendo uma ligação através do enterro dos cadáveres em determinado local. Mas essa prática passou por diferentes fases durante períodos de epidemias de doenças contagiosas, pois não havia local específico para essa prática então quintais de casa, praias e vários locais impróprios eram utilizados, visando mitigar os índices de contaminações foram criados os cemitérios que depois de centenas de anos ainda representam um perigo ao meio ambiente e à saúde pública (Kemerich et al. 2014).

No Brasil os sepultamentos (Figura 29) podem ocorrer por inumação no solo, que consiste em colocar o caixão diretamente no solo com uma determinada cobertura de terra para mitigar odores de gases funerários e o sepultamento por tumulação, que consiste na disposição dos caixões em túmulos pré-fabricados em alvenaria ou concreto para vedar seu interior, mas ambas as práticas oferecem riscos de contaminação se não houver estudo prévio geológico e a fiscalização ambiental das condições do cemitério (Pacheco, 2000).

Figura 21. Esquematização de sepultamentos no solo. a) por inumação; b) por tumulação.



Fonte: Adaptado de Pacheco (2000).

A contaminação pode ocorrer de forma direta através da percolação dos contaminantes cadavéricos até as águas subterrâneas e pelo processo de infiltração da água da chuva nas covas, ocasionando a inundação desse espaço e carregando o contaminante diretamente para os lençóis freáticos, dependendo da vazão da água a pluma de contaminação pode percorrer longos trajetos subterrâneos (Penido, 2022). Os

contaminantes são mais perigosos em períodos de decomposição ativa como o coliquativo, que possui a duração de dois a oito anos, e consiste na ação dos microrganismos putrefativos sob as partes moles dos cadáveres gerando um líquido cadavérico (Pacheco, 2000).

Os cemitérios representam um risco na alteração da qualidade das águas, visto que a decomposição de cadáveres gera uma elevada carga poluidora de materiais orgânicos, inorgânicos, este líquido é denominado necrochorume sendo composto por 60% de água, 30% sais minerais e 10% de substâncias orgânicas como a Putrescina e Cadaverina além de vírus e bactérias (Pacheco, 2000). Todos esses compostos são absorvidos pelo solo e podem chegar aos mananciais subterrâneos, ocasionados pela má conservação dos túmulos e a falta de estudo prévio para instalação dos cemitérios, que na concepção das cidades acaba se tornando um monumento no centro da região, e sua pluma de contaminação se torna ainda mais perigosa (Kemerich et al. 2012;2014).

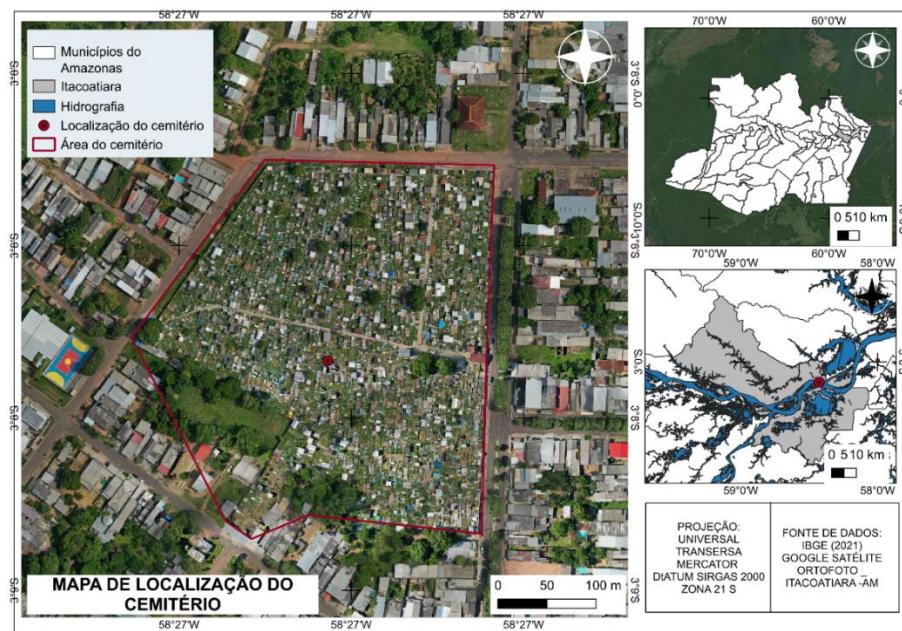
Diante da relevância o Conselho Nacional de Meio Ambiente publicou a Resolução nº 335 de 3 de abril de 2003, que dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios, definindo principais termos, além de recomendações para procedimentos técnicos e de licenciamentos das instalações das necrópoles, esta resolução também proibi a construção em áreas de preservação ambiental (Brasil, 2003). O Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM) também estabelece critério técnicos para implantação de cemitérios através da Portaria nº 149 de 2018 visando a proteção dos solos e águas subterrâneas (Amazonas, 2018). Resultante a isso pesquisas vêm sendo conduzidas no intuito de verificar o impacto dessa atividade no ambiente.

Estudos em cemitérios no estado do Amazonas realizados por Soares *et al.* (2023) identificam as falhas no processo de gerenciamento e instalações das necrópoles, sendo os resíduos sólidos e drenagem pluvial as principais problemáticas sanitárias que podem contaminar o solo e fontes subterrâneas. Vieria *et al.* (2024), destaca as dificuldades que a cidade de Manaus enfrentou durante o pico da pandemia COVID-19, e como sua falta atender a demanda poderia comprometer a saúde da população, pois não havia fiscalização e monitoramento na abertura de valas.

No município de Itacoatiara o cemitério intitulado Divino Espírito Santo (Figura 18) é tombado pelo Conselho Municipal do Patrimônio Cultural de Itacoatiara - COMPACI por meio do Decreto Municipal nº 276, de 28 de setembro de 2016. Luz *et al.* (2020) realizou uma análise nas águas subterrâneas nos arredores da necrópole municipal que visava identificar a presença de compostos orgânicos e inorgânicos através

de ensaios analíticos utilizando o espectrofômetro e analisando a curva de absorbância para duas substâncias encontradas em cadáveres, a putrescina e cadaverina. Os cinco pontos amostrais utilizados sofrem influência da substância necrochorume, impactando a qualidade das fontes de abastecimento com compostos nitrogenados.

Figura 22. Mapa de localização do principal cemitério de Itacoatiara



Fonte: Autoria própria (2025).

As fontes subterrâneas na vizinhança da necrópole de Itacoatiara (Figura 30) sofrem influência direta de compostos nitrogenados, essa realidade é consequência das instalações antigas, da falta de manutenção nas covas e falhas nos procedimentos técnicos de inumação. Além disso, projeto de uma nova necrópole para atender a demanda deve ser considerado, visando atendendo as normativas legais para que essa atividade seja realizada com menor impacto aos recursos naturais e a saúde pública.

Psicultura

A atividade de piscicultura, embora desempenhe papel relevante na economia regional, também pode representar risco potencial à qualidade das águas subterrâneas. Isso ocorre principalmente pela alta carga orgânica proveniente da ração não consumida e dos dejetos dos peixes, que se acumulam nos viveiros e podem infiltrar-se no solo, liberando nutrientes como nitrogênio e fósforo (Santos et al., 2021). Esses elementos,

quando em excesso, favorecem processos de eutrofização e podem alcançar os aquíferos, alterando sua qualidade natural.

Outro aspecto relevante é o uso de insumos químicos e medicamentos veterinários, aplicados para controle de doenças e manejo sanitário, que podem percolar para o subsolo em condições de manejo inadequado. Estudos recentes destacam que a piscicultura em ambientes amazônicos, quando não acompanhada de práticas de monitoramento, tende a intensificar impactos ambientais, sobretudo em áreas de elevada conectividade hídrica entre rios, igarapés e aquíferos rasos (Silva et al., 2022; Almeida et al., 2023).

Em Itacoatiara, a piscicultura constitui uma das principais atividades aquícolas (Figura 31) voltadas para a produção de tambaqui (*Colossoma macropomum*), espécie nativa de grande importância econômica. No entanto, a ausência de sistemas de drenagem adequados e o descarte direto de efluentes em corpos d’água ou no solo adjacente aos tanques podem intensificar o risco de contaminação. Essa realidade ressalta a necessidade de adoção de práticas de manejo sustentável, como tratamento de efluentes, monitoramento da qualidade da água e escolha de áreas compatíveis com a atividade, visando reduzir a pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos e garantir a segurança hídrica local (Carvalho et al., 2023).

A análise combinada revela que zonas planas com presença de fontes pontuais de contaminantes representam os pontos de maior risco. Postos de combustíveis e indústrias, por exemplo, concentrados próximos à área urbana, elevam o risco de contaminação por substâncias organocloradas e metais pesados, enquanto cemitérios e lixões configuram ameaças orgânicas e microbiológicas. Pisciculturas, por sua vez, intensificam a carga de nutrientes, especialmente nas porções rasas do aquífero. Essa heterogeneidade exige políticas de monitoramento e controle diferenciado por tipo de uso.

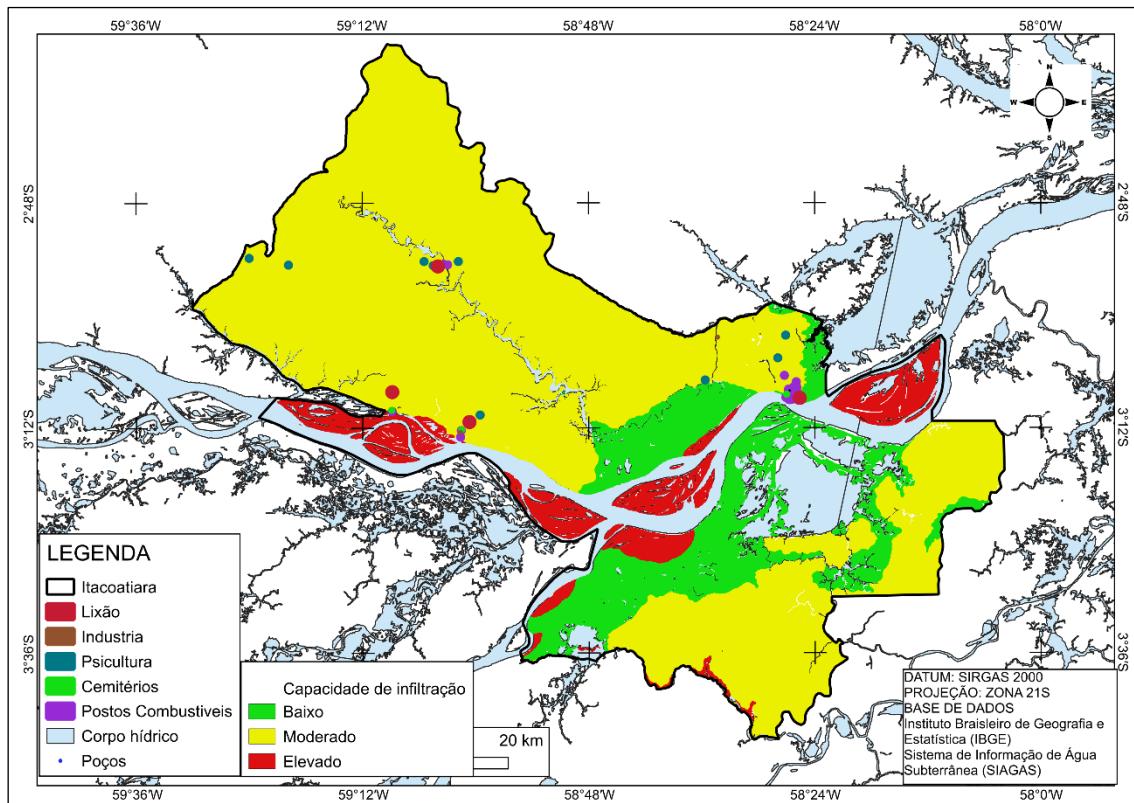
Figura 23. Fazenda de psicultura no município de Itacoatiara.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 32 apresenta a distribuição espacial das fontes pontuais de contaminação em Itacoatiara, considerando as diferentes classes de capacidade de infiltração do solo. Observa-se que áreas com maior capacidade de infiltração (em vermelho) coincidem com a presença de algumas atividades potencialmente poluidoras, como postos de combustíveis e cemitérios. Outras atividades se concentram em maior parte nas áreas de moderada capacidade de infiltração (amarelo). Essa sobreposição caracteriza um risco de sobrecarga hidráulica, uma vez que a maior permeabilidade do solo pode favorecer a percolação de contaminantes em direção ao aquífero, ampliando a vulnerabilidade hídrica subterrânea (Foster; Hirata, 1988; Aller *et al.*, 1987).

Figura 24. Mapa da capacidade de infiltração dos solos e suas respectivas fontes pontuais de contaminação.



Fonte: Autoria própria (2025).

A identificação dessas áreas é essencial para subsidiar o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos, pois permite reconhecer zonas críticas onde o controle e monitoramento devem ser intensificados. No contexto amazônico, onde os aquíferos possuem grande importância para o abastecimento humano, a proximidade entre fontes poluidoras e áreas de elevada infiltração representa uma ameaça à qualidade da água subterrânea. Nesse sentido, o mapeamento da sobrecarga hidráulica contribui para a compreensão da vulnerabilidade local, reforçando a necessidade de integração entre políticas públicas e práticas de ordenamento territorial (Hirata; Foster, 2004; Nascimento; Gomes, 2020).

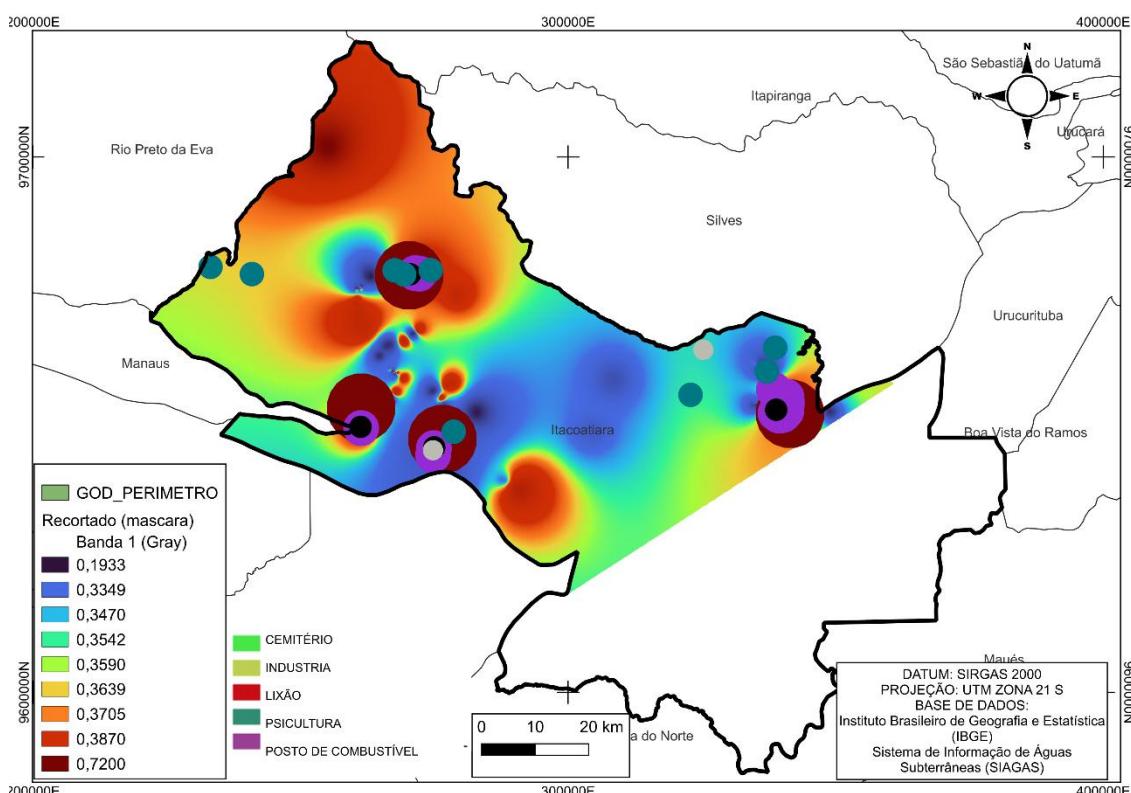
3.5.3 Risco potencial de contaminação

Ao integrar os resultados do POSH com os índices de vulnerabilidade natural do GOD, identifica-se um quadro de risco prioritário para o município, áreas que extrapolam o simples diagnóstico geológico e demandam ação urgente. Essa abordagem integrada

está alinhada às recomendações contemporâneas de gestão de recursos hídricos em contextos urbanos e agrícolas dinâmicos (Sousa et al., 2022; Pereira et al., 2023).

A sobreposição espacial entre as zonas de vulnerabilidade e as fontes pontuais de risco (Figura 33) revelou uma correlação significativa, demonstrando que áreas mais vulneráveis coincidem com a presença de atividades potencialmente poluidoras, como postos de combustíveis, indústrias, cemitérios, lixões e empreendimentos de piscicultura. Esse resultado reforça que a vulnerabilidade natural, quando associada a pressões antrópicas, eleva substancialmente a probabilidade de degradação da qualidade das águas subterrâneas.

Figura 25. Mapa do risco potencial de contaminação



Fonte: Autoria própria (2025).

Entre os diferentes tipos de fontes analisadas, os postos de combustíveis se destacam como uma das principais fontes de risco, devido ao potencial de liberação de hidrocarbonetos e solventes, cuja remediação em subsuperfície é de alta complexidade (Oliveira et al., 2022). As áreas de disposição inadequada de resíduos sólidos e as atividades industriais também representam pontos críticos, uma vez que podem liberar lixiviados com metais pesados e compostos tóxicos de difícil contenção (Molle et al., 2022).

Os cemitérios, por sua vez, configuram um risco microbiológico relevante, sobretudo em zonas de recarga direta e solos mais permeáveis, onde o transporte de patógenos pode ocorrer com maior facilidade (Araújo et al., 2021). Já as atividades de piscicultura, embora associadas a recursos superficiais, podem contribuir indiretamente para a eutrofização de aquíferos rasos em áreas com forte conexão hidrogeológica.

Nesse contexto, a integração entre os índices de vulnerabilidade natural e o mapeamento das fontes pontuais de contaminação constitui uma abordagem eficaz para avaliação do risco hídrico, possibilitando identificar áreas prioritárias para monitoramento e gestão (Li et al., 2023). Os resultados obtidos neste estudo reforçam a necessidade de adoção de medidas preventivas, como fiscalização ambiental, implantação de zonas de proteção em áreas de maior vulnerabilidade e monitoramento contínuo da qualidade da água subterrânea. Além disso, tais informações podem subsidiar ações no âmbito da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Amazonas, fortalecendo a gestão integrada e a proteção dos mananciais subterrâneos no município de Itacoatiara.

CAPÍTULO III – Análise espaço-temporal do uso do solo em Itacoatiara

4.1 CARACTERISTICAS DO SOLO

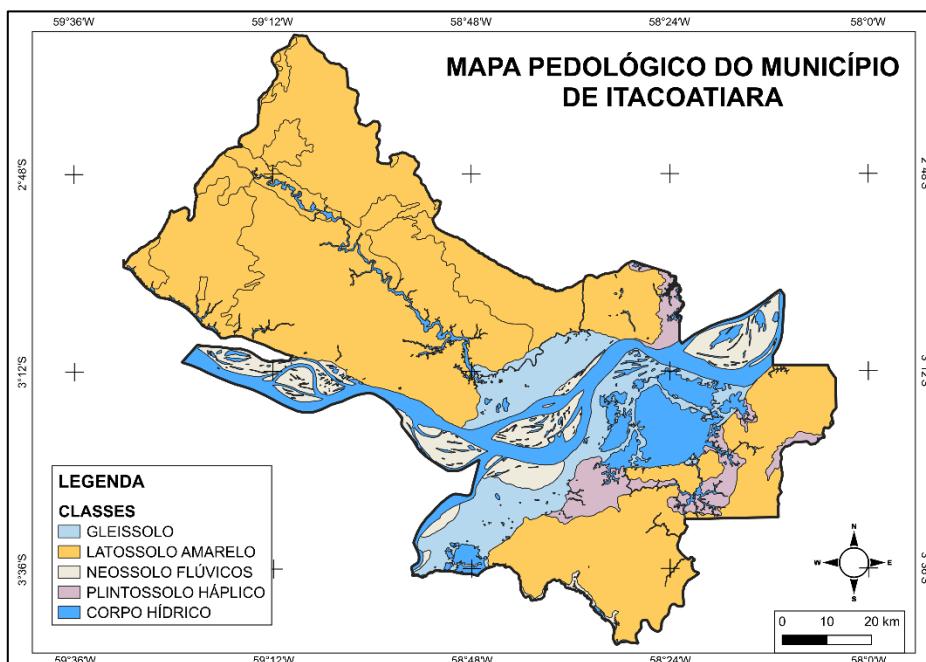
No município de Itacoatiara, existem quatro principais classificações de solos identificadas no mapa pedológico (Figura 34). Dentro dessa classificação estão os Gleissolos as margens do Rio Amazonas, sua principal característica é estar frequentemente saturado por água, ou seja, são hidromórficos, sendo comumente encontrados em áreas de várzea ou alagadiças, também possuem papel fundamental na recarga de aquíferos rasos, entretanto apresentam alta vulnerabilidade à contaminação (EMBRAPA, 2003).

Outra classe são os Plintossolo Háplicos, que possuem uma presença mais discreta no mapa e algumas de suas áreas estão as margens do corpo hídrico, eles são constituídos principalmente de minérios de ferro e alumínio, estando associados a áreas com pouca drenagem, sendo considerado limitantes no uso agrícola e no desenvolvimento urbano (EMBRAPA, 2003).

Os Neossolos Flúvicos são uma classe de solos constituídos de material mineral ou orgânico e caracterizados como solos jovens pois estão associados às planícies de inundação, também são muito suscetíveis à erosão e as variações sazonais, essas características são fortalecidas em virtude de sua localização próximo as calhas de rios principais, como o Amazonas (EMBRAPA, 2025).

Por fim, temos a maior porção de solo de Itacoatiara, os Latossolos Amarelos que são típicos equatoriais, são solos fortemente ácidos com altos níveis de intemperização, sua predominância indica uma homogeneidade na paisagem dessa região (EMBRAPA, 2025). Este solo possui uma boa drenagem, em virtude de sua porosidade, além de ser bem estruturado, todas essas características o tornam um solo de bom desempenho agrícola e bastante utilizado em culturas anuais (Leite, 2022).

Figura 26. Mapa pedológico do município de Itacoatiara



Fonte: Autoria própria (2025).

Os solos que estão mais próximos aos corpos hídricos são os gleissolos e os neossolos, nestes solos existe uma concentração de atividades e ribeirinhas, tornando essas áreas suscetíveis à contaminação sendo necessário o manejo sustentável diante da existência de expansão urbana desordenada (EMBRAPA, 2003). Para mitigar essa problemática, a análise pedológica é uma boa ferramenta para a gestão do solo e consequentemente dos recursos hídricos, através do planejamento territorial e definição de áreas prioritárias a serem preservadas.

Os solos predominantes neste município são os latossolos amarelos que possuem baixa fertilidade natural e elevada permeabilidade, essas características favorecem a infiltração, potencializando riscos de percolação de contaminantes nos aquíferos livres (Silva, 2003). A densa ocupação urbana e uso agropecuário intensivo sobre esses solos podem acarretar na sua compactação, na perda da cobertura de vegetação natural e consequentemente favorecer a disposição inadequada de resíduos sólidos, essas condições comprometem sua função como barreira natural à contaminação hídrica (EMBRAPA, 2003).

4.2 ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Historicamente a população do município se concentrou as margens do rio Amazonas depois a cidade foi crescendo na direção contrária, as suas vilas como Novo Remanso, Vila do Engenho e suas comunidades do interior possuem as mesmas características. Por sua vez, algumas áreas concentram mais domicílios, atividades industriais enquanto algumas áreas expandiram melhor a sua capacidade agropecuária e compreender as atividades que são realizadas sob o solo, auxilia no entendimento dos potenciais vulnerabilidades associadas ao manancial subterrâneo (EMBRAPA, 2003).

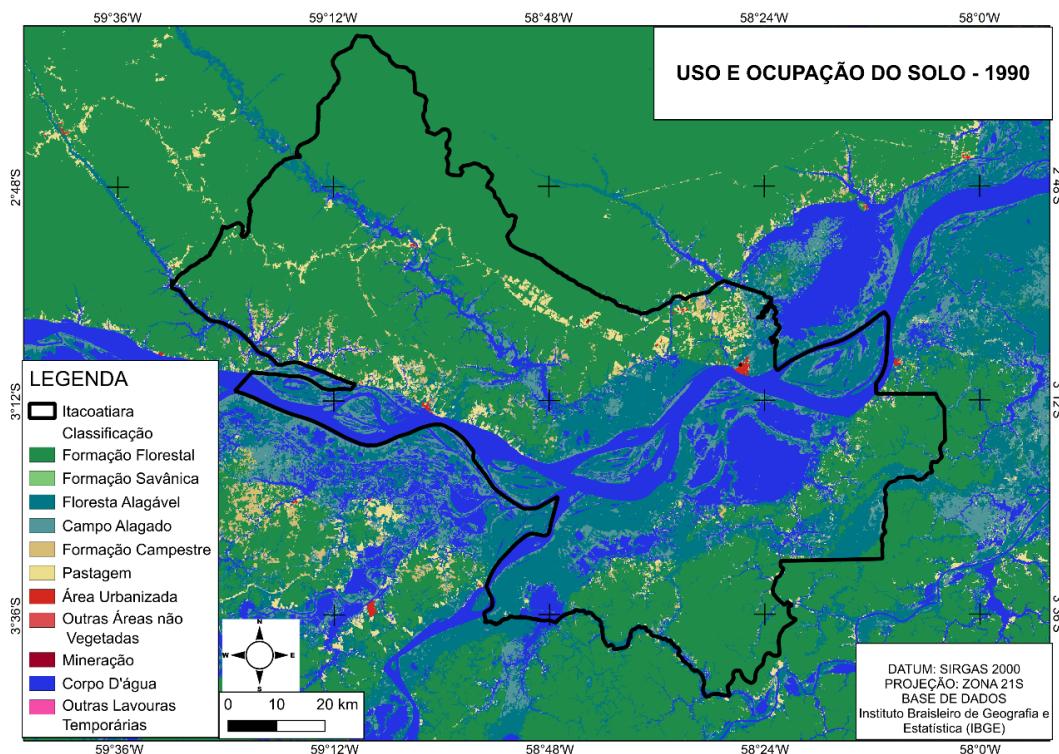
Compreender o processo de urbanização de Itacoatiara é fundamental para analisar as decisões e práticas que moldaram o seu desenvolvimento, desde as primeiras áreas ocupadas até a expansão desordenada observada em períodos posteriores. Nesse percurso histórico, observa-se que áreas de vulnerabilidade ambiental foram sendo delimitadas de forma gradativa, sobretudo em decorrência de ocupações irregulares e de atividades antrópicas de elevado impacto sobre os recursos naturais, em especial os hídricos.

Nas figuras a seguir observam-se as mudanças no uso e ocupação do solo no município de Itacoatiara ao longo dos anos de 1990, 2008 e 2023. A análise demonstra um processo contínuo de expansão da área urbanizada e de intensificação das atividades antrópicas, especialmente nas áreas mais próximas ao núcleo urbano e às margens dos rios, onde se localizam comunidades tradicionais e vilas, como Novo Remanso, Vila do Engenho e Lindóia.

No ano de 1990 (Figura 35), nota-se uma paisagem predominantemente natural, marcada pela forte presença da floresta ombrófila e áreas de floresta alagável, que ainda dominavam grande parte do território municipal (EMBRAPA, 2003). A ocupação urbana restringia-se ao núcleo central de Itacoatiara e a vilas do município.

Neste período, as atividades de desmatamento e abertura de áreas para a agricultura deixava de serem apenas pontuais, vinculadas principalmente à agricultura de subsistência e pequenas áreas de pastagem (Becker, 2005). A presença da estrada AM-010 inaugurada na década de 60, foi um facilitador para a era de desmatamento em suas adjacências e expansão urbana dessas novas áreas, representando uma mudança significativa no cenário do ao seguinte de estudo.

Figura 27. Mapa de uso do solo do ano de 1990.



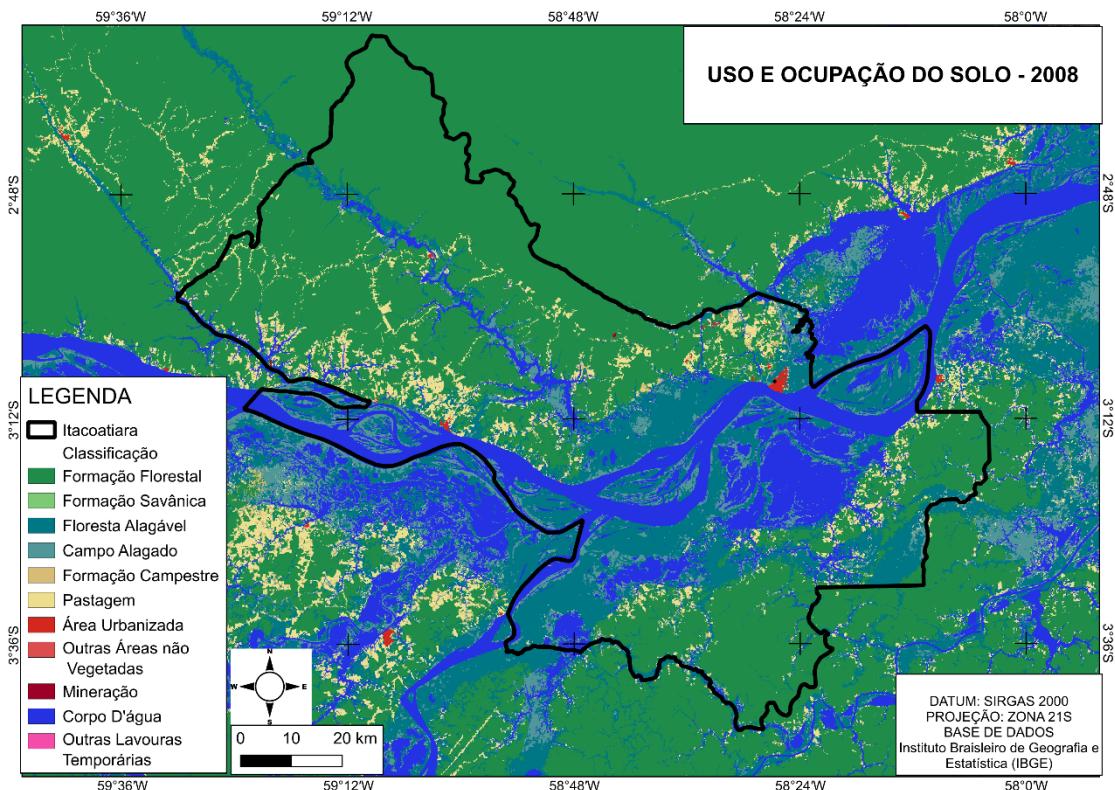
Fonte: Autoria própria (2025).

No ano de 2008 (Figura 36), nota-se um aumento expressivo das áreas de pastagem e de áreas não vegetadas, resultado do avanço da fronteira agropecuária na região, que estava concentrada apenas em regiões centrais do Brasil. Esse processo está associado ao crescimento da demanda por produtos agrícolas e pecuários, bem como à expansão de estradas vicinais que facilitaram o acesso a novas áreas de produção.

De acordo com Lourenço (2010), há questões como o tamanho das famílias que tendem a modificar a paisagem, pois ao dividir uma porção terra entre os herdeiros cada uma passa a exercer influência no mosaico original ao construir sua nova família e iniciar novas atividades agropecuárias e extrativista, sendo uma das possíveis causas do avanço de formações campestres e pastagem.

A urbanização também apresenta expansão, ainda que moderada, reforçando o papel de Itacoatiara como polo regional de comércio e serviços. Essa fase coincide com o período de maior avanço da pecuária na Amazônia, que exerceu forte pressão sobre a cobertura florestal (Barona et al., 2010). Um novo olhar surgiu sobre os territórios amazônicos, e os proprietários investiram em diferentes atividades agropecuárias, modificando os mosaicos florestais.

Figura 28. Mapa de uso do solo do ano de 2008.



Fonte: Autoria própria (2025).

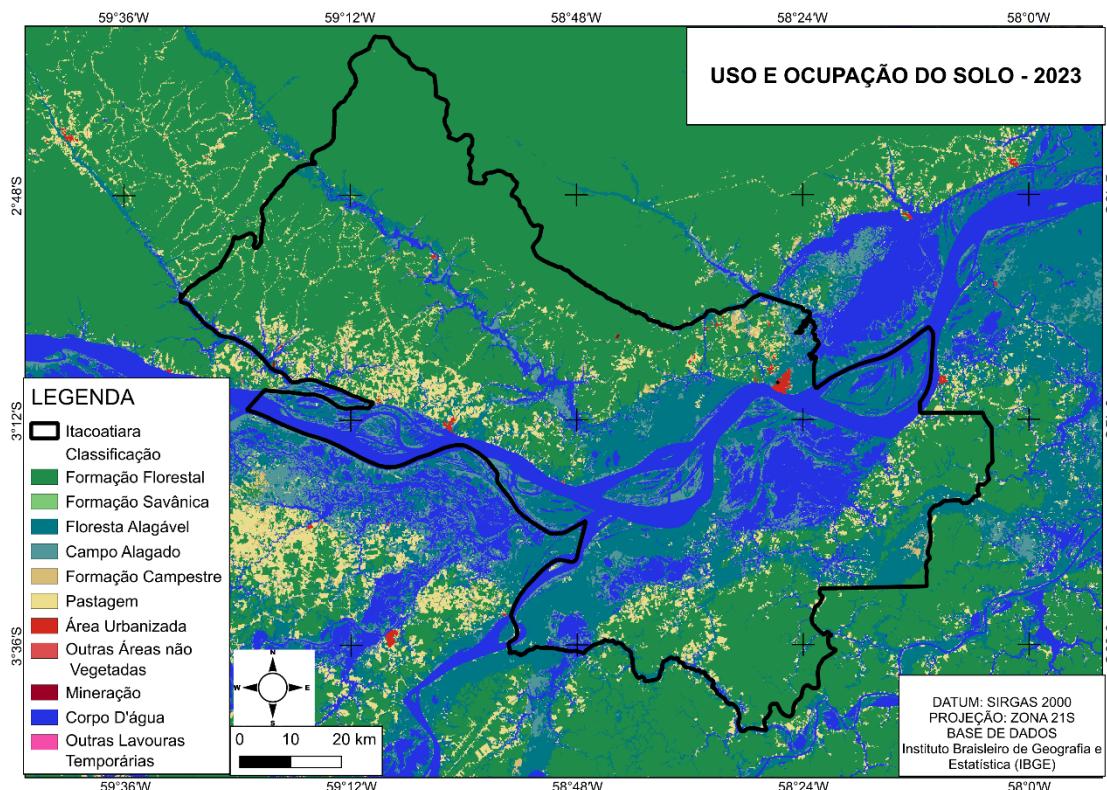
Em 2023 (Figura 37), a expansão das áreas de pastagem e das áreas urbanizadas torna-se ainda mais evidente, revelando a intensificação das pressões sobre o território. O processo de urbanização é evidente tanto no perímetro urbano de Itacoatiara quanto em vilas rurais estratégicas como Novo Remanso e Engenho, ligadas à produção agrícola e ao transporte fluvial. Outra situação recorrente é a saída da população jovem das comunidades para a sede do município em busca de melhores condições de estudo e trabalho (Lourenço, 2010).

Esse processo reflete tanto a pressão demográfica quanto a influência de políticas nacionais de incentivo à produção agropecuária na Amazônia, além da conectividade com a Região Metropolitana de Manaus, que estimula fluxos migratórios e econômicos (Silva; Souza, 2021). A substituição de áreas florestais por pastagens e outras áreas antrópicas gera sérias implicações ambientais, como o aumento do escoamento superficial, a redução da infiltração e a maior vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação.

A Figura 37 se reflete parcialmente a atual configuração de uso do solo do município com pastagens significativas ao longo do leito do Rio Amazonas. A presença da BR AM-010 é um fator que contribui tanto para o desenvolvimento do município

quanto para o crescimento de pastagens, atividade de piscicultura e fábricas que tem se tornado comuns ao longo dessa estrada.

Figura 29. Mapa de uso do solo do ano de 2023.



Fonte: Autoria própria (2025).

As mudanças observadas ao longo das três décadas evidenciam que a transformação do uso do solo em Itacoatiara não se trata apenas de um processo local, mas reflete dinâmicas regionais e nacionais ligadas à expansão da fronteira agrícola amazônica e à urbanização sem planejamento.

Do ponto de vista ambiental, a conversão da cobertura natural em artificial, aumenta a fragilidade dos ecossistemas e compromete a recarga hídrica subterrânea, sobretudo nas áreas de alta permeabilidade. Esse cenário reforça a necessidade de políticas de ordenamento territorial e de monitoramento do uso do solo, de modo a mitigar os impactos sobre os aquíferos e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos no município (Foster; Hirata, 1988; Nascimento; Gomes, 2020).

4.3 IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo é fundamental para compreender os processos que influenciam a vulnerabilidade hídrica subterrânea no município de Itacoatiara. As alterações naturais e, sobretudo, as de origem antrópica relacionadas à expansão urbana, às atividades agrícolas e o desmatamento modificam as características físicas do solo e impactam diretamente a recarga dos aquíferos que compõem a região (Silva et al., 2021). Nesse contexto, Florenzano (2011) ressalta que o acompanhamento temporal dessas transformações permite avaliar os efeitos cumulativos da ação humana, fornecendo subsídios técnicos e científicos para políticas públicas voltadas à gestão integrada dos recursos hídricos.

Entre os impactos mais significativos, destaca-se o crescimento urbano em Itacoatiara, que aumenta o risco de contaminação ao inserir no meio atividades que geram altas cargas de contaminação como os lixões. Outro impacto, são as mudanças na capacidade de infiltração do solo, comprometendo a recarga natural das águas subterrâneas (Almeida et al., 2020). Esse cenário, associado ao uso intensivo de insumos agroquímicos em áreas rurais, amplia a vulnerabilidade hídrica local e compromete a qualidade da água destinada ao consumo (Silva; Ferreira, 2020). De acordo com Santos e Souza (2021), o monitoramento temporal do uso do solo é essencial para identificar áreas críticas e propor estratégias de mitigação e conservação ambiental.

Sob a perspectiva do planejamento territorial, o acompanhamento do uso e ocupação do solo em Itacoatiara constitui uma ferramenta indispensável para a proteção das águas subterrâneas. Estudos têm demonstrado que a ausência de ordenamento e de fiscalização em áreas próximas a cursos d'água e zonas de várzea intensificam os processos de degradação ambiental e aumenta a susceptibilidade à poluição hídrica subterrânea (Meneses et al., 2022). Nesse sentido, Rossetti *et at.*, (2017) enfatizam que a análise das mudanças espaciais fornece suporte técnico-científico essencial para a formulação de políticas públicas mais sustentáveis e alinhadas à preservação dos recursos naturais.

O crescimento populacional e a pressão sobre os recursos hídricos intensificam a demanda por água potável, ao mesmo tempo em que elevam os riscos de degradação desse recurso essencial (Costa *et al.*, 2021). Conforme destacam Lima e Ribeiro (2020), a análise espaço-temporal do território permite compreender como padrões inadequados

de ocupação podem gerar vulnerabilidades sociais, sobretudo em comunidades que dependem das águas subterrâneas como principal fonte de abastecimento.

Nesse sentido, contextualizar a importância da análise do uso e ocupação do solo em Itacoatiara implica reconhecer que o acompanhamento temporal das transformações espaciais é indispensável para avaliar a vulnerabilidade hídrica subterrânea. Essa perspectiva oferece suporte científico ao monitoramento ambiental, à gestão territorial e à formulação de políticas públicas orientadas à preservação dos recursos hídricos, garantindo sustentabilidade e qualidade de vida para as futuras gerações (Santos; Almeida, 2019; Meneses *et al.*, 2022).

A análise espaço-temporal constitui, um instrumento para compreender o comportamento das pressões antrópicas sobre o meio, permitindo identificar padrões de uso e ocupação do solo e sua evolução ao longo do tempo. A integração de variáveis ambientais e socioeconômicas em diferentes escalas espaciais possibilita relacionar a intensificação das atividades humanas com a degradação da qualidade e da quantidade da água subterrânea (Machado *et al.*, 2019).

Essa abordagem contribui para a identificação de áreas mais vulneráveis à contaminação, especialmente em regiões marcadas por práticas como agricultura intensiva, expansão urbana desordenada e disposição inadequada de resíduos sólidos e efluentes domésticos e industriais (Hirata *et al.*, 2015). A análise temporal, por sua vez, favorece a avaliação de alterações na recarga, rebaixamento do nível piezométrico e ocorrência de contaminantes emergentes, fatores que refletem diretamente a pressão antrópica sobre os aquíferos (Martins; Oliveira, 2021).

Assim, a compreensão da dinâmica espaço-temporal dos impactos ambientais fornece subsídios técnicos para o planejamento de políticas públicas mais eficazes voltadas à gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos. Além disso, possibilita a implementação de medidas preventivas e corretivas, assegurando maior segurança hídrica e preservação socioambiental (Silva; Pereira, 2020).

No presente estudo, as análises espaço-temporais foram realizadas para os anos de 1990, 2008 e 2023, cobrindo um intervalo de aproximadamente três décadas. Esse recorte temporal foi escolhido por permitir a observação das transformações associadas tanto a processos naturais quanto às ações antrópicas, evidenciando tendências relevantes para o entendimento da vulnerabilidade hídrica no município.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA MULTITEMPORAL

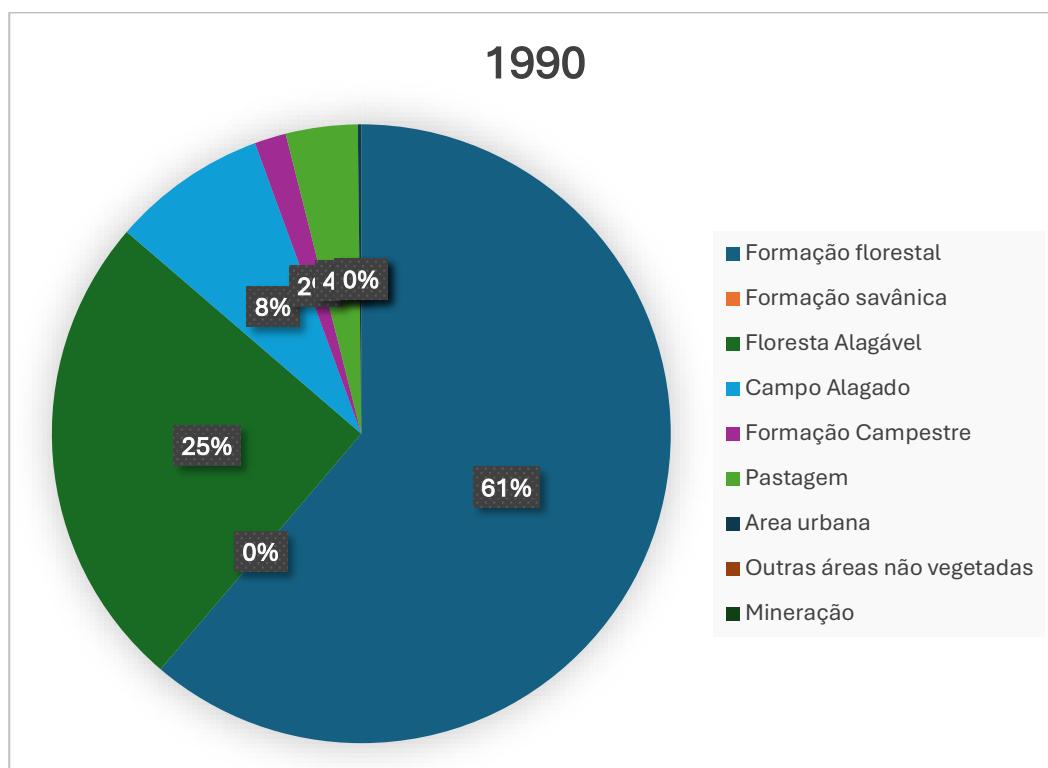
A análise comparativa multitemporal permite avaliar as transformações no uso e cobertura do solo ao longo de três décadas, identificando tendências relevantes em diferentes escalas como nacional, regional e local. No contexto brasileiro, observa-se que a vegetação nativa da Amazônia sofreu redução significativa nas últimas décadas, sobretudo entre 1990 e 2008, período marcado pelo avanço da fronteira agropecuária, pela exploração madeireira e pela intensificação das atividades agrícolas (Santos *et al.*, 2021).

No Estado do Amazonas, embora a cobertura florestal ainda represente a maior parte do território, os anos analisados evidenciam crescimento das atividades agrícolas e urbanas em regiões estratégicas, muitas delas situadas em áreas de recarga hídrica, o que demonstra maior pressão sobre os recursos subterrâneos caso semelhante aconteceu na urbanização de Manaus (Soares, 2024).

No município de Itacoatiara, a análise multitemporal revela que a expansão urbana e agropecuária segue padrões semelhantes aos observados em escala da capital, pois a falta de zoneamento, planejamento urbano e infraestrutura afeta diretamente zonas de recarga e aumentando a vulnerabilidade dos aquíferos locais (Cunha *et al.*, 2021).

A Figura 38 apresenta o gráfico com dez classes de uso e cobertura que interferem na dinâmica multitemporal. Em 1990, a classe de formação florestal correspondia à maior extensão territorial, com 4.450,029 km², representando aproximadamente 61% da área do município. Em seguida, a floresta alagável ocupava 1.822,321 km², equivalente a 25% do território. Outras classes, como mineração, formação savânica e áreas não vegetadas, apresentaram valores pouco expressivos, enquanto as demais mantiveram percentuais intermediários entre as de maior e menor representatividade.

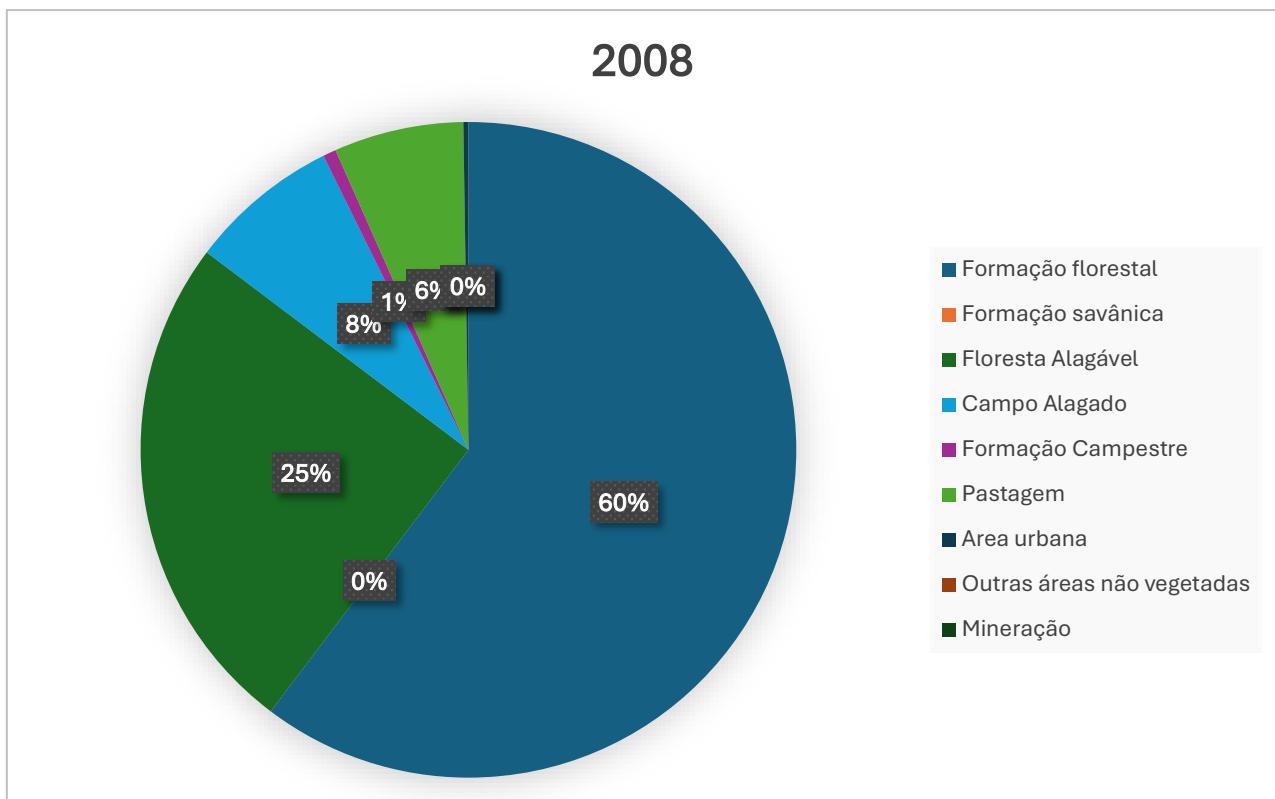
Figura 30. Gráfico da distribuição de área a diferentes formações em 1990



Fonte: Autoria própria (2025).

Na figura 39 é possível observar uma mudança variada com relação ao ano de 1990, a formação florestal e a formação campestre apresentaram maior índice de diminuição comparado aos últimos dados coletados com redução de menos 95,838 km² e menos 73,384 consecutivamente, contudo a pastagem apresentou um aumento de 189,37 km² de extensão, seguido do corpo hídrico que evidenciou um aumento de 46,266 km², a formação savânica não mostrou nenhum crescimento ou qualquer redução de extensão, ou seja não teve nenhum processo natural ou antrópico que alterasse sua formação e estrutura.

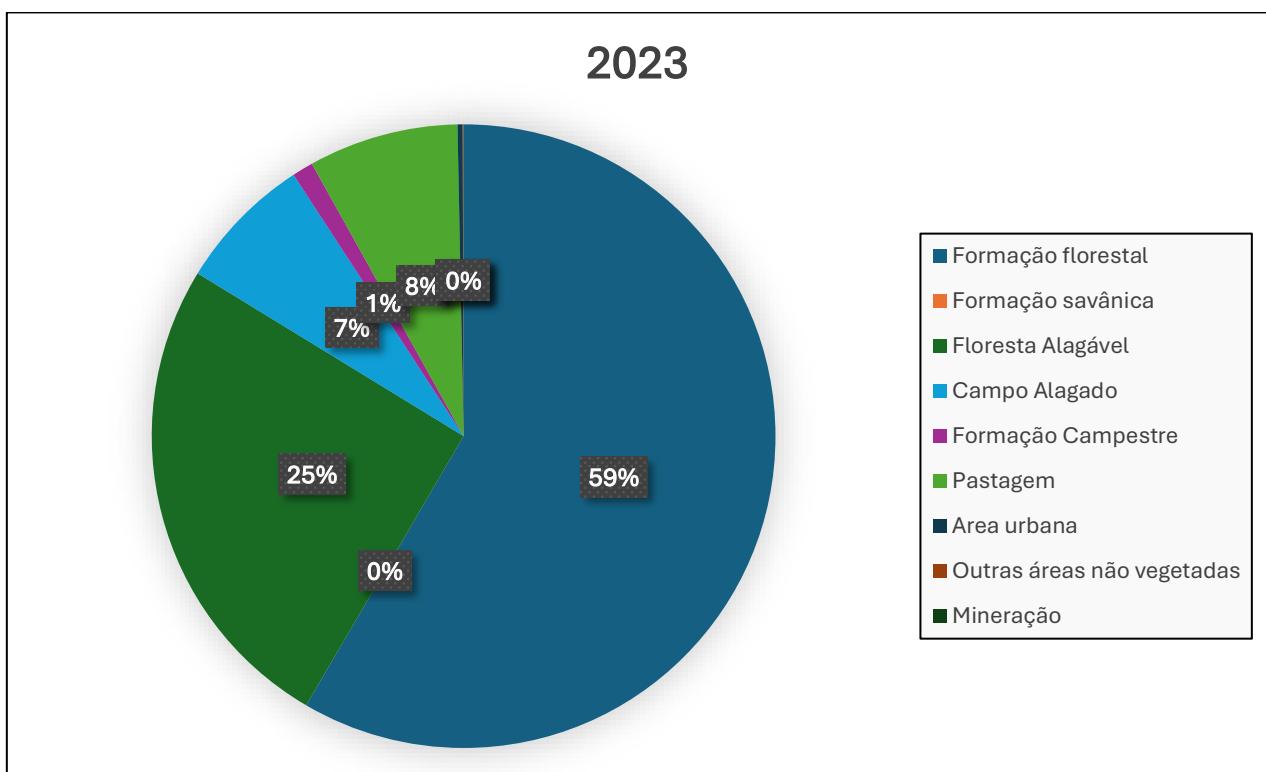
Figura 31. Gráfico da distribuição de área a diferentes formações em 2008.



Fonte: Autoria própria (2025).

No último ano de estudo observou-se uma redução florestal de menos 220,799 km² comparado ao ano de 1990, fator esse que pode ser ocasionado pelo crescimento urbano de forma desordenada principalmente pela chegada e instalação de empresas e indústrias no município, fomentando o crescimento populacional tanto na zona urbana, com migrações de pessoas das zonas rurais para sede, de pessoas de outros municípios que vem para Itacoatiara com perspectivas de melhoria da qualidade de vida e de trabalho (Loureiro, 2010). Quanto aumento da zona rural com aumento da população e consequentemente aumento das áreas de agricultura que passou a ter auxílio com para produção de abacaxi.

Figura 32. Gráfico da distribuição de área a diferentes formações em 2023

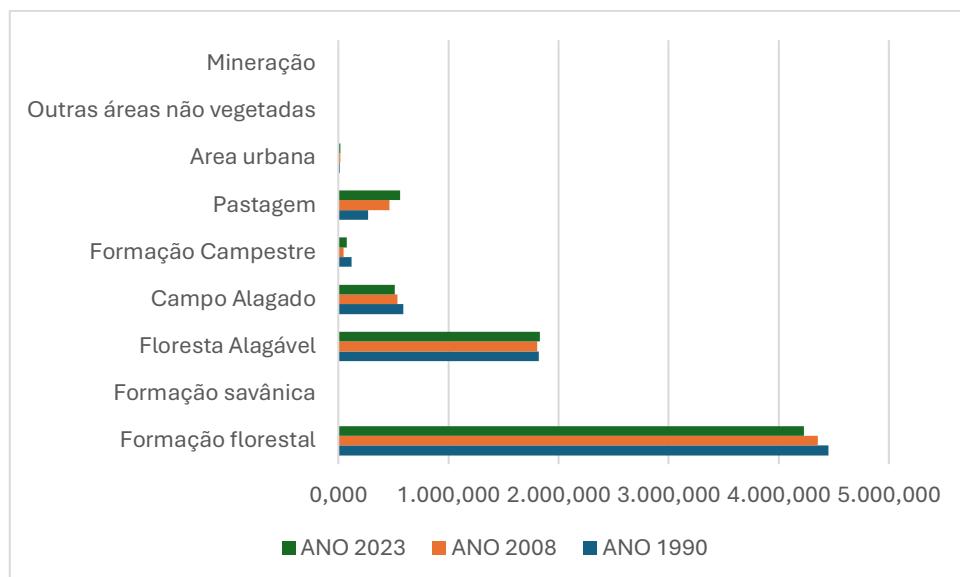


Fonte: Autoria própria (2025).

O gráfico comparativo entre os anos de 1990, 2008 e 2023 evidencia mudanças no uso e cobertura do solo em Itacoatiara. A formação florestal permanece como a classe dominante ao longo do período, mas apresenta tendência de redução progressiva, reflexo do avanço das atividades humanas sobre áreas naturais (EMBRAPA, 2003). De forma semelhante, a floresta alagável, o campo alagado e a formação campestre mostram decréscimos, indicando substituição de ambientes naturais por usos agropecuários e urbanos (Meneses *et al.*, 2022).

Em contrapartida, as áreas de pastagem e de uso urbano apresentam crescimento expressivo, acompanhando o processo de intensificação da pecuária e da urbanização na região. Esse padrão, observado também em outras cidades amazônicas, representa importante pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos, sobretudo pela impermeabilização do solo e pela redução da recarga natural dos aquíferos (Silva; Ferreira, 2020). Ainda que menos representativa em termos absolutos, a expansão urbana tem impacto direto sobre a qualidade da água subterrânea devido ao manejo inadequado de resíduos e efluentes (Cunha *et al.*, 2021).

Figura 33. Variação multitemporal do uso do solo em Itacoatiara (1990, 2008 e 2023).



Fonte: Autoria própria (2025).

As categorias de menor representatividade no gráfico, não necessariamente são insignificantes, havendo um crescimento de 52,39% de área urbana durante os anos de 1990 até 2023. formação savânica e áreas não vegetadas, não apresentaram variações relevantes no período analisado. No entanto, mesmo em pequenas extensões, tais usos podem agravar processos de degradação ambiental, especialmente quando coincidem com áreas de recarga hídrica (Hirata *et al.*, 2015). Isso demonstra que a pressão antrópica não se limita às grandes transformações, mas também às alterações pontuais no território.

De forma geral, a análise multitemporal reforça que a substituição de vegetação nativa por atividades agropecuárias e urbanas contribui para o aumento da vulnerabilidade hídrica subterrânea em Itacoatiara. A redução das áreas naturais compromete a infiltração e favorece a contaminação difusa, ampliando os riscos para os aquíferos locais. Nesse contexto, o monitoramento contínuo do uso do solo é essencial para subsidiar políticas públicas voltadas à proteção dos recursos hídricos e à sustentabilidade ambiental (Almeida *et al.*, 2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a vulnerabilidade hídrica subterrânea em Itacoatiara é consequência direta da relação entre a dependência majoritária do município em relação às águas subterrâneas, a expansão urbana desordenada e a precariedade do saneamento básico. A aplicação dos métodos GOD e POSH, integrados a geotecnologias, permitiu identificar que os índices GOD de variaram entre 0,24 e 0,72, classificados entre diferentes classes de vulnerabilidade. Através do método POSH, as principais atividade identificadas como fontes pontuais de contaminação foram os lixões, cemitérios, postos de combustíveis, as fazendas de psicultura e algumas industriais, cuja localização em setores de alta infiltração tendem a agrava o risco de poluição difusa e localizada.

Através da análise espaço-temporal foi possível identificar um grande aumento em áreas urbanas chegando em 2023 a um percentual de 53,39% em relação ao ano de início do estudo em 1990. Por sua vez também houve um aumento significativo na área de pastagem em 2023 de cerca 106,38% em relação ao ano de 1990, esse crescimento exponencial revelou a grande taxa de redução da cobertura florestal e o avanço da agropecuária no município de Itacoatiara.

Tais resultados reforçam que o zoneamento atual, sem planejamento adequado pode vir a comprometer a qualidade e disponibilidade da água subterrânea sendo necessário a urgência de políticas públicas integradas que contemplem o fortalecimento do saneamento básico, o monitoramento sistemático da qualidade das águas subterrâneas, a definição de áreas de proteção em torno dos poços e a regulação mais rigorosa das atividades com potencial de contaminação.

Por fim, reconhece-se que este estudo apresenta limitações, tanto de poços como pontos amostrais quanto à ausência de análises laboratoriais detalhadas da qualidade da água subterrânea e à disponibilidade restrita de dados hidrogeológicos. Recomenda-se, portanto, que pesquisas futuras integrem medições de campo mais robustas e análises físico-químicas, de modo a validar e complementar os resultados obtidos. Apesar dessas limitações, o presente trabalho constitui um avanço significativo no diagnóstico da vulnerabilidade hídrica subterrânea de Itacoatiara e oferece subsídios técnicos e científicos relevantes para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- ABU-BAKR, H. A. Groundwater vulnerability assessment in different types of aquifers. *Agricultural Water Management*, v. 240, p. 106275, 2020.
- AIT LAHSSAINE, I.; KABIRI, L.; MESSAOUDI, B. et al. Avaliação integrada da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas em Goulmima: análise comparativa dos métodos DRASTIC e GOD. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, v. 9, p. 2109-2122, 2024.
- ALLER, L. et al. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA, 1987.
- ALMEIDA, L. Q. Riscos ambientais e vulnerabilidades nas cidades brasileiras: conceitos, metodologias e aplicações. 2012.
- ALVES, R. C. et al. Gerenciamento municipal de resíduos sólidos no Amazonas, Brasil. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 12, p. e28691211139, 2020.
- AMAZONAS. Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas. Portaria nº 149, de 2018. Estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental no estado do Amazonas. Diário Oficial do Estado do Amazonas, Manaus, 2018.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020. Brasília, 2020.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas Águas: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília, 2020.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas Esgotos: despoluição das bacias hidrográficas. Brasília, 2022.
- AQUINO, W.; AQUINO, S. Postos de combustíveis na geração de áreas contaminadas em zonas urbanas e seus impactos na sustentabilidade. São Paulo: Atena, 2024.
- ARRAES, J. A. Estudo qualquantitativo sobre prevalência de parasitos, diarreia, indicadores de saúde e socioambientais em Itacoatiara (AM). 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2024.
- AZEVEDO, R. P. O (des)abastecimento público de água no município de Pauini no estado do Amazonas: causas e consequências. In: CONGRESSO ABES, 30., 2019. Anais... Natal: ABES, 2019.

- AZEVEDO, R. P. Uso de água subterrânea em sistema de abastecimento público de comunidades na várzea da Amazônia central. *Acta Amazônica*, v. 36, p. 313-320, 2006.
- BANDEIRA, N. B.; CENTENO, L. N.; CECCONELLO, S. T. Mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas de Jaguarão/RS. *Revista Ambientale*, v. 13, n. 4, p. 58-72, 2021.
- BARONA, E. et al. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 5, n. 2, p. 024002, 2010.
- BARROS, L. M. M. G.; LIMA, A. M. M. Uso potencial e vulnerabilidade das águas subterrâneas em áreas de expansão urbana (Belém-Pará). *Revista GeoUECE*, v. 12, n. 22, 2023.
- BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 19, n. 53, p. 71–86, 2005.
- BEZERRA, A. et al. Potencial risco de contaminação do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 9, n. 2, p. 01-20, 2023.
- BORDALO, C. A. O paradoxo da água na região das águas: o caso da Amazônia brasileira. *GEOUSP Espaço e Tempo*, v. 21, n. 1, p. 120-137, 2017.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 335, de 3 de abril de 2003. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios.
- Burrough, P. A.; McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- CARDOSO, J. E. T.; LODI, P. C.; BARROS, A. M. T. C. Técnicas de remediação de contaminação da água e solo por hidrocarbonetos. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 5, n. 36, p. 18-28, 2017.
- CARSON, R. Primavera silenciosa. São Paulo: Melhoramentos, 1969.
- CARVALHO MARTINS, R. C.; ALMEIDA, P. L. C. S. Economia circular e ecodesign na logística reversa. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, v. 12, n. 3, 2022.
- CECONI, D. E. et al. Análise de vulnerabilidade visando o planejamento ambiental em bacia de captação. *Ambiente & Sociedade*, v. 21, p. e00782, 2018.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo. São Paulo, 2014.
- CUNHA, D. G. F.; SILVA, A. M. Fontes de poluição da água: revisão conceitual. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 1, p. 29–39, 2012.

- CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Aplicação dos métodos Drastic e Posh para vulnerabilidade do aquífero Furnas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n. 2, p. 127-142, 2010.
- DE BRITO, A. P. et al. Relação entre precipitação e recarga de águas subterrâneas na Amazônia Central. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, p. 39-49, 2020.
- DUARTE, M. L. et al. Vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero Alter do Chão em Manaus. *Revista Monografias Ambientais*, p. e7, 2019.
- EMBERGA, T. O. A.; ONYEKURU, S. et al. Avaliação de risco de águas subterrâneas na bacia do rio Imo, Nigéria: DRASTIC e GOD. *Water Conservation Science and Engineering*, v. 8, p. 42, 2023.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed. Brasília: Embrapa, 2025.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO/PAHO/CEPIS, Lima, 1988.
- FRANCO, A. O.; ARCOS, F. O. Vulnerabilidade natural de aquíferos no Acre. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 1, 2020.
- FREITAS, C. M.; GIATTI, L. L.; CASTRO, H. A. Contaminação dos igarapés urbanos de Manaus. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 24, n. 6, p. 2267–2276, 2019.
- GOMES, F. B. M. et al. Vigilância em saúde em postos de combustíveis. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 8, n. 19, p. 1061-1073, 2021.
- GUIMARÃES, G. A. et al. Áreas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos de Itacoatiara. *Fronteira*, v. 12, n. 2, p. 49-62, 2023.
- GUIMARÃES, G. A. et al. Resíduos sólidos urbanos em distritos rurais no Amazonas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 3, p. 1658–1671, 2024.
- HERNANDEZ, P. G. L. et al. Interpolação de dados hidrogeológicos no Paraná. *Águas Subterrâneas*, v. 35, n. 1, p. 1-11, 2021.
- HINNAH, S. S. Diagnóstico do saneamento básico de Itacoatiara-AM. 2020.
- HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. Águas subterrâneas no Brasil: importância, desafios e gestão. *Revista USP*, n. 116, p. 42–57, 2018.
- HIRATA, R.; FOSTER, S. Groundwater pollution risk assessment: an international perspective. *Hydrogeology Journal*, v. 12, p. 103–114, 2004.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro, 2022.

- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil (1991–2020). Brasília, 2024.
- JESUS, R. C.; CAIRES, T. A. Fossas rudimentares e contaminação de poços rasos. *Research, Society and Development*, v. 14, n. 1, 2025.
- JÚNIOR, P. B. et al. Gestão, comércio e conflitos pelo uso da água. *Brazilian Journal of Agroecology and Sustainability*, v. 4, n. 2, 2022.
- KEMERICH, P. D. C. et al. Valores anômalos de metais pesados em solo de cemitério. *Revista Ambiente & Água*, v. 7, p. 140-156, 2012.
- KEMERICH, P. D. et al. A questão ambiental envolvendo os cemitérios no Brasil. *Revista Monografias Ambientais*, p. 3777-3785, 2014.
- LAGES, A. S. et al. Razões iônicas como marcadores de interações entre água superficial e aquífero no Igarapé do Quarenta, Manaus-AM. v. 45, e37, 2023.
- LEITE, M. J. H. As características são duas principais, apenas na região semiárida. *RECIMA21*, v. 3, n. 10, 2022.
- LEITE, N. M. G. et al. A influência da disposição final dos resíduos sólidos nos recursos hídricos: revisão sistemática. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 2, 2021.
- LI, P. et al. Fontes e consequências da contaminação das águas subterrâneas. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 80, p. 1-10, 2021.
- LI, J.; HEAP, A. D. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, v. 53, p. 173–189, 2014.
- LIMA, L. T.; CUNHA, K. M. Manifestações patológicas no Sistema Autônomo de Água e Esgoto em Parintins-AM. *Revista DELOS*, v. 17, n. 62, 2024.
- LOURENÇO, F. S. Ambiente e agricultura: uso da terra pela agricultura familiar em Itacoatiara. Dissertação (Mestrado) – UFAM, 2010.
- LUZ, M. A. M.; MORALES, B. F.; SOUSA MAIA, P. J. Contaminação de águas subterrâneas por cemitérios em Itacoatiara-AM. 2019.
- MAIOR, M. M. S.; CÂNDIDO, G. A. Vulnerabilidade socioambiental urbana: metodologias brasileiras. *Cadernos Metrópole*, v. 16, n. 31, p. 241-264, 2014.
- MARTINS, L. A.-C. P.; BRANDO, F. R. O meio ambiente em discussão: Estocolmo e Rio-92. *Cadernos de História da Ciência*, v. 17, 2023.
- MAYS, D. C.; SCHEIBE, T. D. Contaminação de águas subterrâneas: processos e métodos de remediação. *Water*, v. 10, n. 12, p. 1708, 2018.
- MENDONÇA, A. L. P. et al. As águas da região norte e a luta pela água potável no Amazonas. *Revista do Direito Público*, v. 18, n. 2, p. 187-204, 2023.

- MONTEIRO, V. R. C. et al. Espectroscopia de fluorescência para avaliação de matéria orgânica dissolvida. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019.
- MORAES, Y. G.; OLIVA, P. C. Hidrocarbonetos em subsuperfície em postos de combustíveis de Baião (PA). *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 12, p. 30252-30271, 2019.
- MOURA, André Negrão. Recarga artificial de aquíferos: os desafios e riscos para garantir o suprimento futuro de água subterrânea. *Águas Subterrâneas*, 2004.
- NASCIMENTO, J. R.; GOMES, L. A. Vulnerabilidade e risco à contaminação das águas subterrâneas em áreas urbanas amazônicas. *Revista Geonorte*, v. 11, n. 40, p. 59–78, 2020.
- OLIVEIRA, C. N. S.s de et al. Urbanização no Médio Amazonas: a importância de Itacoatiara/AM como cidade intermediária. 2007.
- OLIVEIRA, L. I.; DE OLIVEIRA LOUREIRO, C. Contaminação de aquíferos por combustíveis orgânicos em Belo Horizonte: avaliação preliminar. *Águas Subterrâneas*, 1998.
- OLIVEIRA, M. S. F de. Determinação de metais pesados e poluentes emergentes utilizando eletrodos de carbono vítreo e diamante dopado com boro. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.
- ONU BR – Nações Unidas no Brasil. A Agenda 2030. 2015.
- ORSI, R. A. et al. Conflitos e desafios entre a regionalização do saneamento básico, a governança da água e a macrometrópole paulista. *Cadernos de Campo*, n. 31, p. 237-260, 2021.
- PACHECO, A. Cemitério e meio ambiente. Tese (Livre Docênciа) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2000.
- PACHECO, J. W. Guia técnico ambiental de frigoríficos – industrialização de carnes (bovina e suína). São Paulo: CETESB, 2008.
- PADOVESI-FONSECA, C.; DE FARIA, R. S. Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no Brasil e Europa. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, v. 3, 2022.
- PANTOJA, N. G. P. A utilização da água de rio para o consumo humano nas comunidades ribeirinhas na região de Coari a Itacoatiara, Amazonas, Brasil. Tese de Doutorado, 2015.
- PASCOALOTO, D; GOVONE, J. S. Qualidade da água em nascentes urbanas e no leito do igarapé que drena o Polo Industrial de Manaus. 2020.
- PATRÍCIO, A. R; BOAS, Rafaela Maria Ribeiro Patrício Vilas; GALDINO, Marcela Tomé. Gerenciamento e tratamento de efluentes líquidos de laticínios com

- dimensionamento de estação de tratamento em Uberaba-MG. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 4, p. 37278-37292, 2021.
- PAULA, T. L. F. et al. Avaliação hidrogeológica e vulnerabilidade natural à contaminação (método GOD) do município de Ipiranga do Piauí, PI. Serviço Geológico do Brasil, 2025.
- PAUNGARTTEN, S. P. L.; SANTOS, Jader de Oliveira Santos. Exposição e sensibilidade na avaliação da segurança hídrica: estudo de caso na Amazônia. *Revista GeoUECE*, v. 12, n. 22, 2023.
- PEIXOTO, F. S. Risco de contaminação da água subterrânea em uma sub-bacia urbana. *Mercator*, v. 19, p. e19013, 2020.
- PERONI, J. B.; CARVALHO, L. H; LANNES, Lucíola Santos. Qualidade da água e saneamento básico em assentamento rural de São Paulo. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 2, 2021.
- QUEIROZ NETO, J. P. Pedologia: conceito, método e aplicações. 1984.
- REGO, N. L S.; MELO, D. H. C T. B; DA CONCEIÇÃO GOMES, M. Vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero na Região Metropolitana de Salvador. *Revista de Geociências do Nordeste*, p. 49-56, 2021.
- REBOUÇAS, A. C. Desenvolvimento das águas subterrâneas no Brasil. *Águas Subterrâneas*, 1998.
- RIBEIRO, B. T. et al. Contaminação de águas superficiais e subterrâneas por agrotóxicos. *Brazilian Journal of Development*, v. 10, n. 6, 2024.
- ROCHA, R. O. F. et al. Aplicação do método GOD para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos no Estado de Sergipe. 2018.
- ROSA, N. B. et al. Qualidade microbiológica de águas de poços escavados no interior de Rondônia. *Interfaces Científicas – Saúde e Ambiente*, v. 9, n. 1, 2022.
- SALES, L. F. P.; JÚNIOR, J. P. M.; FERREIRA, N. C. Caracterização de poços tubulares profundos em ambiente SIG. *Águas Subterrâneas*, 2014.
- SANTOS LIMA, R et al. Tecnologias convencionais e alternativas de tratamento de esgoto em comunidade ribeirinha de Itacoatiara-AM. *Revista Augustus*, v. 31, n. 58, p. 31-56, 2022.
- SANTOS, A.C. B. et al. Vulnerabilidade de aquíferos: aplicação do método GOD com base SIAGAS. *Águas Subterrâneas*, 2013.
- SANTOS, A. S. D. et al. Águas subterrâneas: poço tubular. *Brazilian Journal of Business*, v. 2, n. 1, p. 550-563, 2020.

- SANTOS, A. N. Sousa et al. Resíduos sólidos e design sustentável na economia circular à luz da Agenda 2030. *Aracê*, v. 7, n. 2, p. 7365-7391, 2025.
- SANTOS, G. G. et al. Dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura do solo no assentamento Rio Juma, sul do Amazonas. *Revista GeoAmazônia*, v. 9, n. 1, p. 57-75, 2021.
- SANTOS, L. H. T; DA SILVA FILHO, Eliomar Pereira. Impactos da urbanização e saneamento inadequado na qualidade das águas subterrâneas em Porto Velho. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 10, 2024.
- SANTOS, M. S. et al. Prognóstico de níveis do Rio Amazonas na vazante de 2025: estação Itacoatiara. Serviço Geológico do Brasil, 2025.
- SCHULTZ, A. M. B. et al. Qualidade da água para consumo humano em entorno de poços artesianos no noroeste do RS. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 16, n. 1, 2025.
- SCHWADE, M. A. Riquezas materiais e imateriais: relações cidade e campo na Amazônia. 2014.
- SEGOV. Relatório Nacional Voluntário sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2017. Curadoria Enap, 2017.
- SILVA BRANDÃO, L; DOS SANTOS, W. L. Análise hidroquímica da água do Rio Acre em Rio Branco-AC. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 3, n. 1, p. 1-17, 2025.
- SILVA, C. A.; SOUZA, L. A. Dinâmica da urbanização e transformações territoriais na Amazônia brasileira. *Revista Territórios & Fronteiras*, v. 14, n. 2, p. 220-239, 2021.
- SILVA, H. P. Urban planning and vulnerability in São Félix do Xingu. *Revista Gênero e Interdisciplinaridade*, v. 5, n. 5, p. 228-252, 2024.
- SILVA, R. R.; SIQUEIRA, E. Q.; NOGUEIRA, I. S. Impactos de efluentes de laticínios no Rio Pomba. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, p. 217-228, 2018.
- SILVEIRA, K. A. et al. Contaminação no lençol freático por fossas rudimentares. *Caderno Progressus*, v. 3, n. 5, p. 40-47, 2023.
- Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR. Relatório nacional de gestão de resíduos sólidos. 2019.
- SOARES, M. D. R. et al. A influência da contaminação do cemitério de Humaitá-AM nas áreas adjacentes. 2023.
- SOUZA, M. P; SILVA, A. R; DE OLIVEIRA SOUZA, Emilyn. Acabou a água? Estudo analítico sobre possível crise hídrica no Brasil. 2023.

- SOUZA, C. J; SIQUEIRA, G. W. Impactos ambientais de efluentes industriais: frigorífico São Francisco em Redenção-PA. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 12, n. 1, 2023.
- TEIXEIRA, A. G. T. Análise da cadeia produtiva do abacaxi e mandioca em Novo Remanso, Itacoatiara-AM. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, 2025.
- TIBÚRTIO, E. R L; PERALTA-ZAMORA, Patrício; LEAL, Elenise Sauer. Contaminação de águas por BTXs e processos de remediação. *Química Nova*, v. 27, p. 441-446, 2004.
- TSUTYA, S. Engenharia e perfuração de poços tubulares profundos. 2. ed. São Paulo: IPT, 2010.
- TUCCI, C. E. M. Gestão da drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 1, p. 5-15, 2008.
- UNESCO. *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater*. Paris: UNESCO, 2022.
- VASCONCELOS, M. B. Poços para captação de águas subterrâneas: revisão de conceitos e nomenclatura. *Águas Subterrâneas*, 2014.
- VIEIRA, M. R. S. et al. Impactos socioambientais dos cemitérios de Manaus. *Revista Contemporânea*, v. 4, n. 2, 2024.
- VIOTTI, P.; GAVASCI, R. Scaling of ammonia stripping tower in treatment of groundwater polluted by landfill leachate. *Revista Ambiente & Água*, v. 10, n. 2, 2015.
- ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. *Águas Subterrâneas*, 2008.
- ZOBY, J. L. G.; MATOS, . Águas subterrâneas no Brasil e sua inserção na Política Nacional de Recursos Hídricos. *Águas Subterrâneas*, 2002.

ANEXO

Códigos	Lat_ut m	Long_ut m	Nível_ estático	Profundida de	Parametro- 1_G	Parametro _2_O	Parametro _2_D	Índice_ GOD	Classificação _GOD
1300000406	339615	9652605	7	32,5	0,6	0,7	0,8	0,33	Moderada
1300000408	339397	9654110	3.3	20	1	0,7	0,9	0,63	Ata
1300000411	340108	9653343	12	161	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000412	340108	9653312	12	162	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000414	339678	9652329	5.5	118	0,6	0,8	0,8	0,38	Moderada
1300000415	340789	9652423	13	126	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000416	348878	9652433	12	159	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000417	340694	9653958	14	158	0,6	0,8	0,8	0,38	Moderada
1300000418	340078	9653251	21	170	0,6	0,7	0,7	0,29	Baixa
1300000685	339461	9652267	12	45	0,6	0,8	0,8	0,38	Moderada
1300000687	340234	9651654	1,3	60	1	0,5	1	0,50	Moderada
1300000689	340664	9653559	10	12	0,6	0,7	0,8	0,33	Moderada
1300000692	255094	9701958	4,5	83	1	0,8	0,9	0,72	Extrema
1300000732	272160	9678147	8	15	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000733	271603	9678791	12	22	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300000800	274695	9644356	15	40	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300000800	274695	9644356	15	40	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300001834	341155	9654333	13	140	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300001836	338641	9652116	16	148	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300001837	340399	9653469	14	172	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300001838	339101	9653630	4	31	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300001839	339138	9653648	2.4	12,5	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300001840	339335	9651925	18	178	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300001841	339837	9652425	18	162,4	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300002938	334335	9653734	26	180	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa
1300003376	275101	9644110	4.6	13	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003377	275125	9644766	18	120	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003378	275126	9644826	18	120	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003380	275203	9643920	12	36	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003425	275526	9643784	12	45	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003426	277826	9642774	10	60	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003428	275321	9644294	6.75	10	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003431	275097	9644172	8.45	10,65	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003433	275135	9645334	5.8	9,3	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003478	274778	9644874	7.6	16	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003480	277479	9657442	4.5	6,7	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003482	261260	9669220	0.9	2,7	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003483	261662	9668324	2.15	5,05	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003484	261724	9668064	1.9	4,7	1	0,5	0,9	0,45	Moderada

1300003485	261841	9668044	0.1	1,85	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003486	266114	9664694	11.4	19	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003487	266710	9665004	7.9	13	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003489	269327	9665628	1.75	7,15	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003490	271999	9667733	3.8	5	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003491	271020	9667036	6.45	8,25	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003492	278300	9657844	0.48	1,65	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003493	274921	9645568	8.45	9,75	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003494	274921	9644198	8.9	18	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003495	274966	9644756	10	26	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003496	275047	9645100	7.9	18	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003497	277123	9648446	4.2	5,3	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003498	264763	9662864	9.9	14,7	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003499	272282	9678234	2.25	4,1	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003500	271796	9678434	2.05	4,34	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003501	288059	9639662	8	24	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300003502	267700	9659466	9.1	16	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003504	267808	9659692	9	12	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003505	287523	9639838		58	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300003506	290968	9637902	15.5	70	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003507	271924	9678300	3.7	58	1	0,8	0,9	0,72	Extrema
1300003508	266706	9660324	3.5	4,5	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003509	266678	9660380	9.45	12	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003511	267285	9660040	6	7,2	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003512	267722	9659780	0.8	3,3	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003514	274950	9644832	8.05	11,5	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003515	274906	9644846	7.55	11,25	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003516	274929	9644886	7.5	40	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003518	260514	9675428	8.9	9,6	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003519	260599	9675192	5.3	8,6	1	0,5	0,8	0,4	Moderada
1300003520	260695	9673662	6.55	9,05	1	0,5	0,8	0,4	Moderada
1300003523	260860	9670724	0.6	2	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003524	260795	9670664	0.6	8,95	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003525	260688	9670366	3.1	6,4	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003526	260759	9670006	0.9	4,2	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003527	274748	9656302	7.85	10	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003528	276848	9647952	4.1	7,7	0,6	0,5	0,9	0,27	Baixa
1300003530	276802	9653696	2.3	10	0,6	0,5	0,9	0,27	Baixa
1300003532	275229	9644246	8.05	11,05	1	0,5	0,8	0,4	Moderada
1300003533	274845	9644840	7.6	11,8	1	0,5	0,8	0,4	Moderada
1300003534	274832	9644854	7.1	10,9	1	0,5	0,8	0,4	Moderada
1300003535	274875	9644556	7.1	16,45	1	0,7	0,8	0,56	Alta
1300003536	275159	9644556	9.1	15,1	1	0,7	0,8	0,56	Alta

1300003541	276309	9644556	1	2,25	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003550	266362	9644556	0,16	1,5	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003551	266509	9644556	11	12	0,6	0,5	0,9	0,27	Baixa
1300003553	266748	9644556	5,5	8,8	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003555	276370	9644556	4,3	6,65	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003556	268086	9644556	0,1	1	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003557	269207	9644556	1	3,7	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003558	267848	9644556	0,6	3	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003560	274870	9644556	8,3	13	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003562	274779	9644556	7,9	15	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003566	261211	9644556	1,75	3,7	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003567	260913	9644556	7,2	11	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003570	279217	9644556	1,48	5,1	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003603	263041	9644556	13,2	13,6	0,6	0,4	0,8	0,192	Baixa
1300003609	260447	9644556	0,7	2,4	1	0,5	0,9	0,45	Moderada
1300003612	261393	9644556	7,85	10,55	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003613	262805	9644556	13,35	14,85	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300003622	290980	9644556	3	115	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300004462	339305	9644556	3	100	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300004463	339616	9644556	17	114	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300004468	339616	9644556	3,2	26	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300004469	341712	9644556	23	100	0,6	0,8	0,7	0,336	Moderada
1300004470	340603	9644556	21	100	0,6	0,8	0,7	0,336	Moderada
1300004471	341035	9644556	18	100	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300004472	339366	9644556	3	100	1	0,8	0,9	0,72	Extrema
1300004473	340508	9644556	15	100	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300004474	339616	9644556	3,5	100	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300004475	339335	9644556	3	100	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300005184	290984	9644556	3	114	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300005882	339678	9644556	9	40	1	0,5	0,8	0,4	Moderada
1300006371	339459	9644556	22	80	1	0,7	0,7	0,49	Moderada
1300006396	261343	9644556	5	18	1	0,7	0,8	0,56	Alta
1300006407	340790	9644556	10,4	100	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300006456	336270	9644556	22	40	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
1300006998	335075	9644556	28,1	30	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa
1300006999	334983	9644556	20,96	25	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
1300007029	335044	9644556	21,96	30	0,6	0,8	0,7	0,336	Moderada
1300007032	335261	9644556	24,14	30	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
	336959	9644556	24,66	30	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
1300007034	338319	9644556	13,88	24	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300007645	340265	9644556	7	43	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300007729	340234	9644556	7	102	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300007875	336826	9644556	6	30	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa

1300007879	337537	9644556	25	105	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
1300007885	336950	9644556	10	104	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300007971	304177	9644556	20	104	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300007992	304208	9644556	20	104	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300008061	335261	9644556	27	120	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa
1300009051	334663	9644556	15	82	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300009052	341128	9644556	26	154	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa
1300009156	339212	9644556	8	84	0,6	0,8	0,8	0,384	Moderada
1300009325	282863	9644556	26	92	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
1300009343	340111	9644556	10.7	90	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300010187	337135	9644556	58	105	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
1300010194	260911	9644556	26	105	0,6	0,8	0,7	0,336	Moderada
1300010253	274785	9644556	15	100	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300010259	336280	9644556	2.24	65	1	0,7	0,9	0,63	Alta
1300010260	337825	9644556	27	120	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa
1300010282	340111	9644556	10.7	90	0,6	0,5	0,8	0,24	Baixa
1300010293	282863	9644556	26	92	0,6	0,5	0,7	0,21	Baixa
1300011865	308607	9644556	30.05	100	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa
1300011944	340603	9644556	25	120	0,6	0,8	0,7	0,336	Moderada
1300012060	334951	9644556	26	180	0,6	0,8	0,7	0,336	Moderada
1300012087	275631	9644556	13.49	72	0,6	0,7	0,8	0,336	Moderada
1300012100	308237	9644556	35.05	104	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa
1300012116	336126	9644556	25.9	62,08	0,6	0,7	0,7	0,294	Baixa