

Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Luckencia Jean

Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no município de Tabarre,
região metropolitana de Porto Príncipe – Haiti.

Uberlândia
2025

Luckencia Jean

Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no município de Tabarre,
região metropolitana de Porto Príncipe – Haiti.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Geografia da Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do
título de mestre em Geografia.

Área de concentração: Dinâmicas Territoriais e
Estudos Ambientais

Linha 2: Estudos Ambientais e Geotecnologias

Orientador: Prof. Dr. Alan Silveira

Uberlândia

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

J43a
2025 Jean, Luckencia, 1994-
Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no município de Tabarre, região metropolitana de Porto Príncipe – Haiti [recurso eletrônico] / Luckencia Jean. - 2025.

Orientador: Alan Silveira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Geografia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5039>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Geografia. I. Silveira, Alan, 1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Geografia. III. Título.

CDU: 910.1

André Carlos Francisco
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	GEOGRAFIA				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico; Número 564, PPGGEO				
Data:	28 de fevereiro de 2025	Hora de início:	09h:00min	Hora de encerramento:	11h:10min
Matrícula do Discente:	12312GEO017				
Nome do Discente:	LUCKENCIA JEAN				
Título do Trabalho:	A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS AGUAS SUBTERRÂNEAS A POLUIÇÃO NO MUNICÍPIO DE TABARRE, REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO PRÍNCIPE - HAITI				
Área de concentração:	DINÂMICAS TERRITORIAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS				
Linha de pesquisa:	ESTUDOS AMBIENTAIS E GEOTECNOLOGIAS				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se na Sala 1H14 do Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em GEOGRAFIA, assim composta: Professores Doutores: [Thallita Isabela Silva Martins Nazar - UFCAT-GO](#); [Vanderlei de Oliveira Ferreira - IGESC-UFU](#) e [Alan Silveira - IGESC/UFU](#) orientador da candidatura. A Defesa aconteceu de forma presencial.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. [Alan Silveira - IGESC/UFU](#), apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu a Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimeada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de [Mestre](#).

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por Alan Silveira, Professor(a) do Magistério Superior, em 28/02/2025, às 11:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Vanderlei de Oliveira Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior, em 28/02/2025, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por THALLITA ISABELA SILVA MARTINS NAZAR, Usuário Externo, em 28/02/2025, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 6085184 e o código CRC F62F3EFE.

Luckencia Jean

Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no município de Tabarre,
região metropolitana de Porto Príncipe – Haiti.

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para obtenção do título de
mestre em Geografia.

Uberlândia, 28 de fevereiro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Thallita Isabela Silva Martins Nazar - UFCAT-GO

Prof. Dr. Vanderlei de Oliveira Ferreira -IGESC-UFU

Prof. Dr. Alan Silveira – IGESC-UFU

Gostaria de dedicar este trabalho a:

Minha mãe, Soline Joseph, que sempre me apoiou e encorajou, apesar dos altos e baixos, sabendo que, por mais esforço que eu faça, nunca conseguirei retribuir nem mesmo uma gota dos oceanos de amor e felicidade que ela me proporcionou durante todos os anos de estudo.

Em memória da minha tia, Yvette Jacinthe, que infelizmente faleceu em 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão a Deus, pela força e coragem que ele me concedeu ao longo do estudo.

Gostaria de manifestar minha profunda gratidão ao Grupo Coimbra das Universidades Brasileiras de Mobilidade Internacional (GCUB-Mob) pelo seu compromisso com a educação internacional. Graças ao seu programa de bolsas de estudos para estudantes estrangeiros, tive a honra de ser selecionado e integrar o grupo de beneficiários.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior no Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001, pela bolsa concedida durante os dois anos do curso, assim como à Fundação Conhecimento e Liberdade do Haiti (FOKAL) pelo apoio financeiro deste trabalho.

Minha gratidão vai para a equipe pedagógica e técnica do Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva (IGESC) e do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO) da Universidade Federal de Uberlândia, pela qualidade do ensino que recebi ao longo da minha formação.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Dr. Alan Silveira, que me guiou e apoiou ao longo da realização deste trabalho, oferecendo conselhos valiosos e compartilhando seu conhecimento e experiência. Sua ajuda eficaz, disponibilidade, orientações regulares, múltiplas e seu amor pelo trabalho bem feito foram fundamentais.

Meus agradecimentos também se dirigem aos responsáveis pelas diferentes instituições no Haiti que contribuíram para a realização deste trabalho:

- Professor Edouard Guito, Diretor Geral da Direção Nacional de Água Potável e Saneamento (DINEPA), por me permitir acessar as informações relativas aos furos perfurados no município de Tabarre.
- Professor Karnold Henry, Diretor de Operações do Centro Técnico de Exploração da Região Metropolitana de Porto Príncipe (CTE-MPP) da DINEPA, por me fornecer os dados disponíveis sobre os furos perfurados.
- Professor Pascal Adonis, Diretor do laboratório do Centro Técnico de Exploração da Região Metropolitana de Porto Príncipe CTE-MPP da DINEPA, pela colaboração ao disponibilizar os resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas dos furos de Tabarre.

Gostaria de expressar também minha gratidão aos Professores Vanderlei de Oliveira Ferreira e Silvio Carlos Rodrigues pelas críticas construtivas, conselhos e apoio na realização deste trabalho.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Professor Luiz Antônio de Oliveira por sua disponibilidade, paciência e valiosos conselhos no tratamento dos dados físico-químicos. Sua expertise e acompanhamento constante contribuíram significativamente para a qualidade e o rigor científico deste trabalho.

Meus agradecimentos vão ainda à minha família, sempre presente para me acompanhar: minha mãe, Soline Joseph, minha irmã, Solita Joseph, meu filho, Kender Medley Joseph, e meu companheiro, Jordinio Hyppolite, pelo apoio moral inestimável, encorajamento constante, paciência e amor incondicional, que me permitiram superar desafios e avançar ao longo deste estudo.

Sou profundamente grata aos meus amigos e colegas da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio, camaradagem e conselhos valiosos. Sua ajuda preciosa, seus conselhos perspicazes e os momentos compartilhados contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos professores da Ecole Nationale de Géologie Appliquée (ENGA), Michael Sainbertil, Samuel Geneas, Hermin Jean Louis e David Telcy, assim como aos meus amigos e colegas no Haiti, pelo apoio inestimável, disponibilidade, conselhos valiosos e benevolência ao longo deste estudo.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que, de perto ou de longe, contribuíram para a elaboração deste trabalho, embora não possa citá-las todas aqui.

RESUMO

O município de Tabarre está inserido no aquífero da planície de Cul-de-Sac (PCS), que é utilizado para o abastecimento público da região metropolitana de Porto Príncipe, no Haiti. O município passa por um intenso aumento populacional, acompanhado de uma urbanização desordenada, sobretudo a partir do impactante terremoto ocorrido no ano de 2010. O objetivo deste estudo foi avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no município de Tabarre, utilizando o método DRASTIC, que faz uso de um sistema paramétrico de 7 variáveis, culminando na organização de um produto cartográfico. A metodologia contou com quatro etapas de desenvolvimento, que envolveu a aquisição de dados (1), o processamento e análise das amostragens de águas subterrâneas (2), a determinação do índice DRASTIC (3); e o mapeamento da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas de Tabarre (4), com uso do software QGIS na escala 1:50.000. Foram avaliadas as águas de 15 furos a partir de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos. Com base nos critérios da OMS e a UE, os resultados adquiridos para os parâmetros físico-químicos estão em conformidade com as normas. Entretanto, os parâmetros bacteriológicos não estão adequados devido à presença de coliformes totais, que variaram de 2 UFC/100 mL a 22 UFC/100 mL nos furos P3, P5, P6, P8, P9, P10, P11, P12 e P15. Além disso, os estreptococos fecais atingiram valores de 4 UFC/100 mL e 3 UFC/100 mL nas amostras dos furos P9 e P10. Entre os 15 furos, 9 deles apresentaram algum resultado inadequado bacteriológico. O mapa apresentou quatro classes com diferentes graus de vulnerabilidade das águas subterrâneas: baixa (< 108), média (108 a 140), alta (140 a 200) e muito alta (> 200). O somatório do percentual das classes de vulnerabilidade muito alta, alta e média registram 72% do total em área, sendo 27% com classe muito alta. Isso se deve as características permeáveis geológicas e hidrogeológicas da região, junto ao contexto geomorfológico de topografia predominantemente plana, que reduz o escoamento superficial nessas planícies e terraços, aumentando assim o tempo de contato dos poluentes com o solo, favorecendo a sua infiltração. A urbanização intensa e a ausência de um sistemas de saneamento básico eficazes também contribuem para aumentar a vulnerabilidade, expondo as águas subterrâneas a um alto risco de contaminação por esgoto doméstico, resíduos sólidos e atividades industriais. O mapa de vulnerabilidade comporta-se como uma ferramenta para auxiliar na proteção dos recursos hídricos subterrâneos contra possíveis poluições. Pode colaborar com decisões futuras relacionadas à gestão da água, garantindo a preservação a longo prazo desse recurso vital para as gerações futuras.

Palavras-chave: recursos hídricos; hidrogeologia; contaminação de aquífero; planície de Cul-de-Sac.

ABSTRACT

The municipality of Tabarre is located in the aquifer of the Cul-de-Sac Plain (PCS), which is used for public supply to the metropolitan region of Port-au-Prince, Haiti. The municipality is going through an intense population increase, accompanied by a disorderly urbanization, especially after the impactful earthquake that occurred in 2010. The objective of this study was to evaluate the vulnerability of groundwater to pollution in the municipality of Tabarre, using the DRASTIC method, which makes use of a parametric system of 7 variables, culminating in the organization of a cartographic product. The methodology had four stages of development, which involved data acquisition (1), processing and analysis of groundwater samples (2), determination of the DRASTIC index (3); and the mapping of the vulnerability to groundwater pollution in Tabarre (4), using the QGIS software at a scale of 1:50,000. The waters of 15 boreholes were evaluated based on physicochemical and bacteriological parameters. Based on the criteria of the WHO and the EU, the results acquired for the physicochemical parameters are in accordance with the standards. However, the bacteriological parameters are not adequate due to the presence of total coliforms, which ranged from 2 CFU/100 mL to 22 CFU/100 mL in the P3, P5, P6, P8, P9, P10, P11, P12 and P15 holes. In addition, fecal streptococci reached values of 4 CFU/100 mL and 3 CFU/100 mL in samples from P9 and P10 holes. Among the 15 holes, 9 of them presented some inadequate bacteriological result. The map presented four classes with different degrees of groundwater vulnerability: low (< 108), medium (108 to 140), high (140 to 200) and very high (> 200). The sum of the percentage of very high, high and medium vulnerability classes register 72% of the total in area, 27% of which are very high class. This is due to the geological and hydrogeological permeable characteristics of the region, along with the geomorphological context of predominantly flat topography, which reduces the surface runoff in these plains and terraces, thus increasing the contact time of pollutants with the soil, favoring their infiltration. Intense urbanization and the absence of effective basic sanitation systems also contribute to increased vulnerability, exposing groundwater to a high risk of contamination by domestic sewage, solid waste, and industrial activities. The vulnerability map behaves as a tool to assist in the protection of groundwater resources against possible pollution. It can collaborate with future decisions related to water management, ensuring the long-term preservation of this vital resource for future generations.

Keywords: water resources; hydrogeology; aquifer contamination; Cul-de-Sac plain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.	22
Figura 2 - Ciclo Hidrológico.	25
Figura 3 - Exemplos de fontes potenciais de contaminação dos aquíferos.	28
Figura 4 - Fluxograma metodológico da pesquisa.	31
Figura 5 - Linhas de falhas ativas no Haiti.	45
Figura 6 - Localização da Planície de Cul-de-Sac entre os maciços da Hotte e da Selle e cordilheiras de Matheux e de Trou d'Eau.	46
Figura 7 - Expansão da área urbanizada do município de Tabarre.	55
Figura 8 - Lixos domésticos na área urbana de Tabarre.	56
Figura 9 - Despejo industrial no rio Grise.	57
Figura 10 - Acúmulo de lixo em canal fluvial.	58
Figura 11 - Mapa de Geologia do município de Tabarre.	60
Figura 12 - Mapa de hidrogeologia do município de Tabarre.	62
Figura 13 - Mapa de hipsometria do município de Tabarre.	64
Figura 14 - Mapa de declividade do município de Tabarre.	66
Figura 15 - Mapa de geomorfológico do município de Tabarre.	68
Figura 16 - Perfis geológico-geomorfológicos do município de Tabarre.	70
Figura 17 - Imagens dos compartimentos de relevo do município de Tabarre.	71
Figura 18 - Gráficos dos parâmetros físico-químicos de furos (campo) – Tabarre.	73
Figura 19 - Gráficos dos parâmetros físico-químicos de furos (laboratório) – Tabarre.	74
Figura 20 - Mapa de grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas.	84
Figura 21 - Classes de vulnerabilidade em porcentagem.	85
Figura 22 - Representação das zonas de vulnerabilidade baixa.	86
Figura 23 - Representação das zonas de vulnerabilidade média.	87
Figura 24 - Representação das zonas de vulnerabilidade alta.	88
Figura 25 - Representação das zonas de vulnerabilidade muito alta.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores e coeficientes dos parâmetros DRASTIC.	39
Tabela 2 - Pesos dos parâmetros DRASTIC.	41
Tabela 3 - Índice do grau de vulnerabilidade.	43
Tabela 4 - Variações totais anuais de temperatura (min, max e média) na estação do Aeroporto Porto Príncipe (2008 – 2018).....	49
Tabela 5- Precipitação total anual na estação do Aeroporto Porto Príncipe (2008- 2018).....	50
Tabela 6 - Determinação dos parâmetros da evapotranspiração real.	52
Tabela 7 - Determinação dos parâmetros de escoamento superficial.....	52
Tabela 8 - Determinação dos parâmetros de infiltração.	53
Tabela 9 - Parâmetro de Profundidade das águas.....	79
Tabela 10 - Parametro de carregamento.	79
Tabela 11 - Parâmetro de natureza da zona saturada.....	80
Tabela 12 - Parâmetro de tipo de terreno ou solo.....	80
Tabela 13 - Parâmetro de Inclinação.	81
Tabela 14 - Parâmetro de natureza da zona insaturada.	81
Tabela 15 - Parâmetro de permeabilidade ou condutividade.....	82
Tabela 16 - Classes de índice do grau de vulnerabilidade.....	83
Tabela 17 - Áreas e porcentagem de classes de vulnerabilidade no município de Tabarre.	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação das temperaturas totais anuais (min, max e méd) na estação do Aéroport Porto Príncipe (2008- 2018).	49
Gráfico 2 - Variação da precipitação total anual na estação Aeroporto Porto Príncipe.	50
Gráfico 3 - Evolução da população de Tabarre, região metropolitana de Porto Príncipe e Haiti (2009 a 2021).	54
Gráfico 4 - Correlação Ca/ Mg.	75
Gráfico 5 - Correlação STD/Ca.	75
Gráfico 6 - Correlação STD/ Mg.	76
Gráfico 7 - Variações bacteriológicas das águas de furos.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Padrões de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos com base nos critérios da OMS e da UE.....	36
Quadro 2 - Cálculo do índice DRASTIC.....	38
Quadro 3 - Fonte principal e localização dos dados de aplicação do método DRASTIC.	42
Quadro 4 - Resultados do cálculo de índice DRASTIC.	83

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	51
Equação 2	51
Equação 3	51
Equação 4	51
Equação 5	51
Equação 6	52
Equação 7	52
Equação 8	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Airport PAP: Aeroporto de Porto Príncipe

BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CNIGS: Centro Nacional de Informações Geoespaciais

CTE-RMPP: Centro de Operações Técnicas, Região Metropolitana de Porto Príncipe

DINEPA: Direcção Nacional de Água Potável e Saneamento do Haiti

EPA: Agência de Proteção Ambiental

ESC: Escoamento

ETP: Evapotranspiração potencial

ETR: Evapotranspiração real

IGESC: Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva

IHSI: Instituto Haitiano de Estatística e Informática

MDE: Ministério do Meio Ambiental do Haiti

MDE: Modelo Digital de Elevação

MDT: Modelo Digital de Terreno

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

OMS: Organização Mundial da Saúde

P: Precipitação

PCS: Planície de Cul de Sac

PPGGeo: Programa de Pós-Graduação em Geografia

SIG: Sistema de Informação Geográfica

STD: Sólidos totais de dissolvidos

T: Temperatura

UE: União Europeia

UFU: Universidade Federal de Uberlândia

UHM: Unidade Hidro Meteorológica

USEPA: Agência de Proteção do Ambiente dos Estados Unidos

WHO: World Health Organisation

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Problema e justificativa	23
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivos específicos	24
2 REFERENCIAL TEORICO-METODOLOGICO	25
2.1 Ciclo hidrológico e as águas subterrâneas	25
2.2 Águas subterrâneas e aquíferos.....	26
2.3 Poluição das águas subterrâneas	27
2.4 Vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição.....	28
2.4.1 Métodos de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição	29
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
3.1 Etapa 1: aquisição de dados	32
3.1.1 Revisão bibliográfica	32
3.1.2 Dados cartográficos	32
3.1.3 Perfis geológico-geomorfológicos	33
3.1.4 Dados de furos e estação meteorológica	33
3.2 Etapa 2: Processamento e análise das amostragem de águas subterrâneas	34
3.2.1 Parâmetros de campo: temperatura, pH, medição de turbidez, e cloretos	34
3.2.2 Parâmetros laboratoriais: condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e nitratos, cálcio, magnésio e ferro.	34
3.2.3 Parâmetros bacteriológicos: Coliformes totais (CT), coliformes fecais (FC), Escherichia coli (EC) e estreptococos fecais (FS).	35
3.2.4 Critérios de análise para os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos.	36
3.2.5 Cálculo STD e tratamento estatístico.....	37
3.3 Etapa 3: Determinação do Índice DRASTIC.....	38
3.4 Etapa 4: Mapeamento do grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas pelo método DRASTIC	43
4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, CONTEXTO POPUACIONAL E AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO	44
4.1 Contexto geológico	44
4.2 Contexto geomorfológico.....	46
4.3 Contexto hidrogeológico.....	47

<i>4.4 Contexto pedológico</i>	<i>48</i>
<i>4.5 Contexto climatológico</i>	<i>48</i>
4.5.1 Balanço hídrico	51
<i>4.6 Contexto populacional e os problemas ambientais</i>	<i>53</i>
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
<i>5.1 O meio físico de Tabarre</i>	<i>59</i>
<i>5.2 A qualidade das Águas Subterrâneas em Tabarre</i>	<i>71</i>
<i>5.3 A vulnerabilidade das águas subterrâneas de Tabarre</i>	<i>78</i>
5.3.1 Valores, coeficientes e índices dos parâmetros DRASTIC	78
5.3.2 A carta de vulnerabilidade das águas subterrâneas	82
6. CONCLUSÃO	91
REFERÊNCIA	93

1 INTRODUÇÃO

O final do século XX marca um período importante em que se registrou o desenvolvimento de uma consciência global sobre a proteção do meio ambiente. Assim, desde o início dos anos 2000, o mundo enfrenta desafios, entre os quais, o de fornecer água potável a todos os habitantes deste planeta (Gilli, 2015). Diante do aumento populacional e da poluição gerada, a água pura está se tornando cada vez mais rara, considerando que a água é indissociável da história e da sobrevivência da humanidade. É uma questão vital, que devemos aprender a administrar e compartilhar (Cavalera *et al.*, 2010).

Em áreas urbanas do Haiti, as águas subterrâneas são muito utilizadas para o abastecimento público. A escassez e irregularidade das chuvas e o aumento da demanda para atender às necessidades crescentes de água potável, agricultura e indústria acentuaram as restrições sobre esse recurso (Renald *et al.*, 2003). A diminuição dessas reservas de águas subterrâneas é agravada pelos problemas relacionados especialmente ao aumento da população, com consequente poluição desse recurso no ambiente (Murat, 2003).

No Haiti é importante a implementação de medidas para proteger as águas subterrâneas da poluição, considerando-se o contexto ambiental atual, ao mesmo tempo em que também se reconhece a necessidade das atividades humanas na sociedade para o desenvolvimento social e econômico do país. Uma das abordagens importantes para prevenir a poluição das águas subterrâneas é a identificação das áreas vulneráveis de um aquífero.

A bacia aluvial da planície do Cul-de-Sac, que abriga a região metropolitana de Porto Príncipe, representa uma das unidades estruturais mais ricas e complexas em termos geológicos e hidrogeológicos, sendo extremamente diversificada quanto o uso da terra (Waite *et al.*, 1999). Nessa região está inserido o município de Tabarre, que representa a área de estudo desta pesquisa.

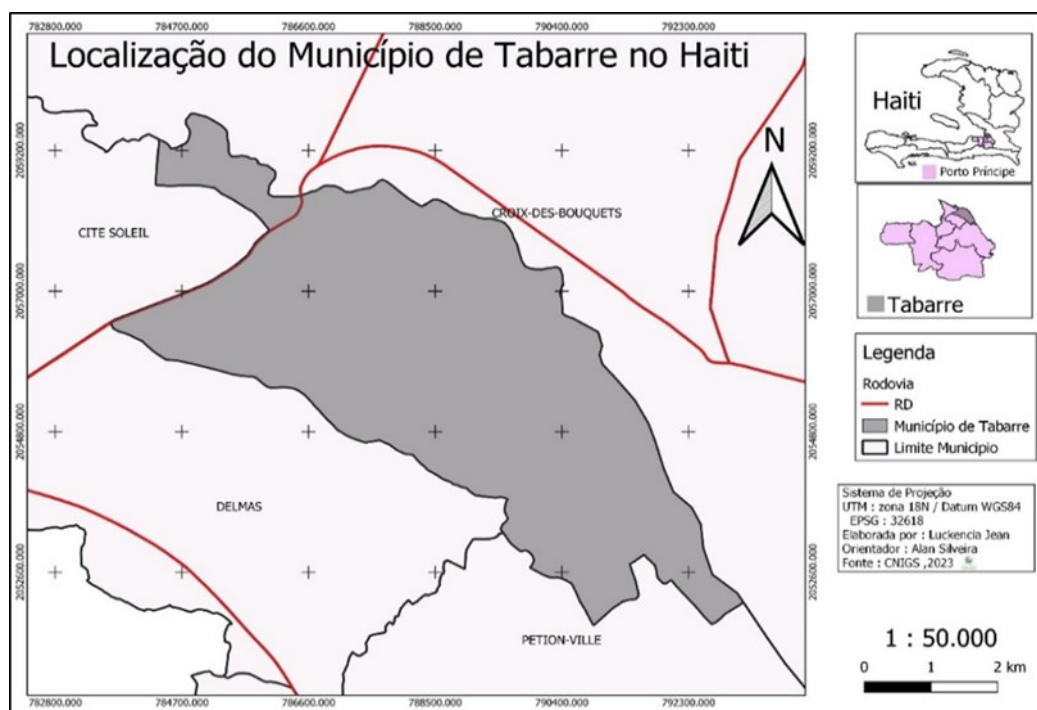
Atualmente, Tabarre vem enfrentando um rápido crescimento descontrolado de sua população, resultando em uma ocupação desordenada de áreas que anteriormente eram utilizadas para a agricultura, mas que agora se tornaram urbanas. A instalação de populações nesses espaços urbanos muitas vezes não é acompanhada pela implementação de sistemas básicos de saneamento, o que coloca em risco a qualidade dos recursos hídricos em geral e das águas subterrâneas, em particular. Ao longo do tempo, os problemas de escassez e poluição da água se agravaram e se tornaram verdadeiros obstáculos para os habitantes da região.

O método DRASTIC foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) nos Estados Unidos em 1987 (Aller *et al.*, 1987) e permite avaliar a vulnerabilidade vertical das

águas subterrâneas à poluição, por um sistema paramétrico (Bézélgues *et al.*, 2002). Este método permite a organização de mapas de vulnerabilidade, que se constituem na síntese do conhecimento dos sete parâmetros que formam a sigla DRASTIC: D - Profundidade da águas (*Depth to water*), R - Carregamento eficiente (*Recharge*), A - Material do aquífero (*Aquifer media*), S - Tipo de terreno ou solo (*Soil media*), T – Topografia ou Declive (*Topography*), I - Impacto da zona não saturada (*Impact of the vadose zone*) e C – Permeabilidade ou Condutividade hidráulica (*Conductivity hydraulic*) (Aller *et al.*, 1987). Determina-se o grau de vulnerabilidade e o potencial poluidor das águas subterrâneas da região com a finalidade de proteger esses recursos (Schnebelen *et al.*, 2002).

Nesse contexto, a pesquisa aborda o tema da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição, a ser avaliada a partir do método DRASTIC, tendo como área investigada o município de Tabarre (Figura 1), que está inserido na região metropolitana de Porto Príncipe. A vulnerabilidade é compreendida como a probabilidade de as águas subterrâneas serem afetadas pela contaminação, levando em consideração a combinação dos fatores naturais e antropogênicos que podem influenciar a qualidade da água ao longo do tempo (Aller *et al.*, 1987).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: CNIGS (2023).

A investigação foi desenvolvida em quatro etapas que envolveram a aquisição de dados bibliográficos, cartográficos, meteorológicos e de furos (1); tratamento e análise das amostragens de águas subterrâneas dos furos (físico-química e bacteriológica) (2); determinação do Índice DRASTIC (3); e mapeamento do grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas (4).

1.1 Problema e justificativa

No Haiti a problemática da água se desenvolve junto a um contexto demográfico, caracterizado por um adensamento populacional, com baixa renda e níveis reduzidos de escolaridade (Emmanuel; Lindskog, 2002). Em uma dinâmica social como essa, a água deve ser percebida não apenas pela disponibilidade per capita, mas também pela qualidade para atender as diferentes necessidades. O contraste entre o volume de água disponível e a crescente demanda não oferece os elementos necessários para compreender o problema da água no país (Emmanuel; Lindskog, 2002).

O município de Tabarre (Figura 1) localiza-se sobre o aquífero da planície de Cul-de-Sac (PCS), sendo um dos mais importantes aquíferos do Haiti, que atende às necessidades de uma população de mais de 2 milhões de pessoas (Adamson *et al.*, 2017), bem como ao setor agrícola, industrial e comercial. Desde o terremoto de 12 de janeiro de 2010, observou-se um crescimento demográfico acompanhado de uma rápida urbanização na zona da planície de Cul-de-Sac (Adamson *et al.*, 2017).

Essa região não possui um sistema adequado de abastecimento de água, eletricidade ou coleta de resíduos sólidos (Northwater International; Rezodlo, 2017). A água subterrânea é de extrema importância na região, pois é a principal fonte de água potável para a maioria dos habitantes da área urbana de Porto Príncipe, utilizada também por alguns agricultores para irrigação dos campos (BRGM, 1989).

A vulnerabilidade da água subterrânea à poluição representa um dos principais desafios, e os efeitos das mudanças globais têm consequências significativas para a saúde pública da população (Daily; Ehrlich, 1996). O aumento exponencial da demanda por água coloca as potencialidades hídricas da região em uma situação de sobre-exploração, agravada pela crescente degradação de sua qualidade devido à poluição (Adamson *et al.*, 2017). O filtro natural formado pelos materiais geológicos geralmente produzem água de boa qualidade (Jourdan *et al.*, 2005), no entanto, o crescimento urbano e os despejos incontroláveis de águas

residuais domésticas e industriais levam a mudanças químicas na água, tornando-a inadequada para consumo (Bouleknafet; Derradji, 2017).

A bacia aluvial da planície de Cul-de-Sac (PCS) ainda não foi objeto de qualquer monitoramento centralizado, bem como não apresenta um sistema controlado de autorização para furos em sua exploração (Adamson *et al.*, 2017). Assim, a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição pode contribuir para uma melhor gestão das águas e respostas adequadas em casos de contaminação. Também permite especificar e identificar as áreas em risco de contaminação por atividades antropogênicas (Miguel; Paim, 2015).

Um vez identificadas as áreas de maior vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas, essas podem ser cuidadosamente orientadas pelos planejadores e utilizadores da terra. Os mapas de vulnerabilidade dos aquíferos são ferramentas padrão para proteger as águas subterrâneas de todas as fontes possíveis de poluição (Smida *et al.*, 2010). Destinam-se a sensibilizar o público em geral e as autoridades competentes para as políticas de proteção e gestão das águas subterrâneas na planície de Cul-de-Sac (PCS), particularmente no município de Tabarre.

Com isso, quais áreas da planície de Cul-de-Sac em Tabarre são mais vulneráveis à contaminação das águas subterrâneas?

1.2 Objetivos

O objetivo principal da pesquisa consistiu em diagnosticar a qualidade e a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no município de Tabarre, localizado na região metropolitana de Porto Príncipe (Haiti).

1.2.1 Objetivos específicos

- Compreender as características do meio físico na área de estudo, em especial as geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e climáticas;
- Analisar a qualidade das águas subterrâneas na área de estudo a partir de dados físico-químicos e bacteriológicos de furos;
- Mapear o grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas na área de estudo a partir do método DRASTIC.

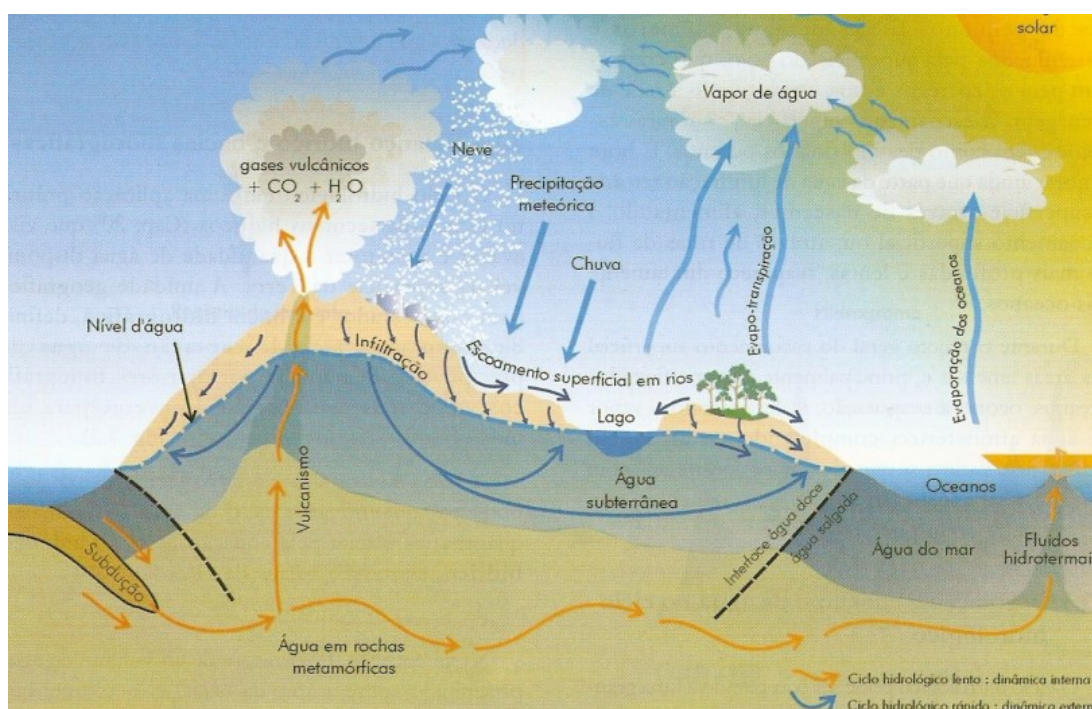
2 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

Nesta parte da dissertação, o foco foi dado a um conjunto de abordagens teóricas desenvolvidas por autores que anteriormente trabalharam no campo da vulnerabilidade das águas subterrâneas. Esta seção é constituída por temas que subsidiaram a metodologia do trabalho.

2.1 Ciclo hidrológico e as águas subterrâneas

O ciclo hidrológico (Figura 2) é o processo central na origem das águas subterrâneas, através do qual a água se move pelas diferentes reservas da Terra: a atmosfera, o glacial, o subterrânea e os oceanos (Sobrinho, 2009). Resulta da interação entre a energia solar, que impulsiona a evaporação, e as forças gravitacionais, que determinam a circulação da água (Feitosa, 1997). Este ciclo inicia-se com a precipitação resultante da condensação do vapor de água atmosférico, gerando a chuva. Uma parte da precipitação retorna à atmosfera por evaporação e evapotranspiração das plantas, e a outra parte infiltra-se no solo por gravidade, alimentando os lençóis freáticos, e deságua nos rios e córregos, muitas vezes indo parar nos oceanos (Teixeira *et al.*, 2000).

Figura 2 - Ciclo Hidrológico.



Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

A água subterrânea encontra-se sob o solo, preenchendo fraturas na rocha ou poros em meios granulares como a areia e o cascalho (Myrand, 2008). Fluem através de formações geológicas subterrâneas e originam canais fluviais a partir de nascentes. O nível freático representa o nível em que as rochas ou os sedimentos estão saturados (Myrand, 2008). Acima deste nível freático existe uma zona não saturada onde a água, tal como a água subterrânea, existe, mas não é geralmente explorada ou classificada como água subterrânea (Ayad, 2017). De acordo com Toth (1999), citado por Gilli *et al* (2015):

[...] as águas subterrâneas são um agente geológico geral; elas desempenham um papel ativo nos processos geodinâmicos, graças à ampla distribuição espacial de seu fluxo e sua forte capacidade de interagir com o meio ambiente (Gilli *et al.*, 2015, p. 9).

As águas subterrâneas estão expostas à poluição proveniente das atividades humanas à superfície. Consequentemente, torna-se imperativo assegurar uma gestão e proteção adequadas dos aquíferos para evitar qualquer forma de contaminação, identificando as principais áreas a proteger e introduzindo medidas de prevenção ambiental.

2.2 Águas subterrâneas e aquíferos

A água subterrânea refere-se à água armazenada nos interstícios das partículas do solo, das formações rochosas e das fissuras (Souza, 2013). Ela se acumula nos espaços vazios, chamados poros, presentes no solo e nas rochas. Essa água pode se deslocar lentamente através das camadas subterrâneas, desempenhando um papel crucial na alimentação dos lençóis freáticos e das nascentes (Souza, 2013). De acordo com Capucci *et al.* (2001), citado por Souza (2013):

[...] aquíferos ou reservatórios naturais de água subterrânea são formações rochosas ou camadas geológicas que armazenam e transmitem água em quantidades economicamente viáveis de extração (Souza, 2013, p.7).

As águas subterrâneas contidas nos aquíferos são essenciais como fonte de abastecimento público, mas a pressão humana sobre este recurso tem aumentado mais rapidamente do que as medidas de proteção ambiental e de controle dos poluentes implementadas pelas autoridades públicas (CETESB, 2014).

2.3 Poluição das águas subterrâneas

A contaminação das águas subterrâneas ocorre quando substâncias nocivas penetram no solo, que as pode absorver como uma esponja. No entanto, estes poluentes atingem frequentemente as águas subterrâneas (CETESB, 2004). Esta poluição pode ocorrer de duas formas distintas: através do transporte de contaminantes pela precipitação, que se infiltra rapidamente até atingir as águas subterrâneas; ou quando os poluentes já estão presentes no aquífero e se deslocam horizontalmente (Silva; Araujo, 2003). Estes poluentes são provenientes de atividades humanas, advindos dos setores doméstico, industrial, agrícola e de mineração (Osório, 2004).

De acordo com Broussaud (2008), citado por Anoh (2015):

[...] A noção de poluição é definida como a introdução direta ou indireta por atividade humana de substâncias e preparações suscetíveis de representar um perigo para a saúde humana e deteriorar os recursos biológicos, o ecossistema ou até mesmo impedir o uso legítimo do meio ambiente (Anoh, 2009, p. 15).

Ainda, segundo Mardhel (2001), citado por Boutaya e Chalal (2017):

[...] fala-se de poluição da água subterrânea em hidrogeologia quando ela perde pelo menos uma de suas funções ou usos e torna-se imprópria para consumo. Isso é avaliado pela medida da diferença entre o "ruído de fundo", que é a concentração de substâncias minerais dissolvidas de origem natural (geológica) caracterizando as águas subterrâneas, e suas características físico-químicas (Boutaya; Chalal, 2017, p. 8).

A variedade de contaminantes nas águas subterrâneas é grande, mas para lá chegarem têm de passar primeiro pelo solo e pela zona não saturada (Silva; Araujo, 2003). Alguns poluentes são capturados na zona não saturada graças ao solo, que atua como um filtro natural, atrasando a sua entrada nas águas subterrâneas (Silva; Araujo, 2003).

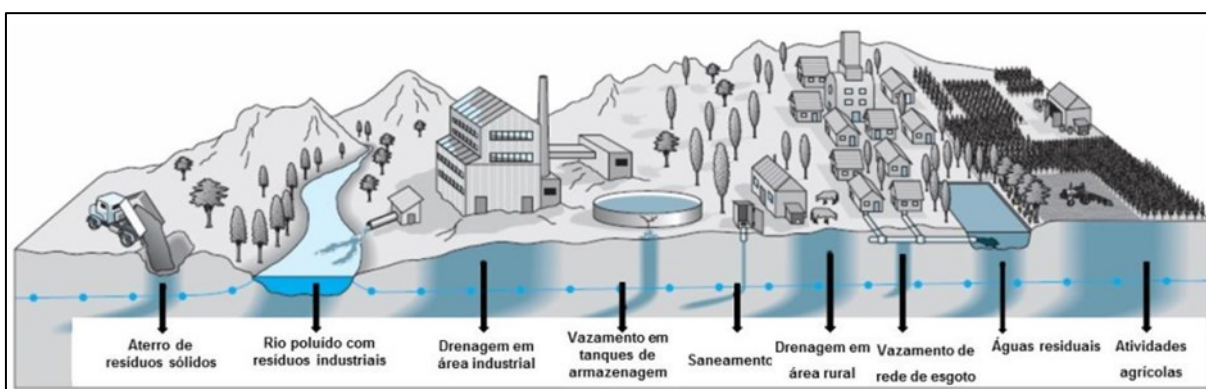
Para Foster *et al.* (2003), citado por Souza (2013):

[...] existem várias causas potenciais de deterioração de aquíferos ou fontes de água subterrânea, sendo as mais comuns o processo de contaminação pela disposição inadequada de resíduos sólidos, infiltração de água de rios contaminados, drenos e instalações industriais, vazamentos de tanques de armazenamento, sistemas de saneamento, vazamentos em redes de esgoto, intensificação da agricultura e drenos de explorações agrícolas (Souza, 2013, p. 13).

As águas subterrâneas podem ser fonte de diversos tipos de contaminação (Figura 3), sejam elas difusas ou pontuais (Foster *et al.*, 2006). A emissão de poluentes numa pequena área

tem um impacto limitado no lençol freático, mas pode propagar-se por difusão, afetando apenas as bacias hidrográficas próximas a jusante. A dimensão da área poluída dependerá da densidade e da solubilidade do poluente, que pode variar em termos de localização e extensão (Anoh, 2009). Se os poluentes se dispersarem por uma grande área, o efeito atinge todo o lençol freático, muitas vezes de forma crônica, ameaçando a qualidade da água potável, a menos que sejam aplicadas medidas de mitigação caras e complexas (Hemidi, 2013). A poluição das águas subterrâneas é mais difícil de ocorrer, se comparamos com as águas superficiais. Entretanto, há dificuldades tecnológicas para descontaminar, além de custos elevados (se comparamos com águas superficiais).

Figura 3 - Exemplos de fontes potenciais de contaminação dos aquíferos.



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

2.4 Vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição

Na década de 1960, a vulnerabilidade das águas subterrâneas foi introduzida na academia, dando início à ideia de uma defesa natural das águas subterrâneas contra a poluição dos solos e rochas (Ertel; Löbner; Silva, 2012). O conceito foi difundido por Le Grand (1964), que identificou poluentes na água ligados a atividades locais, abrindo o debate sobre a sensibilidade dos aquíferos à contaminação por atividades potencialmente poluidoras (Menezes *et al.*, 2014).

Segundo Margat (1991), citado por Boutaya e Chalal (2017):

[...] o termo "vulnerabilidade" remonta aos anos 1960 e foi escolhido para conscientizar a população de que, mesmo que a noção de água subterrânea esteja associada à imagem de pureza, esse recurso ainda é sensível a agentes externos e suscetível à poluição. De acordo com a natureza e a estrutura dos solos e aquíferos, o

conceito de vulnerabilidade pode assumir formas e graus variados para destacar as várias capacidades de resistência natural dos ambientes (Boutaya; Chahal, 2017, p.7).

Le Grand (1964, 1970) e Margat (1968) foram os primeiros a utilizar o termo vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas na França e nos Estados Unidos (Tanajura, 2018). Este termo foi escolhido com o objetivo de sensibilizar para o fato de que, embora a noção de água subterrânea esteja associada a uma imagem de pureza, este recurso é, sensível aos agentes externos e suscetível de ser poluído (Margat, 1991).

Para Margat (1968), citado por Miguel e Paim (2015):

[...] O conceito é definido como a capacidade de um sistema hidrogeológico de transmitir um contaminante potencial desde a superfície do solo até alcançar a zona saturada. O contaminante é transportado a partir da água das precipitações que se infiltra na superfície do solo, percolando através da zona não saturada até alcançar a zona saturada. (Miguel; Pain, 2015, p.16).

Atualmente, muitos investigadores realizaram estudos sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas, um tema que suscita um grande interesse por parte da comunidade científica devido às atividades que se desenvolvem à superfície. Estas atividades dão origem a níveis de poluição cada vez mais preocupantes.

2.4.1 Métodos de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição

Ao longo do tempo, a abordagem da avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas evoluiu graças a diversas contribuições. Essa evolução conduziu ao desenvolvimento de métodos e técnicas que permitem representar graficamente e numericamente esta vulnerabilidade (Aller *et al.*, 1985, 1987). Esse crescimento significativo é atribuível à sua aplicação na gestão dos recursos hídricos, bem como no desenvolvimento de políticas públicas (Aller *et al.*, 1985, 1987). Existem vários métodos para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos tendo em conta as características ambientais (Tanajura, 2018).

O método DRASTIC foi desenvolvido pela Agência de Proteção do Ambiente dos Estados Unidos (USEPA) em 1987 (Aller *et al.*, 1987). Trata-se de um método de avaliação da vulnerabilidade vertical intrínseca dos aquíferos à poluição, utilizando sistemas paramétricos para estimar o potencial de poluição das águas subterrâneas (Schnebelen *et al.*, 2002). O DRASTIC é considerado o método mais utilizado e confiável para avaliar as águas subterrâneas (Aller *et al.*, 1985; Bézélgues *et al.*, 2002).

O método GOD foi desenvolvido no Peru por Foster em 1987, que mostra a vulnerabilidade do aquífero à percolação vertical de poluentes na zona não saturada. O método

baseia-se em três parâmetros: G - grau de confinamento das águas subterrâneas; O - presença de sobrecarga; e D - profundidade do lençol freático, formando o acrônimo GOD. O objetivo desse método é fornecer uma estimativa rápida da vulnerabilidade de um aquífero (Foster, 1987; Tanajura, 2018).

O Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI), desenvolvido no Canadá por Van Stempvoort, Ewert e Wassenaar (1992), visa avaliar o tempo potencial de deslocamento dos poluentes em função de dois fatores principais: espessura (d) de cada estrato sedimentar presente na zona saturada do aquífero; e a condutividade hidráulica (K) destes estratos (Van, Ewert; Wassenaar, 1992).

Neste sentido, o método DRASTIC (Aller *et al.*, 1985; 1987) é uma das abordagens mais utilizadas a nível mundial para avaliar a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas (Samake *et al.*, 2011). Por isso, na presente pesquisa optou-se pelo método DRASTIC, aliado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com a finalidade de contribuir para uma efetiva gestão e proteção dos recursos hídricos.

Vários estudos foram realizados sobre o método DRASTIC, que é amplamente reconhecido por avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição. No entanto, no Haiti, esse método ainda não foi amplamente adotado nem aplicado de maneira sistemática. Aller *et al.* (1987) utilizaram o método DRASTIC para avaliar o potencial de poluição das águas subterrâneas com base no contexto hidrogeológico na cidade Norman, nos Estados Unidos. Segundo Samake *et al.* (2011), o método DRASTIC foi utilizado para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no aquífero raso da bacia de Linfen, na China. Drias e Toubal (2015) aplicaram esse método para mapear a vulnerabilidade à poluição do aquífero aluvial de Tébéssa-Morsott, na Argélia.

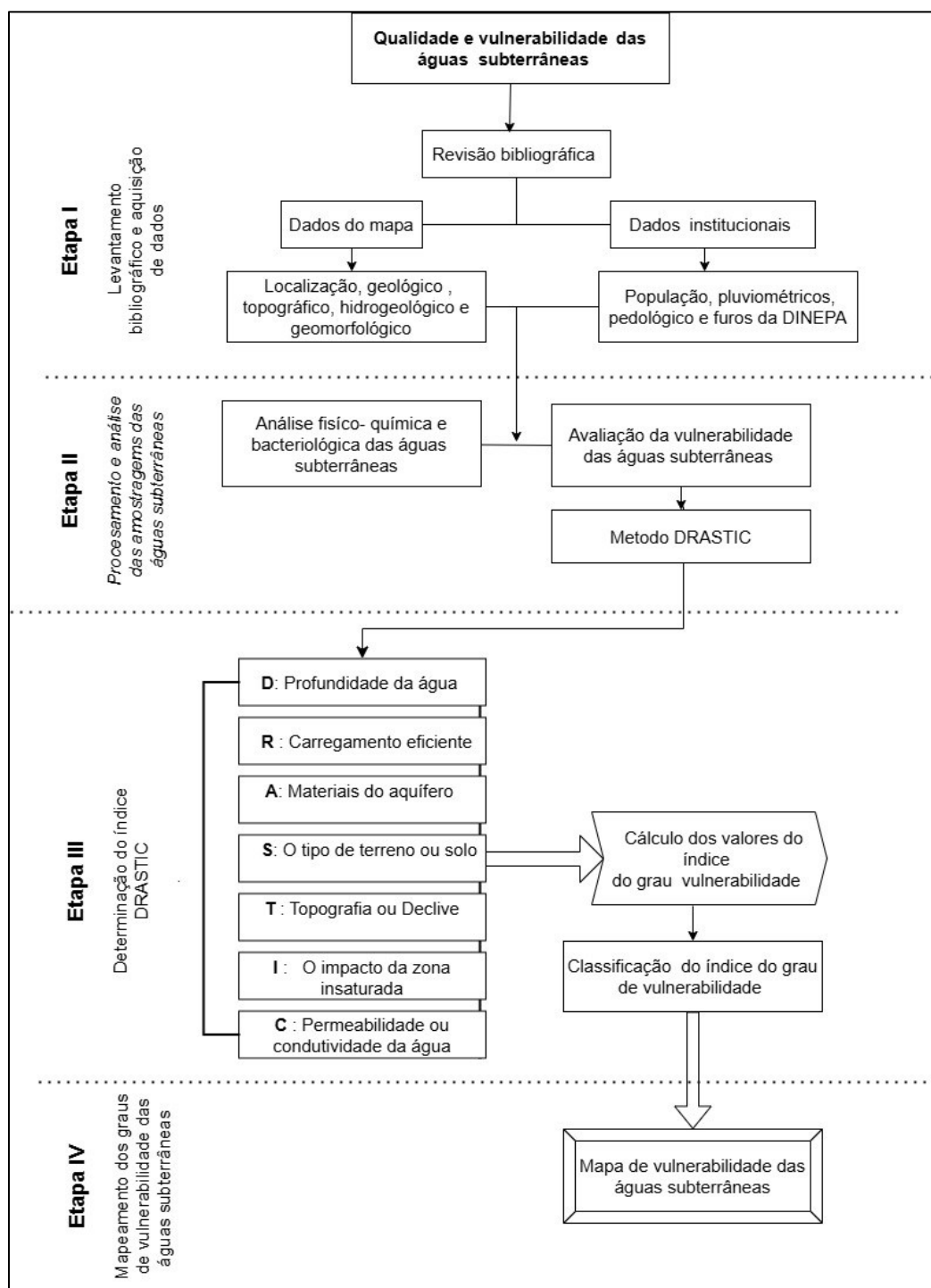
No Brasil, Santos, Marque e Sturano (2016) aplicaram esse método para avaliar a vulnerabilidade do sistema aquífero guarani à contaminação no município de Ribeirão Bonito, região central do Estado de São Paulo. Tanajura (2018) escolheu o DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região do Sistema Jacaré-Tietê, no estado de São Paulo.

Com isso, conjunto desses estudos demonstra a importância e a ampla aplicação do método DRASTIC na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição. Portanto, esse método foi aplicado no presente estudo para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição no município de Tabarre, região metropolitana de Porto Príncipe, no Haiti.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A fim de atender os objetivos da pesquisa, a investigação foi desenvolvida em quatro etapas, as quais estão ilustradas no fluxograma metodológico abaixo (Figura 4) e descritas na sequência do texto.

Figura 4 - Fluxograma metodológico da pesquisa.



3.1 Etapa 1: aquisição de dados

3.1.1 Revisão bibliográfica

Consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica de variadas fontes, incluindo literatura acadêmica, teses universitárias e artigos científicos sobre o método e aplicações do DRASTIC, a fim de coletar informações pré-existentes para a realização deste trabalho. Além disso envolveu a revisão dos temas apresentados no capítulo anterior, que trata do arcabouço teórico-metodológico.

3.1.2 Dados cartográficos

Os dados cartográficos foram extraídos do Centro Nacional de Informações Geoespaciais (CNIGS) e do Haiti Data (HAITIDATA), sendo processados no software Qgis 3.16.0, na escala 1:50.000. Com essas informações, os seguintes documentos foram organizados:

- Mapa de Localização: instrumento usado para localizar e delimitar a área de estudo (Figura 1).

- Mapa Geológico: representa as formações geológicas encontradas em diferentes locais da área de estudo.

- Mapa Geomorfológico: representa os compartimentos de relevo da área de estudo.

- Mapa Hidrogeológico: representa as diferentes formações hidrogeológicas, que determinaram os parâmetros hidrogeológicos.

Ainda foram produzidos os mapeamentos morfométricos:

- Mapa Hipsométrico: representa as diferentes classes de altimetria da área de estudo. Foi criado a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizando a ferramenta Raster > Análise > Reclassificar por intervalos, para representar as diferentes classes de altimetria.

- Mapa de Declividade: representa em classes o gradiente de vertentes da área de estudo. Foi elaborado com a ferramenta Raster > Análise de Terreno > Declividade, gerando classes de gradiente de vertentes para a área de estudo.

3.1.3 Perfis geológico-geomorfológicos

Os perfis geológico-geomorfológicos foram estabelecidos utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir da imagem de satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do município de Tabarre como ponto de partida. Posteriormente, criaram-se os perfis utilizando a ferramenta "Nova Camada de Linha", permitindo traçar com precisão os percursos ao selecionar os pontos da rota. Para a representação visual de cada perfil foi necessário o uso da "Ferramenta de Perfil", que permitiu seguir fielmente suas trajetórias em relação às variações topográficas.

Simultaneamente, o "*Microsoft Paint*" foi utilizado para representar as características litológicas da área. Essa aplicação permitiu desenhar e ilustrar de forma gráfica as diferentes camadas litológicas presentes na região em estudo. Assim, através da integração dessas ferramentas foi possível realizar uma representação dos dados geológicos e geomorfológicos em perfil longitudinal, proporcionando uma visualização das variações de altitude e das características litológicas específicas de Tabarre.

3.1.4 Dados institucionais

No contexto do abastecimento público, furos são estruturas projetadas para captar e explorar água subterrânea armazenada em aquíferos (Kresic, 2017). Essas estruturas são fundamentais para suprir as necessidades de consumo humano, industrial ou agrícola. De acordo com Kresic (2007), os furos são aberturas criadas no solo com o propósito de acessar aquíferos, sendo um meio eficiente de exploração de recursos hídricos subterrâneos.

Foram adquiridos dados de sondagem sobre 15 furos perfurados no município de Tabarre, a partir da Direção Nacional de Água Potável e Saneamento do Haiti (DINEPA). As águas coletadas nestes 15 furos receberam tratamento físico-químico e bacteriológico, também tratados em laboratório da DINEPA.

Além dos dados de sondagem, físico-químico e bacteriológico, buscaram-se dados meteorológicos da estação hidrometeorológica do Aeroporto de Porto Príncipe, localizado no interior da área de estudo. Com esses dados foi calculado o balanço hídrico pelo método Thornthwite (1948), a fim de calcular a quantidade de água infiltrada no solo de forma abrangente para determinar o parâmetro R.

Também foram coletados dados pedológicos do Ministério do Meio Ambiental do Haiti (MDE), além de dados de população do Instituto Haitiano de Estatística e Informática (IHSI) para os anos de 2009, 2015 e 2021.

3.2 Etapa 2: Processamento e análise das amostragens de águas subterrâneas

Trata-se de uma etapa de processamento de dados adquiridos junto à DINEPA, que realizou as análises físico-químicas e bacteriológicas das águas subterrâneas extraídas dos 15 furos da área de estudo. Os seguintes parâmetros foram avaliados:

3.2.1 Parâmetros de campo: temperatura, pH, medição de turbidez, e cloretos

A temperatura é um fator ecológico essencial no ambiente. O seu aumento pode ter um impacto significativo na vida aquática, provocando poluição térmica (Nedjoud; Saida, 2018). Ela influencia a solubilidade dos sais e gases, o pH, e é útil para determinar a origem da água, bem como possíveis misturas (Rodier *et al.*, 2005).

O pH, ou potencial de hidrogênio é o logaritmo decimal do inverso da concentração de íons de hidrogênio (H^+). Ele é inferior ou superior a 7, dependendo se a água é ácida ou básica (Ayad; Kahoul, 2017).

A turbidez é a redução da transparência da água devido à presença de matéria não dissolvida (detritos orgânicos, argilas, organismos microscópicos, etc.) (Rodier; Legube; Merlet, 2009).

Os cloretos (Cl^-) são ânions inorgânicos importantes encontrados em concentrações variadas nas águas naturais, sendo que a principal fonte de cloretos nas águas é a dissolução de rochas sedimentares (Lebbihi; Derki, 2018).

3.2.2 Parâmetros laboratoriais: condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e nitratos, cálcio, magnésio e ferro.

A condutividade elétrica refere-se à capacidade da água de conduzir uma corrente elétrica. Ela é influenciada pela concentração de substâncias dissolvidas, pela carga iônica, pela capacidade de ionização, bem como pela mobilidade e temperatura da água (Taha, 2021). Assim, a condutividade elétrica indica o nível de mineralização da água (Nouayti; Khattach; Hilali, 2015).

O oxigênio dissolvido (O_2) é um gás incolor, inodoro e insípido à temperatura ambiente, que influencia o estado de vários sais minerais, a degradação da matéria orgânica, assim como a vida dos animais aquáticos (Derwich *et al.*, 2010). Ele desempenha um papel primordial na manutenção da vida aquática e na auto-depuração. Sua presença nas águas naturais é principalmente determinada pela respiração dos organismos, pela atividade fotossintética da flora, pela oxidação e degradação dos poluentes, bem como pelas trocas entre o ar e a água (Bensalah; Benzitoune, 2021).

Os íons nitrato são uma forma natural de nitrogênio, amplamente presentes na natureza (Derwich *et al.*, 2010). Importante para o crescimento das plantas, eles se dissolvem facilmente na água, onde aparecem naturalmente em baixas concentrações (Derwich *et al.*, 2010). O aumento dos níveis de nitratos na água resulta principalmente de seu uso como fertilizante e do lançamento de águas residuais (Nedjoud; Saida, 2018).

O cálcio é um metal alcalino-terroso que desempenha um papel crucial em diversos processos biológicos e ambientais (Dor, 2019). A presença de cálcio contribui para a durabilidade da água, o que pode afetar vários aspectos de sua utilização doméstica e industrial (Nedjoud; Saida, 2018).

O magnésio é um metal alcalino-terroso essencial para a nutrição de plantas e animais (Taha, 2021). Nas plantas, é um componente central da clorofila, indispensável para a fotossíntese, já nos animais, participa de diversas funções biológicas, incluindo a síntese de proteínas e o metabolismo energético (Taha, 2021). Também contribui para a durabilidade da água (Taha, 2021).

O ferro estimula o crescimento das “bactérias do ferro”, que obtêm sua energia da oxidação do ferro ferroso (Fe^{2+}) em ferro férrico (Fe^{3+}) (OMS, 2017). Durante esse processo, essas bactérias depositam uma camada mucosa, frequentemente de cor avermelhada ou acastanhada, sobre tubulações e equipamentos (Abdeselem, 1999). Esses depósitos podem favorecer o crescimento de outros microrganismos, levando a problemas de qualidade da água e corrosão acelerada das infraestruturas (Dor, 2019).

3.2.3 Parâmetros bacteriológicos: Coliformes totais (CT), coliformes fecais (FC), *Escherichia coli* (EC) e estreptococos fecais (FS).

Os coliformes totais são um grupo de bactérias gram-negativas, aeróbias ou anaeróbias facultativas, não formadoras de esporos e oxidase-negativas, que crescem na presença de sais biliares, fermentam a lactose produzindo ácidos, aldeídos e gás a 35°C em 24-48 horas (Alessio;

Pinto; Moura, 2009). Sua presença na água ou alimentos indica contaminação por matéria orgânica (Lebbihi; Derki, 2018).

Os coliformes fecais são bactérias capazes de desenvolver e fermentar a lactose com produção de gás a 44°C em 24 horas, eles estão presentes nos intestinos de animais de sangue quente, incluindo humanos (Henriques, 2017). Sua presença na água ou alimentos é um indicador de contaminação fecal, sugerindo a possibilidade de presença de agentes patogênicos potencialmente perigosos (Ayad; Kahoul, 2017).

A *Escherichia coli* é uma bactéria comum no intestino de mamíferos, incluindo humanos (WHO, 2011). A maioria das cepas é benéfica para a digestão, mas algumas podem causar infecções alimentares graves (Pinto; De Oliveira, 2011). É frequentemente usada para detectar a contaminação fecal na água e alimentos, indicando um risco para a saúde humana (Gurgel; Silva; Silva, 2020).

Por fim, os estreptococos fecais são bactérias do gênero *Streptococcus* frequentemente associadas às fezes de animais de sangue quente, incluindo humanos (Bouleknafet; Derradji, 1027). Eles podem ser usados como indicadores de contaminação fecal no ambiente, especialmente na água (Pinto; De Oliveira, 2011). A presença de estreptococos fecais na água pode indicar poluição por resíduos fecais e potencialmente representar riscos para a saúde humana (WHO, 2011). A contaminação detectada por esses parâmetros bacteriológicos provém de fontes como esgoto não tratado, resíduos domésticos e práticas inadequadas de higiene, representando riscos de poluição para os aquíferos e também para a saúde pública (Bruno *et al.*, 2016).

3.2.4 Critérios de análise para os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos.

Os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos anteriormente apresentados foram avaliados de acordo com as normas padronizadas pela OMS (2017) e UE (2015), os quais estão representados no Quadro 1.

Quadro 1 - Padrões de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos com base nos critérios da OMS e da UE.

Parâmetros	Padrões OMS	Padrões EU	Unidades
Potencial de hidrogênio	> 6.5 < 8.	5 > 6.5 < 9.	pH

Turbidez	< 1	< 1	UTN
Cloretos	< 250	< 250 mg/l	Cl ⁻
Temperatura	PVG	PVG	°C
Condutividade elétrica	< 1200	> 200 < 1100	μS/cm
Oxigênio dissolvido	<10	<10	mg/l O ₂
Nitratos	< 50	< 50	mg/l NO ₃
Ferro	< 0.2	< 0.2	mg/l Fe
Magnésia	< 100	PVG	mg/l Mg ²⁺
Cálcio	< 100	PVG	mg/l Ca ²⁺
Coliformes totais	< 1	< 1	UFC/100 ml
Coliformes fecais	< 1	< 1	UFC/100 ml
Escherichia coli	< 1	< 1	UFC/100 ml
Streptococos fecais	< 1	< 1	UFC/100 ml

Fonte: OMS (2017); UE (2015).

3.2.5 Cálculo STD e tratamento estatístico.

Os sólidos totais de dissolvidos (STDs) foram calculados pelo método indireto, onde $STD = C.E \times 0,55$ (soma dos íons na água: Sódio, Potássio, Cálcio, Magnésio, Cloro) (Oliveira, 2009). A relação cálcio/magnésio também foi estabelecida, assim como as relações STD/Ca e STD/Mg, por métodos estatísticos (Oliveira, 2009).

O coeficiente de determinação, notado como R^2 , mede a proporção da variância de uma variável dependente explicada pelas variáveis independentes (Wooldridge, 2015). Um R^2 próximo de 1 indica uma forte correlação, significando que a maior parte da variação da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes (Wooldridge, 2015). Em contraste, um R^2 próximo de 0 indica uma correlação fraca ou inexistente, sugerindo que as variáveis independentes explicam pouco da variância da variável dependente e que outros fatores ou ruído aleatório influenciam majoritariamente essa variância (Montgomery; Runger, 2014). Essas análises permitem avaliar a relação entre esses elementos, indicando a força e a direção dessa relação.

3.3 Etapa 3: Determinação do Índice DRASTIC

O método DRASTIC foi desenvolvido na década de 1980 pela Agência de Proteção do Ambiente dos Estados Unidos (USEPA) (Rakotovahoaka, 2007), cujo objetivo é avaliar os riscos de poluição das águas subterrâneas. Este método permite o estabelecimento de mapas de vulnerabilidade que constituem a síntese do conhecimento litológico e hidrogeológico de uma região (Smida *et al.*, 2010).

Conforme mencionado na introdução do trabalho, a sigla DRASTIC corresponde às iniciais de sete fatores determinantes do valor do índice de vulnerabilidade (Bézégues *et al.*, 2002):

- D: Profundidade da águas (*Depth to wate*);
- R : Carregamento eficiente (*Recharge*);
- A: Materiais do aquífero (*Aquifer media*);
- S: O tipo de terreno ou solo (*Soil media*);
- T : Topografia ou Declive (*Topography*);
- I: O impacto da zona insaturada (*Impact of the vadose zone*);
- C: Permeabilidade ou condutividade do aquífero (*Conductivity hydraulic*).

O índice de vulnerabilidade é igual à soma dos produtos (Coeficiente (R) * Peso (W)) dos sete parâmetros DRASTIC conforme demonstrado no Quadro 2:

Quadro 2 - Cálculo do índice DRASTIC.

IDRASTIC=[DR*DW+RR*RW+AR*AW+SR*SW+TR*TW+IR*IW+CR*CW]	
R(Classificação)	Coeficiente do parâmetro (varia de 1 a 10)
W(Peso)	Peso do parâmetro

Fonte: Aller *et al.* (1987).

DR: coeficiente da profundidade das águas; DW: peso da profundidade das águas

RR: coeficiente do carregamento; RW: peso do carregamento

AR: coeficiente de materiais do aquífero; AW: peso de materiais do aquífero

SR: coeficiente de tipo de solo; SW: peso de tipo de solo

TR: coeficiente da topografia; TW: peso da topografia

IR: coeficiente do impacto da zona insaturada; IW: peso do impacto da zona insaturada

CR: coeficiente da permeabilidade; CW: peso da permeabilidade

As notações atribuídas aos coeficientes dos parâmetros DRASTIC são indicadas na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Valores e coeficientes dos parâmetros DRASTIC.

D: Profundidade das águas	
Valor em m	Coeficiente
0 a 6	8
6 a 15	4
15 a 18	4
18 a 21	3
21 a 24	3
24 a 36	2
> 36	1
R: Carregamento eficiente	
Valor em mm	Coeficiente
[100 à 175]	6
[175 à 250]	8
[>250]	9
A: Materiais do aquífero	
Materiais	Coeficiente
Folhelho maciço	2
Ígneas/metamórficas	3
Ígneas/metamórficas intemperizadas	4
Till glacial	5
Arenito acamadado, calcário e folhelho	6
Seqüencial	
Arenito maciço	6
Calcário maciço	6
areia e cascalho	8
S: O tipo de terreno ou solo	

Terreno ou Solo	Coefficiente
Fino ou ausente	10
Cascalho	10
Arenoso	9
Turfoso	8
Argila agregada e/ou contraída	7
Marga arenosa	6
Franco arenoso	6
Marga	5
Silte margoso	4
Franco argiloso	3
Argila margosa	3
Lixo/esterco	2
Argila desagregada e não expansível	1

T: Topografia ou Declive

% declive	Coefficiente
0 a 2	10
2 a 6	9
6 a 8	8
8 a 10	7
10 a 12	5
12 a 18	3
> a 18	1

I: Impacto da zona insaturada

Material Geológico	Coefficiente
Camada confinante	1
Silte/argila	3
Folhelho	3
Ígneas/metamórficas	4
Calcário	6
Arenito	6
Calcário acamadado, arenito, folhelho	6

Areia e cascalho com significantes silte e argila	6
areia e cascalho	8
Basalto	9
Calcário cárstico	10

C: Permeabilidade ou condutividade do aquífero

valor m/s	Coefficiente
[$>9,4 \cdot 10^{-4}$]	10
[$4,7 \cdot 10^{-4}$ à $9,4 \cdot 10^{-4}$]	8
[$32,9 \cdot 10^{-5}$ à $4,7 \cdot 10^{-5}$]	6
[$14,7 \cdot 10^{-5}$ à $32,9 \cdot 10^{-5}$]	4
[$4,7 \cdot 10^{-5}$ à $14,7 \cdot 10^{-5}$]	2
[$4,7 \cdot 10^{-7}$ à $4,7 \cdot 10^{-5}$]	1

Fonte: Aller *et al.* (1987).

A atribuição dos pesos dos parâmetros DRASTIC é ilustrada na Tabela 2, abaixo apresentada:

Tabela 2 - Pesos dos parâmetros DRASTIC.

Símbolo	Parâmetros	Peso
D	Profundidade	5
R	Carregamento eficiente	4
A	Materiais do aquífero	3
S	O tipo de terreno ou solo	2
T	Topografia ou declive	1
I	Impacto da zona insaturada	5
C	Permeabilidade ou condutividade do aquífero	3

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) no Qgis 3.16.0, cada parâmetro foi anotado numa camada, sendo-lhe atribuído o coeficiente correspondente ao seu peso, ou seja, à sua influência na vulnerabilidade do aquífero .

Estas camadas foram posteriormente sobrepostas a uma camada de resultados onde se calculou o índice DRASTIC, que é igual à soma dos produtos (coeficiente * peso) dos sete parâmetros DRASTIC (Aller et al., 1985, 1987), conforme demonstrado no Quadro 2.

Com isso, o Quadro 3 apresenta os dados utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade (Quadro 2) neste trabalho, indicando suas fontes e localização.

Quadro 3 - Fonte principal e localização dos dados de aplicação do método DRASTIC.

Parâmetros		Fonte principal de informação	Localização dos dados na Dissertação
D	Profundade das águas	Dados de furos (DINEPA)	Anexo 1 (p.105)
R	Carregamento eficiente	Dados de precipitação do AIRPAP (UHM)	Contexto climatológico (p.53)
A	Materiais aquíferos	Dados de furos (DINEPA)	Anexo 1 (p.105)
S	Tipo de solo ou terreno	Dados de solo do MDE (2015)	Contexto pedológico (p. 48)
T	Topografia (declive)	Mapa de declividade	O meio físico de Tabarre- (p.66)
I	Impacto da zona não saturada	Dados de geologia	O meio físico de Tabarre- (p.60)
C	Permeabilidade ou condutividade hidráulica	Dados de furos (DINEPA)	Anexo 2 (p.108)

3.4 Etapa 4: Mapeamento do grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas pelo método DRASTIC

A cartografia da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição também foi realizada utilizando o software QGIS 3.16.0, na escala 1:50.000. Os dados dos parâmetros DRASTIC da área de estudo (Quadro 3) foram importados para o QGIS em formato de camadas raster e vetoriais. Com o auxílio da ferramenta *Raster > Conversion > Rasterize (vector to raster)*, essas camadas vetoriais foram convertidas em rasters. Cada raster foi gerado com a mesma resolução e projeção para garantir sua compatibilidade.

Cada parâmetro foi classificado de acordo com os valores definidos pelo método DRASTIC (Tabelas 1 e 2), utilizando a ferramenta *Reclassify by Table*. As classes atribuídas correspondem aos intervalos de vulnerabilidade específicos de cada parâmetro. Após a reclassificação, os rasters foram combinados na *Calculadora Raster* para produzir um mapa que integra todos os parâmetros DRASTIC. O índice DRASTIC foi calculado atribuindo um peso e um coeficiente específicos a cada parâmetro, conforme características da área de estudo (Quadro 3), obtendo assim um raster final, refletindo o grau de vulnerabilidade à poluição.

Este raster final é caracterizado pela divisão dos critérios em classes (Tabela 3), seguida da atribuição de um índice representativo do grau de vulnerabilidade a cada classe (Engel et al., 1996). Esses critérios foram classificados, e sua indexação foi representada por meio de uma simbologia de cores (Tabela 3): as cores quentes (vermelho-amarelo) indicam alta vulnerabilidade à poluição, enquanto as cores frias (verde-azul) sinalizam menor vulnerabilidade (Rakotovahoaka, 2007).

Tabela 3 - Índice do grau de vulnerabilidade.

Graus de vulnerabilidade		índice de vulnerabilidade
1	Vulnerabilidade baixa	[< a 101]
2	Vulnerabilidade media	[101 a 140]
3	Vulnerabilidade Alta	[140 a 200]
4	Vulnerabilidade muito alta	[>para 200]

Fonte: Engel *et al.* (1996).

4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, CONTEXTO POPUACIONAL E AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO

O capítulo é dedicado à uma revisão bibliográfica sobre as características físicas da área de estudo, com destaque às geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas. Além disso, apresenta também o seu contexto populacional e os problemas ambientais.

4.1 Contexto geológico

O conhecimento geológico é um passo muito importante para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, pois permite a identificação de formações litoestratigráficas que comportam aquíferos.

Do ponto de vista geológico, a planície do Cul de Sac (PCS) se aloja em uma sinclinal e um graben, delimitada por duas anticlinais representadas ao sul pelo Maciço da Selle, e a norte pelo Maciço Matheux e a montanha do lago de água (Adamson *et al.*, 2022). As duas cadeias montanhosas são constituídas principalmente por calcário do Eoceno e um leito rochoso basáltico do Cretáceo (Butterlin *et al.*, 1960). Acredita-se que a depressão seja um antigo braço de mar que se encontra em sua posição atual devido a elevações e rebaixamentos do nível do mar ocorridos no início do Quaternário (Northwater International; Rezodlo, 2017).

A planície do Cul-de-Sac também é resultado dos depósitos sedimentares que ocorreram nesta depressão derivados dos dois relevos montanhosos ao entorno (Adamson *et al.*, 2017). O preenchimento aluvial da planície de Cul de Sac é constituída por blocos, seixos de rochas cristalinas e calcárias no interior de uma matriz arenosa mais ou menos fina, por vezes consolidada (Butterlin *et al.*, 1960). Supõe-se que os diferentes níveis permeáveis estejam em contato com o cascalho grosso depositado pelo Rio Grise, e com os depósitos resultantes de fluxos passados que se depositaram na bacia, que constituem aluviões, seixos, margas e areias (Taylor; Lemoine 1949).

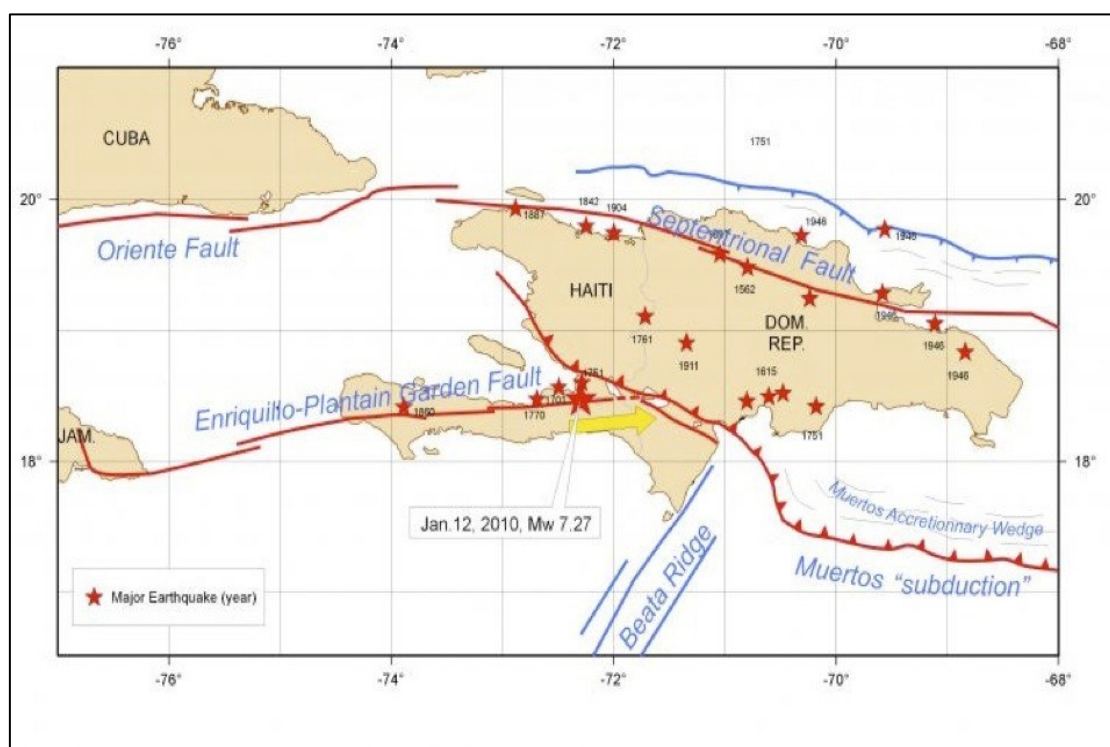
A República do Haiti é cercada por três principais sistemas de falhas que formam a fronteira entre as duas placas: Falhas Enriquillo-Plantain-Garden (EPGFZ) ao sul, a Zona de Falha Este / Setentrional (SOFZ) e a Falha Norte Hispaniola (NHF) ao norte, e um sistema de compressão no centro (Prepetit, 2008) (Figura 5). A Zona de Falha Este/Setentrional, estendendo-se por mais de 800 km, acompanha a costa norte do Haiti e continua em direção ao sul de Cuba, acumulando tensões elásticas a 12 mm/ano (Dolcin, 2022). Ao sul, o sistema de falhas de Enriquillo, com mais de 600 km de comprimento, atravessa a península sul do Haiti

até a Jamaica. Esta falha, com um deslocamento de 7 mm/ano, ameaça cinco departamentos, incluindo Porto Príncipe (Saint Fleur; Klingner; Feuillet, 2014).

A planície Cul-de-Sac é uma unidade complexa construída durante a orogenia, tratando-se de um conjunto de sinclinais por efeito de compressão tectônica (Bowin, 1975). Observa-se na sinclinal, um alinhamento geral do eixo na direção N85° W - S85° E, que se inclina para NW na baía de Porto Príncipe, conforme indicado pelos eixos das linhas batimétricas, formando o eixo do canal de Saint Marc (Woodring *et al.*, 1924).

A região apresenta uma complexidade tectônica, condicionada pela posição de inúmeras dobras, redes de falhas profundas e empurrões ligados a numerosas fases tectônicas compressivas (Bracey; Vogt, 1970). Nos limites das formações, os materiais autóctones são representados pelas formações antigas, enquanto as formações alóctones são compostas por bases aluviais do Quaternário, formando as formações em certos locais da planície de Cul-de-Sac (Butterlin, 1960).

Figura 5 - Linhas de falhas ativas no Haiti.



Fonte: Rembotte (2013).

4.2 Contexto geomorfológico

A República do Haiti tem a forma de uma garra com duas mandíbulas apontando para o oeste. A do norte é curta, de base larga e corresponde à península do Noroeste (Butterlin, 1960). A do sul, chamada de península do sul, é, ao contrário, alongada e estreita (Butterlin, 1960). O relevo desse país é muito acidentado e constitui, no seu conjunto, uma cadeia complexa, constituída por maciços estreitos, verdadeiras cordilheiras, separados por planícies que são, vales sinclinais (Butterlin, 1960; Emmanuel; Lindskog, 2000).

Este complexo montanhoso divide-se em duas unidades distintas. O maciço de la Hotte e o maciço de la Selle encontram-se no sul da península, atingindo a altitude de 2.680 metros (Butterlin, 1960). Na parte norte, por outro lado, encontra-se a cordilheira de Matheux e a cordilheira de Trou d'Eau, que atingem altitudes máximas de 1.600 m e 1.510 m, respectivamente. Estas duas cadeias montanhosas são separadas pela planície e uma depressão com altitude média de 50 metros (Butterlin *et al.*, 1960) (Figura 6).

Figura 6 - Localização da Planície de Cul-de-Sac entre os maciços da Hotte e da Selle e cordilheiras de Matheux e de Trou d'Eau.



Fonte: Google satélite (2023).

4.3 Contexto hidrogeológico

As estruturas geológicas, os tipos de rocha, o contexto geomorfológico e precipitação contribuem para as condições variadas das águas subterrâneas em diferentes partes do país (Waite *et al.*, 1999). As águas subterrâneas podem conter algumas impurezas, as concentrações dessas impurezas naturais dependem da natureza dos materiais geológicos nos quais as águas subterrâneas circulam ou se movem e da qualidade da água de recarga (Waite *et al.*, 1999).

Os recursos hídricos subterrâneos da planície de Cul-de-Sac provêm dessas zonas de recarga, das fontes emergentes dos Maciços de la Selle e dos relevos dos maciços Matheux e montanhas da cisterna (Simonot, 1982). Os maciços calcários que constituem em grande parte o manto sedimentar destes relevos estão muitas vezes sujeitos ao fenómeno de dissolução do carbonato de cálcio (Woodring *et al.*, 1924). São constituídos por cavidades que podem ter mais de dez metros de diâmetro, e estão associados a redes de fraturas que favorecem a circulação subterrânea ao longo das quais se encontram nascentes (Adamson *et al.*, 2022).

A planície Cul-de-Sac abriga um aquífero do tipo aluvial e as águas subterrâneas são encontradas em camadas de sedimentos detríticos do preenchimento da planície (Pierre, 1992). Contido nas grandes enxurradas de areia, cascalho e seixos dos rios e ribeiras, o aquífero aluvial é o local privilegiado de conexões com cursos de água e zonas úmidas (Evens; Lindskog, 2000). Este tipo de aquífero pode ser reabastecido por inundações e, inversamente, repor a água dos rios em épocas de seca. Os depósitos de areia e cascalho formam os melhores aquíferos porque são muito permeáveis, ou seja, permitem que a água circule facilmente (Adamson *et al.*, 2022). A essas camadas de sedimentos são adicionados recifes porosos e permeáveis que também armazenam água (Waite *et al.*, 1999).

A água subterrânea em depósitos aluviais é normalmente encontrada em camadas de areia e cascalho de 1 a 8 metros de espessura, separadas por camadas de lodo e argila (Taylor; Lemoine, 1949). Os depósitos aluviais são em grande parte capturados para abastecimento doméstico e localmente por poços de irrigação. Água salobra ou salina é geralmente abundante em aquíferos aluviais perto da costa e na planície Cul-de-Sac, por efeito da água do mar (Taylor; Lemoine, 1949).

Apesar da significativa vazão do rio Grise (95 milhões de metros cúbicos por ano) e da significativa infiltração deste curso de água, o balanço hídrico da planície do Cul-de-Sac mostra que os aportes subterrâneos dos maciços seriam da ordem dos 17 milhões de metros cúbicos/ano (Adamson *et al.*, 2022). Esta água é utilizada para fins domésticos e industriais através de poços e operações de perfuração que extraem água a cerca de cem metros de

profundidade aquífero (Teylor, 1949). As formações hidrogeológicas do município de Tabarre consistem em aquífero aluvial com lençol freático livre, aquíferos carbonáticos e zonas aluviais mais produtivas (HAITIDATA, 2023).

4.4 Contexto pedológico

As características pedológicas do município de Tabarre revelam uma predominância de solos aluviais, que se formam pela acumulação de elementos finos transportados pelas águas de escoamento provenientes das colinas circundantes (MDE, 2015). Esses processos de deposição sucessiva promovidos pelos fluxos hídricos, dão origem a solos com propriedades variadas, dependendo da localização e da natureza dos materiais depositados (MDE, 2015). Duas categorias principais são registradas: vertissolos e solos aluviais, cada um apresentando características físicas e químicas distintas (MDE, 2015).

Os vertissolos caracterizam-se por textura argilosa, elevada capacidade de retenção de água e baixa permeabilidade, o que reduz significativamente a infiltração de água em profundidade (Dorvil *et al.*, 2023). Essa particularidade favorece a acumulação de água na superfície, especialmente durante a estação chuvosa, resultando em problemas de encharcamento e riscos de inundações locais (Dorvil *et al.*, 2023).

Os solos aluviais, por sua vez, são frequentemente irregulares e heterogêneos, compostos por uma mistura de materiais finos (areia, silte) e seixos calcários arredondados, refletindo a diversidade geológica das áreas de aporte (Charles *et al.*, 2023). Esses solos apresentam uma cor castanho-escura e uma textura variável, que pode oscilar entre franco-arenoso e franco argiloso, sendo que em algumas áreas a camada de solo pode ser muito fina ou totalmente ausente, revelando afloramentos rochosos (MDE, 2015).

Além disso, o pH dos solos de Tabarre é ligeiramente alcalino, com valores que variam entre 7,0 e 8,0 (MDE, 2015). Essa alcalinidade pode influenciar as propriedades físico-químicas do solo, especialmente a solubilidade e a disponibilidade dos minerais presentes, afetando assim os processos naturais de alteração e troca de elementos (Mercius, 2018).

4.5 Contexto climatológico

A temperatura é um dos elementos fundamentais no estabelecimento do balanço hídrico e na determinação do caráter climático de uma região (Krijn *et al.*, 2013). De acordo com os dados anuais de temperatura média da estação meteorológica do Aeroporto de Porto Príncipe

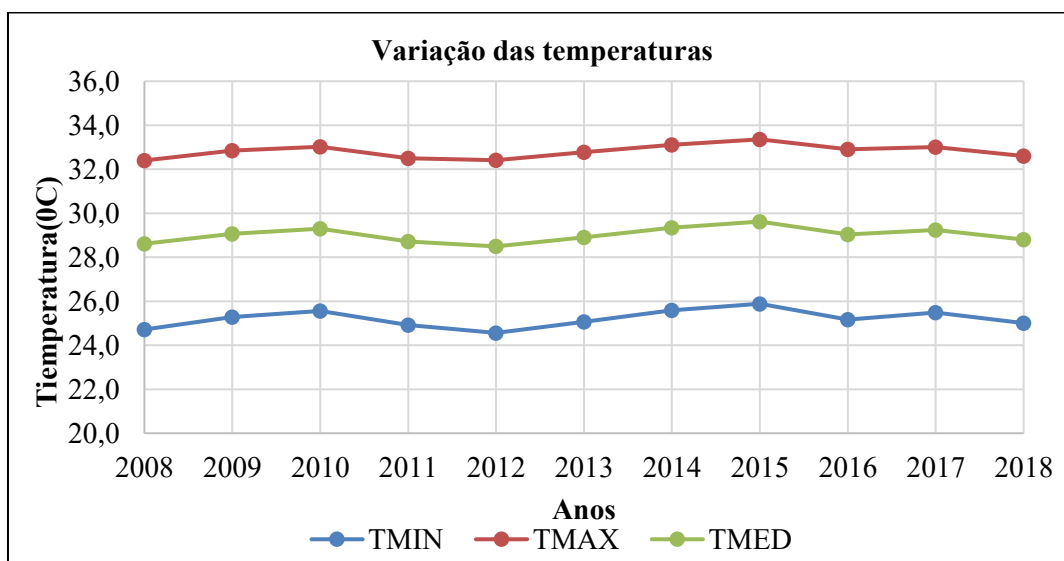
de 2008 a 2018 projetados na Tabela 4 e no Gráfico 1, permitem observar que as temperaturas variam entre 28,5°C e 29,6°C (UHM, 2018).

Tabela 4 - Variações totais anuais de temperatura (min, max e média) na estação do Aeroporto Porto Príncipe (2008 – 2018).

Anos	Tmin	Tmax	Tméd
2008	24,7	32,4	28,6
2009	25,3	32,9	29,1
2010	25,6	33,0	29,3
2011	24,9	32,5	28,7
2012	24,6	32,4	28,5
2013	25,1	32,8	28,9
2014	25,6	33,1	29,3
2015	25,9	33,4	29,6
2016	25,2	32,9	29,0
2017	25,5	33,0	29,2
2018	25,0	32,6	28,8

Fonte: UHM (2018).

Gráfico 1 - Variação das temperaturas totais anuais (min, max e méd) na estação do Aéroport Porto Príncipe (2008- 2018).



Fonte : UHM (2018).

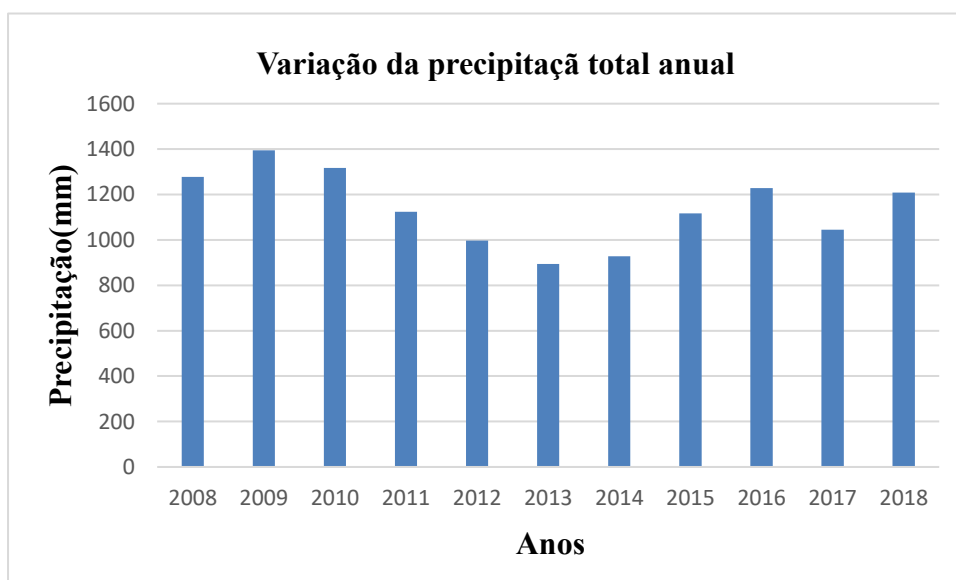
A Tabela 5 e o Gráfico 2 mostram que, em 2009, a região recebeu a maior quantidade de precipitações, com um total anual de 1393,8 mm. Por outro lado, em 2013, a região registrou a menor soma anual de precipitações, com apenas 894,2 mm.

Tabela 5- Precipitação total anual na estação do Aeroporto Porto Príncipe (2008- 2018).

Anos	Precipitação (mm)
2008	1278,1
2009	1393,8
2010	1317,3
2011	1124,1
2012	996,6
2013	894,2
2014	927,2
2015	1116,3
2016	1228,3
2017	1044,3
2018	1209,1

Fonte : UHM (2018).

Gráfico 2 - Variação da precipitação total anual na estação Aeroporto Porto Príncipe.



Fonte : UHM (2018).

4.5.1 Balanço hídrico

O balanço hídrico permite avaliar a distribuição da precipitação entre os diferentes componentes do balanço, como evaporação, infiltração, escoamento, etc (Silva, 2008). O balanço hídrico calculado pelo método Thornthwite (1948) leva em consideração temperatura, precipitação, Evapotranspiração potencial (ETP) e Evapotranspiração real (ETR). É calculado pela seguinte fórmula:

$$P = ESC + ETR + I \quad \text{Equação 1}$$

Onde P é precipitação total anual em (mm), E é escoamento superficial médio anual (mm), E é evapotranspiração média anual (mm) e I é infiltração média anual (mm) (Bouleghlem, 2017).

A evapotranspiração é o conjunto de fenômenos de evaporação (processo físico) e transpiração (processo biológico) (Huo et al., 2013). O termo evapotranspiração engloba dois tipos.

ETP é a soma das quantidades de água que podem evaporar e transpirar sobre uma determinada superfície e durante um determinado período (Junior; Andreoli, 2015). De acordo com Thornthwaite (1948), a ETP é calculada pela fórmula:

$$[(ETP = 16 (10T / I)^a K)] \quad \text{Equação 2}$$

Essa fórmula utiliza a temperatura do ar e a latitude da estação (Marcuzzo; Manzione; Wendland, 2009). É dada pela seguinte expressão:

$$\text{Com: } i = (t/5)^{1,5} \quad \text{Equação 3}$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad a = (1,6/100) I + 0,5 \quad \text{e} \quad K = 1 + 0,06(T - 25) \quad \text{Equação 4}$$

Com ETP é evapotranspiração potencial do ano em (mm), T é temperatura média anual do período (°C), I é índice térmico anual (Martins et al., 2021).

ETR representa a quantidade de vapor efetivamente exportada para a atmosfera pelos solos e plantas (Fernandes, 2015). A fórmula de Turc (1954), permite avaliar a ETR anual a partir da quantidade de chuva e da temperatura total anual, compondo tem a seguinte expressão. O Resultado de sua aplicação pode ser visto na Tabela 6.

$$ETR = P / (0,9 + P^2/L^2)^{1/2} \quad \text{Equação 5}$$

Com ETR é evapotranspiração real em (mm), P é precipitação total anual em (mm), T é temperatura média anual em (°C), L é potência evaporativa, é um limite para o qual o ETR tende quando P se torna grande ($L = 300 + 25t + 0,05t^3$) (Bouleghlem, 2017).

Tabela 6 - Determinação dos parâmetros da evapotranspiração real.

Estaçãoa Aeroporto de Porto Príncipe	Precipitação total anual P (mm)	Temperatura total média anual T (°C)	ETR em (mm)
	1252,9	31,9	688,40

Fonte: UHM (2018).

O escoamento superficial é a quantidade de água que escapa da infiltração e evapotranspiração durante a precipitação (Hemidi; Lotfí, 2013). O escoamento foi calculado pela fórmula Tixeront-Berkaloff (1957). Foi mostrado na Tabela 7.

$$ESC = (P^3 / 3) \times ETP^2$$

Equação 6

Se: $P < 600$ mm Com: E é Escoamento em (mm), P é precipitação total anual em (mm) e ETP é evapotranspiração potencial anual em (mm) (Mohamed; Rekina, 2022).

A fórmula do escoamento Tixeront-Berkaloff foi modificada por Romantchouk (1966):

$$ESC = P^3 / 3 \quad \text{Se: } P > 600 \text{ mm}$$

Equação 7

Como nas estação de medição $P > 600$ mm, aplica-se a segunda fórmula, que dá um escoamento apresentado na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 - Determinação dos parâmetros de escoamento superficial.

Estação Aeroporto de Porto Príncipe	Precipitação total anual P (mm)	Temperatura total média anual T (°C)	Escoamento superficial (mm)
	1252,9	31,9	310,68

Fonte: UHM (2018).

A fórmula geral de Thornthwaite (1948) utilizada para o cálculo do balanço hídrico foi:

$$P = ESC + I + ETR \quad \text{Assim: } I = P - ESC - ETR$$

Equação 8

Com: ESC: escoamento em (mm), P: precipitação total anual em (mm), ETR: Evapotranspiração real em (mm), I: infiltração em (mm).

Com isso, os resultados do cálculo da infiltração estão resumidos na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Determinação dos parâmetros de infiltração.

Estação Aeroporto de Porto Príncipe	Precipitação total anual P (mm)	Temperatura total média anual T (mm)	I em (mm)
	1252,9	31,9	253,82

Fonte: UHM (2018).

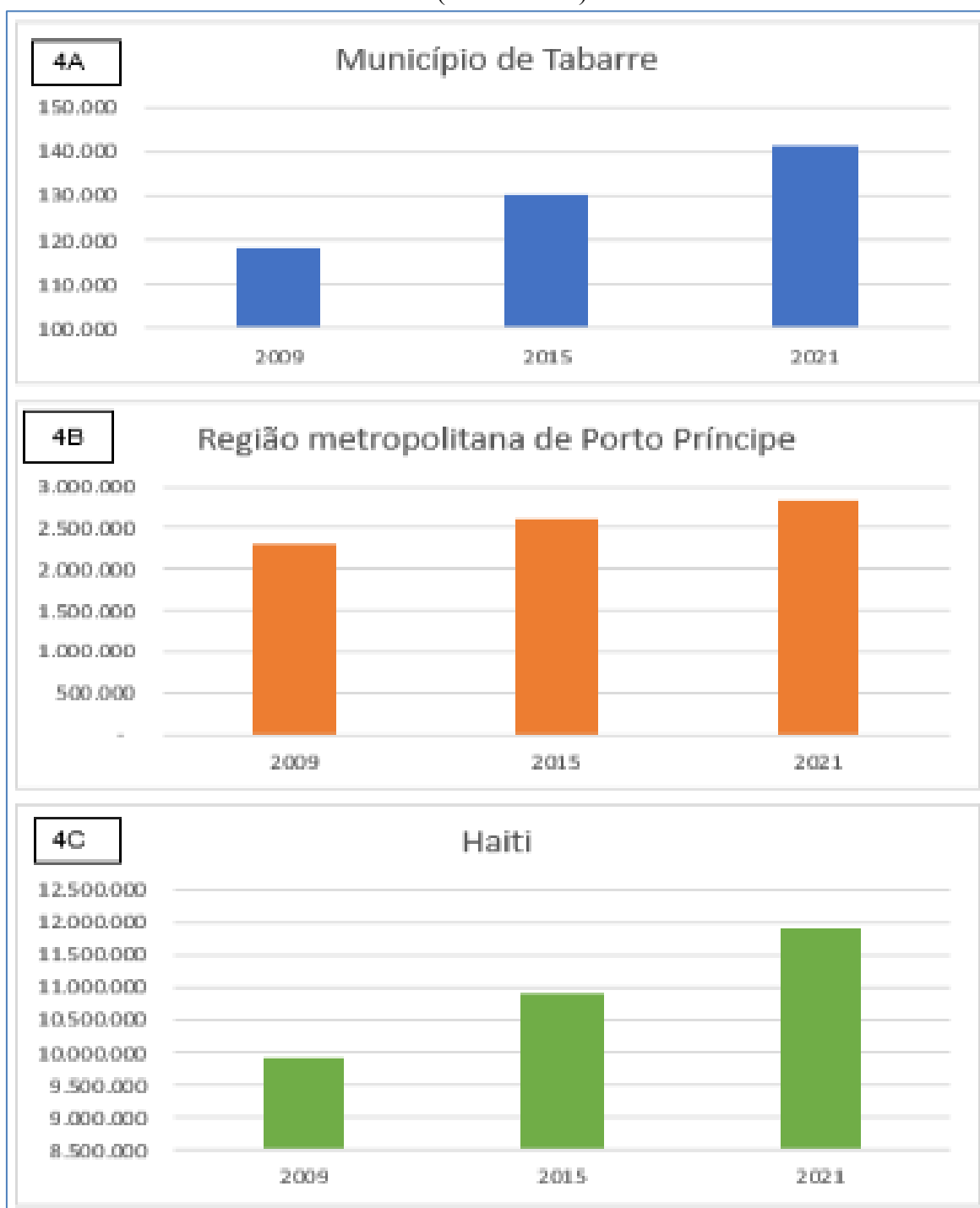
Esse contexto climatológico foi estabelecido com o objetivo de calcular a quantidade de água infiltrada no solo de forma abrangente, a fim de determinar o parâmetro R, que representa a recarga do aquífero na metodologia DRASTIC. Essa metodologia é utilizada para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos à poluição, levando em consideração diversos fatores ambientais, incluindo a infiltração de água, que é essencial para estimar a capacidade de recarga das águas subterrâneas.

4.6 Contexto populacional e os problemas ambientais

A evolução da população de Tabarre, da região metropolitana de Porto Príncipe e do Haiti apresentaram um crescimento significativo entre os anos de 2009, 2015 e 2021.

A população de Tabarre em 12 anos passou de 118.477 (2009) para 141.063 habitantes, o que representa um aumento aproximado de 19,04% em sua população. Já a da região metropolitana de Porto Príncipe partiu de 2.296.386 para 2.835.183 habitantes, enquanto a do Haiti saiu de 9.923.243 para 11.905.897 habitantes. Respectivamente, demonstraram crescimento de 23,46 e 19,9%. Esses dados do Instituto Haitiano de Estatística e Informática (IHSI) também foram projetados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Evolução da população de Tabarre, região metropolitana de Porto Príncipe e Haiti (2009 a 2021).

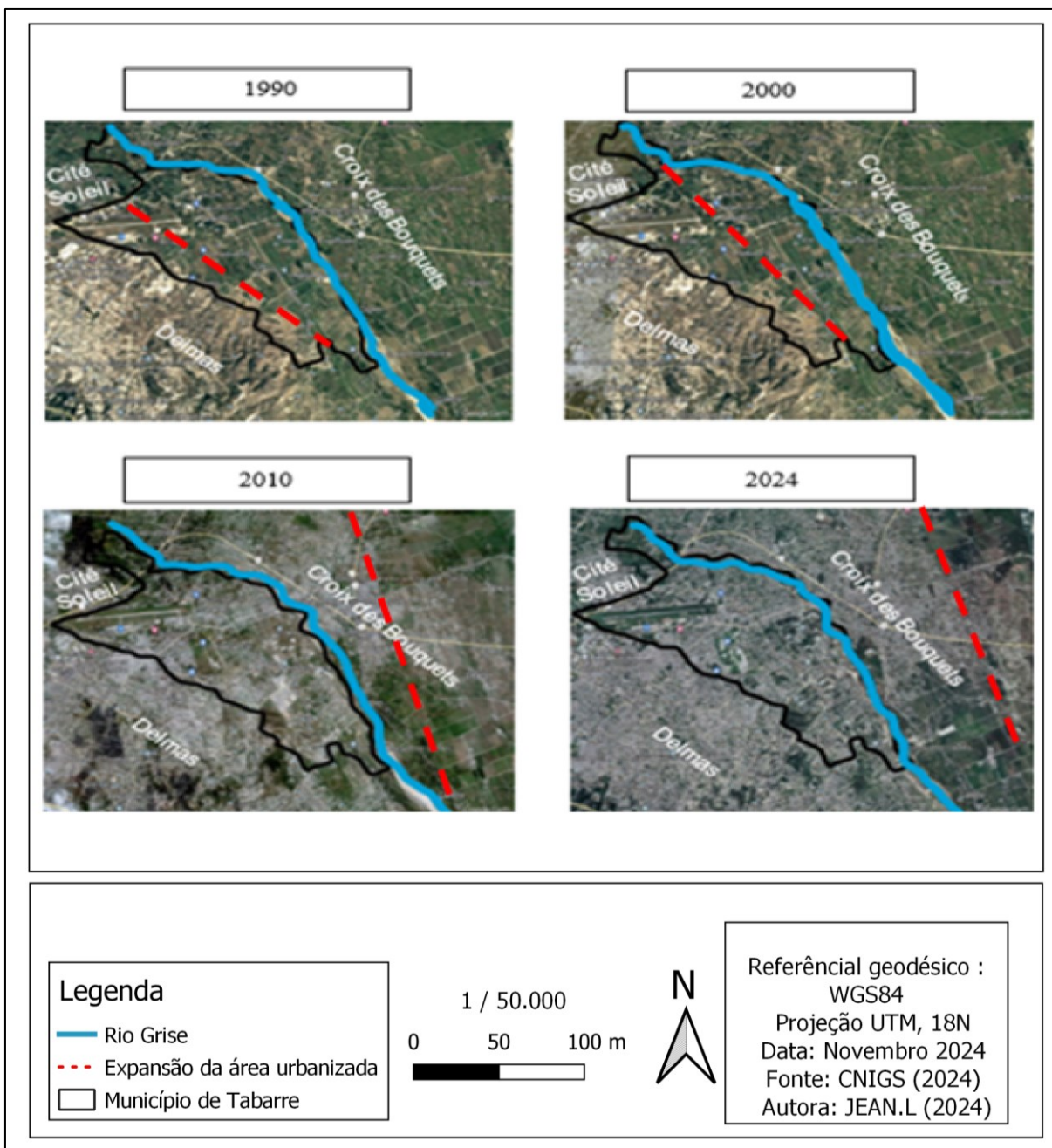


Fonte: Instituto Haitiano de Estatística e Informática (IHSI) (2009, 2015 e 2021).

O município de Tabarre é alvo de um intenso processo de expansão urbana e de instalação de indústrias dos setores de bebidas e alimentícias. Este crescimento não é acompanhado de um sistema básico de tratamento de esgoto, eletricidade e coleta de resíduos. As imagens da Figura 7 ilustram a ampliação das áreas urbanas no município de Tabarre,

considerando os cenários dos anos de 1990, 2000, 2010 e 2024. Essa expansão se estende de sudeste para nordeste, ultrapassando a margem esquerda do rio Grise, já invadindo o município de Croix des Bouquets.

Figura 7 - Expansão da área urbanizada do município de Tabarre.



Fonte: Google Earth Pro (2025).

Na municipalidade de Tabarre, um crescimento urbano desordenado gera diversos tipos de resíduos, ameaçando o meio ambiente e a qualidade da água. Um sistema de saneamento

inadequado ou poços mal conservados podem transferir substâncias indesejáveis para o lençol freático, comprometendo assim a qualidade da água e a saúde pública. A presença descontrolada de resíduos apresenta riscos sanitários devido à contaminação dos recursos hídricos. Os resíduos domésticos, provenientes das atividades diárias, frequentemente se acumulam em aterros não conformes, liberando poluentes que contaminam a água por lixiviação (Figura 8).

Figura 8 - Lixos domésticos na área urbana de Tabarre.



Os resíduos industriais, provenientes de efluentes líquidos, zonas de armazenamento ou vazamentos, também agravam a poluição (Ayad; Kahoul 2016). Algumas atividades industriais, como a indústria alimentícia e as cervejarias, despejam seus efluentes diretamente aos canais fluviais, sem ter tratamento e direção adequada à rede de esgoto. A imagem da Figura 9A revela a presença de um líquido vermelho, despejado por indústria alimentícia local, manchando o

leito do rio Grise, conforme denunciou o jornal Haiti Libre (2020). Enquanto isso, a imagem 9B expõe efluente de indústria cervejeira despejando resíduos sem qualquer tratamento prévio, contaminando diretamente o meio ambiente.

Figura 9 - Despejo industrial no rio Grise.



Fonte: Marco (2020).

Os resíduos pós-catástrofe do terremoto de 2010 são constituídos em grande parte por resíduos inertes (resíduos de construção) (Popescu; Durand; D'ercole, 2014). No entanto, isso não reduz os seus riscos, pois podem assumir outra magnitude quando obstruem cursos d'água e tubulações e, assim, causam uma mudança maciça nos fluxos de água. As inundações e os deslizamentos de terras são os primeiros riscos relacionados com os resíduos adquiridos durante as catástrofes (Popescu; Durand; D'ercole, 2014). A imagem da Figura 10 mostra que canais fluviais de Tabarre estão obstruídos por detritos provenientes principalmente de fontes domésticas e materiais de construção, o que pode ter um impacto negativo nos recursos hídricos e no meio ambiente.

Figura 10 - Acúmulo de lixo em canal fluvial.



Fonte: Popescu (2011).

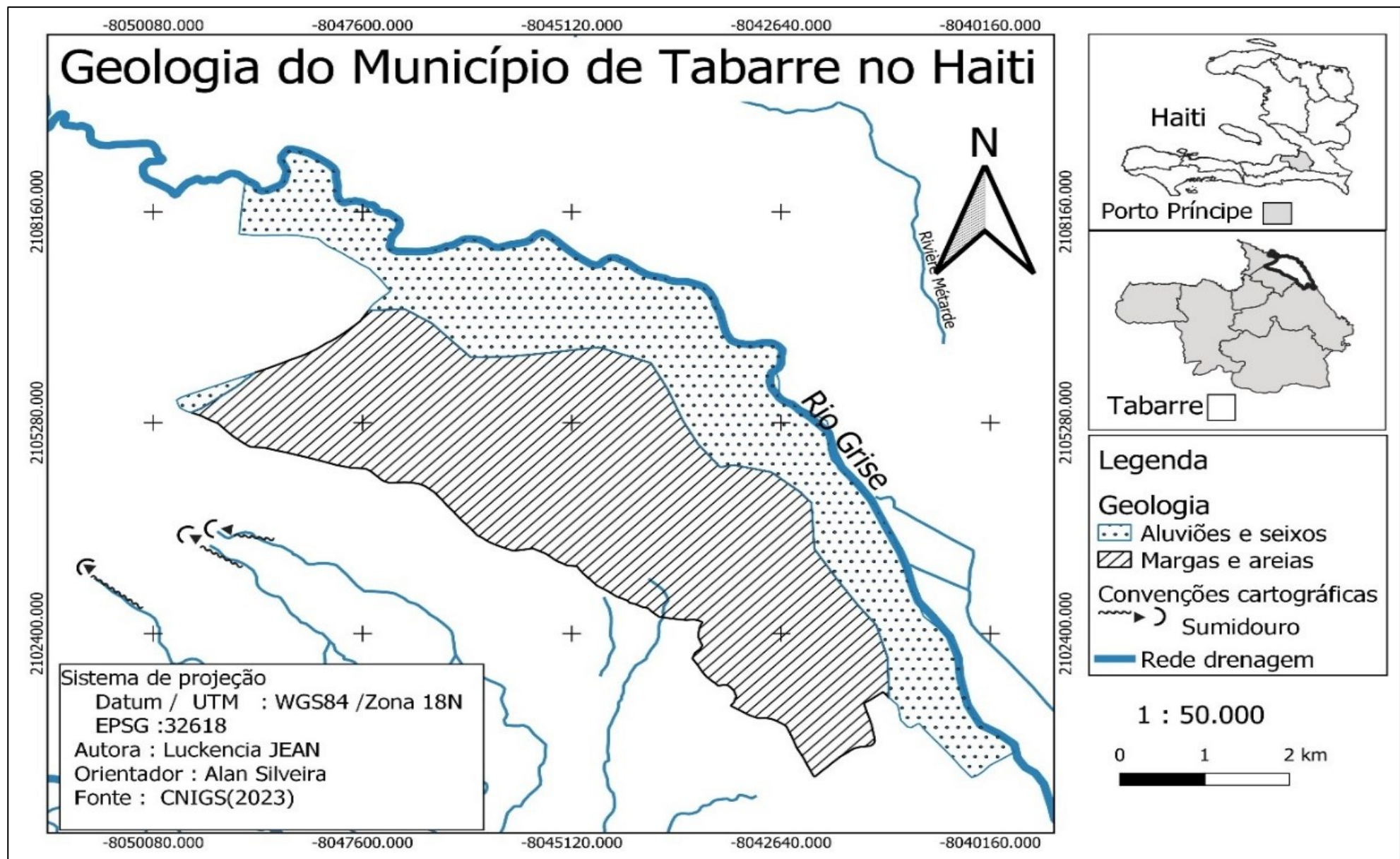
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões apresentadas relacionam-se ao cumprimento das 4 etapas previstas na metodologia, respectivamente vinculadas à organização de mapeamentos para a caracterização do meio físico de Tabarre (5.1); ao tratamento e análise de dados da qualidade da água dos 15 furos, a partir de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos (5.2); e à avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas do município de Tabarre (5.3).

5.1 O meio físico de Tabarre

As características geológicas do Município de Tabarre envolve por um conjunto de depósitos permeáveis da idade do Mioceno e aluviões recentes depositados na superfície (Butterlin *et al.*, 1960). Os níveis permeáveis estão em contato com o cascalho grosso depositado pelos turbulentos rios Grise e com os sedimentos resultantes de fluxos passados que desembocaram na bacia (Adamson *et al.*, 2022). O mapa geológico (Figura 11) mostra que essa área é dominada por aluviões, cascalhos, margas e areias, com importante atuação do rio Grise. Essas formações geológicas indicam uma variedade de materiais depositados por processos fluviais, influenciando a porosidade e a permeabilidade do solo.

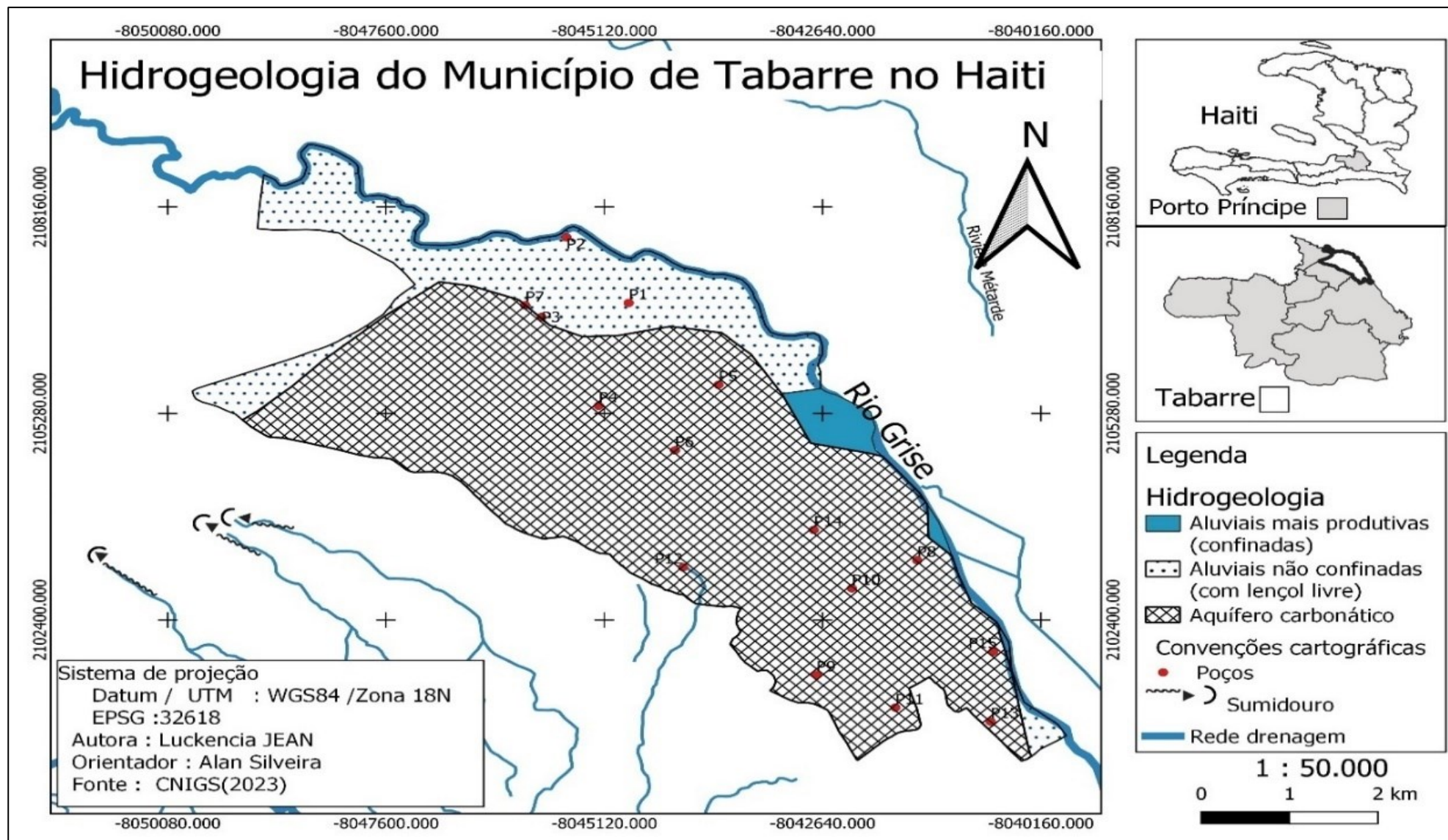
Figura 11 - Mapa de Geologia do município de Tabarre.



Os recursos de água subterrânea do aquífero da PCS vêm das áreas de recarga das nascentes dos maciços de Selle e Matheux, e das montanhas Trouis d'Eau (Simonot, 1982) (Figura 6, p.46). Os maciços calcários desses relevos estão frequentemente sujeitos à dissolução do carbonato de cálcio (fenômeno cárstico), formando cavidades e redes de fraturas favorecendo a circulação subterrânea e a formação de nascentes que emergem fluxos superficiais em grande quantidade (Woodring *et al.*, 1924). Entre essas cadeias posiciona-se o aquífero aluvial da PCS, que é uma depressão geológica formada ao longo da Falha Enriquillo-Plantain Garden, uma falha transformante entre as placas tectônicas do Caribe e da América do Norte (Figura 5, p. 45). A área de subsidência é preenchida por sedimentos aluviais que formam um aquífero, onde a água subterrânea é encontrada em camadas de sedimentos detríticos, conectados por recifes porosos e permeáveis.

As formações hidrogeológicas do município de Tabarre (Figura 12) incluem zonas aluviais produtivas, aluviais não confinadas (com lençol livre) e aquíferos carbonatados. Nessas zonas localizam-se os 15 furos da DINEPA, onde 11 deles se encontram no aquífero carbonático e 4 nos aluviões não confinados. Os aquíferos carbonáticos, compostos principalmente por rochas calcárias, oferecem uma capacidade significativa de armazenamento e transmissão de água. Por outro lado, os aluviões não confinados, compostos por areias e cascalhos, permitem uma recarga rápida e direta dos lençóis freáticos, facilitando assim o acesso à água subterrânea para diversos usos.

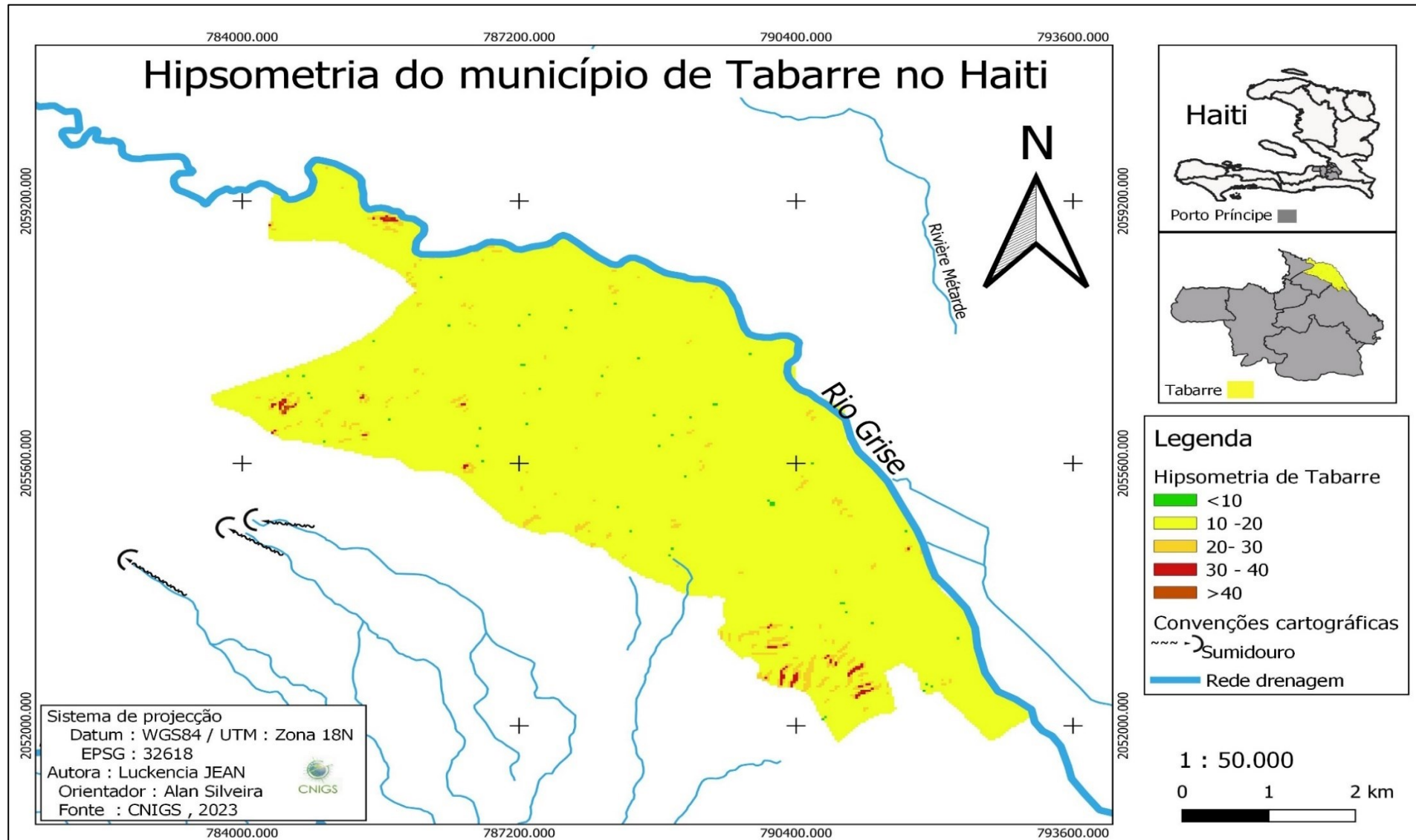
Figura 12 - Mapa de hidrogeologia do município de Tabarre.



No município de Tabarre, as altitudes variam predominantemente entre 0 e 50 metros acima do nível do mar, devido à sua localização na planície aluvial do Cul-de-Sac, que é caracterizada por um relevo relativamente plano (Butterlin *et al.*, 1960). A carta hipsométrica (Figura 13) ilustra as variações altimétricas da área de estudo, que se situam entre altitudes inferiores a 10 metros e superiores a 40 metros.

Essas variações se manifestam em diferentes níveis: domina a classe de 10 a 20 metros, com pontuais classes abaixo de 10 metros e outras entre 20 e 30 metros, em seu interior. Nas partes sul e leste de Tabarre, classes de maior altitude variam de 30 a 40 metros e acima de 40 metros. Esta topografia favorece a infiltração das águas, especialmente nas áreas de menor altitude, facilitando assim a recarga dos aquíferos aluviais, também por meio das precipitações pluviais.

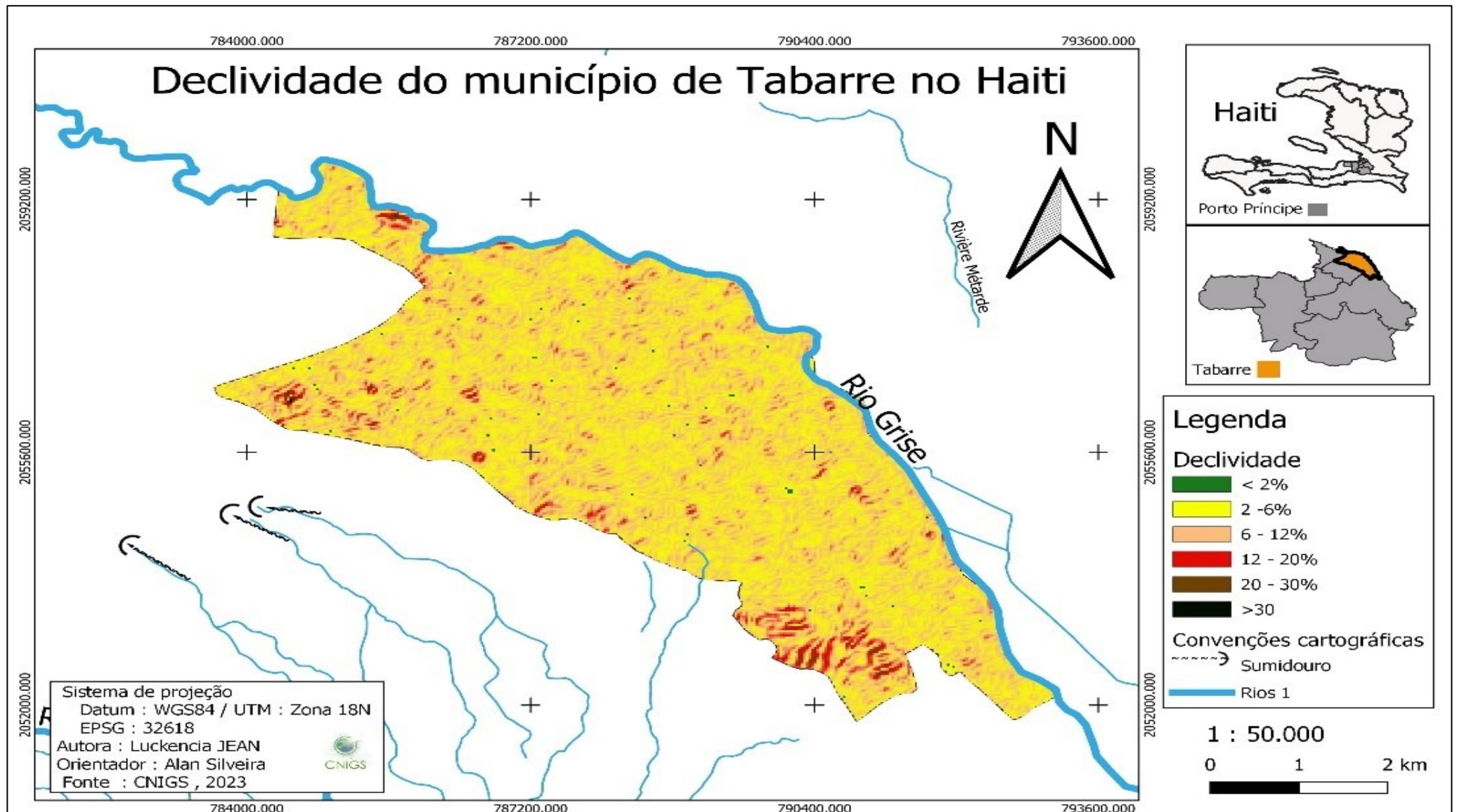
Figura 13 - Mapa de hipsometria do município de Tabarre.



A declividade do município de Tabarre é baixa devido à sua localização na PCS. As vertentes são predominantemente suaves, facilitando a infiltração das águas superficiais e influenciando a distribuição dos solos e sedimentos (Taylor; Lemoine 1949). No entanto, algumas áreas podem apresentar declives mais acentuados, especialmente perto dos maciços circundantes, como os maciços de La Selle e Matheux (Waite *et al.*, 1999). O mapa de declividade (Figura 14) oferece uma visão detalhada das variações nas inclinações das encostas do município.

A análise revela que as inclinações variam consideravelmente, indo de zonas com inclinações inferiores a 2 % a regiões com inclinações superiores a 30 %. Este mapa está estruturado de forma que as cores amarela e laranja, que são as mais dominantes, variam de 2 % a 12 %, com inclinações inferiores a 2 % representadas pela cor verde. As cores vermelha, marrom e preta estão distribuídas por todo o município, mas nas partes leste e sul, as inclinações são mais acentuadas e variam entre 12 % e mais de 30 %.

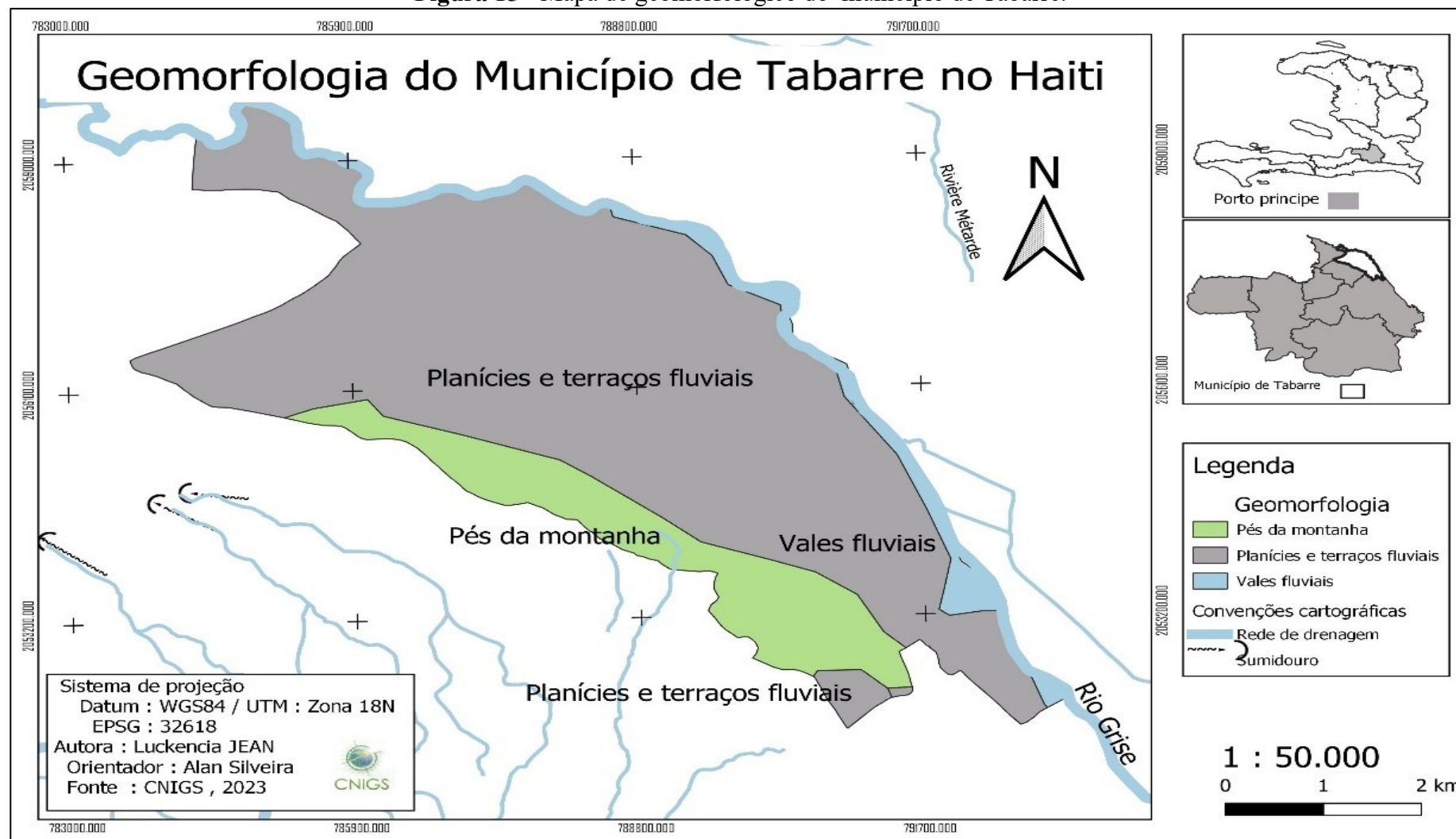
Figura 14 - Mapa de declividade do município de Tabarre.



O relevo de Tabarre é caracterizada pela presença de uma vasta planície aluvial, relativamente plana e homogênea (Emmanuel; Lindskog, 2000). Esta planície aluvial formou-se ao longo do tempo devido à acumulação de sedimentos transportados pelos cursos de água da região (Adamson *et al.*, 2017). Assim, a água da chuva e dos cursos de água pode penetrar rapidamente no solo, contribuindo para a recarga dos lençóis freáticos.

A análise do mapa geomorfológico (Figura 15) revela que esta região é dominada por compartimentos de relevo que incluem os vales fluviais, as planícies e terraços fluviais e os pés de montanha. As planícies e terraços fluviais são compostos por depósitos aluviais recentes, que são propícios para a agricultura devido ao solo fértil. As vales fluviais são formados pela erosão contínua dos cursos de água e se caracterizam por padrões de canal único e multicanal (anastomosado). Os pés de montanha, por sua vez, são zonas de transição entre as altitudes elevadas e as planícies, caracterizadas por inclinações moderadas e solos pouco espessos. Essas diferentes unidades geomorfológicas influenciam não apenas a hidrologia da região, mas também nas atividades humanas, como a agricultura, a urbanização e outras.

Figura 15 - Mapa de geomorfológico do município de Tabarre.



As Figuras 16A e 16B posicionam os perfis geológico-geomorfológicos (Figura 16C) do município de Tabarre. Representam a seção dos terrenos por um plano vertical e horizontal no qual se observam a variação litológica e os compartimentos de relevo. Os perfis estão divididos em três segmentos:

- Segmento AB: com um valor mínimo de 30m e um valor máximo de 46m de altitude em uma distância de 2600m.
- Segmento CD: com um valor mínimo de 25m e um valor máximo de 15m de altitude em uma distância de 3000m.
- Segmento EF: Este com um valor mínimo de 1m e um valor máximo de 15m de altitude em uma distância de 3000m.

De acordo com os perfis geológicos do município de Tabarre, as altitudes variam entre 1 e 46 metros em uma distância de 3000m.

A Figura 17 mostra as variações topográficas e as formas de relevo em cada compartimento, evidenciando suas diferenciações. Nos vales, observa-se a concentração de água, enquanto nas planícies há um maior aplainamento do terreno com declives menos acentuados, mas suscetíveis à inundações. Os terraços apresentam uma modesta elevação em relação à planície, indicando processos de sedimentação pretéritos aos atuais. Por fim, os pés de montanha exibem a transição gradual entre áreas de maior e menor elevação, com formas mais dissecadas sustentadas por margas e areias.

Assim, o conjunto dessas informações contribuirá para o cálculo do índice DRASTIC e para a elaboração do mapa de vulnerabilidade, principalmente com o uso dos dados dos mapas geológico, hidrogeológico e declividade. Ao aplicar o método DRASTIC em relação às características físicas da área de estudo, torna-se possível desenvolver uma compreensão aprofundada dos fatores de vulnerabilidade e criar ferramentas eficazes para a gestão sustentável dos recursos hídricos diante das pressões ambientais e antropogênicas.

Figura 16 - Perfis geológico-geomorfológicos do município de Tabarre.

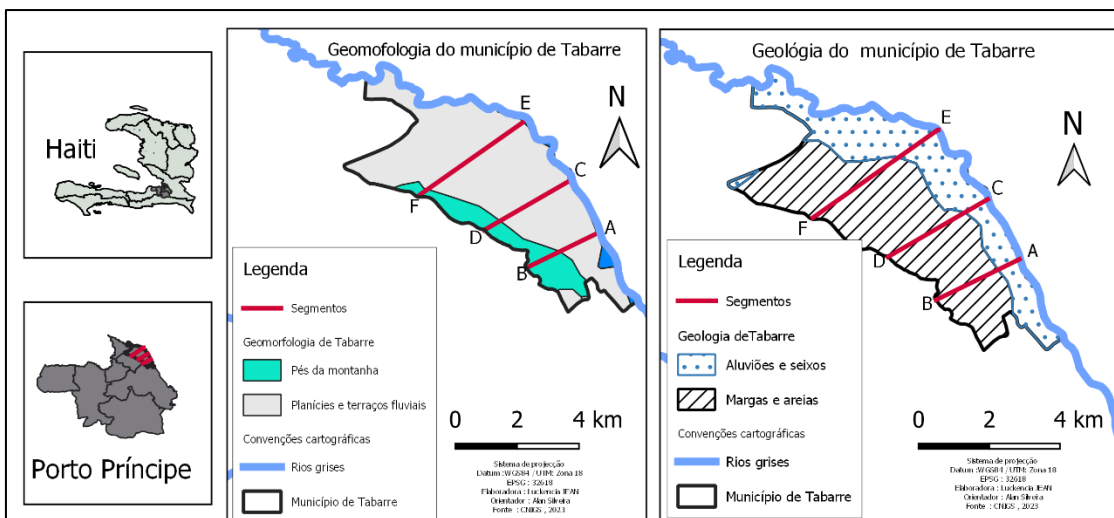


Figura 16A : Geomorfologia do município de Tabarre

Figura 16B : Geologia do município de Tabarre

Perfis geológicos e geomorfológicos

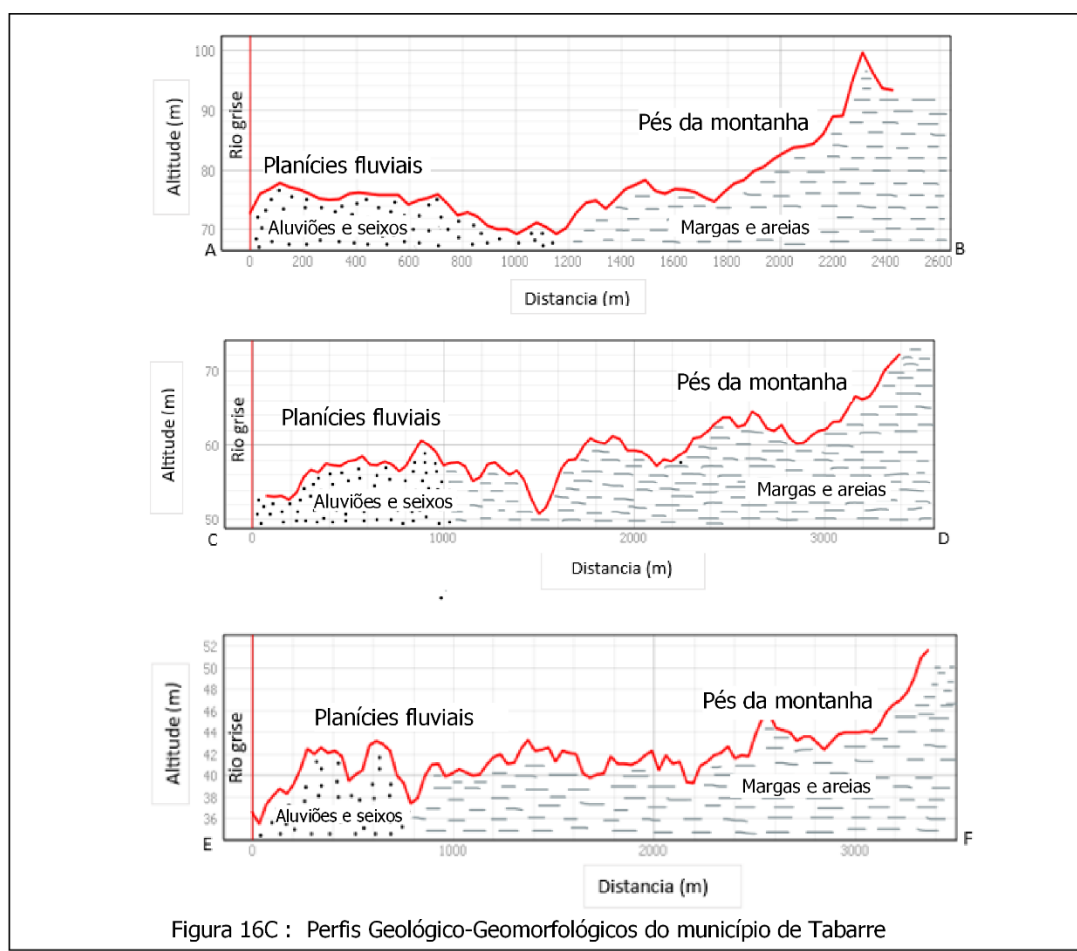
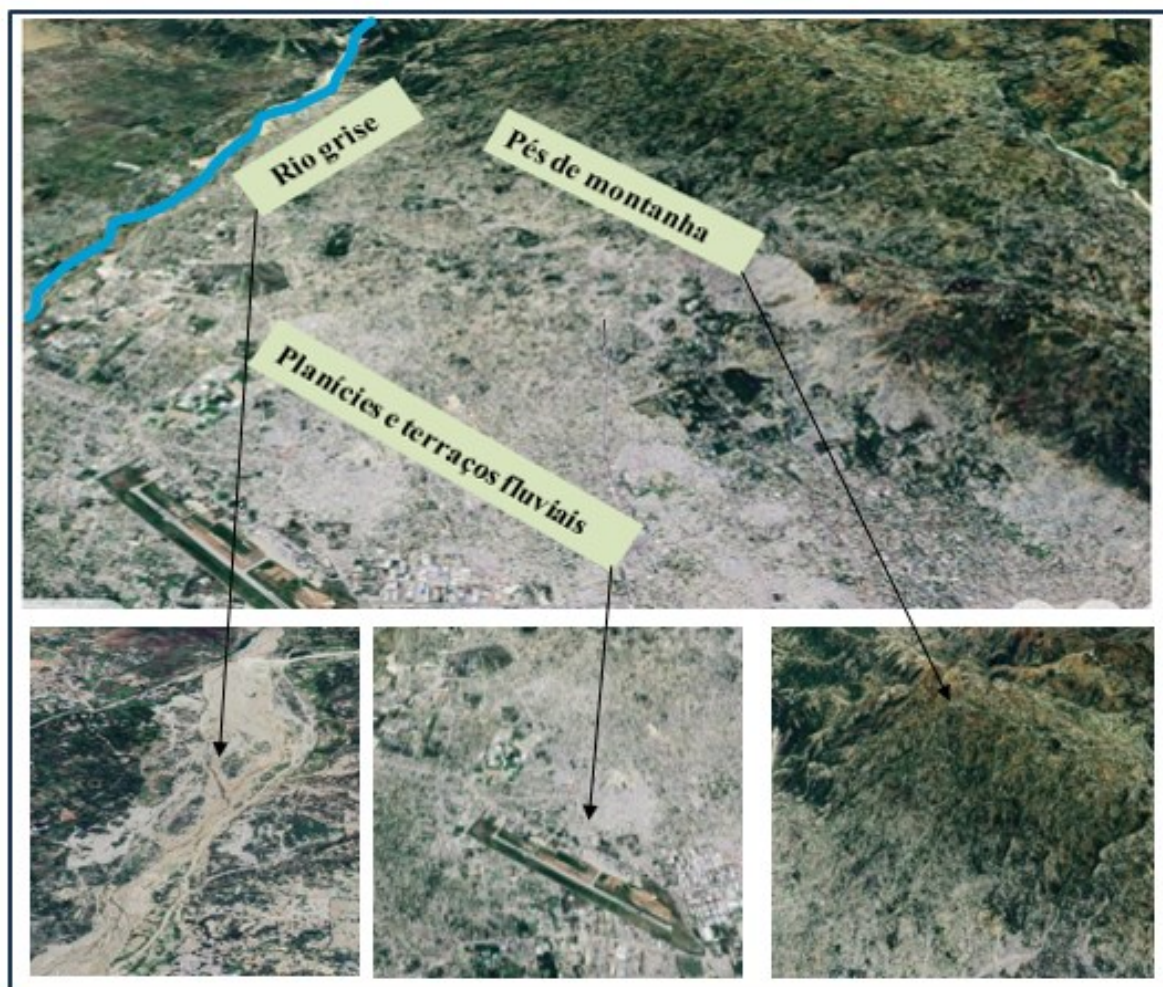


Figura 17 - Imagens dos compartimentos de relevo do município de Tabarre.



Fonte: Google Earth Pro (2024).

5.2 A qualidade das Águas Subterrâneas em Tabarre

O estudo físico-químico e bacteriológico das águas subterrâneas desempenha um papel importante na determinação da sua qualidade e, portanto, na sua aptidão para ser utilizada como água potável. É essencial avaliar a variação dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos das águas de furo da DINEPA no município de Tabarre. Os principais resultados obtidos são apresentados na sequência do texto.

De acordo com os padrões estabelecidos pela OMS (2017) e pela UE (2015) (Quadro 1, p. 36), os resultados da análise físico-química são conformes. No entanto, os valores mais elevados de alguns parâmetros foram identificados em diferentes furos, como pode-se observar nos gráficos da Figura 18 e 19. O furo P9 apresenta 28,5 mg/L de nitratos, 88,6 mg/L de cálcio,

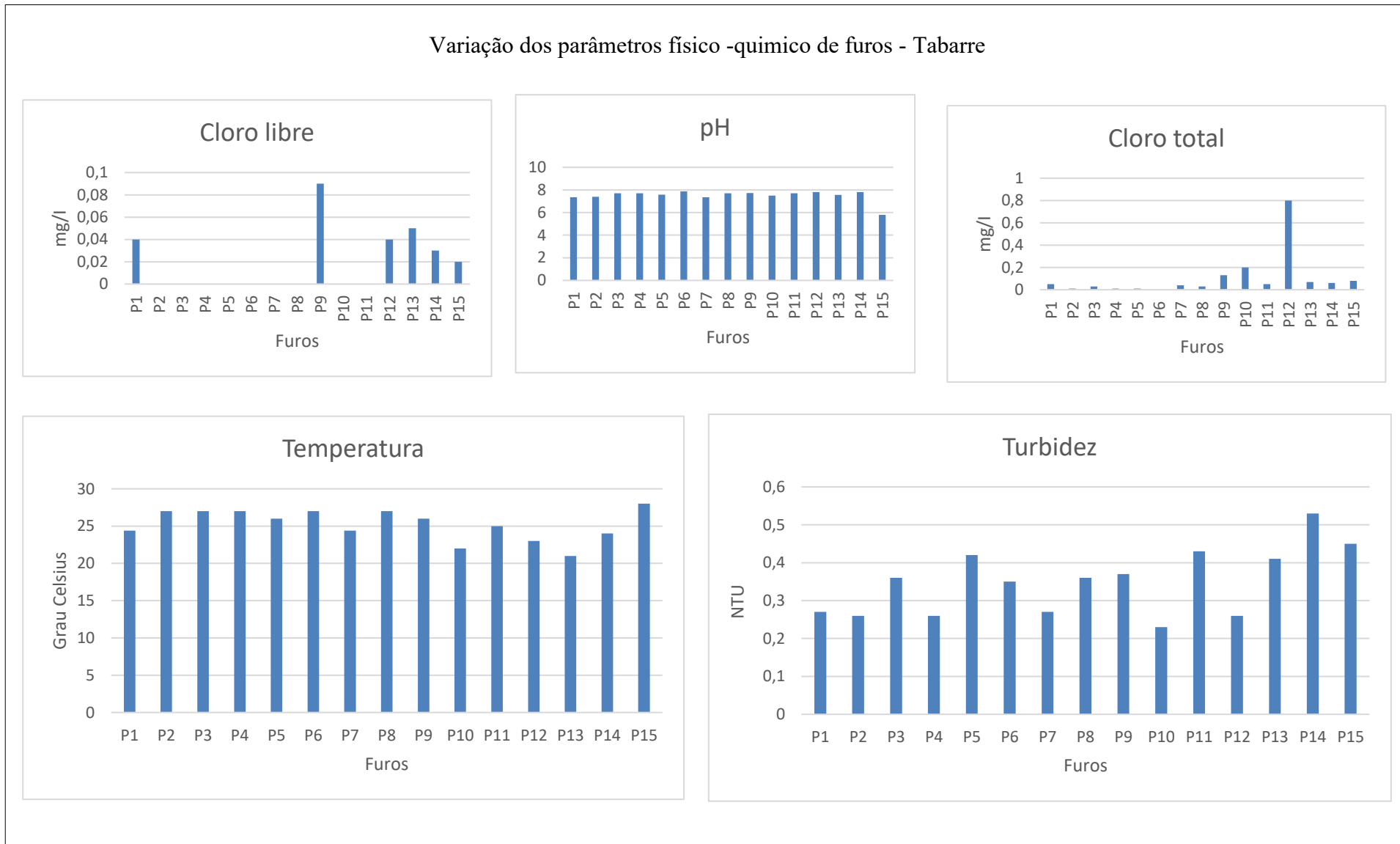
0,09 mg/L de cloro livre, 0,13 mg/L de cloro total e 0,04 mg/L de ferro. Além disso, o furo P14 registrou 7,5 mg/L de oxigênio dissolvido e uma condutividade de 825 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto o furo P8 mostrou uma concentração de 61,1 mg/L de magnésio. Esses resultados indicam que alguns furos apresentam concentrações mais elevadas de desses parâmetros, o que pode exigir monitoramento maior ou medidas corretivas para garantir a qualidade da água.

A correlação entre os STDs e o Ca (Gráfico 4), os STDs e o Mg (Gráfico 5), assim como entre o Ca e o Mg (Gráfico 6), é considerada fraca, pois os coeficientes de determinação (R^2) são respectivamente 0,19, 0,13 e 0,12. Esses valores indicam que apenas 19%, 13% e 12 % da variância dos STDs podem ser explicados pelas variações do cálcio e do magnésio, respectivamente. A correlação é fraca porque os coeficientes de determinação estão próximos de 0, o que sugere que o cálcio e o magnésio explicam apenas uma pequena parte da variabilidade dos STDs. Isso torna difícil estabelecer uma relação forte e linear entre esses parâmetros.

No entanto, os resultados das análises bacteriológicas (Gráfico 7) da água não estão conformes para alguns parâmetros. De fato, os níveis de coliformes totais e de estreptococos fecais não são aceitáveis devido aos níveis detectados nas amostras. As amostras dos furos P3, P6 e P8 atingiram 2 UFC/100 mL, enquanto as amostras dos furos P5, P9, P12 e P15 obtiveram, respectivamente, 11, 15, 22 e 7 UFC/100 mL para os coliformes totais. As amostras dos furos P9 e P10 atingiram valores de 4 UFC/100 mL e 3 UFC/100 mL para os estreptococos fecais, respectivamente. Essa não conformidade da água é resultado da falta de saneamento básico e da não coleta de resíduos domésticos, levando à contaminação da água destinada ao abastecimento.

Segundo a OMS (2017), a presença de coliformes totais e escherichia fecais causam doenças como a diarreia, febre tifoide, cólera, hepatite A, infecções por parasitas intestinais, entre outras. Essas doenças podem ser transmitidas pela ingestão de água contaminada por excrementos humanos ou animais, oriundos de fossas sépticas, o que evidencia ausência de uma rede coletora de esgoto (Ayad; Kahoul, 2017). A presença dessas altas concentrações de germes patogênicos, que são indicadores de poluição bacteriológica e contaminação por efluentes, mostra claramente que as atividades humanas têm impacto na qualidade da água.. Essas análises permitem obter informações sobre a vulnerabilidade da água à poluição de superfície.

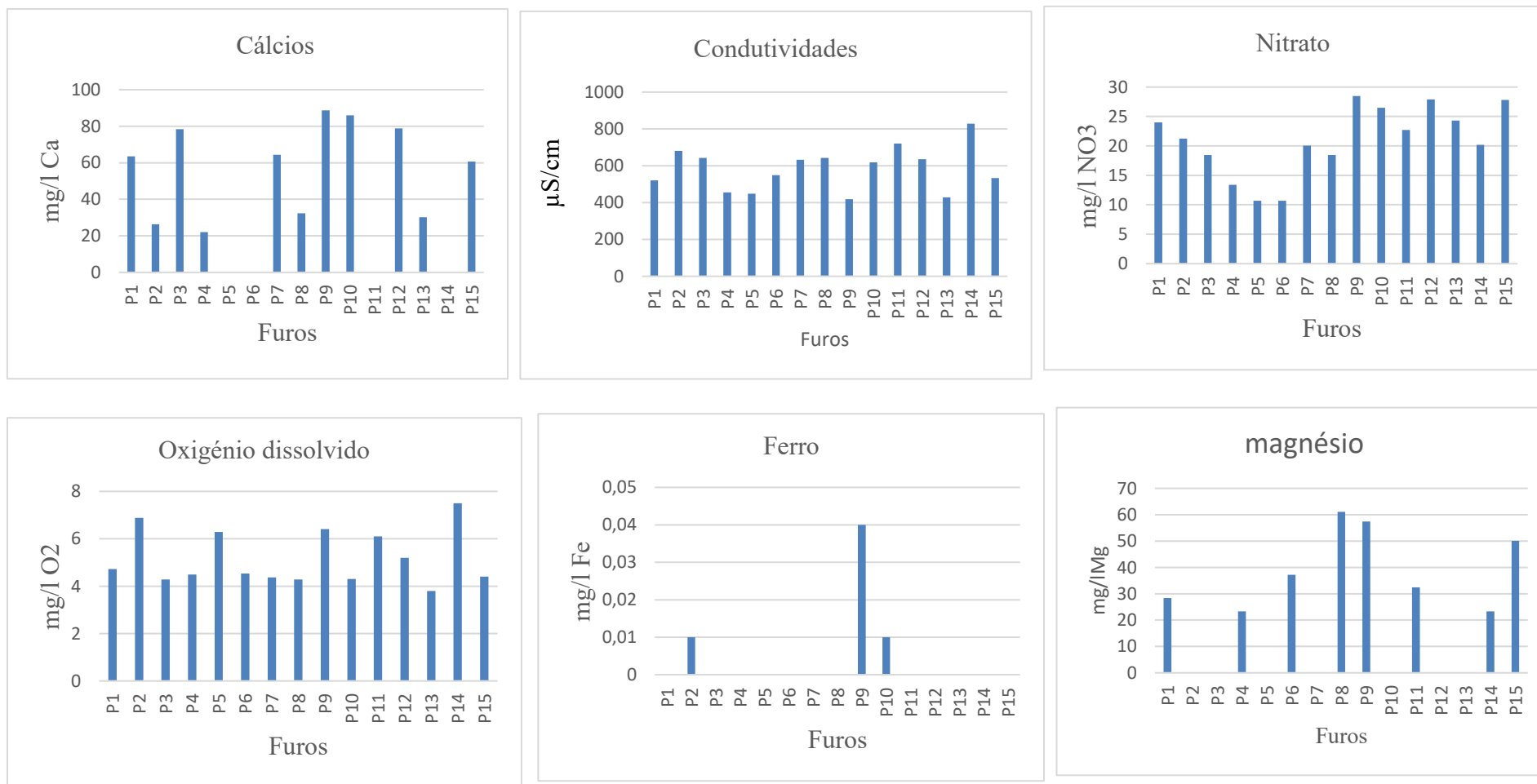
Figura 18 - Graficos dos parâmetros físico-químicos de furos (campo) – Tabarre.



Fonte: Laboratório do Centro Técnico de Exploração da Região Metropolitana de Porto Príncipe (CTE-RMPP) da DINEPA (2018).

Figura 19 - Gráficos dos parâmetros físico-químicos de furos (laboratório) – Tabarre.

Variação dos parâmetros físico-químico de furos (campo) – Tabarre.



Fonte: Laboratório do Centro Técnico de Exploração da Região Metropolitana de Porto Príncipe (CTE-RMPP) da DINEPA (2018).

Gráfico 4 - Correlação Ca/ Mg.

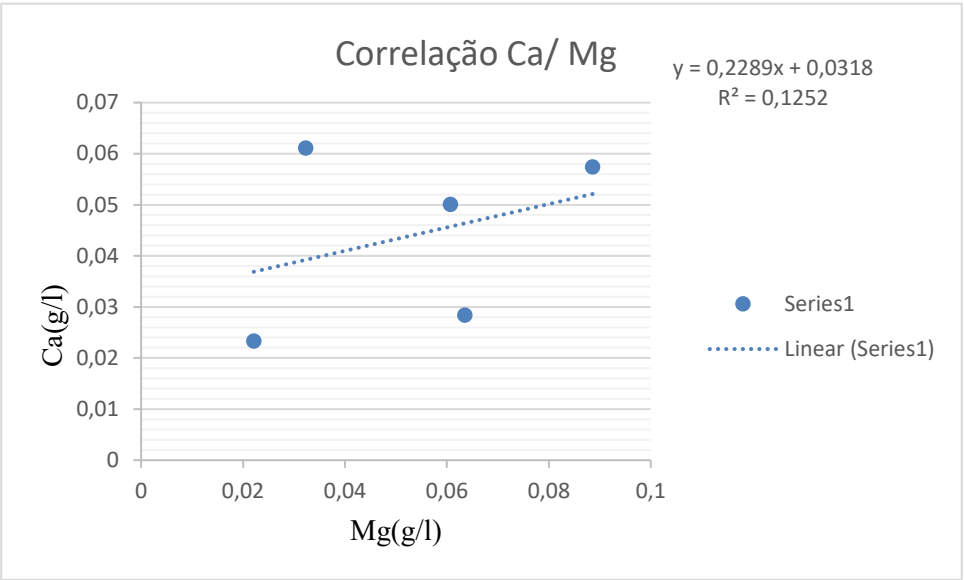


Gráfico 5 - Correlação STD/Ca.

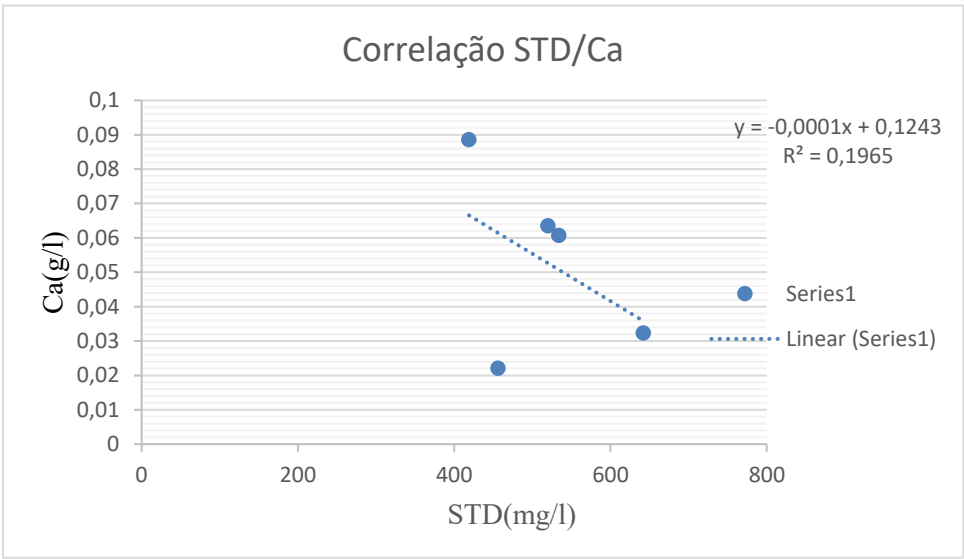


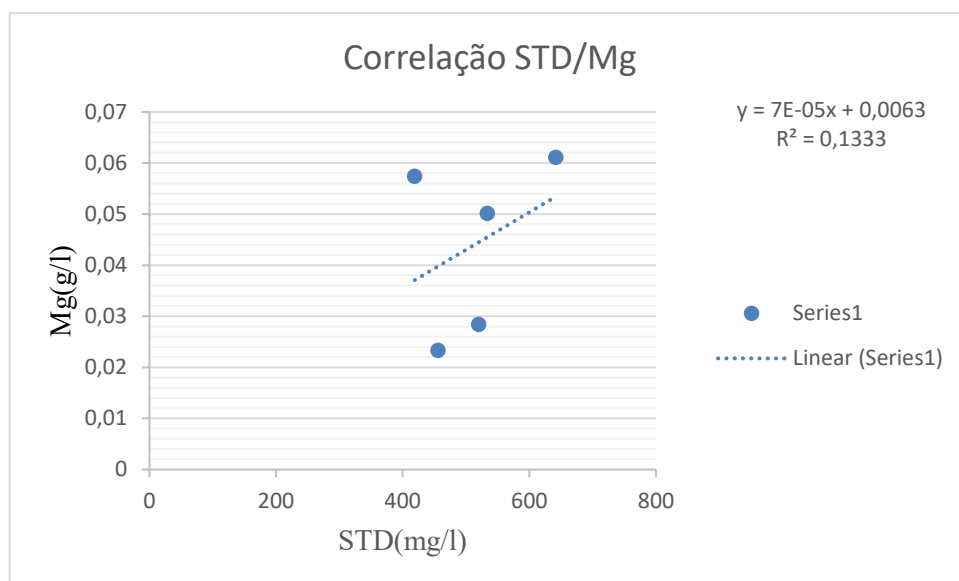
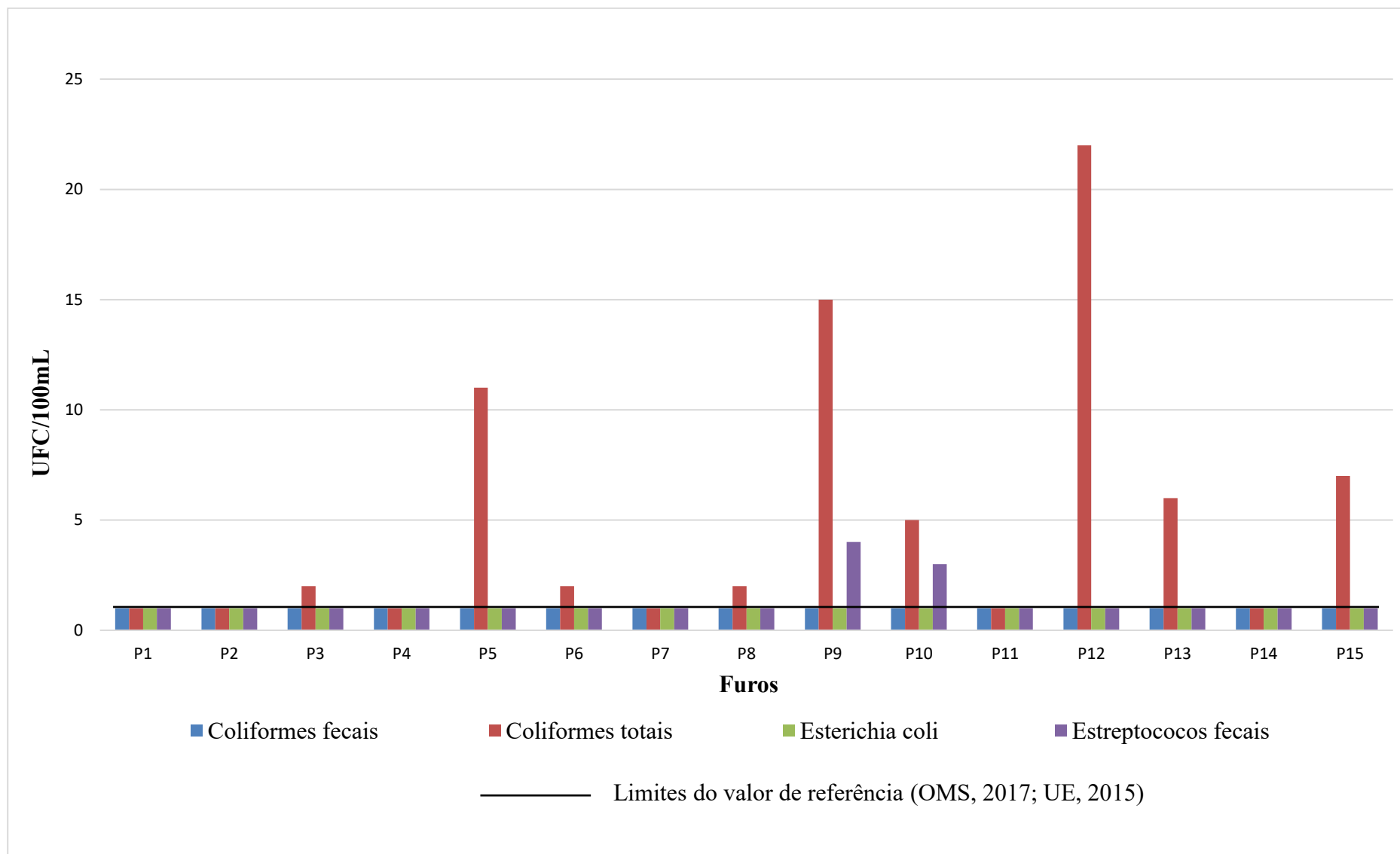
Gráfico 6 - Correlação STD/ Mg.

Gráfico 7 - Variações bacteriológicas das águas de furos.



Fonte: Laboratório do Centro Técnico de Exploração da Região Metropolitana de Porto Príncipe (CTE-RMPP) da DINEPA (2018).

Os resultados obtidos sugerem uma forte relação entre a contaminação observada nas águas subterrâneas e as características geológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas das áreas onde os furos estão localizados. Em particular, a contaminação nos furos em aquíferos carbonáticos (P5, P6, P8, P9, P10, P12, P13 e P15) pode ser atribuída à alta permeabilidade das rochas carbonatadas, o que facilita a migração rápida de contaminantes para os furos. Este tipo de formação geológica, por ser porosa e fraturada, favorece a rápida infiltração de poluentes, comprometendo a qualidade da água e tornando a gestão da sua proteção um desafio maior. Além disso, o furo P3, localizado em uma formação aluvial não confinada, também apresenta sinais de contaminação, o que é explicado pela alta porosidade da areia e do cascalho presentes na área. Essas características permitem uma recarga rápida do aquífero, facilitando a penetração de contaminantes provenientes das atividades humanas.

A localização dos furos, tanto em áreas de aquíferos carbonáticos quanto na formação aluviais não confinadas, está intimamente ligada à ocupação do solo na região. Em Tabarre, a crescente urbanização e a expansão das atividades antrópicas, têm contribuído para o aumento da pressão sobre os recursos hídricos e a contaminação das águas subterrâneas. A proximidade com áreas urbanas densamente povoadas e com infraestrutura inadequada de saneamento básico aumenta o risco de contaminação, principalmente por poluentes orgânicos e nutrientes provenientes de esgotos não tratados e atividades agrícolas intensivas.

Essas observações sublinham a necessidade de uma gestão rigorosa das fontes de poluição e uma monitorização constante da qualidade da água. Somente com políticas públicas eficazes de controle da poluição, proteção dos recursos hídricos e uma vigilância ambiental integrada será possível prevenir a contaminação das águas subterrâneas e garantir um abastecimento seguro e sustentável para a população de Tabarre.

5.3 A vulnerabilidade das águas subterrâneas de Tabarre

5.3.1 Valores, coeficientes e índices dos parâmetros DRASTIC

Os valores, coeficientes e índices para o cálculo da vulnerabilidade para os 7 parâmetros DRASTIC, em consonância com a Tabela 1 (p.39), estão apresentado em Tabelas individualizadas na sequência do texto, considerando as características encontradas no município de Tabarre.

5.3.1.1 Parâmetro de profundidade das águas (D)

A avaliação deste parâmetro foi feita a partir dos valores obtidos no perfil de sondagem (Anexo 1). Esses valores foram classificados de acordo com os intervalos estabelecidos nas tabelas do sistema de pontuação DRASTIC (Tabela 9).

Tabela 9 - Parâmetro de Profundidade das águas.

Profundidade das águas: D		DRASTIC		
Valor em (m)	Zona	Coefficiente: D_R	Peso: D_w	Índice: $D_R * D_w$
[0-6]	Areia	8	5	40
[6-15]	Argila	5		25
[15-18]	Cascalho	4		20
[18-21]	Argila	3		15
[21-36]	Cascalho, Areia e Argila	1		5

5.3.1.2 Parametro de carregamento eficiente (R)

O parâmetro de recarga foi deduzido a partir dos resultados das equações de balanço hídrico de Thornthwaite (1948). Equação 8, p.52). Compreende-se que a recarga líquida do aquífero depende da infiltração direta das águas das chuvas. Esses resultados permitem classificar a área de estudo em três (3) intervalos de carregamento, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Parametro de carregamento.

Carregamento em (mm)	DRASTIC		
	Coefficiente: R_R	Peso: R_w	Índice: $R_R * R_w$
[100 à 175]	6	4	24
[175 à 250]	8		32

[>250]	9		36
--------	---	--	----

5.3.1.3 Parâmetro de materiais do aquífero (A)

A descrição dos materiais que compõem as zonas saturadas e não saturadas do aquífero foi realizada com base na análise descritiva do perfil de sondagem (Anexo 1) que captam o aquífero do município de Tabarre. Os materiais litológicos que compõem o aquífero freático são areias, cascalhos e calcário maciço, representados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetro de natureza da zona saturada.

Natureza da zona saturada: A	DRASTIC		
Zona	Coefficiente: A_R	Peso: A_w	Índice: $A_R * A_w$
Areia e cascalho	8	3	24
Calcário maciço	6		18

5.3.1.4 Parâmetro de tipo de solo (S)

Os dados pedológicos da área de estudo (p.53) fornecem três índices parciais: o solo pouco espesso ou ausente com um índice de 20, o solo de franco arenoso com um índice de 12 e o solo de franco argiloso com um índice de 6, conforme do contexto pedológico e Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetro de tipo de terreno ou solo.

Tipo de terreno ou solo: S	DRASTIC		
Zona	Coefficiente: S_R	Peso: S_w	Índice: $S_R * S_w$
Pouco espesso ou ausente	10	2	20
Franco-arenoso	6		12
Franco-argiloso	3		6

5.3.1.5 Parâmetro de topografia ou declive (T)

A declividade da área de Tabarre varia entre 0 % e mais de 20 % (Figura 14), distribuída em predominantemente em quatro classes, conforme a Tabela 13. Essa classificação permite uma melhor compreensão das características dos ângulos das vertentes da área.

Tabela 13 - Parâmetro de Inclinação.

Inclinação : T	DRASTIC		
Declive %	Coeficiente : T_R	Peso: T_w	Índice : T_R*T_w
[0-2]	10	1	10
[2-6]	9		9
[6-12]	7		7
[12-20]	1		1

5.3.1.6 Parâmetro o impacto da zona insaturada (I)

A descrição dos materiais que constituem as zonas não saturadas do aquífero foi realizada com base em uma análise detalhada do perfil de sondagem (Anexo 1) do aquífero da área de estudo. Os materiais litológicos que formam o aquífero freático foram distribuídos em duas (2) classes, conforme descrito na Tabela 14. Essa classificação permite uma melhor compreensão da diversidade dos materiais presentes e sua influência na dinâmica do aquífero.

Tabela 14 - Parâmetro de natureza da zona insaturada.

Natureza da zona insaturada : I	DRASTIC		
Zona	Coeficiente : I_R	Peso: I_w	Índice: I_R*I_w
Areia e Cascalho	8	5	40
Areia e Argila	6		30

5.3.1.7 Parâmetro de permeabilidade ou condutividade (C)

A condutividade hidráulica (Tabela 15) é um parâmetro que mede a capacidade da água de circular através dos poros, fraturas e cavidades da zona saturada do aquífero. Quando os vazios interconectados na formação aquífera são numerosos, a disponibilidade de água aumenta. Essa maior interconexão oferece mais caminhos para a água, facilitando também o deslocamento de contaminantes no aquífero. Este parâmetro contém uma classe classe $[4,7.10^{-7}$ a $9,4.10^{-4}]$ (Anexo 2), correspondente a uma nota de 8 com um peso de 3, resultando em um índice igual a 24.

Tabela 15 - Parâmetro de permeabilidade ou condutividade.

Condutividade: C	DRASTIC		
Zona	Coefficiente : C _R	Peso : C _W	Índice : C _R * C _W
$[4,7.10^{-4}$ à $9,4.10^{-4}]$	8	3	24

5.3.2 A carta de vulnerabilidade das águas subterrâneas

O cálculo dos índices mínimo e máximo para o mapa de vulnerabilidade, usando o método DRASTIC foi realizado por uma adição ponderada (Quadro 4) aplicada aos parâmetros, a partir dos dados apresentados na Tabelas 9 a 15. Esse cálculo gera uma nova camada de informações cartográficas que representa a variação do índice geral de vulnerabilidade na área de estudo. Os índices DRASTIC calculados neste estudo variam entre 108 e 200, refletindo em diferentes classes de vulnerabilidade (Tabela 16), organizada conforme orientação metodológica DRASTIC (Engel *et al.*, 1996).

Assim, obteve-se o mapa de vulnerabilidade final (Figura 20), destacando as áreas com diferentes graus de vulnerabilidade (Tabela 16). Os procedimentos cartográficos envolveram a importação dos dados dos parâmetros DRASTIC no QGIS 3.16.0. Cada parâmetro foi classificado de acordo com os valores definidos pelo método DRASTIC, utilizando a funcionalidade de reclassificação. Essas camadas foram então combinadas com a Calculadora Raster para produzir o mapa do grau de vulnerabilidade das águas.

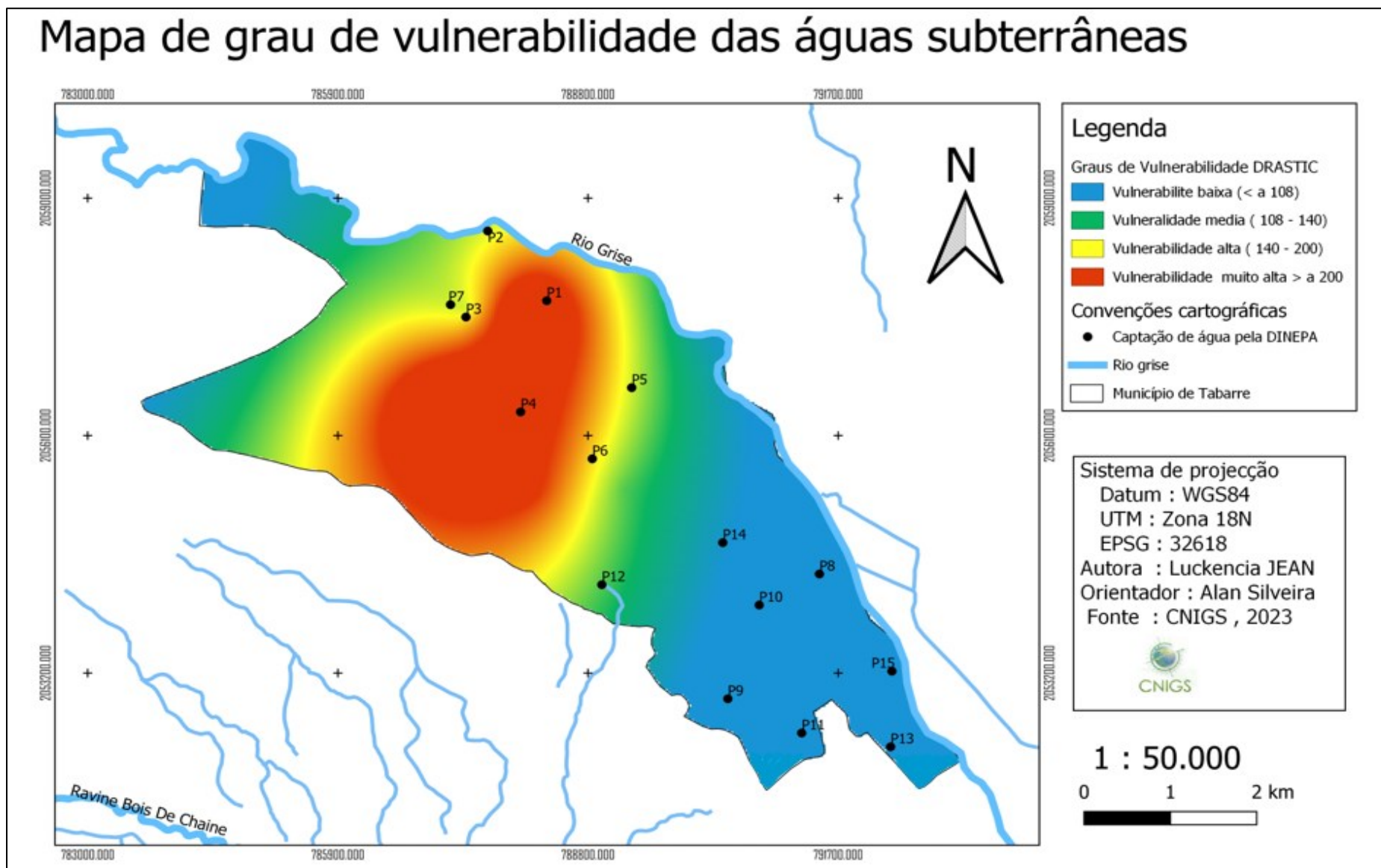
Quadro 4 - Resultados do cálculo de índice DRASTIC.

$I_{DRASTIC}=[DR*DW+RR*RW+AR*AW+SR*SW+TR*TW+IR*IW+CR*CW]$	
ID_{min}	$(5*1) + (4*6) + (6*3) + (3*2) + (1*1) + (6*5) + (8*3) = 108$
ID_{max}	$(8*5) + (9*4) + (8*3) + (10*2) + (10*1) + (8*5) + (8*3) = 200$

Tabela 16 - Classes de índice do grau de vulnerabilidade.

Graus de vulnerabilidade		Índice de vulnerabilidade
1	Vulnerabilidade baixa	< a 108
2	Vulnerabilidade média	[108 a 140]
3	Vulnerabilidade Alta	[140 a 200]
4	Vulnerabilidade muito alta	[> a 200]

Figura 20 - Mapa de grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas.

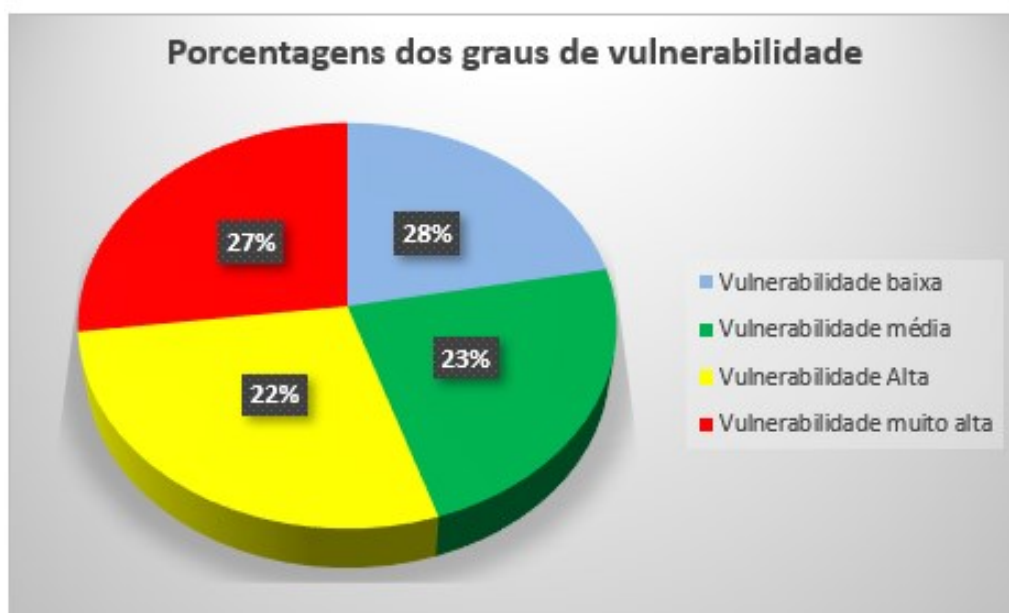


Nesse contexto, a Tabela 17 representa a área e a porcentagem de área de Tabarre por classe de vulnerabilidade, que também foram projetados em gráfico (Figura 21).

Tabela 17 - Áreas e porcentagem de classes de vulnerabilidade no município de Tabarre.

	Graus de vulnerabilidade	Superfícies (km2)	Porcentagens (%)
1	Vulnerabilidade baixa	7.77	28
2	Vulnerabilidade média	6.19	23
3	Vulnerabilidade Alta	5.993	22
4	Vulnerabilidade muito alta	7.5	27

Figura 21 - Classes de vulnerabilidade em porcentagem.



- **Zonas de vulnerabilidade baixa (em azul):**

Essas áreas, que representam 28 % da superfície, estão situadas principalmente no sul e sudoeste do município. Elas se beneficiam de uma proteção natural graças a declives que variam acima de 30 %, o que favorece o escoamento superficial da água e limita sua infiltração. Além disso, a presença de aluviões recentes, bem como de aquíferos confinados, atua como uma barreira contra a propagação dos poluentes.

No entanto, essas zonas estão próximas e em processo de urbanização, o que pode aumentar as pressões sobre os recursos hídricos, devido à expansão das infraestruturas e ao crescimento populacional. Essa urbanização crescente pode resultar em um aumento dos riscos

de poluição das águas subterrâneas e em uma redução da sua capacidade de recarga natural (Figura 22).

Figura 22 - Representação das zonas de vulnerabilidade baixa.



Fonte: Google Earth (2025).

•Zonas de vulnerabilidade média (em verde):

Essas zonas de vulnerabilidade representam 23% da superfície e beneficiam de uma proteção intermediária, graças a aquíferos confinados e formações aluviais mais recente. Essa configuração limita a propagação dos poluentes, mas os riscos persistem devido à permeabilidade de alguns solos. Além disso, embora as atividades humanas nessas zonas sejam geralmente menos intensas do que nas zonas mais urbanizadas, elas ainda representam uma fonte potencial de contaminação (Figura 23).

Figura 23 - Representação das zonas de vulnerabilidade média.



Fonte: Google Earth (2025).

• **Zonas de vulnerabilidade alta (em amarelo):**

Essas zonas, que correspondem a 22 % da área, são dominadas por aquíferos aluviais não confinados e por aquíferos carbonáticos fraturados, o que permite uma infiltração rápida dos poluentes. Estão particularmente expostas à poluição devido a atividades humanas, como a urbanização desordenada e os despejos industriais (Figura 24). A presença de aquíferos não confinados e de fraturas nos aquíferos carbonáticos acelera a propagação dos contaminantes, tornando essas áreas vulneráveis.

Figura 24 - Representação das zonas de vulnerabilidade alta.



Fonte: Google Earth (2025).

- **Zonas de vulnerabilidade muito alta (em vermelho):**

Estas zonas de vulnerabilidade alta, que representam 27 % da área, localizam-se no centro e a leste do município. São caracterizadas por formações geológicas permeáveis, como aluvions, cascalhos e areias, bem como pela presença de aquíferos aluviais e carbonáticos, que permitem uma infiltração rápida dos poluentes nas águas subterrâneas. Essas áreas estão sujeitas a forte pressão antrópica devido à urbanização desordenada e à concentração de atividades industriais. Os declives suaves, inferiores a 20 %, favorecem o acúmulo de água na superfície, aumentando assim a infiltração dos contaminantes (Figura 25).

Figura 25 - Representação das zonas de vulnerabilidade muito alta.



Fonte: Google Earth (2025).

Por fim, as zonas de vulnerabilidade muito alta e alta, representadas por cores quentes, estão particularmente expostas à poluição devido à sua geologia, hidrologia, suas baixas declividades e à alta densidade de atividades antropogênicas. Essas características facilitam a infiltração rápida dos poluentes no solo, tornando as águas subterrâneas vulneráveis à poluição. É nessas zonas, onde se encontram os furos P3, P5 e P6, que as análises bacteriológicas revelaram uma contaminação por coliformes totais. Essas bactérias são usadas como indicadores de poluição microbiológica, frequentemente associadas à contaminação de origem fecal ou ambiental. A presença desses coliformes indica que a água foi contaminada, provavelmente devido à alta concentração da população urbana, às atividades industriais, à eliminação inadequada de resíduos ou à ausência ou insuficiência de sistemas de saneamento básico adequados. Essas zonas exigem ações urgentes para atenuar os efeitos sobre a qualidade da água, reduzir os riscos para a saúde pública e preservar de forma sustentável o meio.

Por outro lado, as áreas de baixa e média vulnerabilidade, representadas por cores frias, se beneficiam de uma proteção natural devido a declives mais acentuados, que favorecem o escoamento superficial, e à presença de aquíferos confinados, que garantem uma filtragem natural da água, protegendo as águas subterrâneas contra a contaminação.

Além disso, essas zonas, menos urbanizadas e onde as pressões humanas são reduzidas, limitam sua exposição aos poluentes e preservam de forma mais eficaz os recursos hídricos. No entanto, apesar dessas vantagens, alguns poços situados nessas áreas apresentam sinais de contaminação. Assim, os furos P8, P9, P10, P12, P13 e P15, de acordo com as análises bacteriológicas, revelaram contaminação por coliformes fecais. Além disso, os furos P9 e P10 também apresentaram contaminação por enterococos fecais. Essa poluição provavelmente se deve a infiltrações de fontes naturais, a fenômenos geológicos ou à má gestão das águas residuais e dos resíduos nessas zonas. Esta situação destaca a necessidade de implementar medidas adicionais de monitoramento e proteção para preservar a qualidade desses recursos.

6 CONCLUSÃO

A área urbana de Tabarre se intala nas zonas que compõem a PCS, onde as águas subterrâneas estão contidas em camadas de sedimentos detríticos resultantes do preenchimento desta planície. Este aquífero é reconhecido como um reservatório subterrâneo importante, capaz de armazenar uma quantidade significativa de água, favorecendo sua infiltração devido à natureza permeável dos materiais geológicos.

As formações hidrogeológicas da área são caracterizadas pelas zonas aluviais mais produtivas (confinadas), aluviais não confinadas (com lençol livre) e aquífero carbonático. Infelizmente, o lençol freático é intensivamente explorado e até mesmo superexplorado para atender às necessidades industriais e de abastecimento de água da região metropolitana de Porto Príncipe. Os valores indicativos relativos às normas estabelecidas pela OMS e pela UE mostram que a análise dos parâmetros físico-químicos está em conformidade, enquanto a análise dos parâmetros bacteriológicos não está em conformidade em 9 furos. De fato, os níveis de coliformes totais e de estreptococos fecais são inaceitáveis devido às concentrações detectadas nas amostras.

A aplicação do método DRASTIC para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas na região da planície do Cul-de-Sac (PCS) permitiu identificar zonas vulneráveis na área de estudo. O município de Tabarre, devido às suas características geológicas, hidrogeológicas, geomorfológicas, pedológicas, climáticas e ao uso do solo, está extremamente fragilizado pela lixiviação de poluentes em direção ao aquífero, localizado sob áreas extremamente favoráveis à infiltração.

A análise do mapa de vulnerabilidade revelou quatro (4) classes de vulnerabilidade:

- Vulnerabilidade muito alta, definidas por aluviões, seixos, margas, areias, aquíferos aluviais de lençol freático e aquíferos carbonatados, com uma declividade inferior a 20% [> 200];
- Vulnerabilidade alta, representadas por aquíferos aluviais não confinadas (com lençol freático) e aquíferos carbonáticos [140 a 200];
- Vulnerabilidade média, representadas por áreas aluviais mais produtivas (confinadas) e aquíferos carbonáticos [108 a 140];
- Enfim, Vulnerabilidade baixa, localizadas ao sul e sudoeste da área de estudo, compostas por aluviões recentes provenientes das proximidades do rio Gris e caracteriza-se por uma declividade superior a 30%. [< 108].

As classes muito alta, alta e média totalizam 72% da área de Tabarre. Com isso, a maior parte da região apresenta um elevado risco de contaminação. A análise dos parâmetros de vulnerabilidade das águas subterrâneas permite concluir que o município de Tabarre é extremamente vulnerável à poluição. Os problemas de poluição das captações de águas subterrâneas são uma realidade que precisa ser enfrentada na região da planície. A presença de contaminantes de origem antropogênica evidencia a fragilidade desses recursos estratégicos diante das pressões exercidas pela urbanização, pela agricultura intensiva e pela má gestão de resíduos.

A preservação dos recursos de águas subterrâneas no município de Tabarre exige uma ação conjunta entre os tomadores de decisão, os atores econômicos e as populações locais, a fim de garantir um acesso sustentável a uma água de qualidade, protegendo ao mesmo tempo esse ecossistema essencial para as futuras gerações.

A análise da metodologia DRASTIC revelou zonas de alta vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, com grande parte da área apresentando riscos elevados devido à presença de materiais geológicos permeáveis, à topografia plana e à urbanização crescente. No entanto, para melhorar a precisão e a confiabilidade dos resultados, seria necessário integrar maior quantidade de dados sobre os parâmetros de qualidade da água subterrânea e realizar estudos de campo para detalhar e validar as classificações atribuídas aos 7 parâmetros DRASTIC.

Assim, o trabalho deixa possibilidades para futuras investigações com maior detalhamento dos parâmetros junto a dados em campo e maior número de amostragens de água, comparando-os com outros métodos de avaliação de vulnerabilidade, como o método GOD. Isso proporcionaria um comparativo metodológico e permitiria uma análise mais detalhada da situação investigada.

Finalmente, é importante destacar que, devido à complexidade dos fatores que influenciam a vulnerabilidade, mais estudos são necessários para avaliar e monitorar a vulnerabilidade das águas subterrâneas da área e adaptar as estratégias de gestão dos recursos hídricos de forma eficaz.

REFERÊNCIA

- ABDESSELEM, A. Suive de la qualité microbiologique et physicochimique des trois serres alimentaires de la région de Tlemcen. **Thèse** (mémoire d'ingénieur institut de biologie), Université de Tlemcen, p. 2-18, 1999.
- ADAMSON J. K ; JAVAN M. ; PIERRE. Y R. **An evaluation of the Plaine du Cul-de-Sac aquifer and its potential to serve Canaan**. Global Communities. 2017.
- ADAMSON, J. K.; JAVAN, M.; ROCHAT, P. Y.; MOLIERE, E.; PIASECKI, M.; MONFORTE, S. P.; LAVANCHYS, G.T.; VERA, R. M. Significance of river infiltration to the Port-au-Prince metropolitan region: a case study of two alluvial aquifers in Haiti. **Hydrogeology Journal**, New York, v. 30, n. 5, p. 1367-1386, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02488-3>.
- ALBINET, M. ; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine, **Bull. BRGM 2me Series**, v. 3, n. 4, 1970.
- ALESSIO, C. E.; PINTO, F.G.S.; MOURA, A. C. Avaliação Microbiológica das Águas das Principais Fontes de Praças e Parques de Cascavel PR. **Journal of Health Sciences**, Serajevo, v. 11, n. 2, p.04-41, 2009. <https://doi.org/10.17921/2447-8938.2009v11n2p%25p>.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H. ;PETTY, R.J.; HACKETT, G. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting. USEPA Report 600/02-87/035. United States Environmental Protection Agency (UEPA). **Environmental Research Laboratory**; Ada, Oklahoma, 1987.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R.J.; HACKETT, G. DRASTIC: à standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting. USEPA Report 60002-85/018. United States Environmental Protection Agency (UEPA) **Environmental Research Laboratory**; Ada, Oklahoma, 1985.
- ANOHI, K. A. **Évaluation de la vulnérabilité spécifique aux intrants agricoles des eaux souterraines de la région de Bonoua**. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Côte d'Ivoire 2009.
- ARMINE, M.; HOBLER, M.; DROUBI, A.; RAJAB, R.; SUBAH, A.; KHATER, A.R. Groundwater Vulnerability Mapping in the Arab Region. **Springer e Books**, p. 145–155, 2004. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10866-6_13.
- AYAD, W.; KAHOU, M. Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits dans la région d'El-Harrouch (N.E - Algérie). **Thèse** (maîtrise en microbiologie):

- Université Badji Mokhtar Annaba. 2017. Disponível em: <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2017/07/These-Ayad-Wissem.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- BENSALAH, Y.; BENZITOUNE, R. Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines brutes dans la wilaya de Constantine. **Thèse** (maîtrise en Ecologie et Environnement): Université des Frères Mentouri Constantine. 2021. Disponível em: <https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2021/Evaluation%20de%20la%20qualit%C3%A9%20physico-chimique%20et%20bact%C3%A9riologique%20des%20eaux%20souterraines%20brutes%20dans%20la%20wilaya%20de%20Constantine..pdf>. Acesso em: 5 junho. 2024.
- BÉZÉLGUES S., DES GARETS E., MARDHEL V., DÖRFLIGER N. Cartographie de la vulnérabilité de Grand-Terre et de Marie-Galatie (Guadeloupe). Phase 1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité. **Rapport BRGM51783-FR**, 2002.
- BOULEGHLEM, Z. Etude hydrogéologique et evaluation des ressources en eau dans la region Azzaba-Guerbes. **Thèse**, (Doctorat en hydrogéologie), Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2017.
- BOULEKNAFET, Z.; DERRADJI, E.F. Hydrogéologie et vulnérabilité à la pollution des ressources en eau dans la plaine du Kébir ouest. **Revue des Sciences et de la Technologie**, Algérie, v. 34, p. 85–94, 2017. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/157251>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- BOUTAYA. I ; CHALAL. S. Etude d'évaluation à la pollution de la région par la méthode DRASTIC. **Thèse** (Maîtrise en Science de la Nature et de la Vie), Boulimat, Algérie. 2017.
- BOWIN, C. The Geology of Hispaniola. **ResearchGate**, New York, v.3, p. 501–552, 1975. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4684-8535-6_12.
- BRACEY, D. R. ; VOGT, P. R. Plate Tectonics in the Hispaniola Area. **Geological Society of America Bulletin**, v. 81, n. 9, p. 2855, 1970. <https://doi.org/10.1130/0016-7606%281970%2981%5B2855%3APTITHA%5D2.0.CO%3B2>.
- BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Étude des ressources en eau de la région de Port-au-Prince. **Centrale Autonome Métropolitaine d'Eau Potable (CAMEP)**, Port-au-Prince, Haiti, 1989.
- BRUMO, R. B.; OLIVEIRA, N. R.; REIS, H. C. O.; LIMA, Z. M.; MORAIS, E. B. Qualidade das águas de poços rasos em área com déficit de saneamento básico em cuiabá, mt: avaliação microbiológica, físicoquímica e fatores de risco à saúde. **Holos**, Rio Grande do Norte, v. 2, n.32, p. 179-188, 2016. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.2714>.

- BUTTERLIN, J. **Géologie Générale et Régionale de la République d’Haïti**. Éditions de l’IHEAL, 1960. <https://doi.org/10.4000/books.iheal.5606>.
- CAPUCCI, E.; MARTINS, A. M.; MANSUR, K.L.; MONSORES, A.L.M. **Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas**. DRMRJ- Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- CARVALHO, G. J. P. **Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Rio Sordo: comparação de modelos baseados no método DRASTIC**. Caderno de Geografia nº32. Coimbra, Faculdade de Letras. Universidade de Coimbra – p.289-299, 2013. https://doi.org/10.14195/0871-1623_32_26.
- CAVALERA, T.; GILLI, E.; PAJANY, Y. M.; MARMIER, N. Mechanism of Salt Contamination of Karstic Springs Related to the Messinian Deep Stage. **The Speleological Model of Port Miou (France)**. v. 23, n. 1-3, p. 15–28, 2010. <http://dx.doi.org/10.3166/ga.23.15-28>.
- CHARLES, R.; OLIVEIRA, R. C.; TORRES, G. A. L.; GRECO, R. Análise das características ambientais e implicações da produção agrícola no Departamento Oeste da República do Haiti. **Open Edition Journals**, v. 35, 2023. <https://doi.org/10.47456/geo.v3i37.41080>.
- CIVITA, M.; FORTI, O.; MARINI, L.; PICCINI, L.; PRANZINI, G. **Carta da vulnerabilità all’inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane**. Mem. explic, Monografia GNDICI. – CNR. Firenze, v. 2, n. 399, , p. 56, 1990.
- CNIGS - Centre National de l’Information Géospatiale. Hti Geology Hydrogeology Bme Polygon. **HAITIDATA**, 2010. Disponível em: <https://haitidata.org/layers/geonode_data:geonode:hti_geology_hydrogeology_bme_polygon_2010>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- CNIGS - Centre Nationale de l’Information Géospatiale. Hti Geology Geomorphology Polygon 082005. **HAITIDATA**, 2010. Disponível em: <<http://haitidata.org/geoserver/wms>>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. [Site]. **A Importância das Águas Subterrâneas**. 2014. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/Informa??es-B?sicas/3-Polui??o-das-?guasSubterr?neas>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- CUTRIM, A. O.; GUIMARÃES, J. E. Aplicação dos Métodos Drastic e Posh para a Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis-MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v15, n.2, p127-142, 2010. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v15n2.p127-142>.

- DAILY, G. C.; EHRLICH, P.R. Global change and human susceptibility to disease. **Annual Review of Energy and The Environment**, v. 21, n. 1, p. 125–144, 1996. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.21.1.125>.
- DEGBEY, C.; MAKOUTODE., M.; OUENDO, E. M.; BROUWER, C. Pollution physico-chimique et microbiologique de l'eau des puits dans la Commune d'Abomey-Calavi au Bénin en 2009. **International Journal of Biological and Chemical Sciences**, v. 4, n. 6, 2010. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i6.64910>.
- DERWICH, E.; BENAABIDATE, L.; ZIAN, A.; SADKI, O.; BELGHITY, D. Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut sebou en aval de sa confluence avec oued fes .**larhyss journal**, v. 8, n. 1, p. 101-112, 2010. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.44>.
- DINEPA - Direção Nacional de Água Potável e Saneamento. **Relatório de dados físico-químicos e bacteriológicos dos furos**. Porto Príncipe: Laboratório do Centro Técnico de Exploração da Região Metropolitana de Porto Príncipe (CTE-RMPP), 2018.
- DOLCIN, D. Gestão de Riscos Sísmicos no Haiti: Abordagem Geoética. **Tese** (mestrado em Geografia), UEPG, Ponta Grossa, 2022.
- DOR, E. F. Étude de la potabilité des eaux de boisson utilisées à Bocozele et facteurs de risques sanitaires associés. **Thèse** (Sciences et Technologie des Aliments): Faculté D'agronomie Et De Médecine Vétérinaire, Haiti, 2019.
- DORVIL, W.; MUSEAU¹, H.; SALOMON¹, W.; ANDRÉ, D.; THÉODAT, J. M. Le statut organique des sols à Saint-Raphaël : quels mécanismes, quelles pratiques agricoles et quels indicateurs ? **Int. J. Biol. Chem. Sci**, v. 17, n. 6, p. 2490-2511, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i6.28>
- ELHAM, FIJANI.; NADIRI, A.; MOGHADDAM, A.A.; TSAI, F. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran. **Journal of Hydrology**, v. 503, p. 89–100, 2013 . <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.03>.
- EMMANUEL, E.; LINDSKOG, P. Regards sur la situation des ressources en eau de la République d'Haïti. **Actes du Colloque International sur Gestion Intégrée de l'Eau en Haïti**, Port-au-Prince, 2002. v. 26, p 30-52. Disponível em: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=15204321>. Acesso em: 24 jul. 2023.
- ENGEL, B.; HIRATA, R.; GOMES, D.; PARIS, M. Estimating groundwater vulnerability to nonpoint source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. In : Kavar and

- Nachtnebel HP (eds) Proc hydro Gis' : Application of Geographic information system in Hydrology and water Ressources Manager, **IAHS Publication**, n. 235, 1996.
- ERTEL T.; LÖBLER, C.A.; SILVA, J.L.S. Índice de vulnerabilidade das águas subterrâneas no município de Rosário do Sul, Rio Grande do Sul. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 7, n. 7, p. 1400-1408, 2012. <https://doi.org/10.5902/223611705962>.
- FEITOSA, F, F, J, M. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. **Fortaleza, CPRM, LABHID**.Universidade Federal de Pernambuco, p 389, 1997.
- FENN D. G.; HANLEY, K.J.; DEGEORE. T.V. Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites. **Environmental Protection Agency, Washington, DC (USA). Office of Solid Waste**, 1975.
- FERNANDES, A. V. B. Evapotranspiração e sua influência na engenharia civil. **Ciência exatas e tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 3, p.21-36, 2015.
- FIJANI, E.; NADIRI, A. A.; MOGHADDAM, A. A.; FRANK, T. C. T.; DIXON, B. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran. **Journal of Hydrology**, p. 89–100, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.038>.
- FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG. **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information**. n. 38, Committee on Hydrological Research, The Hague, p. 69–86, 1987.
- FOSTER, S. ; HIRATA, R.; GOMES, D. Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies. **The International Bank for Reconstruction and Development.The World Bank**. 2006.
- FOSTER, S. S. D.; CHILTON, P. J. Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 358, n. 1440, p. 1957–1972, 2003. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1380>.
- GIBB, P. J.; BARCELONE, J. M.; SCHOCK, C. S.; HAMPTON, W. M. Hazardous waste in Ogle and Winnebago Counties: potential risk via ground water due to past and present activities. Illinois **Department of Energy and Natural Resources**, n. 83 v. 26, p. 66. 1983.
- GILLI, E. Deep speleological salt contamination in Mediterranean karst aquifers: perspectives for water supply. **Environ Earth SCI**. France, v. 74, n. 1, p. 101–113, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4042-2>.

GURGEL, S. R.; SILVA, L. S.; SILVA, L. A. Investigação de coliformes totais e *Escherichia coli* em água de consumo da comunidade Lago do limão, Município de Iranduba – AM. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 4, n. 4, p. 2512-2529, 2020. <https://doi.org/10.34115/basrv4n4-028>.

GURGEL, S. R.; SILVA, L. S.; SILVA, L. A. Investigação de coliformes totais e *Escherichia coli* em água de consumo da comunidade Lago do limão, Município de Iranduba – AM. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 4, n. 4, p. 2512-2529, 2020. <https://doi.org/10.34115/basrv4n4-028>.

HEMIDI, L. **Vulnérabilité de la nappe alluviale de Guerrara à la pollution. Memoire de maitrise**. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers, Guerrara, Algérie, 2013.

HENRIQUES, J. A. Distribuição da contaminação fecal em águas de drenagem afluentes do canal do Prado, Campina Grande-PB. **Tese** (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental): UFCG, 2014. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3886>. Acesso em: 9 junho. 2023.

HUO, Z. L.; Dai, X. Q.; FENG, S. Y.; KANG, S. Z.; HUANG, G. H. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. **Journal of Hydrology**, v. 492, n.10, p. 24-34, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.011>.

IHSI - Instituto Haitiano de Estatística e Informática. Indication sur la population en 2021, **haiti now**, 2021. Disponível em: <https://ihsi.gouv.ht/indicator-population>. Acesso em: 19 maio.2024.

IHSI - Instituto Haitiano de Estatística e Informática. Population totale, population de 18 ans et plus ménages et densités estimés en 2009, **haiti now**, 2009. Disponível em: https://www.haiti-now.org/wp-content/uploads/2021/01/POPTOTALMENAGDENS_ESTIM2009.pdf. Acesso em: 24 nov. 2023.

IHSI - Instituto Haitiano de Estatística e Informática. Population totale, population de 18 ans et plus ménages et densités estimés en 2015, **haiti now**, 2015. Disponível em: https://www.haiti-now.org/wp-content/uploads/2021/01/POPTOTALMENAGDENS_ESTIM2009.pdf. Acesso em: 24 nov.2023.

JOURDAN, F.; FERAUD, G.; BERTRAND, H.; KAMPUNZU, A. B., TSHOSO, G., WATKEYS, M. K.; LE GALL, B. Karoo large igneous province : Brevity, origin, and relation to mass extinction questioned by new ⁴⁰Ar/³⁹Ar age data. **Geology**, v. 33, n. 9, p. 745-748, 2005. <https://doi.org/10.1130/g21632>.

JUNIOR, J. J. Uso de dados climáticos e hidrológicos como subsídio na Determinação do regime de fluxo de canais de drenagem. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.16, n.1, p.177-189, 2015. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i1.422>

Kresic, N. Hydrogeology and Groundwater Modeling. **2. Ed.** Florida, CRC Press, 2007.

KRIJN, P. P.; REBECCA, L. H.; REBECCA, A. S.; JUSTINE, I. B.; SIMON, B.; COURTNEY, C. M.; MATTHEW, B. T. Temperature variation makes ectotherms more sensitive to climate change. **Global Change Biology**, 19, n. 8, 2373–2380, 2013. <https://doi.org/10.1111/gcb.12240>.

LEBBIHI, R.; DERKI, H. Etude de quelques paramètres physicochimiques et microbiologiques des eaux potables dans la région d'El-OUED. **Thèse** (Maitrise en sciences biologiques): Université Echahid Hamma Lakhdar D'el-Oued. 2018. Disponível em: <https://dspace.univ-eloued.dz/server/api/core/bitstreams/3e09d332-55c9-4793-8f4a-d51819ba75a5/content>.

Acesso em: 5 junho. 2024.

LEGRAND, H. System for evaluating contamination potential of some waste sites. **American Water Work Association Journal**. v. 56, n. 8, p. 959-974, 1964. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1964.tb01292.x>

LEGRAND, H.E. Comparative hydrogeology: Na example of its use. **Geological Society of America Bulletin**. n. 81, p. 1243-1248. 1970. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[1243:CHAEOI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1243:CHAEOI]2.0.CO;2).

MARCO, P. Haïti - Environnement : La Rivière Grise devient soudainement rouge. **HaitiLibre.com**: Toutes les nouvelles d'Haïti 7/7. 2020. Disponível em: <https://www.haitilibre.com/article-30484-haiti-environnement-la-riviere-grise-devient-soudainement-rouge.html>. Acesso em: 19 jan. 2024.

MARCUZZO, F. F. N.; MANZIONE, R L.; WENDLAND, E. Balanço hídrico utilizando diferentes metodologias de estimativa de evapotranspiração por temperatura. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009, Campo Grande, p. 1- 19.

MARGAT, J. Les eaux souterraines dans le Monde : Similitudes et différences. **Journées de l'hydraulique**, v. 21, n. 4, p. 1-13, 1991.

MARGAT. J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie, Doc. **BRGM, 68 SGL 198 HYD**. Orléans, France, 1968.

MARTINS, P. A. S; NUNES, D. D.; QUERINOS, C. A. S.; SILVA, P. C. S. Balanço hídrico climatológico pelo método de thornthwaite e mather (1955) para a cidade de humaitá - mesorregião sul do estado do amazonas. **Anais do XIV ENANPEGE**, 2021, Campina Grande,

p. 1- 16, . Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/81908>. Acesso em: junh. 2024.

MDE- Ministério do Meio Ambiental do Haiti-. Relatório de dados do solo do município de Tabarre. 2015.

MENEZES, J. P.; C. BERTOSI, A. P. A.; SANTOS, A. R.; NEVES, M. A. Qualidade da água subterrânea para consumo humano e uso agrícola no sul do estado do Espírito Santo. *Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)*, v. 17, n. 17, p. 3318-3326, 2014. <https://doi.org/10.5902/2236117010630>.

MERCIUS, D. Analyse-diagnostic des systèmes de conservation de sols en Haïti au cours de ces dix dernières années, application à vingt communes des départements du Centre et de l'Artibonite. **Thèse de maitrise**, Liège Université, 2018.

MIGUEL E. A. C ; PAIM. P. J.C. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du Bas Cheliff : Application de la méthode DRASTIC, 2015. **Thèse** (mémoire de maitrise), Faculté des Science de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre, Cheliff, Algérie, 2015.

MOHAMED, B.; REKINA, H. Etude de fonctionnement hydrologique du bassin versant d'oued Djendjen. **Thèse**, (maitrise en Hydrogeologie): Faculté des sciences de la nature et de vie, 2022.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. **6th ed**, 2014. Disponível em: <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/088-Applied-Statistics-and-Probability-for-Engineers-Douglas-C.-Montgomery-George-C.-Runger-Edisi-5-2011.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2024.

MURAT, V.; PARADIS, D.; SAVARD, M. M.; BOURQUE, E.; HAMEL, A.; LEFEBVRE, R.; MARTEL, R. Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources naturelles Canada, **Commission géologique du Canada**, 2003. <https://doi.org/10.4095/214216>.

MYRAND, D. **Guide technique : captage d'eau souterraine pour des résidences isolées**. Canada, Québec, 2008.

NEDJOUD, B.; SAIDA, K. Evaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau souterraine (Sources et Puits) collecté dans la région d'Ouled Brahem Bordj Bou Arreridj. **Thèse** (Maitrise en sciences biologiques): Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A. 2018. Disponível em: <https://dspace.univ-bba.dz/handle/123456789/823>. Acesso em: 22 jan. 2024.

NORTHWATER INTERNATIONAL; REZODLO. An evaluation of the Plaine du Cul-de-Sac aquifer and its potential to serve Canaan : Port-au-Prince, Haïti. **Technical report, cooperative agreement no. AID-521-A-15-00010**, United States Agency for International Development and American Red Cross, Port-au-Prince, Haïti, 2017.

NOUAYTI, N.; KHATTACH, D.; HILALI, M. Evaluation de la qualite physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc), **Journal de Matériel et Science de l'Environnement**, v. 6, n. 4, p.1068-1081, 2015.

NOUAYTI, N.; KHATTACH, D.; HILALI, M. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc), **Journal de Matériel et Science de l'Environnement**, v. 6, n.4, p. 1068-1081, 2015.

OBO-FERREIRA, J. P.; CHACHADI, A. G. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using Galdit method. Part 1: **Application to the Portuguese aquifer of Monte Gordo**.irgu.unigoa.ac.in, p-1-12, 2005.

OLIVEIRA, L. A. O sistema aquífero Guarani no Estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs. 2009. **Tese** (Doutorado em Geologia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

OMS - Organisation Mondiale de la Santé. **Directives de qualité pour l'eau de boisson. 4ème édition intégrant le premier additif**. Genève, Suisse. 2017. Disponível em: <https://www.who.int/fr/publications-detail/9789241549950>. Acesso em: 12 mar. 2024.

OSÓRIO, Q. S. **Vulnerabilidade natural de aquíferos e potencial de poluição das águas subterrâneas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, RS.Brasil. 2004

PIERRE, A. **Evaluation des projets en Eau et Assainissement dans les Plaines alluviales d'Haïti**. Unicef, Port-au-Prince, Haïti, 1992.

PINTO, A. B.; DE OLIVEIRA, A. J. F. C. Diversidade de microrganismos indicadores utilizados na avaliação da contaminação fecal de areias de praias recreacionais marinhas: estado atual do conhecimento e perspectivas. **O Mundo da Saúde**, São Paulo, vol. 35, n. 1, p. 105-114, 2011. Disponível em:

<https://revistamundodasaude.emnuvens.com.br/mundodasaude/article/download/581/521>.

Acesso em: 8 junho. 2024.

PREPETIT, C. Tremblement de terre en Haiti: Mythe ou réalité. **Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics D'haïti**. 2008. Disponível em: <https://lnbtp.gouv.ht/publications/seisme-haiti.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2024.

- RAKOTOVAHOAKA J, E. **Cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines de la plaine d'antananarivo et de ses environs alamanga**. Mémoire de maîtrise. Département de physique. Université d'Antananarivo, 2007.
- REMBOTTE, I. Haïti: Le risque sismique est toujours là. **Sxmíno.fr**, 2013. Disponible em: <https://www.sxmíno.fr/63869/06/08/2013/haiti-le-risque-sismique-est-toujours-la/>. Acesso em: 07 agosto. 2024.
- RENALD, Schaub, ERIK, Wahlstroem, ANDERS, Ronnau, et al. Oxygen-mediated diffusion of oxygen vacancies on the TiO₂ (110) surface. **Science**, v. 299, p. 377-379, 2003. <https://doi.org/10.1126/science.1078962>.
- RODIER, J.; LEGUBE, B.; MERLET, N. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. **Ed. Dunod**, Paris, p 1384, 2005.
- SAINT FLEUR, N.; KLINGER, Y.; FEUILLET, N. Sismotectonique du système de failles d'Enriquillo et du séisme du 12 janvier 2010 (Mw 7.0) en Haïti. **Tectonophysics**, Paris, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228368>.
- SAMAKE, M.; TANG, Z.; HLAING, W.; MBUE, I.; KASEREKA, K.; BALOGUN, O. W. . Groundwater Vulnerability Assessment in Shallow Aquifer in Linfen Basin, Shanxi Province, China Using DRASTIC Model. **Journal of Sustainable Development**, v. 4, n.1, 2011. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n1p53>.
- SCHNEBELEN, N, et al. Préfédure de la région Aquitaine, Opération sectorielle Protection de la nappe de l'oligocène en région bordelaise. Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions. **Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 01-EAU-403 janvier 2002 BRGMIRP-51178-FR**. Disponible em: <<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51178-FR.pdf>>. Acesso em: 8 ago. 2023.
- SILVA, J. E. D. Água subterrânea na bacia experimental de Aiuaba-CE. **Tese (em Engenharia Civil): UFC**, 2008.
- SILVA, R. C. A.; ARAUJO, T. M. Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana - Bahia. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 8 n. 4, p. 1019-1028, 2003. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232003000400023>.
- SIMONOT M. Les ressources en eau souterraine de la région de Port-au-Prince : situation actuelle et recommandation [Groundwater resources in the Port-au-Prince region: current situation and recommendations]. HAI/79/001, **Project of the UN**, Port-au-Prince, Haiti, 1982.
- SMIDA, H. A. ; CHOKRI, A.; MONCEF, Z.; DHIA , H. B. Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un Système d'information

géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax, Tunisie). **Science et changements planétaires/Sécheresse**, v. 21, n. 2, p. 131-146, 2010. <https://doi.org/10.1684/sec.2010.0246>.

SOBRINHO, L. C. G. **Metodologias de determinação de vulnerabilidade de aquíferos à contaminação ambiental: uma análise crítica**. Universidade Federal de Minas Gerais ,Belo horizonte. Brasil, 2009.

SANTOS, R. G.; MARQUE, M. L.; STURANO , J. R. Geoprocessamento aplicado a análise do índice de vulnerabilidade DRASTIC no sistema aquífero Guarani em Ribeirão Bonito – SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 2, p. 391-406, 2016. <https://doi.org/10.14393/rbcv68n2-44402>.

SOUZA, N. A. D. Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas Um estudo do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG. **Dissertação de mestrado** , Universidade Federal Uberlândia, Brasil. 2013.

TAHA, B. Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de sources de la région de Lardjem, Tissemsilt. **Thèse** (Master en Ecologie et Environnement). Université de Tissemsilt. 2021.

TANAJURA, D. D. S. **Avaliação do método Drastic na estimativa da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no Sistema Jacaré-Tietê/Sp**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São paulo. Brasil, 2018.

TAYLOR JR., G. C. ; LEMOINE, R. C. **Ground water in the Cul-de-Sac Plain, Haïti**, 1949. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr49114>. Acesso em: 24 jul. 2023.

TAYLOR JR., G. C. ; LEMOINE, R. C. **Les rivières et les sources de la Plaine du Cul-de-Sac : extrait du rapport sur les eaux souterraines de la Plaine du Cul-de-Sac**, 1946. Disponível em: <<https://pubs.er.usgs.gov/publication/70102161>>. Acesso em: 24 jul. 2023.

TAYLOR, P. GABRIELLI, E. **Plans de gestion intégrée des ressources en eau : Manuel de Formation et Guide Opérationnel**. 2005. Disponível em: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/gwp_plans_gire_manuel_fr.pdf. Acesso em: 16 abr. 2024.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO ; MCM de,et al. Decifrando a terra. São Paulo: **Oficina de Textos**. 2000.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology. **Centerton**, v. 10, n. 3, p.311, 1957.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology**, Centerton, v. 8, n.1, 104p, 1955.

UE- Union européenne. Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. **Journal Officiel des Communautés Européennes**, v. 330, n. 5.12, p 32-54, 2015. Disponível em: <http://data.europa.eu/eli/dir/1998/83/2015-10-27>. Acesso em: 12 mar. 2024.

UHM – Unidade Hidro Meteorológica . **Relatório de dados mensais de temperaturas e pluviometrias**: Porto Príncipe. Estação meteorológica do Aeroporto de Porto Príncipe(APP), 2018.

VAN, S, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **AVI:A method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canadá**. PPWD. Pilot Project. Set-1991- mach 1992, Groundwater and Contaminants Project. Environmental Sciences, Division, National Hidrology Research Institute, 1992.

WAITE. R. L.; MARKLEY. B.; ROBERT. B.; BUCKALEW. J. O. Water Resources Assessment of Haiti. US Army Corps of Engineers Mobile District and Topographic **Engineering Center**, 1999. Disponível em: <https://www.sam.usace.army.mil/Portals/46/docs/military/engineering/docs/WRA/Haiti/Combined%20Final%20Haiti.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2024.

WHO - World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality**. 2011. Disponível em: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf?sequence=1. Acesso em: 10 fev2024.

WOODRING, W. P.; BROWN, J. S.; AND BURBANK, W. S. Geology of the Republic of Haiti. **Department of Public Works**, Port-au-Prince, Haiti, 1924.

WOOLDRIDGE, J. M. Introdução à Econometria: Uma abordagem moderna. **5. ed**. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

Anexo 1

Type de Rapport: Coupes Lithologique et Technique					TRAVAUX REALISES: FORAGE D'EAU	
Projet: Eau Potable						
Client: CAMPEF1					Entreprise: HAITI FORATECH	
Localisation: Glaciers					Ingenieur: Arlande PIERRE	
Profondeur	Symbole	Description	Prof./Elev.		Remarques	
0		Ground Surface	0		Tubo prior 24"	
1			0			
2						
3						
4		SABLE			Niveau statique: 5 mètres	
5			6			
6			-6			
7						
8						
9						
10		ARGILE				
11						
12						
13						
14			15			
15			-15			
16		GRAVIER	16			
17			-16			
18						
19		ARGILE	21.1			
20			-21.1			
21						
22		ARGILE ET GRAVIER	24			
23			-24			
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30		GRAVIER			Crepines PVC SCH80/12"	
31						
32						
33						
34						
35			38.1			
36			-38.1			
37						
38						
39		ARGILE				
40						
41						
42						
43						
44			45.1			
45			-45.1			
46					Crepines PVC SCH80/12"	
47						
48						
49						
MACHINE DE FORATION: FAIRING CF-15 FORD					HAITI FORATECH B.P 15662	
METHODE DE FORATION: Rotation à ciment directe					Varreux 1, Route Nationale	
DATE DE FORATION Du 15 Mai au 16 Juin 2000					No: 1 P-au-P, Haiti - Tel: (509)	
					250-9490/510-7434	
					Fax: 250-9376	
					DIAMETRE DE FORATION	
					FORAGE 110MM/12"	
					DEBIT:	
NOMBRE DE PAGE: 1 of 3						

Type de Rapport: Groupes Lithologiques et Techniques

TRAVAUX REALISES: FORAGE D'EAU

Projet: Eau Potable

Client: CAMPEPI

Entreprise: HAITI FORATECH

Localisation: Glacière

Ingénieur: Arlande PIERRE

Profondeur	Symbole	Description	Prof/Elev.		Remarques
50		ARGILE ET SABLE			Crepines PVC SCH80/12"
51					
52					
53					
54					
55					
56					
57					
58					
59					
60		GRAVIER	66.2		Crepines PVC SCH80/12"
61			66.2		
62		ARGILE	66.2		
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70					
71		ARGILE ET GRAVIER	66.3		Crepines PVC SCH80/12"
72					
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					
81		ARGILE	66.3		Crepines PVC SCH80/12"
82			66.3		
83		ARGILE ET GRAVIER	66.3		
84			66.3		
85		ARGILE	66.3		
86			66.3		
87		ARGILE ET GRAVIER	66.3		
88			66.3		
89		ARGILE	66.3		
90			66.3		
91		ARGILE ET GRAVIER	66.4		
92			66.4		
93					
94					
95					
96					
97					
98					

MACHINE DE FORATION FAIRING CF-15 FORD

HAITI FORATECH B.P 15662

DIAMETRE DE FORATION

METHODE DE FORATION: Rotation à circuit direct

Vareux 1. Route Nationale

FORAGE 110W/12"

DATE DE FORATION Du 15 Mai au 16 Juin 2000

No: 1 P-au-P, Haiti -Tel: (509)

250-9490/510-7434

Fax: 250-9376

DEBIT:

NOMBRE DE PAGE: 2 of 3

Type de Rapport: Coupes Lithologique et Technique				TRAVAUX REALISES: FORAGE D'EAU	
Projet: Eau Potable				Entreprise: HAITI FORATECH	
Client: CAMEP/F1				Engineur: Arlande PIERRE	
Localisation: Clerpine					

COUPE LITHOLOGIQUE					
Profondeur	Symbol	Description	Depth/Elev.		REMARQUES
99		GRAVIER			Crepines PVC SCH80/12"
100					
101					
102					
103					
104			104		
105		ARGILE	-104		
106					
107					
108					
109					
110			110		Capot soude
111		Fin de foration	-110		
112					
113					
114					
115					
116					
117					
118					
119					
120					
121					
122					
123					
124					
125					
126					
127					
128					
129					
130					
131					
132					
133					
134					
135					
136					
137					
138					
139					
140					
141					
142					
143					
144					
145					
146					
147					
148					

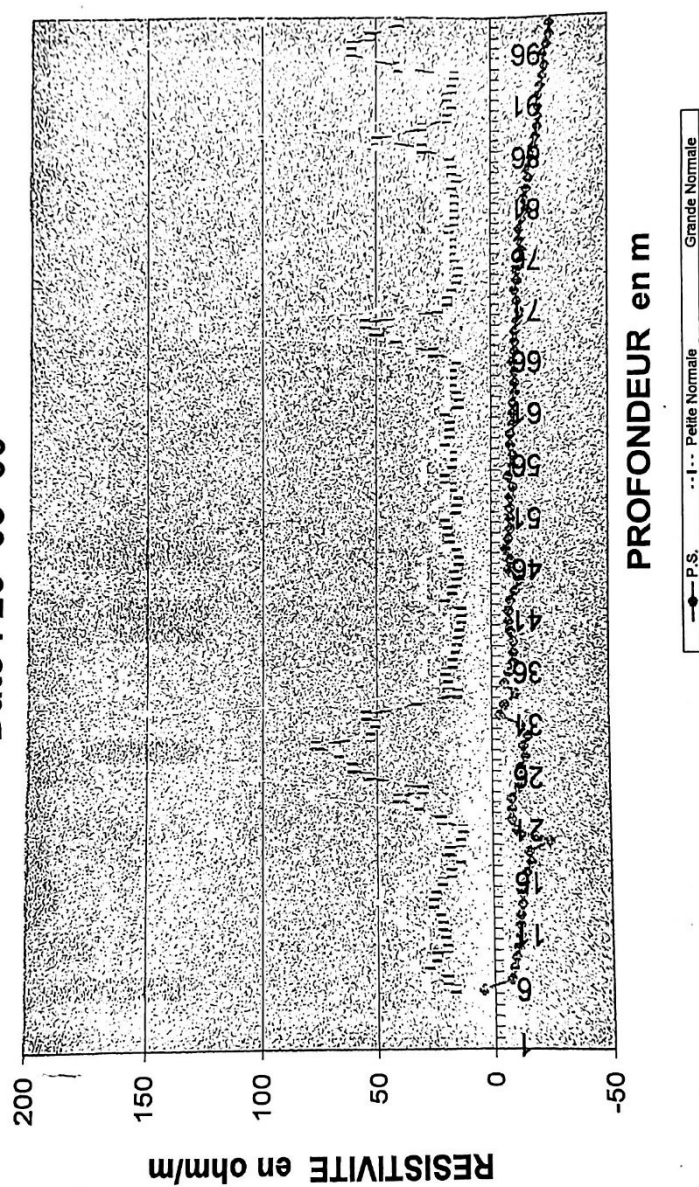
MACHINE DE FORATION: FAILING CF-15 FORD	HAITI FORATECH BP 15662	DIAMETRE DE FORATION:
METHODE DE FORATION: Rotation à circul.directe	Varreux Route Nlle No:1	FORAGE: 110M/12"
DATE DE FORATION: Du 15 Mai au 16 Juin 2000	Port-au-Prince, Haiti	DEBIT:
	Tel: (509) 250-9490/510-7434	
	Fax: 250-9376	

Page: 3 of 3

Anexo 2

Carottage électrique et perméabilité du forage F1 / à Clercine pour la CAMEP

Date : 26-05-00



Le test de pompage a permis de déterminer que l'aquifère possède une perméabilité de $8,4 \times 10^{-4}$ m/s, ce qui indique une capacité modérée à transmettre l'eau. Cette valeur correspond à une formation aquifère relativement perméable, typique de matériaux tels que le sable fin ou les graviers fins, ce qui caractérise un milieu à perméabilité moyenne à élever selon les classifications hydrogéologiques.