



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL

JANDSON ALBUQUERQUE ALVES

**ESTRUTURAÇÃO PRELIMINAR DE BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO
DE SONDAGENS À PERCUSSÃO E MISTAS EM FORTALEZA - CE**

FORTALEZA - CE

2023

JANDSON ALBUQUERQUE ALVES

ESTRUTURAÇÃO PRELIMINAR DE BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO DE
SONDAGENS À PERCUSSÃO E MISTAS EM FORTALEZA - CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura

FORTALEZA - CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A479e Alves, Jandson Albuquerque.
Estruturação preliminar de banco de dados georreferenciado de sondagens à percussão e mistas em Fortaleza - CE / Jandson Albuquerque Alves. – 2023.
96 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura.
1. Sondagens SPT. 2. Sistema de Informação Geográfica. 3. Georreferenciamento. I. Título.
CDD 620
-

JANDSON ALBUQUERQUE ALVES

ESTRUTURAÇÃO PRELIMINAR DE BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO DE
SONDAGENS À PERCUSSÃO E MISTAS EM FORTALEZA - CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 06/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Cely Martins Santos de Alencar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M. Sc. Helano Wilson Pimentel
Examinador externo

A Deus, por sempre me conduzir.

Aos meus amados pais, João e Edna, pela
minha educação e formação.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Alfran Sampaio Moura, pessoa a quem estimo e admiro muito, que aprofundou meu interesse pela geotecnia.

A professora Dra. Marisete Dantas de Aquino, que lecionou a disciplina de Projeto de Graduação I e II.

Ao professor Dr. Antônio Paulo de Hollanda Cavalcante, que participou do meu amadurecimento acadêmico, durante os dois anos que fui seu bolsista.

A todos os membros da coordenação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, em especial para a coordenadora Dra. Cely Martins Santos de Alencar, que forneceu todo o suporte possível aos alunos durante seus mandatos.

A todos os professores, que durante o ciclo básico e profissional participaram da minha graduação.

Ao Msc. Helano Wilson Pimentel que contribuiu com o presente trabalho, fornecendo os dados base de sua dissertação.

Ao sócio gerente da empresa Tecnord - Tecnologia Nordeste de Solos e Fundações, Alan Kélcio Figueirêdo Scipião, que prontamente me acolheu e permitiu a coleta de relatórios de sondagem, possibilitando o presente trabalho de ser realizado.

Ao diretor técnico da empresa Pilotis Engenharia, Msc. Bergson da Silva Matias, que forneceu relatórios de sondagens.

Ao engenheiro civil Daniel Carlos Gois Brito, que também forneceu relatórios de sondagens e contribuiu com ideias para este trabalho.

A Ingrid Alves Silva, que auxiliou na correção dos textos deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, que se empenharam em ajudar uns aos outros.

“Infelizmente, solos são produzidos pela natureza e não pelo homem, e os produtos da natureza são sempre complexos.” (Karl Terzaghi).

RESUMO

O presente trabalho é resultado da coleta e da organização de um banco de dados georreferenciado de investigações geotécnicas preliminares, por ensaios de campo: *Standard Penetration Test* (SPT), sondagem rotativa e sondagem mista; realizados no município de Fortaleza - CE, no qual tem aproximadamente 312 km² de área. Ademais, como exemplificação, elaborou-se boletins uniformizados de sondagens no bairro Guararapes. Atualmente, existe uma problemática envolvendo a ausência de informações geotécnicas do solo fortalezense reunidas sistematicamente, que auxiliem futuros estudos preliminares; no entanto, sem a intenção de dispensar a necessidade de investigações específicas em cada terreno a construir. Nessa perspectiva, tem-se como objetivo estruturar um banco de dados georreferenciado de sondagens realizadas no município de Fortaleza – CE, com capacidade de ser compartilhável digitalmente. Por meio de uma metodologia baseada na coleta de dados e na implementação de um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), aplicada em 751 furos de sondagens selecionados. Dessa forma, utilizou-se as ferramentas do *Google Earth Online* para distribuir espacialmente os furos, posteriormente, com o programa QGIS 3.28.11 realizou-se o geoprocessamento e produção cartográfica. Além disso, a plataforma *Google My Maps* foi escolhida para receber os dados processados, por ser gratuita e de fácil edição, com o compartilhamento dos boletins uniformizados via *link* do *Google Drive*. Portanto, este trabalho fornece um banco de dados de sondagens georreferenciado, com relevância tanto acadêmica para embasar futuras pesquisas, quanto prática na sociedade. Enfim, espera-se que o presente trabalho possa futuramente contribuir para a elaboração de mapeamentos geotécnicos de Fortaleza, com a finalidade de nortear o planejamento de obras e empreendimentos na capital cearense.

Palavras-chave: Sondagens SPT; Sistema de Informação Geográfica; Georreferenciamento.

ABSTRACT

The present work is the result of the collection and organization of a georeferenced database of preliminary geotechnical investigations, through field tests: Standard Penetration Test (SPT), rotary drilling and mixed drilling; carried out in the municipality of Fortaleza - CE, which has an area of approximately 312 km². Furthermore, as an example, standardized survey bulletins were prepared in the Guararapes neighborhood. Currently, there is a problem involving the lack of systematically gathered geotechnical information on the soil of Fortaleza, which would assist future preliminary studies; however, without the intention of dispensing with the need for specific investigations on each plot of land to be built. From this perspective, the objective is to structure a georeferenced database of surveys carried out in the city of Fortaleza – CE, with the ability to be digitally shareable. Through a methodology based on data collection and the implementation of a Geographic Information System (GIS) environment, applied to 751 selected drilling holes. In this way, Google Earth Online tools were used to spatially distribute the holes; later, with the QGIS 3.28.11 program, geoprocessing and cartographic production were carried out. Furthermore, the Google My Maps platform was chosen to receive the processed data, as it is free and easy to edit, with uniform bulletins being shared via a Google Drive link. Therefore, this work provides a georeferenced survey database, with both academic relevance to support future research and practical relevance in society. Finally, it is hoped that this work can contribute in the future to the preparation of geotechnical mapping of Fortaleza, with the purpose of guiding the planning of works and projects in the capital of Ceará.

Keywords: SPT surveys; Geographic Information System; Georeferencing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista de parte do litoral norte de Fortaleza em 2001.	18
Figura 2 – Métodos de sondagem.....	22
Figura 3 – Etapas na execução de sondagem à percussão: (a) avanço da sondagem por desagregação e lavagem; (b) ensaio de penetração dinâmica (SPT).....	24
Figura 4 – Esquema de funcionamento de sonda rotativa.	25
Figura 5 – Exemplo de boletim de sondagem SPT.....	27
Figura 6 – Componentes de um SIG.	33
Figura 7 – Formas de dados gráficos de um SIG.	34
Figura 8 – Etapas de um geoprocessamento de dados.....	35
Figura 9 – Funcionamento de um SIG: (a) estrutura de dados geográficos vetorial e raster; (b) representação do espaço real em camadas.	36
Figura 10 – Logotipo do programa QGIS.	37
Figura 11 – Interface do programa QGIS.	38
Figura 12 – Mapa ilustrativo da localização de Fortaleza.	39
Figura 13 – Mapa socioeconômico de Fortaleza.	40
Figura 14 – Mapa de densidade populacional em Fortaleza.	41
Figura 15 – Evolução histórica da cidade de Fortaleza.	42
Figura 16 – Vista de satélite da cidade de Fortaleza.....	43
Figura 17 – Mapa de divisões administrativas de Fortaleza.....	44
Figura 18 – Mapa de isoietas de precipitação em Fortaleza.....	45
Figura 19 – Mapa hidrográfico de Fortaleza.	46
Figura 20 – Mapa de isovalores do nível freático.	47
Figura 21 – Mapa planialtimétrico de Fortaleza.....	49
Figura 22 – Mapa geológico simplificado de Fortaleza.	50
Figura 23 – Mapa geotécnico preliminar de Fortaleza elaborado por Colares (1996).	53
Figura 24 – Mapa de isovalores do Nspt a 10 m de profundidade na porção norte de Fortaleza elaborado por Pimentel (2015).	55
Figura 25 – Mapa de isovalores do Nspt a 5 m de profundidade em Fortaleza elaborado por Carvalho (2016).	56
Figura 26 – Proposta metodológica esquemática.	58
Figura 27 – Plataforma Fortaleza em Mapas.....	60
Figura 28 – Plataforma Geologia.GIS.	60

Figura 29 – Georreferenciamento de furos de sondagem.....	62
Figura 30 – Organização dos relatórios de sondagem em pastas.	64
Figura 31 – Comparação entre antes e depois da atualização da carta de Colares (1996).	66
Figura 32 – Mapa altimétrico de Fortaleza.....	67
Figura 33 – Mapa hipsométrico de Fortaleza.	68
Figura 34 – Mapa de declividade de Fortaleza.....	69
Figura 35 – Mapa atualizado do zonamento geotécnico de Colares (1996).....	71
Figura 36 – Mapa de origem dos solos de Fortaleza, de acordo com Colares (1996).....	72
Figura 37 – Mapa da resistência dos solos de Fortaleza, de acordo com Colares (1996).	73
Figura 38 – Recorte da tabela de atributos do banco de dados de sondagens.	74
Figura 39 – Mapa de localização dos furos de sondagem em Fortaleza.	74
Figura 40 – Mapa da quantidade de furos de sondagem por bairro de Fortaleza.....	75
Figura 41 – Mapa de densidade de furos de sondagem.	76
Figura 42 – Furos de sondagem e faixas de densidade na região centro-norte.	77
Figura 43 – Furos de sondagem e altitude na região centro-norte.....	78
Figura 44 – Furos de sondagem e zonas geotécnicas na região centro-norte.....	79
Figura 45 – Dispersão de furos de sondagem em quatro grupos de meses.	80
Figura 46 – Padrões gráficos adotados.	85
Figura 47 – Boletim uniformizado da sondagem GR23.....	86
Figura 48 – Interface inicial da plataforma <i>Google My Maps</i>	87
Figura 49 – Funcionamento da Plataforma Colaborativa.	88
Figura 50 – Ampliação em folha A3 da Figura 42.	96
Figura 51 – Ampliação em folha A3 da Figura 43.	97
Figura 52 – Ampliação em folha A3 da Figura 44.	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Precipitação acumulada média mensal (série histórica de 1991 a 2020).	45
Gráfico 2 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a regiões administrativas.	81
Gráfico 3 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação as classes de altitude.	81
Gráfico 4 – Distribuição de frequências de furos de sondagem ao longo dos anos.	82
Gráfico 5 – Distribuição de frequências de furos de sondagem nos meses.	83
Gráfico 6 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a zona geotécnica de Colares (1996).	83
Gráfico 7 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a bacia hidrográfica.	84
Gráfico 8 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a origem do solo.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estados de compacidade e consistência.....	23
Quadro 2 – Classificação da rocha em função do RQD.....	26
Quadro 3 – Sistema de codificação das zonas de Colares (1996).	52
Quadro 4 – Síntese produzida por Fonteles (2003) das características geológicas-geotécnicas de três unidades litológicas.....	54
Quadro 5 – Codificação adotada para cada bairro de Fortaleza, com indicação de presença (cor preta) ou ausência (cor cinza) de furos de sondagem.....	63
Quadro 6 – Simplificação da codificação de Colares (1996).	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coesão dos solos argilosos.....	28
Tabela 2 – Ângulo de atrito de solos arenosos.	29
Tabela 3 – Correlações utilizadas para estimar o ângulo de atrito.	29
Tabela 4 – Peso específico das argilas.	29
Tabela 5 – Peso específico das areias.	30
Tabela 6 – Coeficiente de Poisson.....	30
Tabela 7 – Correlações utilizadas para estimar o módulo de deformabilidade.	31
Tabela 8 – Localização geográfica de Fortaleza.....	39
Tabela 9 – Área das Secretarias Regionais de Fortaleza.	43
Tabela 10 – Profundidade resistente das zonas de Colares (1996).....	54
Tabela 11 – Classes de declividade.	65
Tabela 12 – Quantidade de furos de sondagem em cada unidade litoestratigráfica.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
CAD	Computer Aided Design.
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação.
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército.
DWG	AutoCAD Drawing Database
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará.
IPLANFOR	Instituto de Planejamento de Fortaleza
KML	Keyhole Markup Language
MDE	Modelo Digital de Elevação
NBR	Norma Brasileira.
PDF	Portable Document Format
PIB	Produto Interno Bruto.
PMF	Prefeitura Municipal de Fortaleza
RQD	Rock Quality Designation.
SER	Secretaria Executiva Regional.
SGB	Serviço Geológico do Brasil.
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados.
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SM	Sondagem Mista
SPT	Standard Penetration Test.
SR	Sondagem Rotativa
TELEBRÁS	Telecomunicações Brasileiras S.A
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro.
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Temática da pesquisa.....	19
1.3	Justificativa	19
1.4	Objetivos	20
1.5	Estrutura da monografia.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Investigações geotécnicas	21
2.1.1	Programa de investigação geotécnica	21
2.1.2	Sondagem à percussão	23
2.1.3	Sondagem rotativa e mista	25
2.1.4	Relatório de sondagem.....	26
2.1.5	Correlações e parâmetros do solo	27
2.2	Sistema de informação geográfica (SIG).....	32
2.2.1	Histórico da tecnologia	32
2.2.2	Banco de dados georreferenciado	33
2.2.3	Geoprocessamento de dados	34
2.2.4	Exemplos de aplicação.....	36
2.2.5	Sistema QGIS.....	37
2.3	Caracterização geral de Fortaleza	39
2.3.1	Contexto urbano	41
2.3.2	Contexto hidrológico.....	44
2.3.3	Contexto geomorfológico.....	47
2.3.4	Contexto geológico	49
2.3.5	Contexto geotécnico.....	52

3	METODOLOGIA DO TRABALHO	57
3.1	Classificação da pesquisa	57
3.2	Planejamento da pesquisa	57
3.3	Plataformas e programas utilizados	59
3.4	Levantamento de bases cartográficas e descritivas	59
3.5	Aquisição de relatórios de sondagem.....	61
3.6	Georreferenciamento de furos de sondagem.....	61
3.7	Organização do banco de dados	63
3.8	Produção cartográfica e documental	65
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
4.1	Modelo Digital de Elevação de Fortaleza	67
4.2	Mapa atualizado do zoneamento geotécnico de COLARES (1996).....	70
4.3	Mapa da localização dos furos de sondagem	73
4.4	Mapas temáticos dos furos de sondagem	75
4.5	Análise do banco de sondagens	81
4.6	Boletins uniformizados de sondagem	85
4.7	Ambiente colaborativo entre pesquisadores	87
5	CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES	89
5.1	Considerações finais.....	89
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	90
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE A – AMPLIAÇÃO DE MAPAS COM FUROS DE SONDAÇÃO	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O crescimento econômico cearense nas últimas décadas tornou a construção civil um dos principais segmentos econômicos do estado. Neste contexto, destaca-se a cidade de Fortaleza (Figura 1) que gera demanda por empreendimentos de diferentes portes, tanto por órgãos públicos como pela iniciativa privadas. Essa condição exige estudos preliminares mais assertivos e uso de tecnologias apropriadas.

Diante disso, os estudos geotécnicos para implantação de novos empreendimentos envolvem investigações de campo e de laboratório, etapas fundamentais para embasar projetos de fundações, contenções, rodovias, portos, aeroportos, escavações, entre outros. Dentre essas, destaca-se o ensaio de sondagem à percussão (SPT) e de sondagem mista (SM), que fornecem as principais características (qualitativas e quantitativas) dos solos e das rochas, respectivamente.

Figura 1 – Vista de parte do litoral norte de Fortaleza em 2001.



Fonte: Fonteles (2003, p. 62).

O emprego de metodologias para investigações e caracterizações geotécnicas preliminarmente têm considerável influência no planejamento de novas construções, possibilitando do direcionamento de projetos para áreas mais adequadas.

Na última década, a potencialização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitiu o aprimoramento dos trabalhos com dados georreferenciados por possibilitar análises

espaciais complexas, associada a informações gráficas e alfanuméricas, com processamento ágil e eficiente (Santos, 2016 *apud* Oliveira, 2018). Portanto, o SIG é uma ferramenta tecnológica para compreensão geográfica que auxilia na tomada de decisões.

Assim, de posse dos dados de sondagens, pode-se agregá-los espacialmente, por meio de um ambiente SIG. Estas ferramentas possibilitam a aplicação de técnicas de geoprocessamento de dados, essas práticas representam um importante passo para estudos geotécnicos no Ceará.

1.2 Temática da pesquisa

A temática do presente trabalho envolve a consolidação de boletins de sondagem em um banco de dados e o vínculo de cada furo de sondagem a uma referência espacial, por meio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), em diversos bairros do município de Fortaleza, no estado do Ceará.

1.3 Justificativa

Na construção civil, muitos projetos são elaborados sem as devidas investigações geotécnicas, ocasionando, em muitos casos, redução de desempenho e patologias estruturais; desta forma, o conhecimento das propriedades dos solos é o fator primordial para o sucesso de um projeto. A falta dessas informações leva o profissional a adotar parâmetros generalistas, mas que, muitas vezes, não representam as condições reais na região, acarretando em projetos inadequados tecnicamente ou adoção de elevados fatores de segurança (Diniz, 2013).

A criação de cartas geotécnicas é uma prática importante e bastante comum entre os pesquisadores, mas sua aplicação deve ser delimitada na fase preliminar de projeto, essas cartas não podem substituir uma investigação detalhada no subsolo local da obra. Além disso, a construção de um modelo representativo do solo precisa ser fundamentada em resultados de ensaios; nesse sentido, mediante a um amplo banco de dados local é possível sanar esse problema ao aproximar-se da realidade.

Diante disso, a justificativa para a realização do presente trabalho é motivada em reunir um conjunto de informações capaz de auxiliar estudos de viabilidade, guiar as soluções geotécnicas preliminares, contribuir com o planejamento de obras de infraestrutura. A criação de uma base sistematizada de informações geotécnicas pode auxiliar no planejamento de novas sondagens e no conhecimento do perfil do solo.

Nessa perspectiva, os bancos de dados georreferenciados são de grande auxílio na Engenharia Civil, com eles tendo relevância tanto acadêmica (subsidiar pesquisas geotécnicas), quanto prática na sociedade em futuros projetos na capital cearense.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estruturar preliminarmente um banco de dados georreferenciado de sondagens realizadas no município de Fortaleza – CE, com capacidade de ser compartilhável digitalmente, por meio da implementação de um ambiente de SIG.

Ademais, objetiva-se especificamente neste trabalho: levantar uma quantidade expressiva de relatórios de sondagem, disponibilizar mapas temáticos da área de estudo e propor uma sistematização para colaboração entre pesquisadores.

1.5 Estrutura da monografia

Para atingir os objetivos citados anteriormente, a presente monografia será organizada em cinco capítulos, descritos a seguir:

- a) 1º Capítulo (introdução), discorrerá sobre a contextualização do tema e demais características deste estudo, com a apresentação dos objetivos definidos;
- b) 2º Capítulo (fundamentação teórica), conterá uma síntese expositiva dos principais conceitos que envolverão toda a pesquisa, mediante ao embasamento encontrado na literatura, abordando-se os seguintes assuntos:
 - investigações geotécnicas;
 - Sistema de Informação Geográfica (SIG);
 - caracterização geral de Fortaleza – CE.
- c) 3º Capítulo (metodologia do trabalho), descreverá os materiais e métodos utilizados neste trabalho, desta forma, fornecendo as bases sistemáticas para a construção do banco de dados;
- d) 4º Capítulo (apresentação e discussão dos resultados), apresentará os resultados obtidos a partir da metodologia, com os devidos comentários, além de expor as análises, documentações e produtos cartográficos;
- e) 5º Capítulo (considerações e sugestões), finalizará o trabalho, com as considerações finais do presente autor, bem como as sugestões para trabalhos futuros e estudos complementares.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Investigações geotécnicas

A investigação geotécnica consiste em um conjunto de ensaios que visam conhecer e entender o comportamento dos solos e das rochas, assim como a estratigrafia geológica que compõem estas estruturas naturais (Carvalho, 2016). Os resultados dos ensaios fornecem informações mais detalhadas do terreno e dos parâmetros geotécnicos: resistências, deformabilidade, permeabilidade, entre outros.

Segundo Belicanta (1998) *apud* Fonteles (2003, p. 6), “no final do século XIX, os meios de investigação dos solos se restringiam à abertura de poços, escavações de grande porte e à perfuração por circulação de água”. Durante meados do século XX, a geotecnia se consolida como um campo de estudos independente, havendo assim o desenvolvimento de novas metodologias. Os principais métodos podem ser categorizados em ensaios de campo ou de laboratório.

Velloso e Lopes (2011) recomendam que o engenheiro geotécnico deve estar ativamente envolvido com o processo de investigações do subsolo; os autores também expõem que, na prática, dificilmente isso acontece. Militisky, Consoli e Schnaid (2008) relatam que a ausência completa de investigações representa cerca de 80% dos casos de desempenho inadequado de estruturas geotécnicas. Ou seja, é imprescindível que qualquer obra de engenharia em contato com o solo tenha no mínimo uma investigação preliminar de campo.

2.1.1 Programa de investigação geotécnica

Primeiramente, segundo Velloso e Lopes (2011), é fundamental definir o programa para a realização de uma investigação adequada do subsolo, esse programa pode abranger até três etapas com objetivos diferentes, estas etapas são: preliminar, complementar e da fase executiva da obra.

Para a definição de um programa de investigação, o engenheiro geotécnico deve realizar estudos prévios, em busca de publicações técnicas sobre o contexto regional (hidrogeológico, pedológico, geológico e geotécnico). Também, dispendo da locação do terreno, levantamento planialtimétrico, informações de projeto e códigos de obras locais. Além disso, é necessário consultar a norma ABNT NBR 8036/1983, que busca nortear os projetistas quanto a tomada de decisão, com a especificação do número mínimo de furos de sondagem e

profundidade mínima de exploração do solo (Militisky; Consoli; Schnaid, 2008; Velloso; Lopes, 2011).

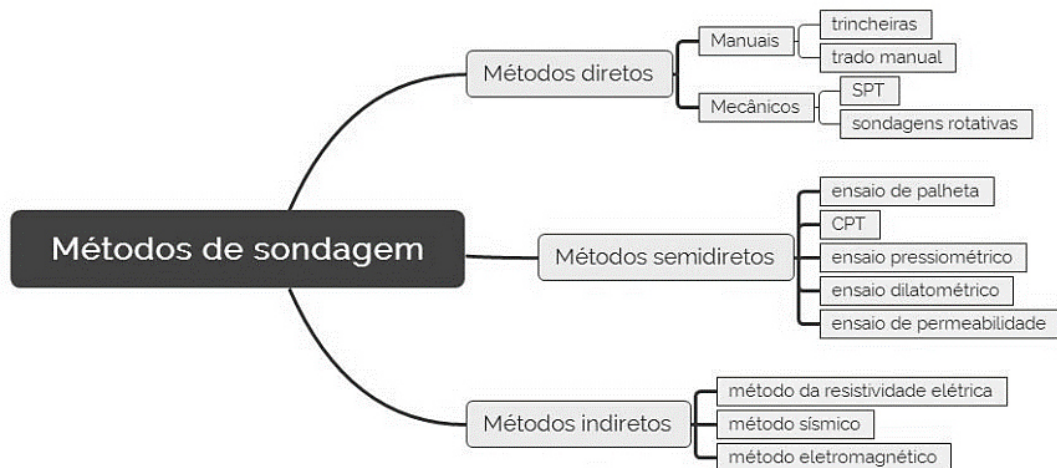
Na investigação preliminar, tem-se como objetivo conhecer as características descritivas das camadas do subsolo (textura, índice de resistência, coloração, entre outros); em geral, é realizado apenas com sondagens à percussão. Em casos onde há necessidade de ultrapassar camadas de rocha, indica-se a solicitação de sondagens rotativas, juntamente com o furo da sondagem à percussão (Velloso; Lopes, 2011). Atualmente, no Brasil, o programa preliminar é normalmente desenvolvido com base no ensaio SPT (Standard Penetration Test), pela ABNT NBR 6484/2020.

Militisky, Consoli e Schnaid (2008) explicam que o programa de investigações complementares depende de alguns fatores, como: condições geotécnicas, aspectos estruturais do projeto, entre outros. Ainda mais, pode-se envolver ensaios em campo (cone, pressiômetro, dilatômetro, palheta, sísmico, dentre outros) e ensaios de laboratório (adensamento, triaxiais, cisalhamento direto, dentre outros).

Segundo Dias (2019) os tipos de ensaios de campo que utilizam a abordagem por sondagem (Figura 2) podem ser categorizados como de:

- a) métodos diretos, resultantes da direta observação do solo, com obtenção de amostragens no percurso da perfuração;
- b) métodos semidiretos, que fornecem detalhes sobre as características geotécnicas do material, porém, sem coletar amostras do solo;
- c) métodos indiretos, que medem indiretamente os parâmetros físicos do solo, normalmente com uso de ondas.

Figura 2 – Métodos de sondagem.



Fonte: Dias (2019, p. 67).

Por fim, Velloso e Lopes (2011) recomendam que deve ser verificado a idoneidade da empresa executora das sondagens, onde o aspecto de custo não pode ser colocado a cima do padrão de qualidade da investigação; os autores reforçam, que financeiramente esse custo é uma fração irrisória do valor total da obra.

2.1.2 Sondagem à percussão

De acordo com ABGE (2013), a sondagem à percussão do tipo SPT é um método de investigação cujo a perfuração avança por meio de um trado ou de um processo de lavagem, onde a quantidade de golpes de cravação do amostrador padrão define o índice de resistência à penetração (N_{spt}), registrado a cada metro.

A norma ABNT NBR 6484/2020 descreve todos os detalhes referentes ao ensaio, como: listagem de equipamentos, requisitos executivos, critérios de paralisação, etapas executivas, entre outros. O Quadro 1 apresenta a classificação do estado de compactidade e consistência das camadas, conforme ABNT NBR 6484/2020.

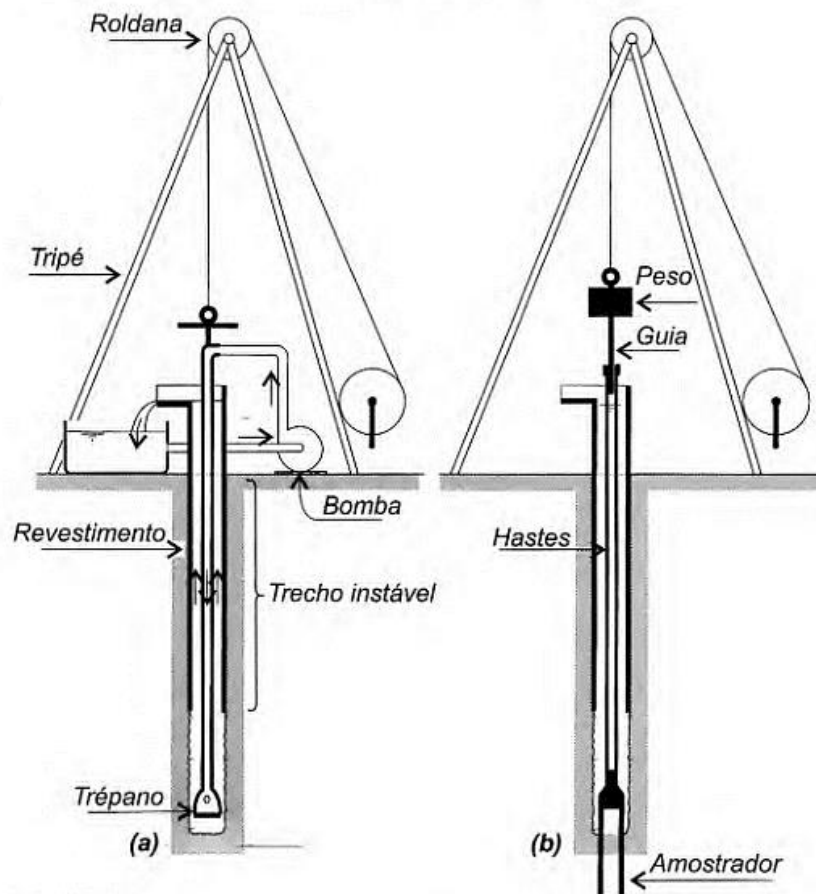
Segundo Velloso e Lopes (2011), este ensaio é capaz de atravessar solos relativamente compactos e duros, em casos de instabilidade da integridade do furo, pode-se revesti-lo (recomendado em areias). A Figura 3 ilustra os equipamentos utilizados.

Quadro 1 – Estados de compactidade e consistência.

Solo	N_{spt}	Compactidade/Consistência
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole(o)
	3 a 5	Mole(o)
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)

Fonte: ABNT NBR 6484/2020, modificado pelo Autor (2023).

Figura 3 – Etapas na execução de sondagem à percussão: (a) avanço da sondagem por desagregação e lavagem; (b) ensaio de penetração dinâmica (SPT).



Fonte: Velloso e Lopes (2011, p. 38).

Ademais, existem críticas ao ensaio, Fonteles (2003) explica que existe uma facilidade na aquisição de equipamentos para a execução do SPT. Seu custo baixo de operação em relação a outros ensaios de campo contribui para que diversos fatores possam influenciar negativamente; acarretando na redução da confiança nos resultados da investigação geotécnica. Estes fatores são basicamente divididos em duas categorias:

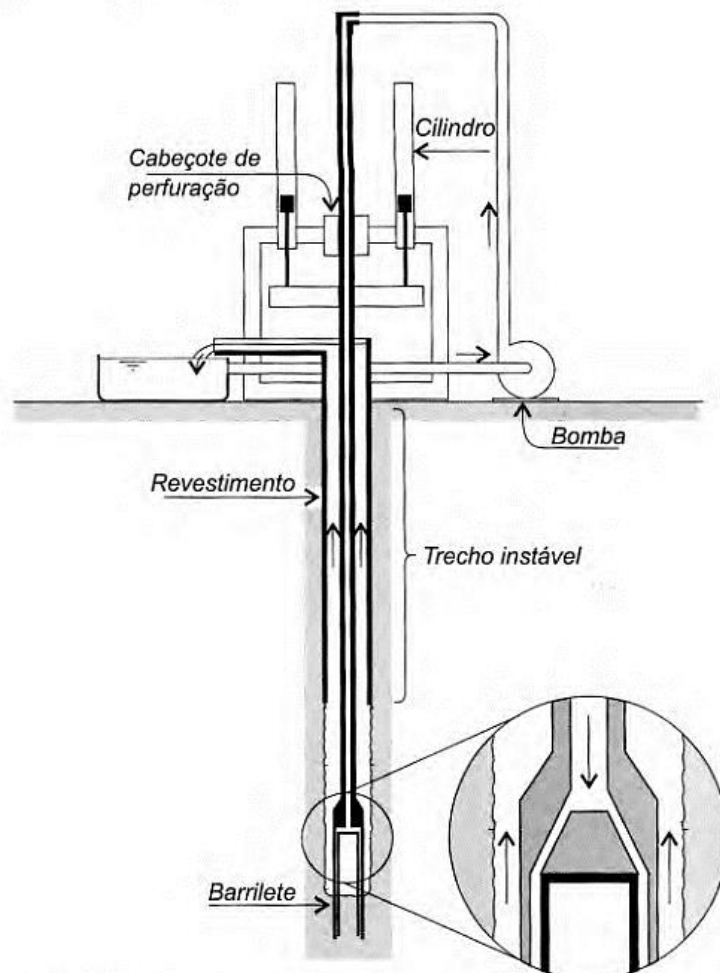
- a) material, atrelado ao estado de conservação e confiabilidade dos equipamentos utilizados na execução do ensaio;
- b) humana, ou seja, envolvem todas as ações realizadas pelos operadores (registro de informações, procedimento executivo, entre outros), esse fator é extremamente crítico, tendo em vista que a maioria dessas sondagens é manual.

Carvalho (2016) expõe que, apesar de existir normativa para o ensaio SPT, ele não é totalmente padronizado, pois a energia de aplicação não é especificada em norma. Desta forma, por não ser quantificada a energia, o ensaio pode conter erros, principalmente mascarando o real índice de resistência à penetração (N_{spt}).

2.1.3 Sondagem rotativa e mista

A ABGE (2013, p. 61) define que, a sondagem rotativa (SR) é uma investigação baseada em um “conjunto mecânico destinado à perfuração de maciços rochosos e obtenção de amostras de materiais rochosos com formato cilíndrico, chamadas de testemunho”. Utiliza-se esse tipo de sondagem quando precisa-se ultrapassar algum elemento de rocha, ou caracterizar especificamente uma camada rochosa. A Figura 4 ilustra esquematicamente o processo de perfuração deste ensaio.

Figura 4 – Esquema de funcionamento de sonda rotativa.



Fonte: Velloso e Lopes (2011, p. 40).

Velloso e Lopes (2011) definem, que as sondagens mistas (SM) são uma combinação entre, um equipamento de sondagem rotativa com um equipamento de sondagem à percussão, em um mesmo furo. Dessa forma, o momento ideal para a substituição do método de sondagem à percussão para o método rotativo deve ocorrer ao atingir o impenetrável ao amostrador do SPT, sem o uso do recurso de lavagem para o avanço da perfuração. É importante

ressaltar, que a lavagem não permite a obtenção de amostras representativas, desagregando o material. Por isso, deve-se buscar seguir esta recomendação para obter uma boa representação do trecho de transição entre solo e rocha (ABGE, 2013).

Existem diversas classificações que descrevem qualitativamente a camada rochosa, uma delas é a qualidade da rocha, conhecida como RQD (*Rock Quality Designation*), que consiste no cálculo de porcentagem de recuperação, em que apenas os fragmentos maiores que 10 cm são considerados (Velloso; Lopes, 2011). Além disso, a ABNT NBR 6502/2022 organiza um conjunto de terminologias, normatizando o padrão de classificação geotécnica de rochas; nesse sentido, a classificação da rocha de acordo com o RQD é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação da rocha em função do RQD.

Classificação RQD	R1	100 –91%	Excelente
	R2	90-76%	Boa
	R3	75-51%	Regular
	R4	50-26%	Pobre
	R5	25-0%	Muito pobre

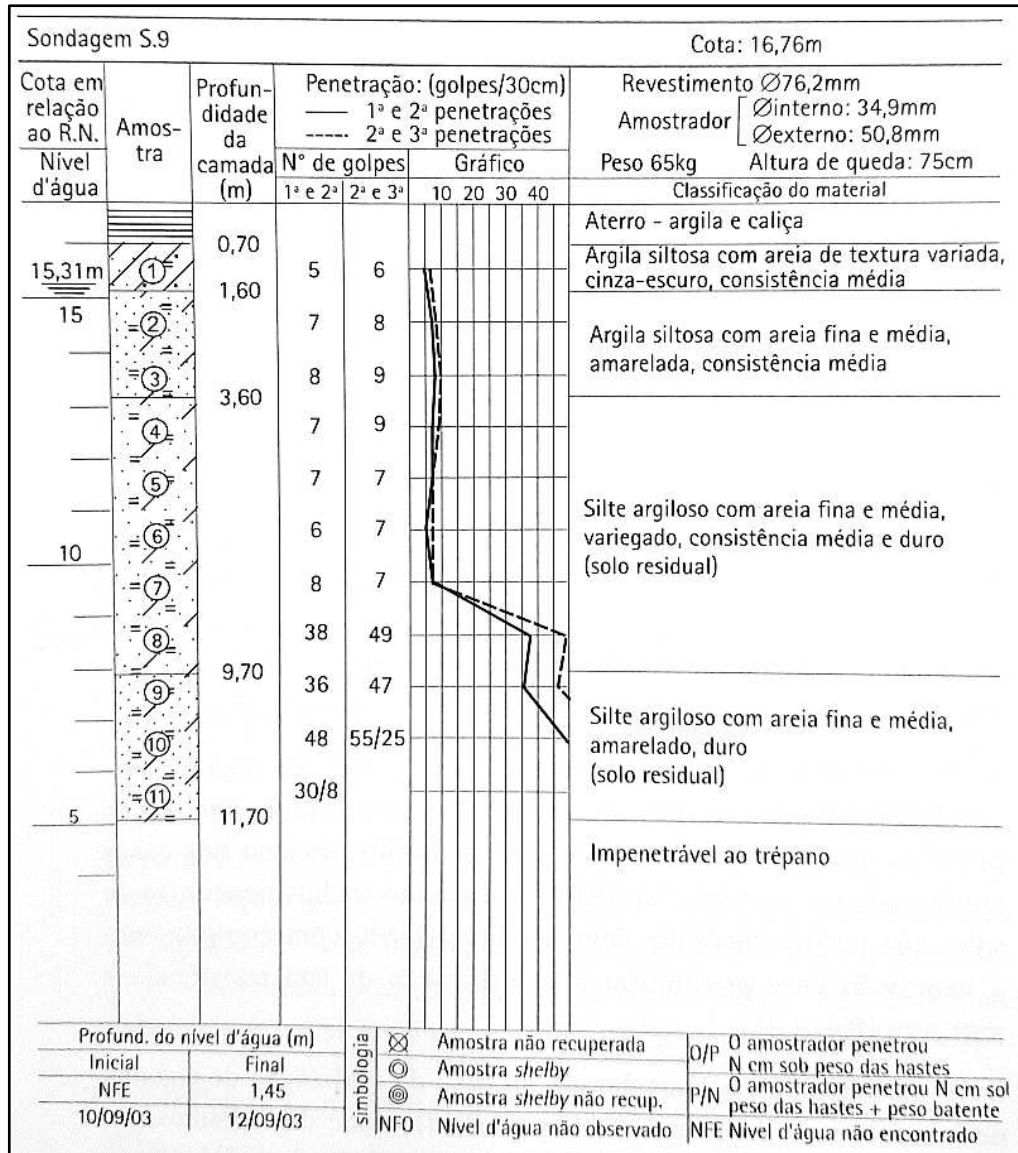
Fonte: ABNT NBR 6502/2022.

2.1.4 Relatório de sondagem

Após a finalização de qualquer ensaio de investigação geotécnica, deve-se apresentar um relatório técnico, com todas as observações, resultados e conclusões. Para isso, a ABNT NBR 6484/2020 tem uma seção dedicada a especificar sobre os itens que devem compor este relatório.

De acordo com ABGE (2013), as principais informações apresentadas em um boletim de sondagem são: perfis individuais na escala 1:100, índice de resistência a penetração das camadas, classificação granulométrica tátil-visual dos materiais, classificação geológica dos materiais e cota do nível freático (caso houver). A Figura 5 ilustra um exemplo de boletim de sondagem SPT típico.

Figura 5 – Exemplo de boletim de sondagem SPT.



Fonte: Militisky, Consoli e Schnaid (2008, p. 31).

2.1.5 Correlações e parâmetros do solo

A presente seção busca elucidar brevemente a importância dos resultados de uma sondagem de simples reconhecimento do solo. Por meio do conhecimento dos tipos de textura encontradas no perfil do solo, juntamente com o N_{spt} das camadas, pode-se correlacionar essas informações com outros parâmetros. As correlações são amplamente aplicadas na engenharia geotécnica, pois em muitas situações preliminares, existe a ausência de ensaios de laboratório para caracterizar o material, ocasionado por aspectos financeiros ou de cronograma.

De acordo com Schnaid (2000) *apud* Sobré (2018), o ensaio SPT apresenta resultados extremamente passíveis de serem correlacionados através de análises empíricas,

apesar de sua simplicidade e baixo custo. Berberian (2015, p. 30) revela que “Estas correlações assumem grande importância prática, tendo em vista que ainda a maioria das obras é projetada e executada sem o apoio de ensaios laboratoriais”, porém, sua precisão e validade dependem diretamente dos critérios estabelecidos pelos estudos.

Na literatura geotécnica, temos diversos estudos que abordam metodologias para estimar preliminarmente parâmetros do solo; por exemplo, no livro de fundações publicado pelos autores Cintra, Aoki e Albiero (2011) e nos trabalhos de revisão bibliográfica de: Berberian (2015), Sobré (2018) e Mendes (2023). Algumas correlações selecionadas pelo presente autor encontram-se dispostas a seguir, juntamente com a Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7:

a) Coesão (c) das argilas;

$$\text{Teixeira e Godoy (1996)} \quad c = 10Nspt \quad (\text{kPa})$$

$$\text{Berberian (2015)} \quad c = \frac{Nspt}{0,35} \quad (\text{kPa})$$

Tabela 1 – Coesão dos solos argilosos.

Argila	Nspt	Coesão c (kPa)
muito mole	< 2	< 10
mole	2 - 4	10 - 25
média	4 - 8	25 - 50
rija	8 - 15	50 - 100
muito rija	15 - 30	100 - 200
dura	> 30	> 200

Fonte: Alonso (2010) *apud* Sobré (2018, p. 24).

b) Ângulo de atrito (ϕ) das areias;

$$\text{Teixeira (1996)} \quad \phi = \sqrt{20Nspt} + 15 \quad (\text{graus})$$

Tabela 2 – Ângulo de atrito de solos arenosos.

Areia	Nspt	Ângulo de atrito ϕ (°)
fofa	< 4	< 30
pouco compacta	4 - 10	30 - 35
medianamente compacta	10 - 30	35 - 40
compacta	30 - 50	40 - 45
muito compacta	> 50	> 45

Fonte: Alonso (2010) *apud* Sobré (2018, p. 25).

Tabela 3 – Correlações utilizadas para estimar o ângulo de atrito.

Método	Expressão	Parâmetro de entrada
Kulhawy e Mayne (1990), proposta 1	$\phi' = 54 - 27,6034 \cdot \exp(-0,014 (N_1)_{60})$	$(N_1)_{60}$
Kulhawy e Mayne (1990), proposta 2	$\phi' = \text{tg}^{-1} \left(\frac{N_{60}}{12,2 + 0,2 \sigma'_v} \right)^{0,34}$	N_{60}, σ'_v
Wolff (1989)	$\phi' = 27,1 + 0,3(N_1)_{60} - 0,00054 (N_1)_{60}^2$	$(N_1)_{60}$
Godoy (1983)	$\phi' = 28^\circ + 0,2 N$	N
Meyerhof (1959) / Yoshida (1988)	$\phi' = 28 + 3,75 \sigma'_v^{-0,012} N_{60}^{0,46}$	N_{60}, σ'_v
Ludovico Marques (1997)	$\phi' = 37,1 \cdot \exp(0,025 P_L)$	P_L
Ménard <i>apud</i> Clarke (1995)	$P_L = 0,25 \left(2^{\frac{\phi' - 24}{4}} \right)$	P_L

Fonte: Mendes (2023, p. 60).

c) Peso específico dos solos;

Tabela 4 – Peso específico das argilas.

Nspt	Consistência	Peso específico (kN/m ³)
≤ 2	Muito mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Godoy (1972) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2011, p. 45).

Tabela 5 – Peso específico das areias.

N _{spt}	Compacidade	Peso específico (kN/m ³)		
		Seco	Natural	Submerso
≤ 8	Fofa a Pouco compacta	16	18	19
9 - 18	Medianamente compacta	17	19	20
≥ 19	Compacta a Muito compacta	18	20	21

Fonte: Godoy (1972) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2011, p. 46).

d) Coeficiente de Poisson dos solos;

Tabela 6 – Coeficiente de Poisson

Solo	ν
areia pouco compacta	0,2
areia compacta	0,4
silte	0,3 - 0,5
argila saturada	0,4 - 0,5
argila não saturada	0,1 - 0,3

Fonte: Teixeira e Godoy (1996) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2011, p. 93).

e) Módulo de deformabilidade dos solos;

Tabela 7 – Correlações utilizadas para estimar o módulo de deformabilidade.

Método	Expressão	Parâmetro de entrada
Mikhejev (1961)	$E = (15000 \text{ to } 22000) \ln N_{55}$	N_{55}
Bowles (1996), proposta 2	$E = (2600 \text{ to } 2900)N_{55}$	N_{55}
De Mello (1971)	$E = 3(N - 3)$	N
Décourt <i>et al.</i> (1989)	$E = 3,5 N_{60}$	N_{60}
Teixeira e Godoy (1996)	$E = \alpha KN$	α^*, K^{**}, N
Trofimenkov (1974)	$E = 43,1 (\log N_{60})$	N_{60}
De Freitas <i>et al.</i> (2012)	$E = 8000 N_{60}^{0,8}$	N_{60}
Afonso (2016)	$E = 2,9 N + 2,7$	N
Ménard (1975)	$E = \frac{E_m}{0,50}$	E_m
	$E_m \leq 10: E = \frac{E_m}{0,50}$	E_m
Ménard (1975) <i>apud</i> Clarke (1995), proposta 2	$E_m > 10: E = \frac{E_m}{0,33}$	E_m

NOTA (*):		NOTA (**):			
Solo	α	Solo	K (MPa)	Solo	K (MPa)
areia	3,0	areia com pedregulhos	1,10	silte	0,35
silte	5,0	areia	0,90	argila arenosa	0,30
argila	7,0	areia siltosa	0,70	silte argiloso	0,25
		areia argilosa	0,55	argila siltosa	0,20
		silte arenoso	0,45	-	-

Fonte: Mendes (2023, p. 62).

2.2 Sistema de informação geográfica (SIG)

Kneip (2014) explicita a dificuldade de se obter uma definição única para os Sistemas de Informação Geográfica, isso ocorre devido aos diferentes tipos e usos da informação que será manipulada ou sistematizada. De modo geral, toda atividade que envolva a necessidade de analisar dados ligados a localização podem fazer uso da tecnologia.

Segundo Carvalho (2016), o desenvolvimento do uso desta tecnologia está associado as diversas áreas do conhecimento, dentre elas: geografia, engenharias, estatística, meio ambiente e outras. Ribeiro, Silva e Barroso (2016, p. 3) ressaltam que o SIG é capaz de oferecer “mecanismos para combinar as várias informações, por meio de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados geográficos”.

Ademais, um importante aspecto de um SIG é a capacidade de fazer análise espacial para examinar padrões e relações entre dados geográficos. No contexto da geotecnia, essas análises podem ser aplicadas para entender a distribuição de características geotécnicas em uma determinada área, com o desenvolvimento de modelos espaciais para prever ou simular o comportamento dessas características em diferentes cenários.

Além disso, outro aspecto dessa ferramenta é a facilidade em gerar produtos cartográficos variados, dentre esses produtos, ressalta-se os mapas temáticos. Conforme Isoppo e Colzani (2013), os mapas temáticos podem ser definidos como representações de informações sob uma perspectiva geográfica, mediante uma classificação categórica. Sua principal vantagem é apresentar informações espacializadas, por exemplo: unidades geológicas, aptidões de uso do solo, risco ambiental, pluviosidade, zoneamento geomorfológico, entre outros.

2.2.1 Histórico da tecnologia

Câmara *et al.* (2004) *apud* Carvalho (2016) relata que foi a partir da década de 60 que iniciaram as primeiras tentativas de informatizar o processamento de dados; contudo, a baixa capacidade de computação da época limitou a implementação desses sistemas. Posteriormente, nos anos 1980, iniciou-se a popularização dos Sistemas de Informação Geográfica, porém limitado ao meio institucional e governamental; já na década de 90 os programas passam a emergir amplamente no setor privado.

Apenas em 1982 que essa tecnologia vem para o Brasil, por meio do Dr. Roger Tomlinson (criador do *Canadian Geographical Information System*). A novidade se disseminou

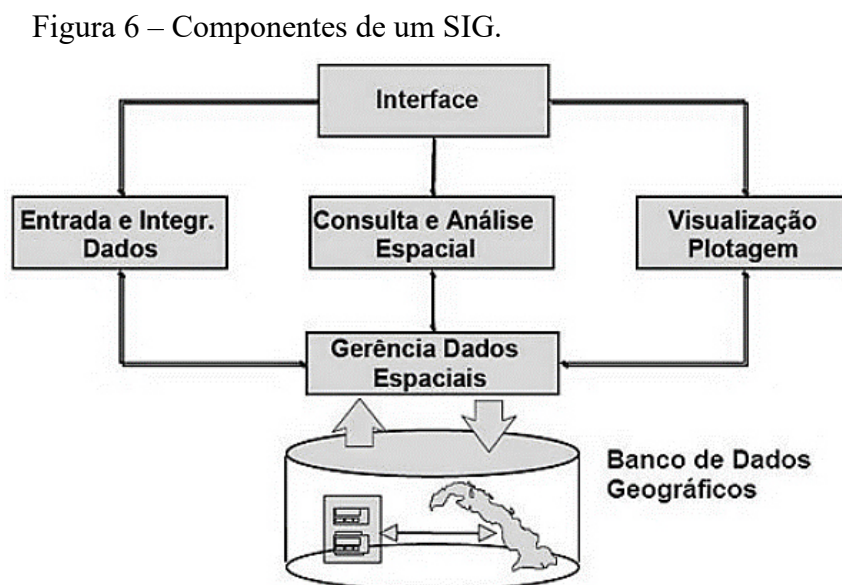
principalmente no Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geografia da UFRJ, no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS e no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; com o estabelecimento de um grupo específico de estudos e desenvolvimento da tecnologia de geoprocessamento em 1984 (Câmara *et al.*, 2004 *apud* Carvalho, 2016).

De acordo com Rosa (2009) *apud* Diniz (2013), o aumento da capacidade de processamento ocorrida no início do século XXI representou uma queda significativa no custo de equipamentos e programas. Esse avanço tecnológico tornou viável o estudo, análise e planejamento das condições dos fenômenos do ambiente; com base em georreferenciamento e geoprocessamento de dados.

2.2.2 Banco de dados georreferenciado

Amorim (2004, p. 66) define que um banco de dados “é um conjunto de informações com especificações comuns, armazenamento em forma digital, atualizável e facilmente acessível pelo usuário”. Ele ressalta que o banco de dados está sobre a responsabilidade do seu gestor, sendo este encarregado da autenticidade dos dados.

Conforme Michels (2020), a construção do banco de dados é baseada em um método de conservação organizada das informações (textos, números e objetos) e/ou arquivos associados a uma determinada localidade do espaço físico, vinculado a uma sistematização computadorizada. A Figura 6 ilustra o processo de composição de um banco de dados georreferenciado.



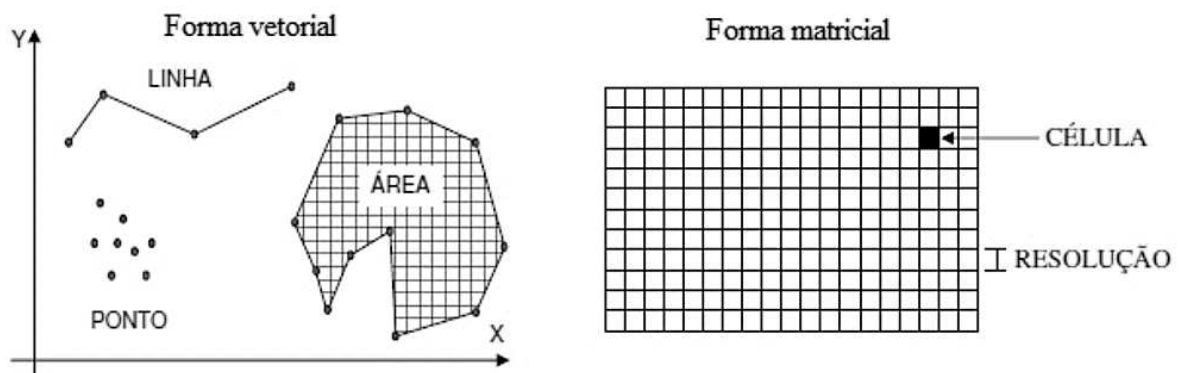
Fonte: Câmara *et al.* (1996) *apud* Ribeiro, Silva e Barroso (2016, p. 3).

De acordo com Yuaça (2003) *apud* Carvalho (2016), os bancos de dados associados a um Sistemas de Informação Geográfica, têm grande potencial de subsidiar ações de planejamento e gerenciamento. Essas contribuições envolvem tanto entidades públicas como privadas, de cunho técnico ou não.

Câmara e Queiroz (2006) *apud* Ribeiro, Silva e Barroso (2016, p. 3) afirmam que “a construção de uma base com informações e dados geográficos é um processo demorado e trabalhoso, onde se gasta a maior parte dos recursos”. Assim, para cadastrar dados de sondagens, por exemplo, precisa-se de planilhas que contenham todas as informações descritivas, como: numeração do furo de sondagem, endereço, coordenadas espaciais, perfil geotécnico e nível freático. Além disso, Diniz (2013) aborda a forma (Figura 7) como as informações podem ser inseridas nos ambientes SIG, sendo baseadas em duas classes:

- a) Forma vetorial (vetor), é discriminada por meio de coordenadas espaciais, sendo representadas por pontos, linhas e polígonos;
- b) Forma matricial (*raster*), apresenta-se como uma grade matricial de resolução variável, a qual armazena informações textuais ou numéricas.

Figura 7 – Formas de dados gráficos de um SIG.



Fonte: Higashi (2006) *apud* Michels (2020, p. 44).

2.2.3 Geoprocessamento de dados

Segundo Câmara *et al.* (1996) *apud* Pinheiro (2018), o termo geoprocessamento refere-se a um ramo do conhecimento, que empregam ferramentas matemáticas e computacionais para o tratamento de um banco de dados geográficos. Por meio de algoritmos específicos nos programas SIG, é possível realizar análises complexas, ao integrar dados de uma ou mais fontes. Desta forma, este processamento influencia diretamente a produção de

documentos cartográficos. A Figura 8 apresenta as etapas para alcançar um produto cartográfico adequado.

Pinheiro (2018) reforça que a modelagem geográfica é um processo complexo, que depende do número de variáveis delimitadas (atributos espaciais). O referido autor cita os principais sistemas que devem estar integrados ao SIG, para que o procedimento de geoprocessamento ocorra, sendo eles: sistema de projeto assistido por computador (CAD), sistema de gerenciamento de base de dados (SGBD), entre outros.

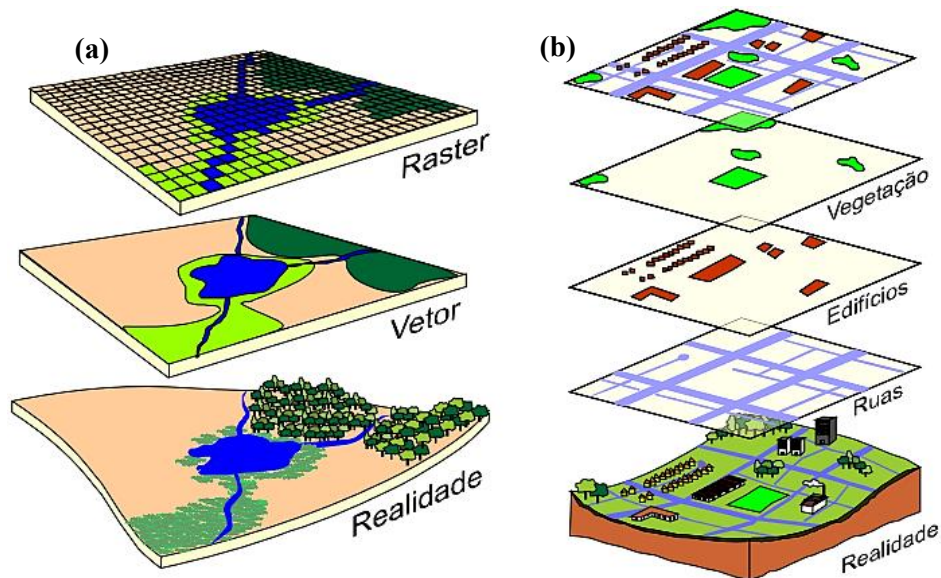
Figura 8 – Etapas de um geoprocessamento de dados.



Fonte: Isoppo e Colzani (2013, p. 8).

O geoprocessamento normalmente gera uma nova camada de dados, que pode ser traduzida em um modelo matricial (rasterizado) ou um modelo vetorial (vetorizado), com a Figura 9 ilustrando os dois modelos. De acordo com Isoppo e Colzani (2013), as camadas de dados matriciais, têm-se a área de estudo subdividida em uma malha de células, denominadas *pixels*, pelos quais são registradas as condições ou atributos daquela porção (qualitativos ou quantitativos). Isoppo e Colzani (2013), também discorrem sobre as camadas de dados vetoriais, cujo os objetos gráficos necessitam de coordenadas, definidas por um sistema cartesiano local, ou coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM).

Figura 9 – Funcionamento de um SIG: (a) estrutura de dados geográficos vetorial e raster; (b) representação do espaço real em camadas.



Fonte: Amorim (2004, p. 66).

2.2.4 Exemplos de aplicação

Kneip (2014) recomenda que é necessário o uso de um SIG para a solução de diversos problemas, envolvendo: armazenamento de dados georreferenciados; integração de diferentes informações em um único sistema; atualizar uma base de dados para o formato digital; manipular e exibir resultados em diferentes mídias; auxiliar a interpretação de propriedades espaciais; e auxiliar a criação de interfaces para acesso a informações cadastrais com base na localização.

Diniz (2013) lista os diversos órgãos governamentais que implementam programas SIG no seu fluxo de trabalho, com estes órgãos também disponibilizando uma grande variedade de dados espaciais, dentre eles, destacam-se:

- a) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- b) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- c) Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG);
- d) Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN);
- e) Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM),
- f) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA);
- g) Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM);
- h) Prefeituras e órgãos associados;
- i) Universidades e instituto de pesquisa.

Carvalho (2016) relata que as principais aplicações de um SIG no campo da geologia de engenharia concentram-se em: mapeamentos temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análise de riscos, avaliação geotécnica e gerenciamento ambiental.

Os Sistema de Informação Geográfica também podem ser utilizado para o estudo geológico-geotécnico; segundo Ellison *et al.* (2002) *apud* Carvalho (2016), a união entre, um banco de dados proveniente de sondagens geotécnicas, um Modelo Digital de Elevação (MDE) e um mapa geológico; são essenciais para embasar a modelagem.

Celestino e Diniz (1998) *apud* Carvalho (2016) discorrem sobre as principais vantagens da aplicação esses sistemas, envolvendo:

- a) possibilidade de variação nas escalas de trabalho;
- b) manipulação de um maior número de atributos do meio físico;
- c) facilidade na aquisição, atualização e recuperação de dados;
- d) capacidade de realizar simulações interativas.

2.2.5 Sistema QGIS

O programa QGIS pode ser definido como um conjunto integrado de algoritmos de SIG, com código-fonte aberto, sendo ele um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (IBGE, 2018). Pode ser utilizado nas plataformas *Linux*, *Unix*, *Mac OSX*, *Windows* e *Android*, a Figura 10 mostra o logotipo do sistema, juntamente com a interface inicial de trabalho do programa (Figura 11).

Figura 10 – Logotipo do programa QGIS.

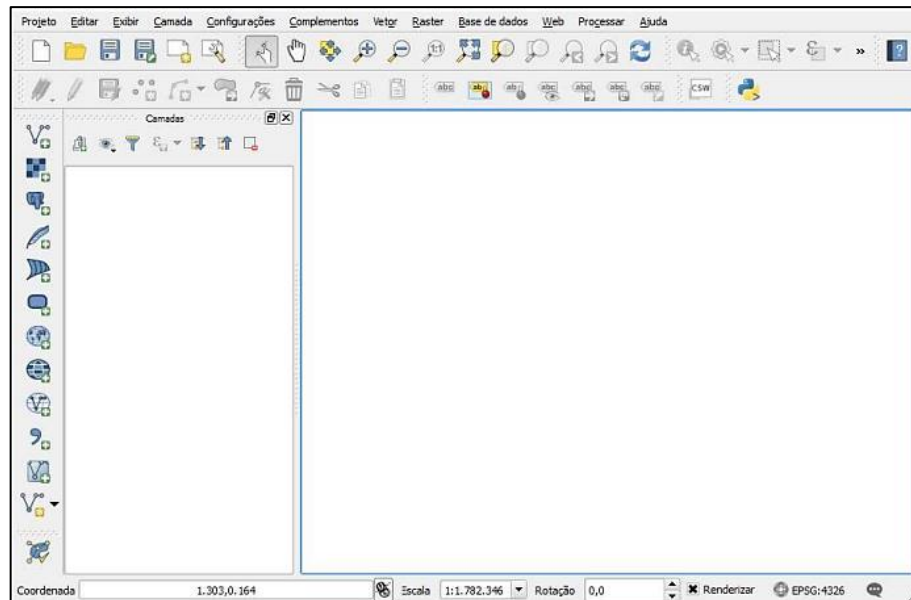


Fonte: QGIS (2023).

Semelhante a outros programas SIG, o QGIS permite ao usuário analisar e editar informações espaciais, além de criar mapas com várias camadas usando diferentes projeções, para diferentes finalidades (visualizar, criar, editar, analisar dados geoespaciais e compor mapas para impressão, entre outras).

O sistema permite compor mapas a partir de camadas matriciais e/ou vetoriais; com os dados podendo ser armazenados como pontos, linhas ou polígonos. Também é válido ressaltar que, diferentes extensões de arquivo são suportadas pelo sistema (QGIS, 2023).

Figura 11 – Interface do programa QGIS.



Fonte: IBGE (2018, p. 57).

2.3 Caracterização geral de Fortaleza

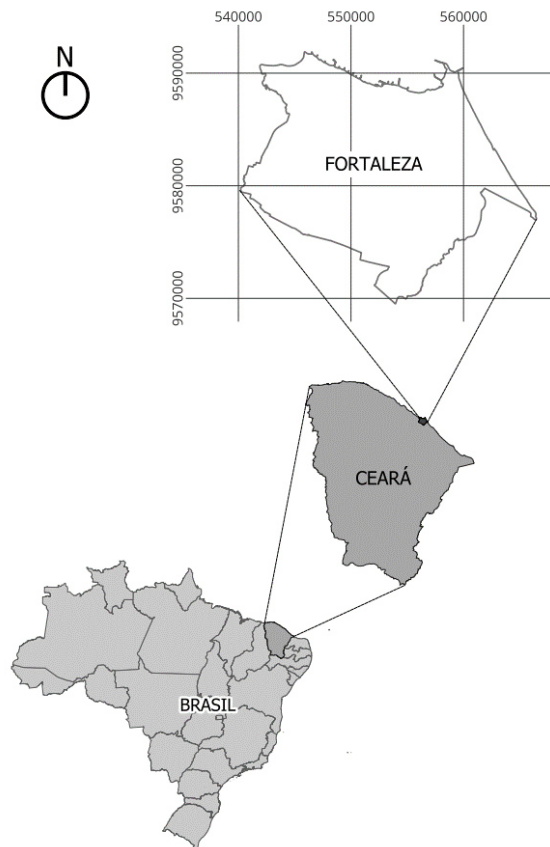
O município de Fortaleza é a capital do estado do Ceará, situado na região Nordeste brasileira e de acordo com os dados do IBGE (2022), dispõe de uma área territorial de aproximadamente 312 km². “O Município de Fortaleza localiza-se em uma planície litorânea na porção norte do estado do Ceará, no nordeste do Brasil, possuindo 32 km de linha de costa” (Pimentel, 2015, p. 25). A Tabela 8 resume as características da localização geográfica do local de estudo, conforme relatório do IPECE, e a Figura 12 ilustra essa localização.

Tabela 8 – Localização geográfica de Fortaleza.

Coordenadas geográficas		Localização	Municípios limítrofes			
Latitude (S)	Longitude (WGr)		Norte	Sul	Leste	Oeste
3° 43' 02"	38° 32' 35"	Nordeste	Oceano Atlântico e Caucaia	Maracanaú, Pacatuba, Itaitinga e Eusébio	Eusébio, Aquiraz e Oceano Atlântico	Caucaia e Maracanaú

Fonte: IPECE (2017), modificado pelo Autor (2023).

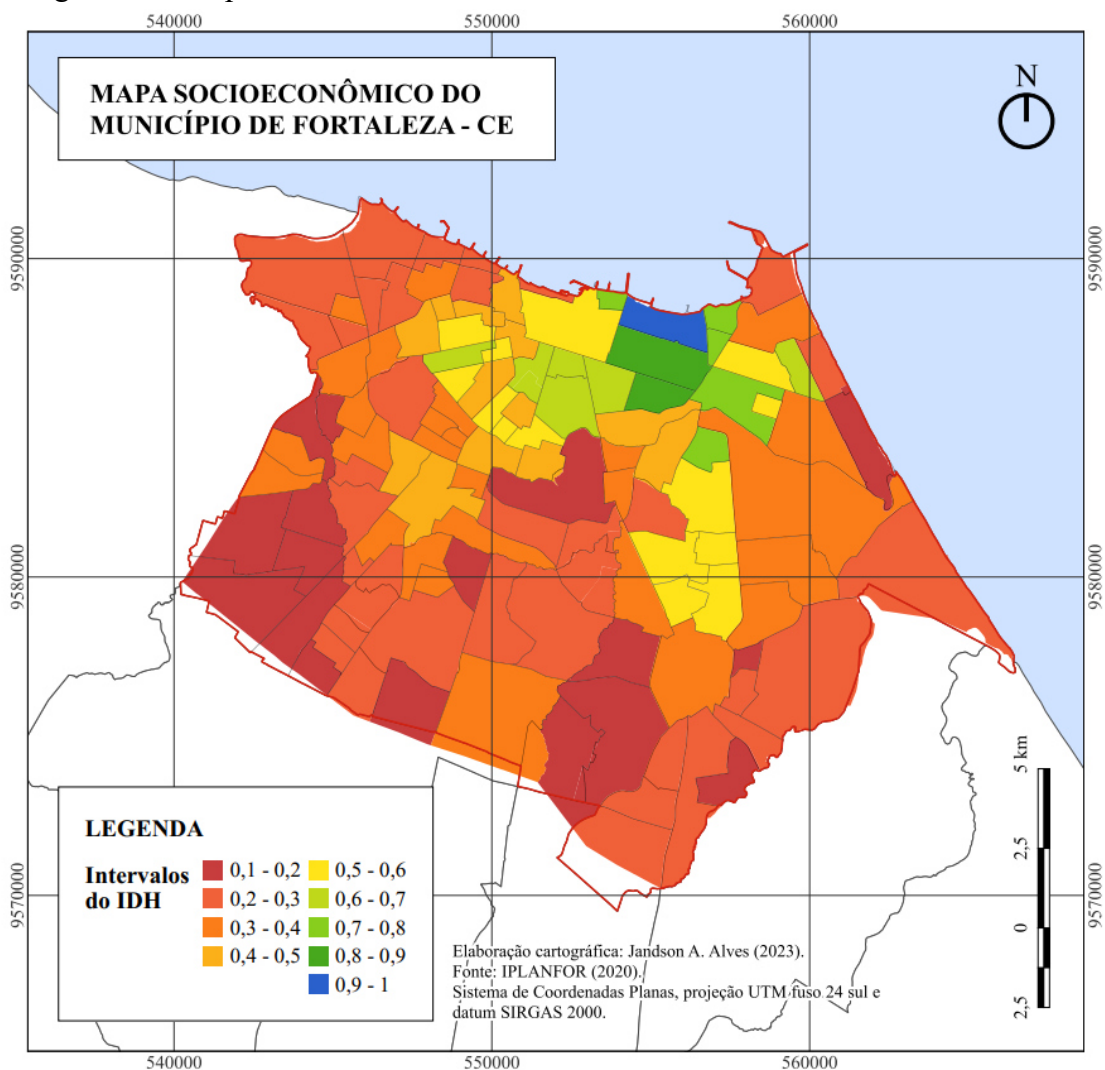
Figura 12 – Mapa ilustrativo da localização de Fortaleza.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Referente a aspectos socioeconômicos o município possui IDH classificado como alto, de 0,754; calculado para 2010, representando um crescimento de 15,6% em relação ao ano de 2000 (IBGE, 2022); a Figura 13 apresenta o Índice de Desenvolvimento Humano dos bairros segundo o IPLANFOR. Ademais, de acordo com o IBGE (2022), o PIB *per capita* da cidade também apresentou notório aumento, encontrando-se na faixa de R\$15.000,00 em 2010, e atualmente na faixa dos R\$24.000,00. Essas características locais demonstram que Fortaleza experimenta um momento marcado por desenvolvimento no âmbito social e econômico, apesar da concentração de melhorias em bairros centrais.

Figura 13 – Mapa socioeconômico de Fortaleza.

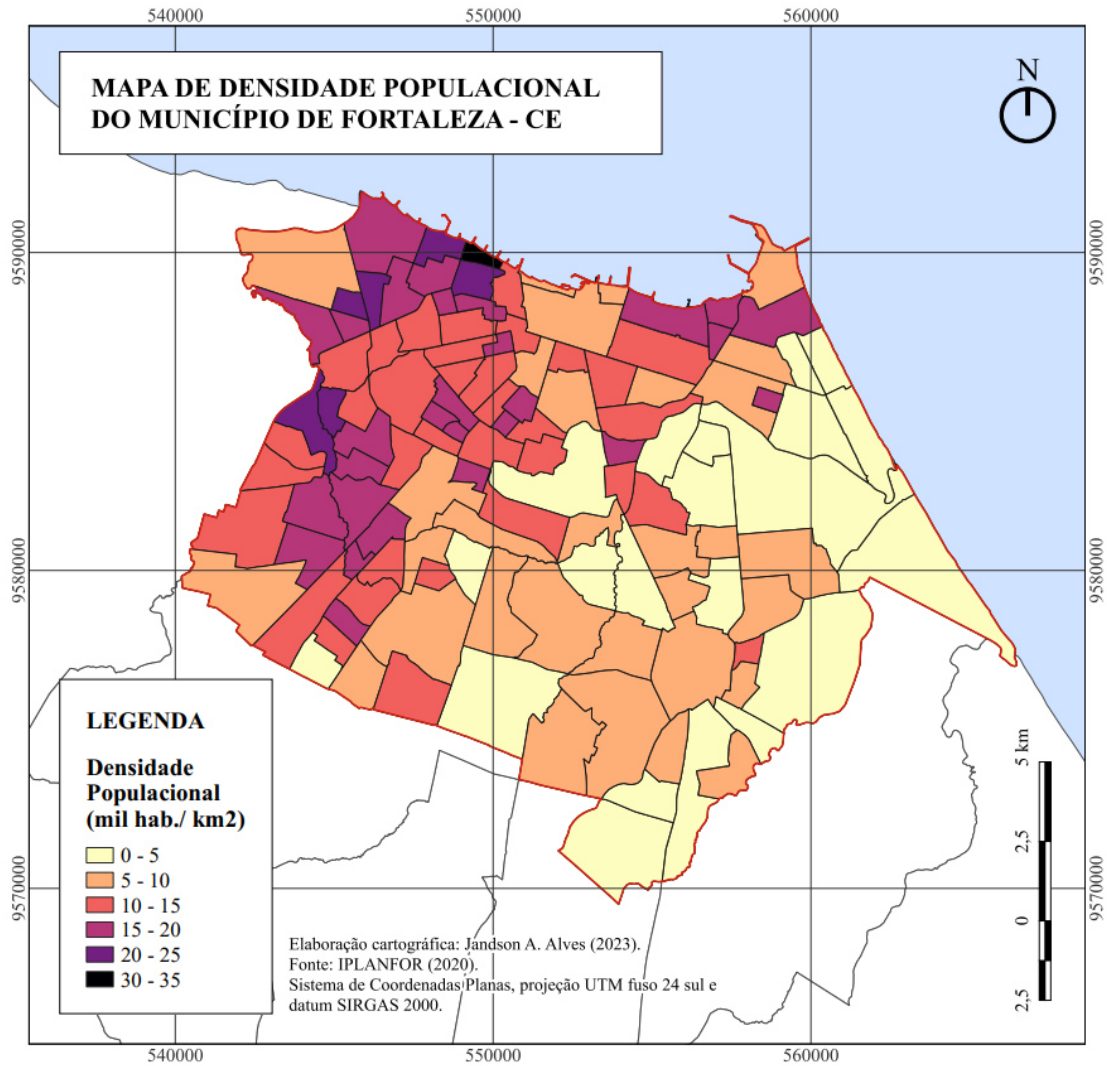


Fonte: IPLANFOR (2020), modificado pelo Autor (2023).

Sobre o contexto populacional, resume-se que a capital cearense representa o maior contingente habitacional do estado do Ceará, ocupando a quarta posição de cidade mais populosa do Brasil, com 2.428.708 habitantes e densidade populacional de 7.777 hab/km²

(IBGE, 2022). A cidade possui grande distribuição de pessoas nos bairros periféricos, com maior concentração nos bairros da porção oeste, a Figura 14 apresenta a densidade populacional dos bairros segundo o IPLANFOR.

Figura 14 – Mapa de densidade populacional em Fortaleza.

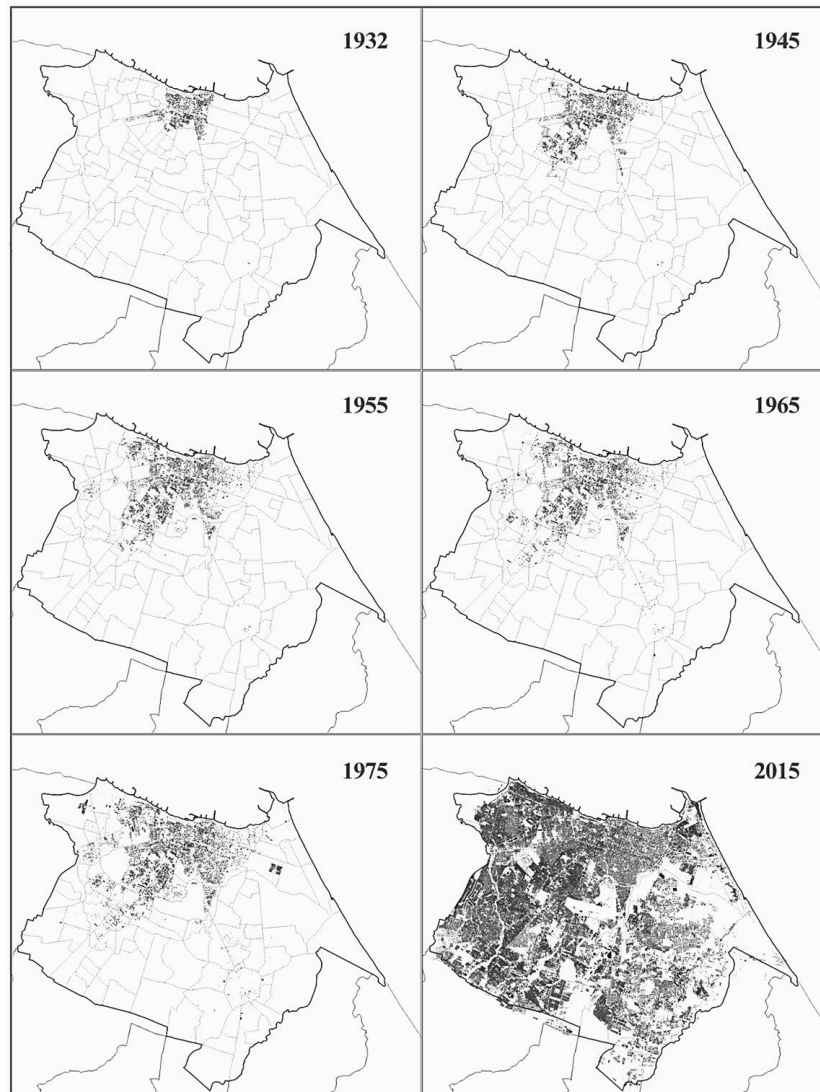


Fonte: IPLANFOR (2020), modificado pelo Autor (2023).

2.3.1 Contexto urbano

A capital cearense foi fundada em 1726, porém, manteve-se com crescimento tímido, somente a partir de meados do século XX que se iniciou uma grande expansão das áreas edificadas, a Figura 15 expõem o aumento de construções no decorrer do tempo.

Figura 15 – Evolução histórica da cidade de Fortaleza.



Fonte: IPLANFOR (2020), modificado pelo Autor (2023).

De acordo com Pimentel, Moura e Carneiro (2020, p. 84) “É uma cidade que cresce verticalmente, principalmente na zona litorânea, contudo, o aumento de edifícios em bairros periféricos encontra-se em expansão considerável”. Neste cenário, há novas iniciativas ligadas a ocupação das áreas não edificadas da cidade, com projetos que propiciam a implantação de edificações de médio e grande porte.

Atualmente, a cidade começa a apresentar elevada ocupação do território, intensificando o processo de conurbação e verticalização urbana; segundo o IBGE (2022), em 2019 o município possuía área urbanizada de aproximadamente 254 km², que representa 81% da área total. A Figura 16 exhibe a ocupação urbana do território municipal vista de satélite via *Google Earth*, com maior densidade de construções na porção oeste.

Figura 16 – Vista de satélite da cidade de Fortaleza.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

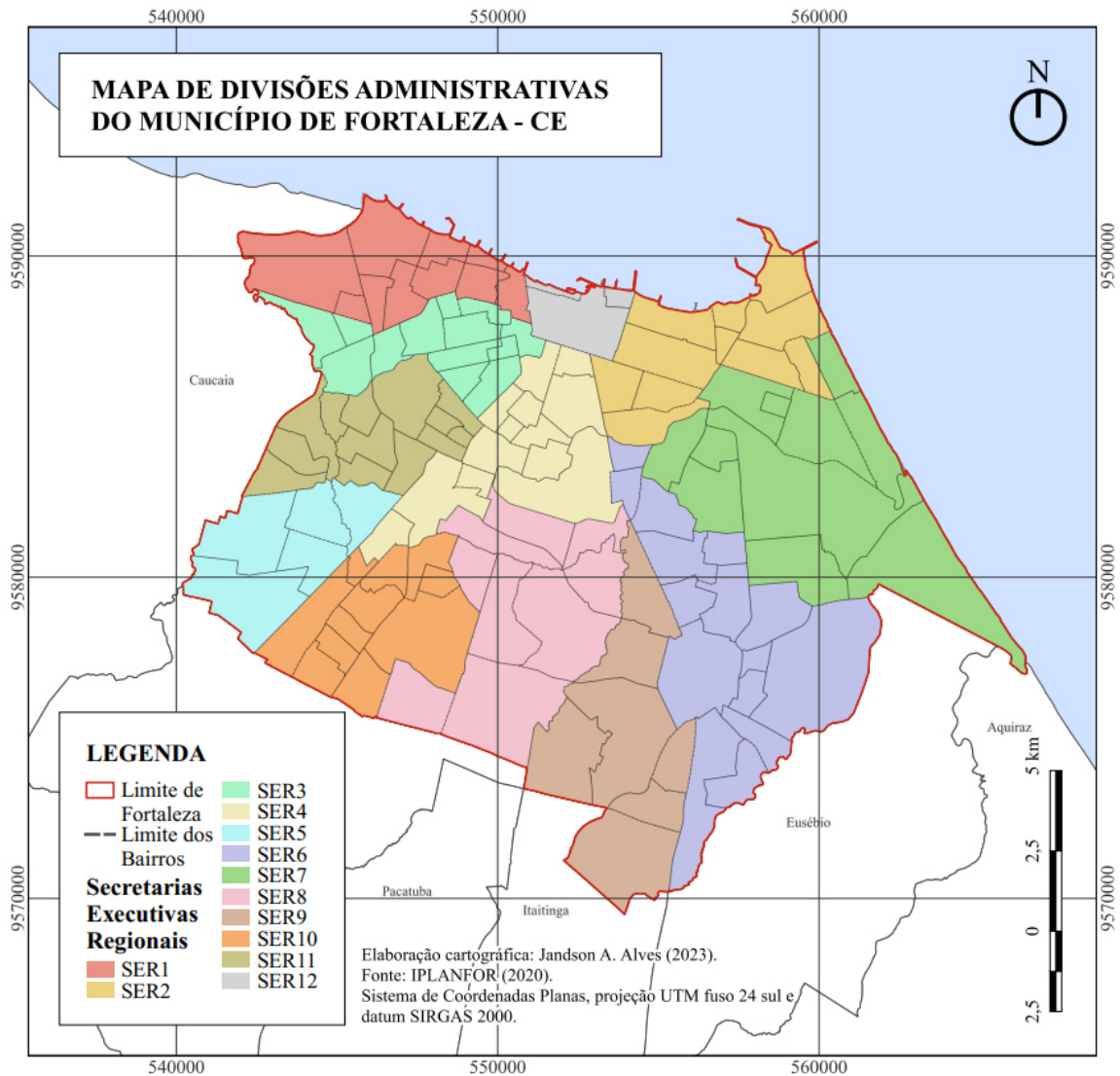
Além disso, o município possui 121 bairros e para melhor administrá-los a Prefeitura de Fortaleza organiza esses bairros em 39 Territórios Administrativos e 12 Secretarias Executivas Regionais (SER); que são subprefeituras, órgãos públicos de gestão direta de cada região (IPLANFOR, 2020), a Figura 17 apresenta o mapa de Fortaleza com a divisão administrativa atual e a Tabela 9 expõem a área de cada SER.

Tabela 9 – Área das Secretarias Regionais de Fortaleza.

Subprefeituras	Área (ha)	% do município
SER 1	2078	6,6%
SER 2	2345	7,5%
SER 3	1602	5,1%
SER 4	2410	7,7%
SER 5	1906	6,1%
SER 6	4448	14,2%
SER 7	4964	15,9%
SER 8	3555	11,4%
SER 9	3164	10,1%
SER 10	2289	7,3%
SER 11	1898	6,1%
SER 12	585	1,9%
Total:	31244	100,0%

Fonte: IPLANFOR (2020), modificado pelo Autor (2023).

Figura 17 – Mapa de divisões administrativas de Fortaleza.



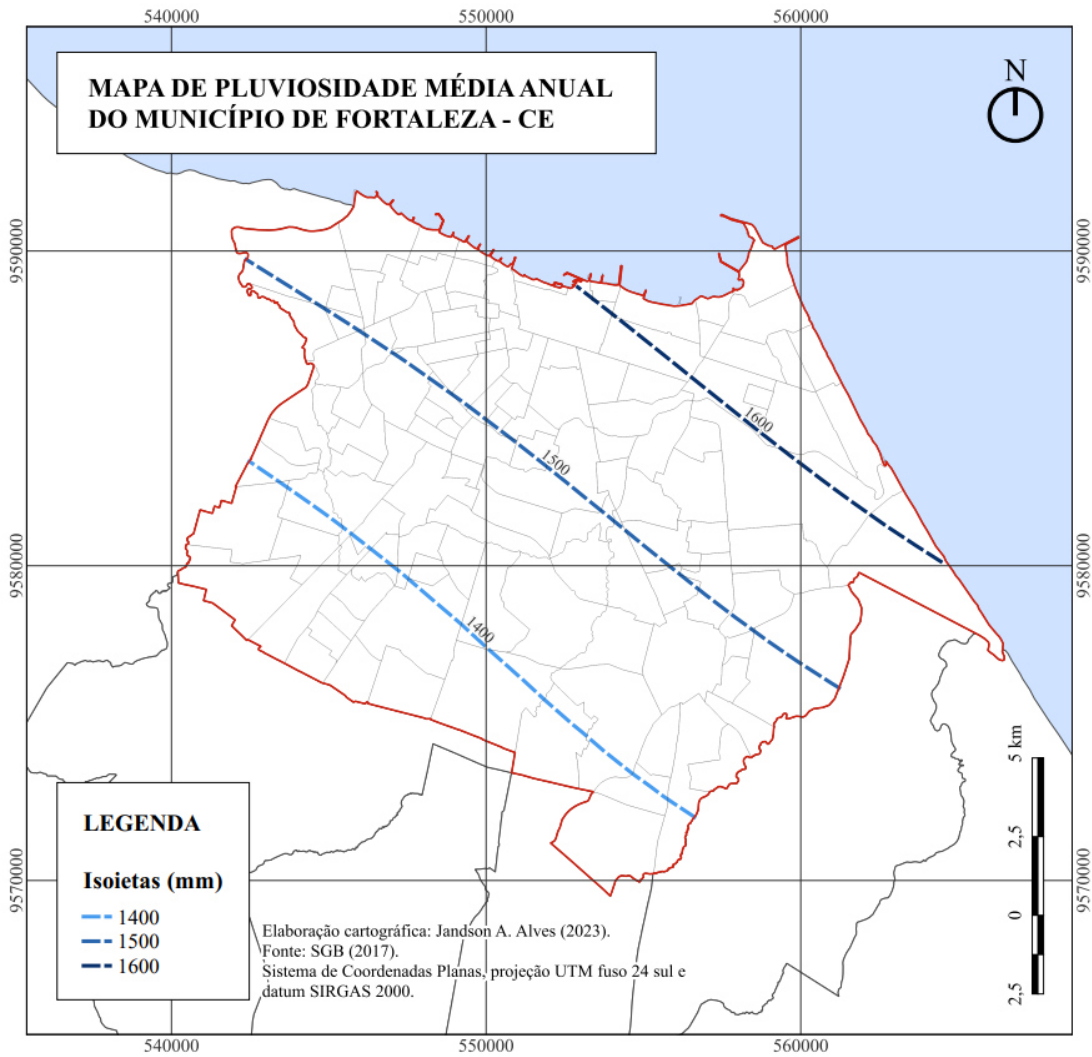
Fonte: IPLANFOR (2020), modificado pelo Autor (2023).

2.3.2 Contexto hidrológico

Referente ao aspecto pluviométrico, tem-se que a região é marcada pela variabilidade do regime de chuvas anual, com ocorrência de chuvas excessivas nos meses iniciais do ano, em oposição aos meses finais do ano (Brandão, 1998), e a Figura 18 exhibe as isoietas de precipitação em Fortaleza.

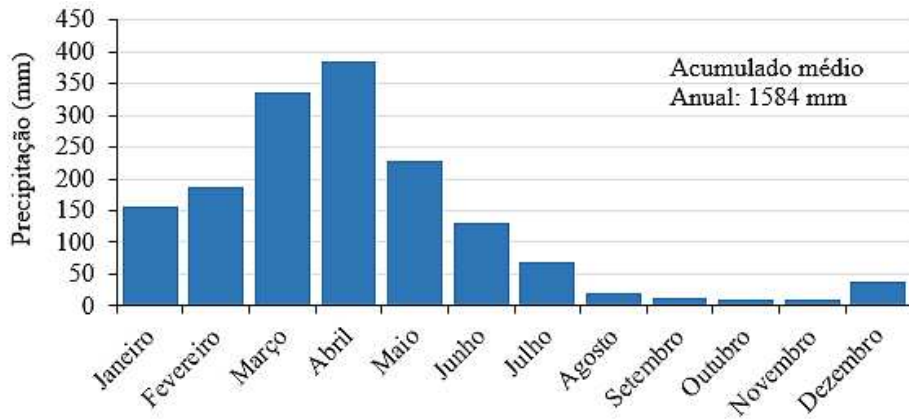
O período chuvoso local ocorre entre janeiro e junho, com cerca de 90% das precipitações concentradas nesse primeiro semestre; havendo maiores ocorrências nos meses de março e abril, com mais de 60% do total anual (Brandão, 1998), o Gráfico 1 mostra a variabilidade média das precipitações ao longo dos meses.

Figura 18 – Mapa de isoietas de precipitação em Fortaleza.



Fonte: SGB (2017), modificado pelo Autor (2023).

Gráfico 1 – Precipitação acumulada média mensal (série histórica de 1991 a 2020).

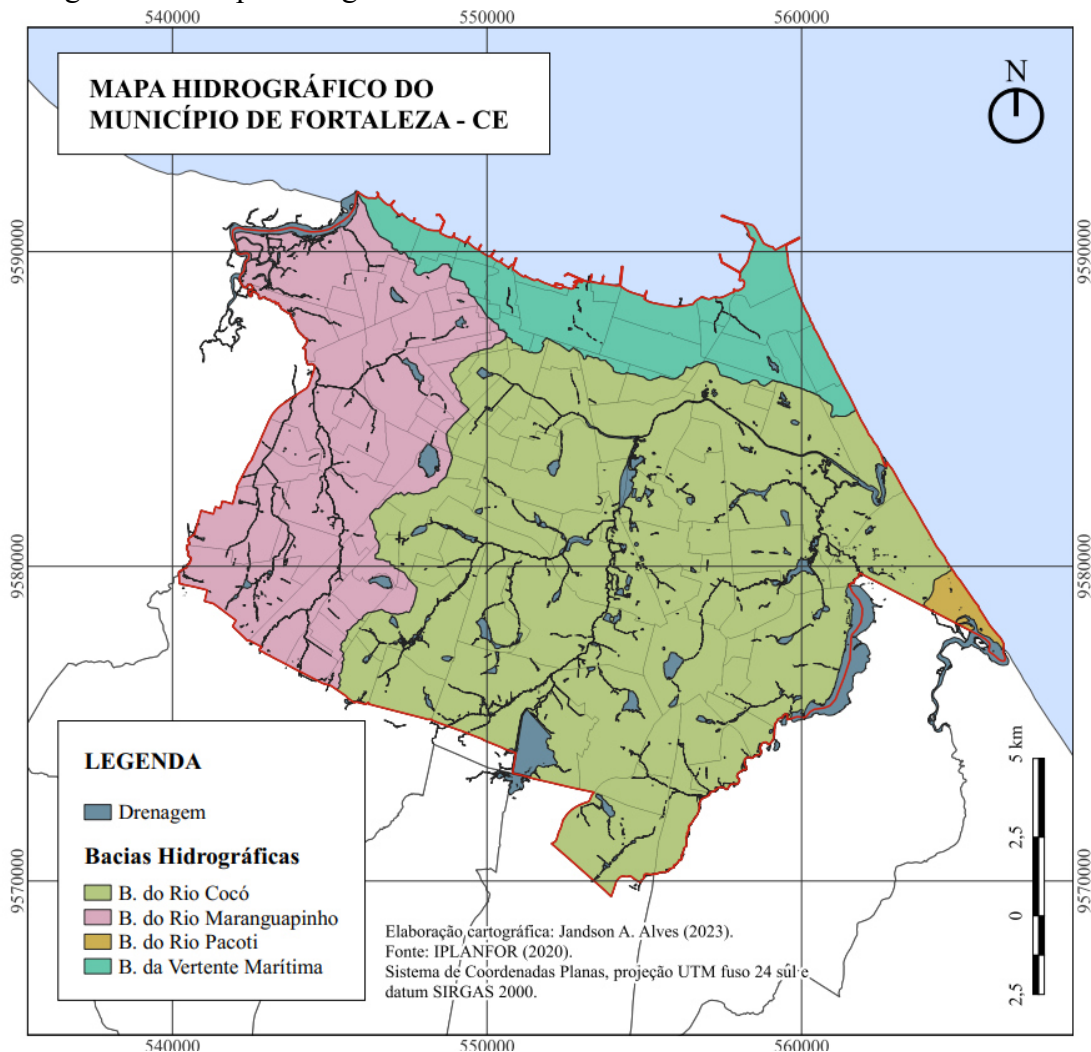


Fonte: INMET (2021), modificado pelo Autor (2023).

A rede hidrográfica do município de Fortaleza é composta por 4 bacias, caracterizadas segundo Brandão (1998, p. 27) “[..], de uma forma geral, unidades sem muita expressão hidrológica, caracterizadas por cursos fluviais de pequeno porte e intermitentes”. A Figura 19 mostra as estas bacias, dentre elas, as principais são:

- a) Bacia do Rio Cocó, cujo seu rio principal nasce na Serra da Pacatuba, percorrendo um percurso de aproximadamente 45 km, com mais de 50% deste caminho estando contido em Fortaleza (Gomes, 2013), dessa forma, o Rio Cocó é o rio mais notório do município;
- b) Bacia do Rio Maranguapinho, localizada na porção oeste, sendo seu rio principal o marco histórico dos limites da cidade, desaguando na foz do rio Ceará. O rio Maranguapinho nasce na Serra de Maranguape, com extensão total de 42 km e apenas 15 km em Fortaleza (Gomes, 2013).

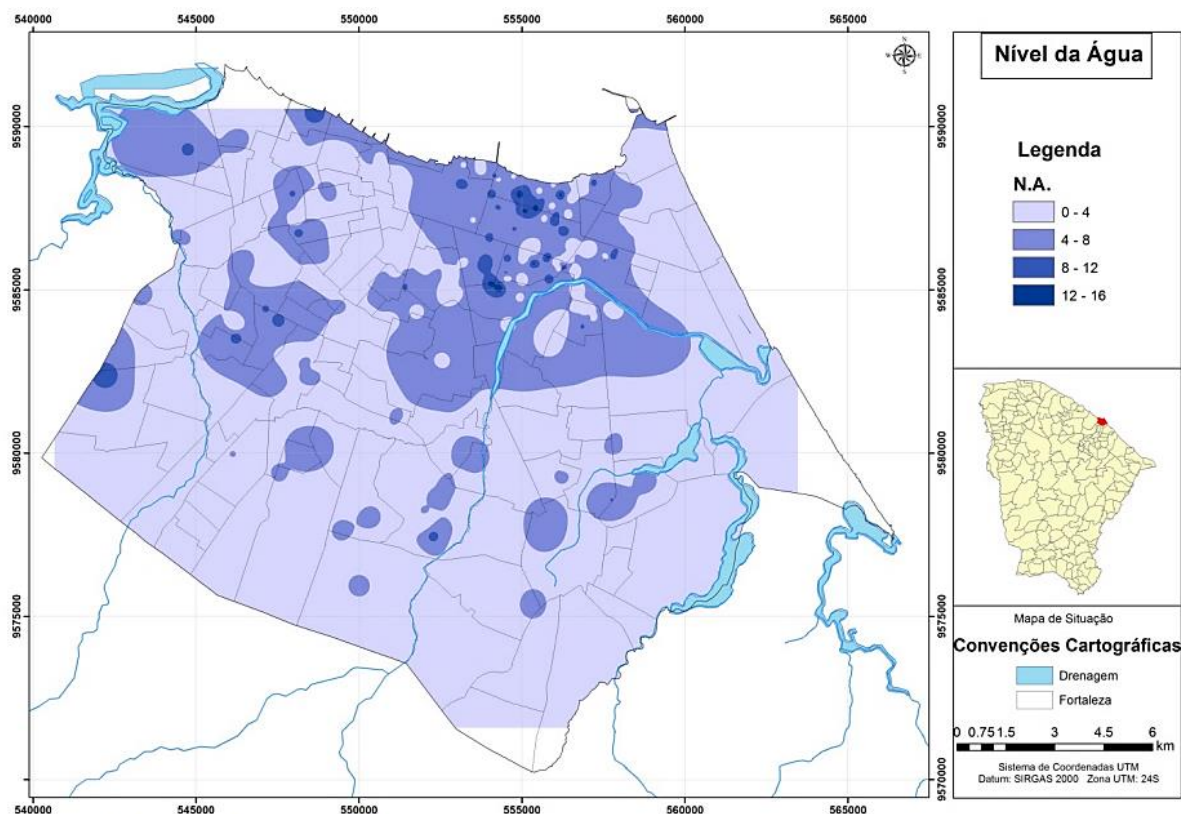
Figura 19 – Mapa hidrográfico de Fortaleza.



Fonte: IPLANFOR (2020), modificado pelo Autor (2023).

Ademais, Brandão (1998) destaca que devido à alta permeabilidade em areias, a faixa costeira composta por dunas, tem maior potencial aquífero de fortaleza, porém com facilidade de contaminação de poluentes descartados no solo e nos corpos d'água locais. Sobre essas águas subterrâneas têm-se o estudo realizado por Carvalho (2016), por meio da interpolação de dados de sondagem SPT, gerou-se uma carta com as prováveis profundidades médias do nível freático em grande parte de Fortaleza (Figura 20).

Figura 20 – Mapa de isovalores do nível freático.



Fonte: Carvalho (2016, p. 42).

2.3.3 Contexto geomorfológico

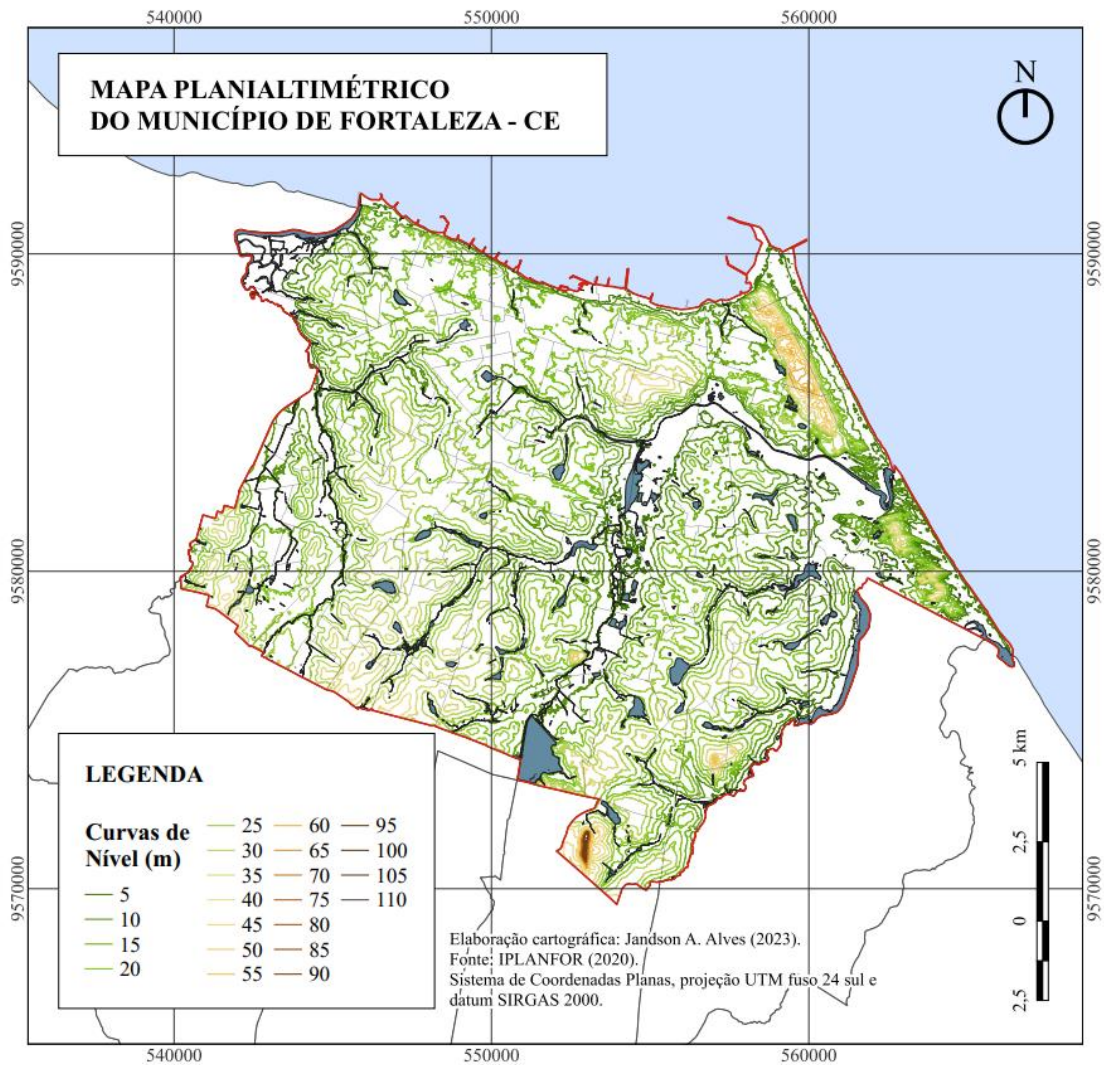
Referente ao contexto geomorfológico, resume-se que o relevo é essencialmente definido por três domínios geomorfológicos: Planícies Litorâneas (campos de dunas e planícies fluviomarinhas), Glacis Pré-Litorâneos (tabuleiros pré-litorâneos e planícies fluviais) e Depressões Sertanejas do tipo Pedimentos Conservados, cujos seus limites são fundamentados em um conjunto de características homogêneas, que abrangem aspectos da forma do relevo, altimetria, litologia, tectonismo, pedologia e biomas associados. (Brandão, 1998).

A seguir, sintetiza-se as principais particularidades de cada domínio presente em Fortaleza, conforme estudos realizados por Brandão (1998) e Fonteles (2003):

- a) Campos de Dunas, encontra-se por toda a faixa litorânea, constituídos por variações mais acentuadas de relevo, com cotas superiores a 50 m, sendo interrompidos eventualmente por trechos fluviais, havendo dois tipos de dunas na região:
 - Dunas recentes, possuem a característica de maior mobilidade no terreno, susceptíveis a ações eólicas, com pouca presença vegetal;
 - Dunas antigas, também chamadas de paleodunas, possuem caráter mais fixo no terreno, com presença de cobertura vegetal de maior porte.
- b) Planícies Fluviomarinhas, cujo ocorrência concentra-se na foz dos principais rios que cruzam o município, ambiente marcado pela grande influência marinha, propício para a formação de mangues;
- c) Tabuleiros Pré-litorâneos, é o domínio que ocupa maior área de Fortaleza, apresenta baixa variação de cota topográfica, com uma suave inclinação em direção ao mar;
- d) Planícies Fluviais, destaca-se ao longo do Rio Cocó, estando em uma faixa estreita nas margens, marcada por apresentar considerável oferta hídrica nos períodos de cheia;
- e) Pedimentos Conservados, apresenta-se somente na porção oeste da cidade, ocorrendo sobre rochas cristalinas, com topografia variando dentre plana ou suave-ondulada, e inclinação suave em direção aos leitos dos rios.

Por fim, sobre os aspectos topográficos, Pimentel (2015) informa que o relevo de Fortaleza é suave, principalmente afastado dos Campos de Dunas, o que conferiu um processo de urbanização com poucas intervenções nas características naturais no terreno do município, a Figura 21 apresenta o mapeamento planialtimétrico do município, com as curvas de nível.

Figura 21 – Mapa planialtimétrico de Fortaleza.



Fonte: IPLANFOR (2020), modificado pelo Autor (2023).

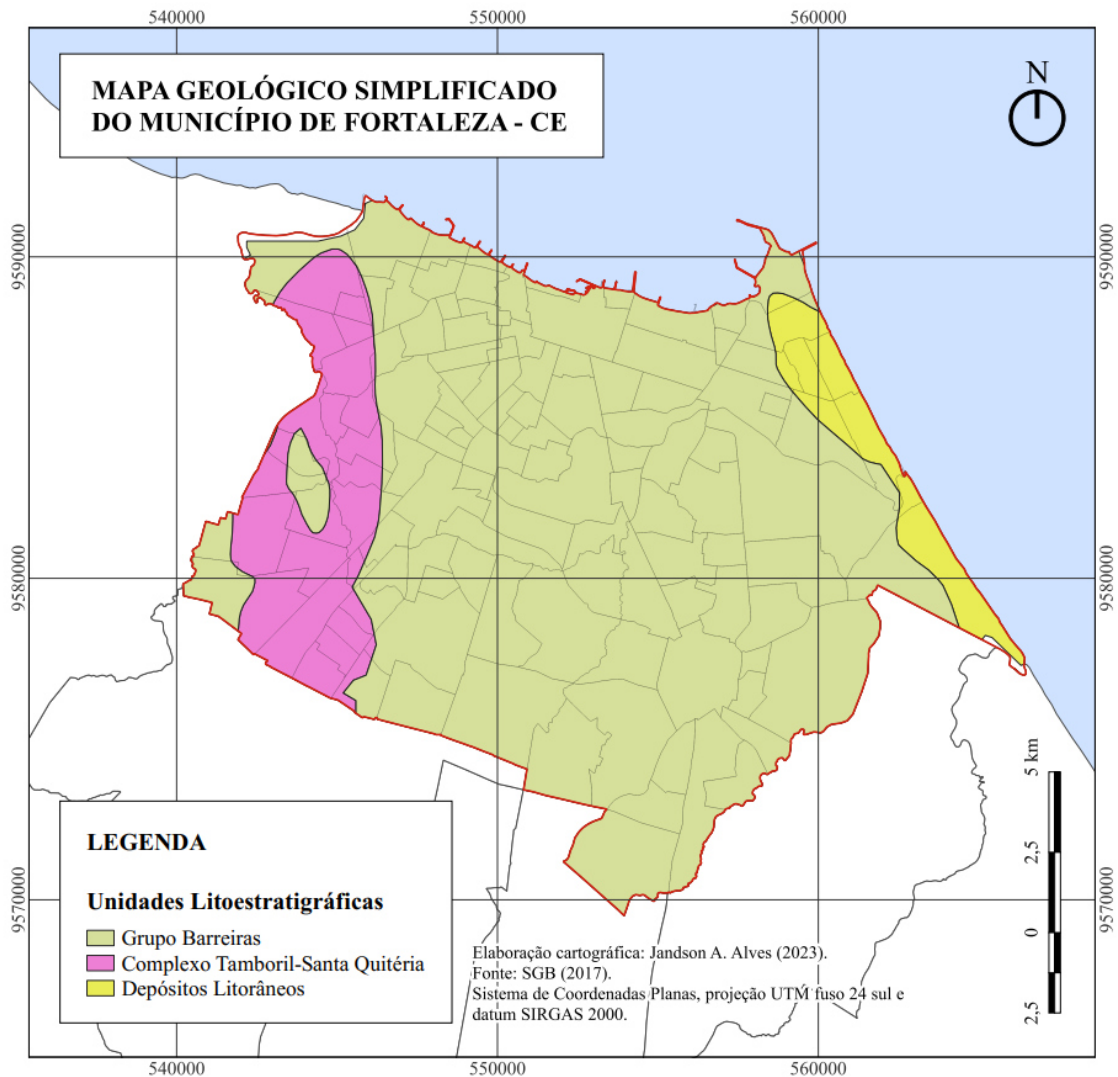
2.3.4 Contexto geológico

Os estudos litológicos realizados pelo SGB (2021) apresentam que Fortaleza é composta por formações geológicas recentes da Era Cenozoicas (Grupo Barreiras, Depósitos Eólicos Litorâneos e Depósitos Aluvionares); e de formações mais antigas da Era Neoproterozoicas (Complexo Tamboril Santa-Quitéria). A Figura 22 mostra o mapa geológico simplificado do município.

“O Grupo Barreiras é, em geral, constituído por arenitos argilosos de granulação fina a média, cores amarela, bege e vermelha, com matriz argilo-caulinítica e com cimento argiloso, ferruginosos e, às vezes, silicoso” (SGB, 2021, p. 52). A região costeira do Ceará, caracteriza-se sendo formada por conglomerados e arenitos grosseiros, de cor vermelha, além da presença de argilas e de cascalhos. De acordo com Brandão (1995) o Grupo Barreiras ocorre

por toda a faixa litorânea cearense, onde em muitas áreas penetra profundamente em direção ao interior, até 30 km, com espessura variável, normalmente entre 20 m e 50 m. Ainda mais, Fonteles (2003) informa que é observada uma fraca estratificação paralela entre as camadas de material, com a mineralogia desta formação sendo constituída em sua essência por cristais de quartzo, havendo menor ocorrência de feldspato e de lateritas.

Figura 22 – Mapa geológico simplificado de Fortaleza.



Fonte: SGB (2017), modificado pelo Autor (2023).

Os Depósitos Eólicos Litorâneos são, em geral, compostos por solos arenoquartzosos de granulação fina a média e com grãos arredondados, esses depósitos incluem sedimentos de praia e de dunas (SGB, 2021). Podem ser divididos em depósitos recentes (imediatamente próximos a linha litorânea) e depósitos antigos (mais afastados do mar), Fonteles (2003) revela que o topo rochoso que embasa esses depósitos eólicos pode ser facilmente confundido como pertencente ao Grupo Barreiras, porém, o critério de distinção

dessas estruturas é o grau de coesão da rocha. Ainda mais, essa formação geológica apresenta uma largura média entre 2 km a 3 km e podendo atingir 30 m de espessura, normalmente composta por areias de cor branca a levemente amarelada.

Conforme o SGB (2021), os Depósitos Aluvionares correspondem a sedimentos inconsolidados constituídos por areias de granulometria fina a grossa, com textura variando entre um material silto-argiloso, argiloso e presença considerável de matéria orgânica; esses depósitos estão associados aos leitos dos corpos d'água, como: rios, riachos e lagoas. Fonteles (2003) destaca que a maior ocorrência dessa formação está nas planícies de inundação do Rio Cocó, com grande influência das deposições pela interação fluviomarinha.

O Complexo Tamboril Santa-Quitéria é uma formação cristalina que em Fortaleza concentra-se na porção oeste, com ocorrência de rochas graníticas e migmatíticas, em geral, o complexo é composto por metatexitos e diatexitos, com intercalações de rochas calcissilicáticas, xistos, quartzitos, anfíbolitos e de mármore (SGB, 2021).

Sobre aspectos pedológicos, Barroso (2002) informa que Fortaleza é composta principalmente por quatro tipos pedológicos: Podzólico Vermelho Amarelo, Halomórfico, Fluvial e Arenoquartzosos. Além disso, os processos de formação do solo são de grande importância para sua caracterização, essas origens dos solos são classificadas em três:

- a) Solos sedimentares ou transportados, cujo os quais sofrem a ação de agentes transportadores, podendo ser aluvionares (constituído por material erodido e transportados pela água, está sempre associado a ambientes de rios, riachos e lagoas), eólicos (erodidos e depositados pela ação do vento) e coluvionares (constituído por matéria solta, envolvendo a ação da gravidade, normalmente encontrado em terrenos de média a alta declividade);
- b) Solos residuais, são aqueles que permanecem na região da matriz rochosa original, em que a principal característica é uma gradual transição da superfície até o topo da rocha mãe. Para que ocorram os solos residuais, é necessário que a decomposição da rocha seja mais rápida do que a velocidade de remoção pelos agentes externos;
- c) Solos orgânicos, são originados da decomposição de matérias orgânicas, com característica de serem muito compressíveis, principalmente quando apresentam camadas espesas.

2.3.5 Contexto geotécnico

As características geotécnicas dos solos de Fortaleza foram estudadas por diversos autores no decorrer do tempo, apresentando novos resultados e mapeamentos de zonas homogêneas; havendo a proposição de conclusões ligadas ao uso e ocupação dessas regiões, além de recomendações para a prática de fundações.

O trabalho de Colares (1996) foi o primeiro a tratar do mapeamento geotécnico preliminar em Fortaleza, que foi obtido mediante a sobreposição de características homogêneas dos solos da região. Utilizou-se diversas cartas temáticas e estudos geológicos existentes na época, com as características escolhidas para definir o zoneamento sendo: origem do solo, textura do material, substrato rochoso associado, espessura do solo e classe de declividade do terreno natural. Para identificar as zonas, o referido autor optou por utilizar um sistema de codificação por dígitos (Quadro 3). A Figura 23 mostra a setorização geotécnica de Colares (1996) em Fortaleza.

Quadro 3 – Sistema de codificação das zonas de Colares (1996).

Origem do solo (1º dígito)	Textura do material (2º dígito)	Substrato rochoso associado (3º dígito)	Espessura do material (4º dígito)	Classes de declividades (5º dígito)
Residual (1)	Areia fina a média (1)	Complexos gnáissico-migmatítico e gnáissico-granítico (1)	< 0,5 m (1)	≤ 2% (1)
Coluvial (2)	Areia siltosa (2)		0,5 m a 10 m (2)	2% a 5% (2)
Aluvial (3)	Areia argilosa (3)		1 m a 5 m (3)	5% a 10% (3)
Eólico (4)	Areia argilo-siltosa (4)	Granitos (2)	2 m a 3 m (4)	10% a 20% (4)
-	Argila arenosa (5)	Formação Barreiras (3)	3 m a 5 m (5)	> 20% (5)
-	Seixos e/ou blocos (6)	-	5 m a 10 m (6)	-
-	-	-	10 m a 15 m (7)	-

Fonte: Colares (1996) apud Fonteles (2003, p. 57), modificado pelo Autor (2023).

pioneiros no uso de métodos matemáticos e computacionais para caracterização geotécnica no Ceará; consequentemente esses métodos foram aplicados pelos demais pesquisadores subsequentes. Ainda mais, ele recomendou o uso de fundações específicas para determinadas áreas da região de estudo, o Quadro 4 apresenta um dos resultados de Fonteles (2003).

Tabela 10 – Profundidade resistente das zonas de Colares (1996).

Zonas de Colares (1996)	Profundidade para N _{spt} >30 golpes
1-5-3-6-1	>10 m
2-2/6-1-2-1	>1 m
3-1-3-7-1	>15 m
3-4-3-2-1	>10 m
3-4-3-3-1	>10 m
3-5-3-4-1	>10 m
4-1-3-5-1	>10 m
4-1-3-6-1	>12 m
4-1-3-6-2	>12 m
4-1-3-6-3	>12 m
4-1-3-6-5	>12 m
4-4-3-5-1	>10 m

Fonte: Colares (1996) *apud* Fonteles (2003, p. 59), modificado pelo Autor (2023).

Quadro 4 – Síntese produzida por Fonteles (2003) das características geológicas-geotécnicas de três unidades geológicas.

Unidade Geológica	Espessura máxima (m)	Descrição táctil-visual	Cor	Compacidade/Consistência	Faixa de variação do N
Grupo Barreiras	>21,5	Areia argiloso, argila arenosa e argila siltosa com concreções lateríticas	Amarelo, branco, vermelho, cinza, variegada	Fofa a muito compacta; mole a muito dura	2 - 60*
Depósitos Eólicos Litorâneos	27	Areia fina a média, areia siltosa, inconsolidada a parcialmente inconsolidada	Cinza, branco, amarelo	Fofa a medianamente compacta	1 - 11
Depósitos Aluvionários	1,5	Areia argilosa com matéria orgânica, areia silte-argilosa	Cinza escuro, amarelo, marrom	Fofa a compacta	2 - 30

* valores acima de 60 (sessenta) golpes foram codificados como 60

Fonte: Fonteles (2003, p. 92), modificado pelo Autor (2023).

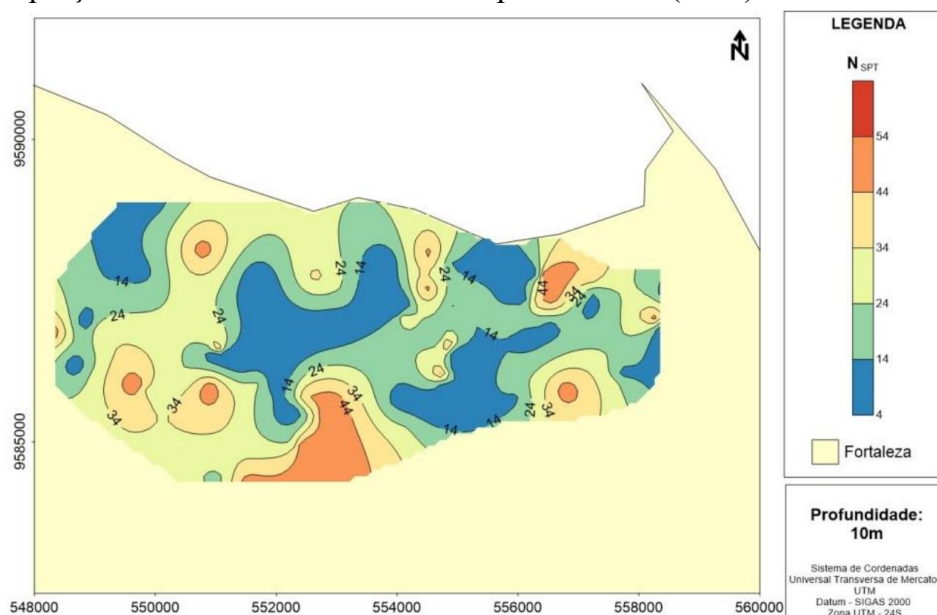
Em sequência, Pimentel (2015) continuou a linha de pesquisa de Fonteles (2003), ele concentrou-se principalmente na porção centro-norte de Fortaleza, propondo a subdivisão da área em quadrículas de 1 km por 1 km. O autor produziu cartas geotécnicas, com base no geoprocessamento de 220 furos de sondagem SPT pelo Inverso do Quadrado da Distância (IQD). Por meio de sua modelagem foi possível recomendar soluções de fundações para diferentes cenários de projeto. A Figura 24 exemplifica um de seus resultados, com a exibição de faixas de N_{spt} para a profundidade de 10 m em determinadas áreas.

Ademais, Pimentel (2015) inovou ao propor o uso de programas *online* para apresentação e compartilhamento de informações sobre os furos coletados por ele; o *Google Earth* foi o programa escolhido, pelo seu fácil manejo e alta difusão entre os usuários. As informações disponibilizadas pelo referido autor englobam:

- a) nível da água;
- b) descrição das camadas do solo;
- c) número de golpes ao longo da profundidade;
- d) indicação do impenetrável, quando houver.

Outra importante contribuição presente no trabalho de Pimentel, Moura e Carneiro (2020) foi a transposição da carta produzida por Colares (1996) para um ambiente digital; mediante a transformação de arquivos de extensão DWG para KML, em seguida adicionou cores nas zonas geotécnicas para facilitar a distinção.

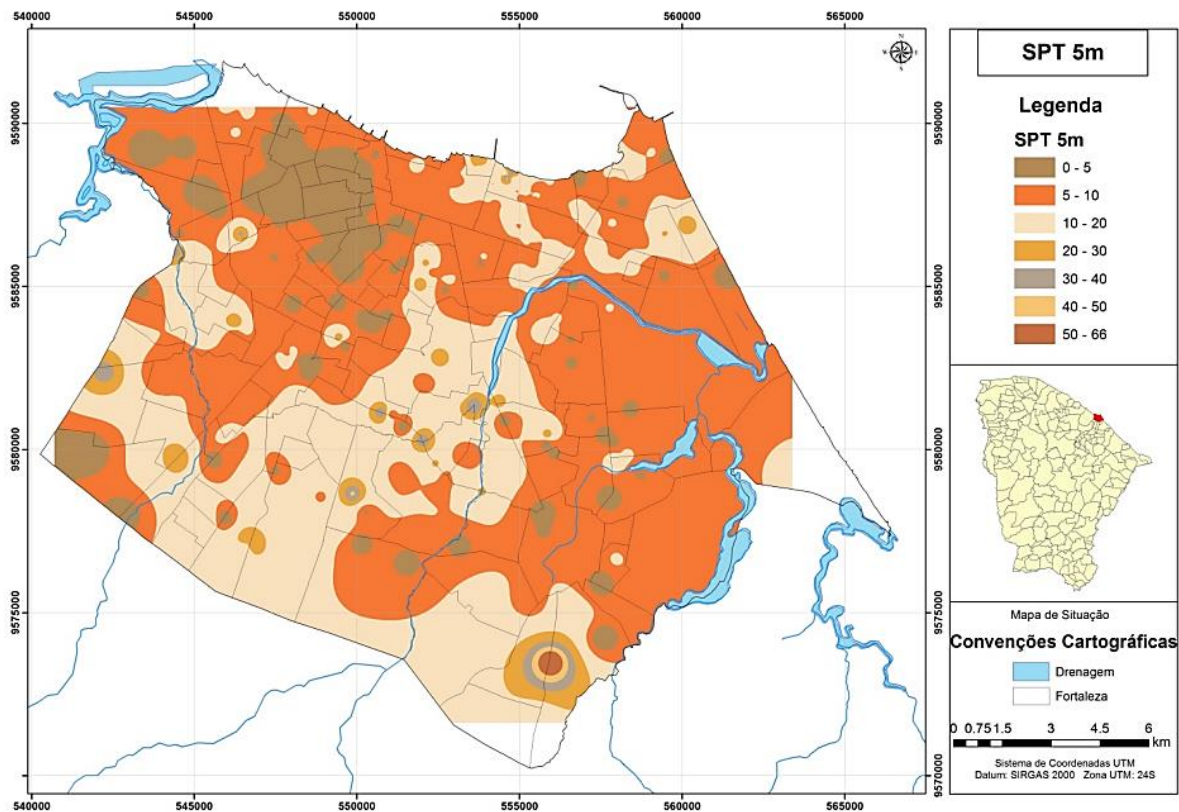
Figura 24 – Mapa de isovalores do N_{spt} a 10 m de profundidade na porção norte de Fortaleza elaborado por Pimentel (2015).



Fonte: Pimentel (2015, p. 64).

Segundo o trabalho elaborado por Carvalho (2016), tem-se uma ampliação da área de estudo geotécnico em Fortaleza, abrangendo grandes porções da cidade. A autora realizou a coleta de sondagens à percussão do tipo SPT, onde selecionou 317 furos para fundamentar seu modelo geotécnico. Seu estudo destacou-se por apresentar a maior quantidade de amostragens do solo de Fortaleza, com grande dispersão dos furos pelo território, a Figura 25 exemplifica um de seus resultados, com faixas prováveis de N_{spt} para a profundidade de 5 m. Ainda mais, a referida autora aplicou um corte no sentido norte-sul, demonstrando um exemplo da estratigrafia do subsolo da cidade.

Figura 25 – Mapa de isovalores do N_{spt} a 5 m de profundidade em Fortaleza elaborado por Carvalho (2016).



Fonte: Carvalho (2016, p. 41).

3 METODOLOGIA DO TRABALHO

3.1 Classificação da pesquisa

A presente pesquisa possui uma finalidade aplicada para uso prático na sociedade, a qual visa resolver o problema de ausência de um banco de dados georreferenciado de sondagens em Fortaleza – CE, acessível para pesquisadores e geotécnicos.

Nesse sentido, tem-se como objetivo metodológico uma pesquisa descritiva e exploratória, com uma abordagem quali-quantitativa, uma vez que se visa analisar a quantidade de sondagens (SPT e SM) obtidas e caracterizar sua abrangência qualitativa perante ao território do município.

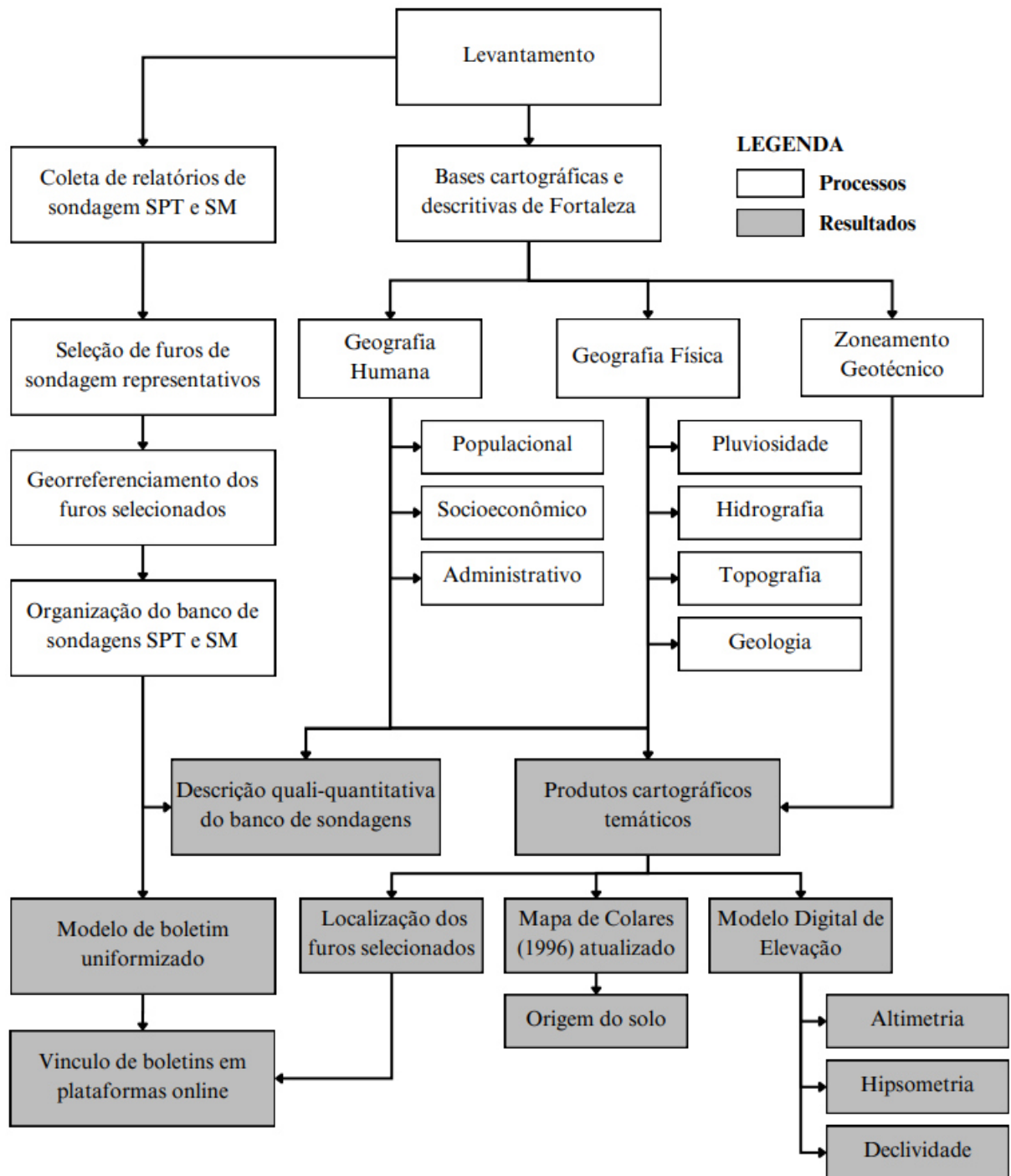
Ademias, utilizou-se procedimentos bibliográficos para estudar as características da área de estudo e para compreender a tecnologia SIG. Também, realizou-se procedimentos de levantamento para obtenção dos relatórios de sondagem.

3.2 Planejamento da pesquisa

A metodologia adotada para a realização dessa pesquisa está baseada na execução de uma série de etapas, a Figura 26 ilustra de modo esquemático a sequência metodológica; a seguir lista-se cada etapa de trabalho:

- a) Levantar bases cartográficas e descritivas do tema de estudo;
- b) Coletar relatórios de sondagem em empresas locais;
- c) Selecionar os furos de sondagem representativos;
- d) Analisar o banco de sondagens, qualitativamente e quantitativamente;
- e) Gerar produtos cartográficos temáticos da área de estudo;
- f) Elaborar boletins com padrão de apresentação uniformizado;
- g) Vincular o banco de dados em plataformas *online*.

Figura 26 – Proposta metodológica esquemática.



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

3.3 Plataformas e programas utilizados

Para se chegar aos objetivos propostos por este trabalho, utilizaram-se diversos programas para armazenar, manipular, tratar, representar e analisar os dados. Os aplicativos computacionais utilizados nessa proposta metodológica foram:

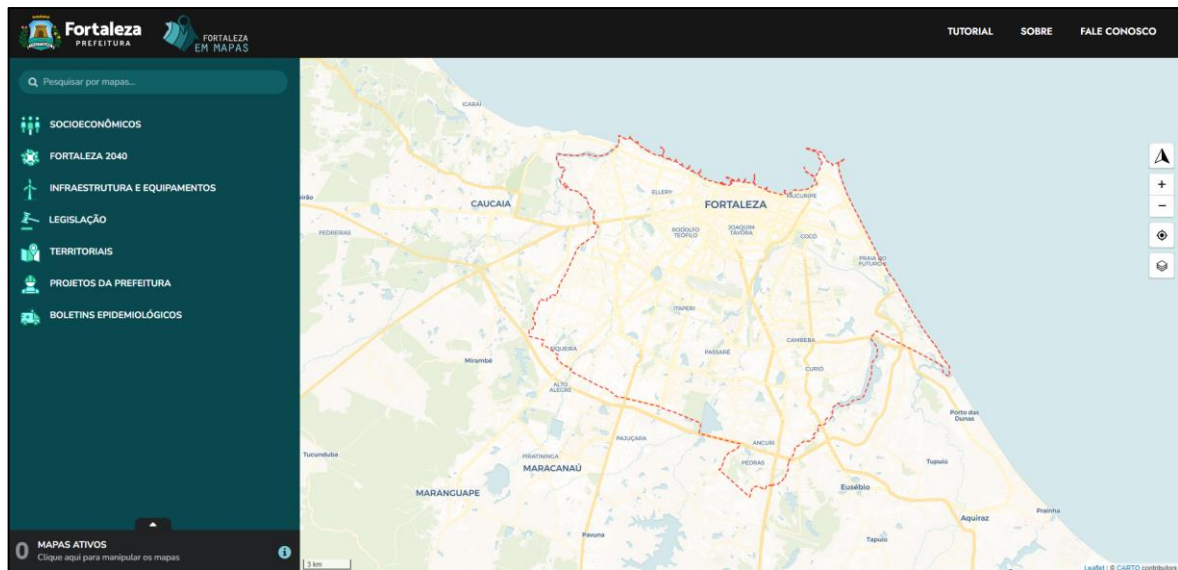
- a) QGIS 3.28, anteriormente conhecido como *Quantum GIS*, foi empregado para execução de operações espaciais, integração do banco de informações, geoprocessamento, manipulação de bases cartográficas, produção cartográfica, entre outras funcionalidades;
- b) AutoCAD 2022, programa de desenho assistido para realizar correções rápidas em arquivos compostos por linhas e polígonos, além de converter formatos de arquivo;
- c) *Microsoft Excel 2016*, essencial para manipular os dados em formato de planilhas, criar o banco de dados e auxiliar na produção de gráficos para análises;
- d) *Google Earth*, acessado via *online*, para lançar pontos que representassem os furos de sondagem, ou seja, utilizado na espacialização;
- e) *Google Drive*, essencial para armazenar arquivos em nuvem com grande capacidade de compartilhamento;
- f) *Google My Maps*, plataforma *online*, capaz de permitir a construção de mapas editáveis e compartilháveis com uso integrado ao *Google Drive*.

3.4 Levantamento de bases cartográficas e descritivas

Para realizar o presente estudo, precisou-se levantar bases cartográficas digitais editáveis, existentes *online*, a maioria foram obtidas de órgãos públicos que já fornecem elas georreferenciadas gratuitamente em seus sites, dentre eles temos:

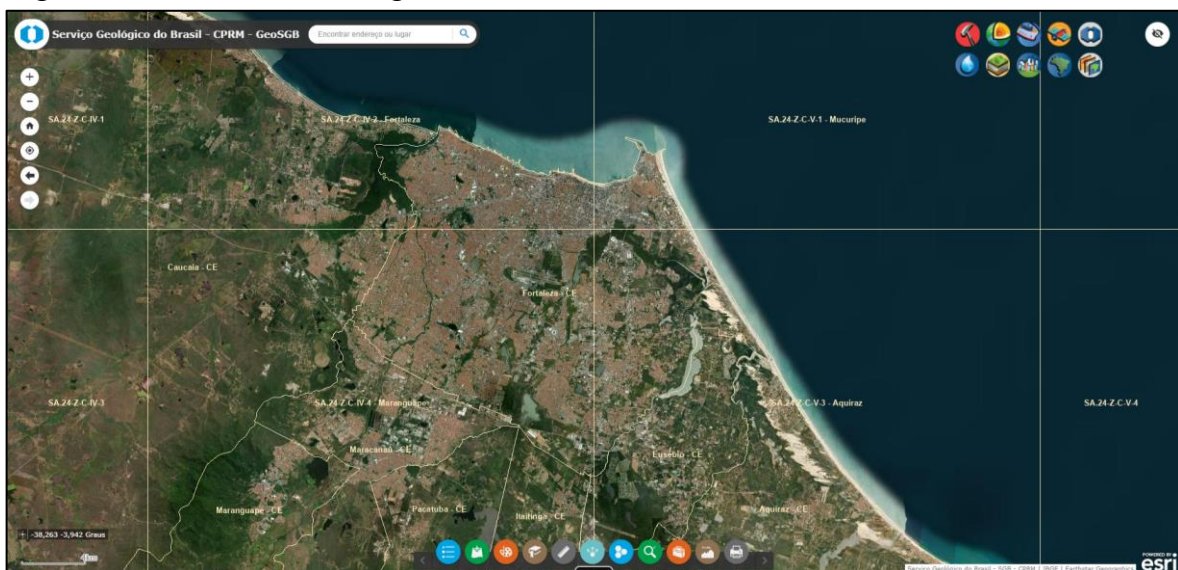
- a) Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF), com a plataforma “Fortaleza em Mapas” (Figura 27), que disponibilizou arquivos *Shapefile* sobre mapeamentos de Fortaleza, referentes a topografia, hidrografia, divisões administrativas, logradouros, IDH por bairro, densidade populacional por bairro, entre outros;
- b) Serviço Geológico do Brasil (SGB), com a plataforma “Geologia.GIS” (Figura 28), que também concedeu arquivos *Shapefile* sobre mapeamentos geológicos simplificados e pluviométricos do Brasil;

Figura 27 – Plataforma Fortaleza em Mapas.



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

Figura 28 – Plataforma Geologia.GIS.



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

Além disso, as bases cartográficas geotécnicas de Fortaleza foram acessadas por meio de produções bibliográficas, via documento PDF, dentre elas temos: Fonteles (2003); Pimentel (2015); Carvalho (2016) e; Pimentel, Moura e Carneiro (2020). Entretanto, a base do zoneamento geotécnico de Colares (1996), foi fornecida pelo pesquisador Helano W. Pimentel, através de arquivo do *Google Earth*, ou seja, em formato digital editável.

Ademais, sobre as bases descritivas, levantou-se as produções bibliográficas (monografias, dissertações, teses, relatórios técnicos, artigos, livros e normas técnicas) que tratam de aspectos teóricos e práticos, referentes a investigações geotécnicas, Sistemas de

Informação Geográfica e caracterização do meio físico do município estudado. É importante ressaltar, que o levantamento bibliográfico perdurou ao longo do desenvolvimento da pesquisa, permitindo a atualização da fundamentação teórica do presente trabalho.

3.5 Aquisição de relatórios de sondagem

Todos os relatórios de sondagem SPT e SM que foram utilizados na presente pesquisa estavam em formato digital (DWG ou PDF), obtidos por meio de cinco fontes distintas; selecionando-se apenas aquelas sondagens realizadas dentro dos limites administrativos de Fortaleza, onde inicialmente dividiu-se os arquivos em cinco pastas, uma para cada fonte de origem.

Nesses relatórios constavam a planta de locação dos furos de sondagens, endereço do local, data, estratigrafia do solo com a descrição tátil-visual, caracterização geotécnica de cada camada com os resultados do Nspt, a medida da profundidade do nível freático (quando existente), indicação de impenetrável, entre outras informações.

A fonte mais preponderante foi a empresa de projetos geotécnicos Tecnord - Tecnologia Nordeste de Solos e Fundações Ltda, a qual o autor desta pesquisa passou 2 dias na sede da empresa, selecionando e transferindo os arquivos de um computador do escritório para um *pendrive* próprio.

A segunda fonte mais relevante foi pelo pesquisador Helano W. Pimentel, que disponibilizou sua base de sondagens, utilizadas em sua dissertação em 2015, seus arquivos foram coletados através de uma transferência via nuvem. Além disso, outras fontes menores, mas que também contribuíram com relatórios foram: empresa de projetos estruturais Pilotis Engenharia, construtora J. Alves e profissionais liberais.

3.6 Georreferenciamento de furos de sondagem

Após a organização preliminar dos relatórios coletados, iniciou-se a etapa de georreferenciamento. Nesse momento da pesquisa foi analisado previamente todos os relatórios, onde foi identificado as informações que pudessem revelar a localização exata das sondagens; dentre elas, podemos destacar o endereço e a planta de locação. Em muitos casos haviam divergências, pois algumas ruas e avenidas mudaram de nome ao longo do tempo, apesar disso, foi possível localizar todos os furos, cruzando com outras informações presentes nos relatórios.

3.7 Organização do banco de dados

O banco de sondagens foi estruturado e organizado em 12 pastas, uma para cada Secretaria Executiva Regional de Fortaleza, com indicação da quantidade de furos no nome das pastas. Posteriormente foi organizado em 121 subpastas, uma para cada bairro, nesse sentido, apenas 76 dessas subpastas foram preenchidas de arquivos, com 45 bairros sem nenhuma sondagem. É válido ressaltar, que cada bairro recebeu um código único de duas letras maiúsculas para simplificação da nomenclatura, o Quadro 5 apresenta esses códigos juntamente com uma diferenciação entre os bairros com e sem furos de sondagem.

Quadro 5 – Codificação adotada para cada bairro de Fortaleza, com indicação de presença (cor preta) ou ausência (cor cinza) de furos de sondagem.

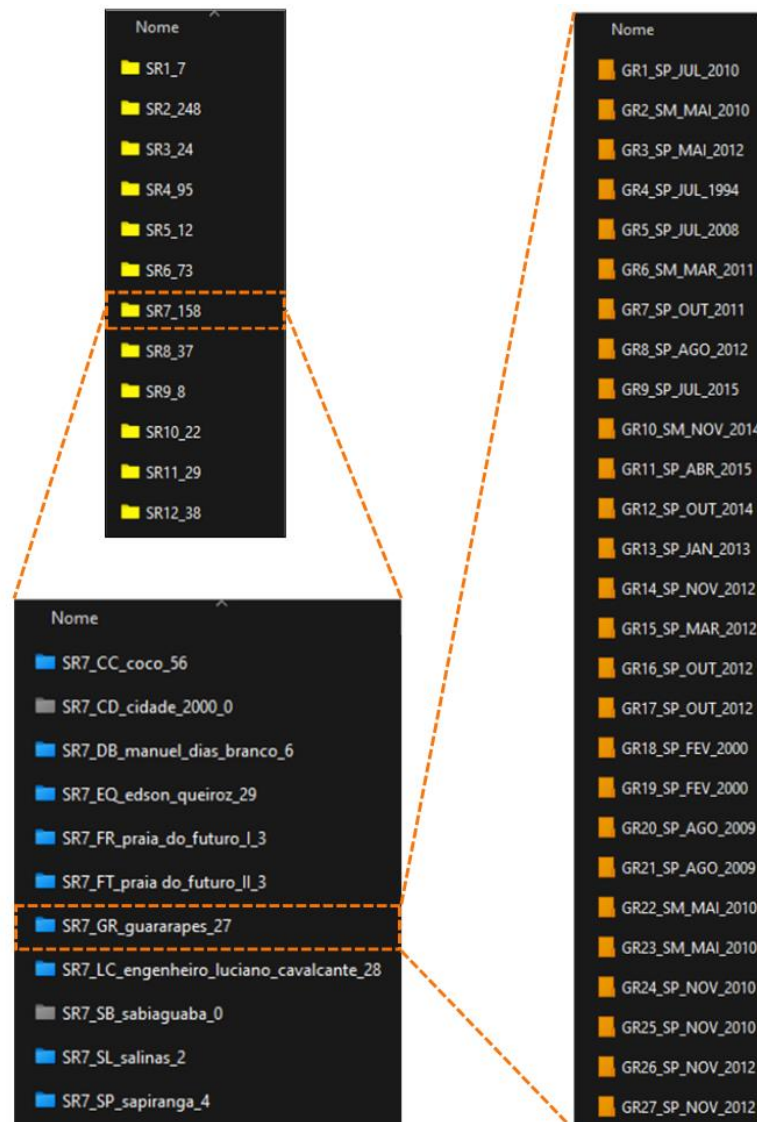
Bairros	Código	Bairros	Código	Bairros	Código	Bairros	Código
Aerolândia	AD	Conjunto Palmeiras	PL	Jardim Iracema	JR	Passaré	PS
Aeroporto	AP	Couto Fernandes	CF	João XXIII	JO	Paupina	PN
Aldeota	AT	Cristo Redentor	RD	Joaquim Távora	JT	Pedras	PE
Alto da Balança	AL	Curió	CR	Jóquei Chube	JC	Pici	PC
Álvaro Weyne	AW	Damas	DM	José Bonifácio	JB	Pirambu	PB
Amadeu Furtado	AF	De Lourdes	LD	José de Alencar	JE	Planalto Ayrton Senna	PA
Ancuri	AN	Demócrito Rocha	DR	José Walter	JW	Praia de Iracema	PR
Antônio Bezerra	AB	Dendê	DD	Lagoa Redonda	LR	Praia do Futuro I	FT
Aracapé	AR	Dias Macedo	DC	Manuel Dias Branco	DB	Praia do Futuro II	FR
Autran Nunes	AS	Dionísio Torres	DT	Maraponga	MG	Presidente Kennedy	PK
Barra do Ceará	BC	Dom Lustosa	DL	Meireles	ML	Presidente Vargas	PV
Barroso	BR	Edson Queiroz	EQ	Messejana	MS	Quintino Cunha	QC
Bela Vista	BV	Ellery	EL	Mondubim	MD	Rodolfo Teófilo	RT
Benfica	BF	Eng. L. Cavalcante	LC	Monte Castelo	MC	Sabiaguaba	SB
Boa Vista	BO	Farias Brito	FB	Montese	MT	Salinas	SL
Bom Futuro	BT	Fátima	FA	Moura Brasil	MB	Santa Maria	SM
Bom Jardim	BM	Floresta	FS	Mucuripe	MP	São Bento	SN
Bonsucesso	BS	Genibaú	GB	Novo Mondubim	NM	São Gerardo	SG
Cais do Porto	CS	Granja Lisboa	GL	Olavo Oliveira	OL	São João do Tauape	ST
Cajazeiras	CZ	Granja Portugal	GP	Padre Andrade	DE	Sapiranga	SP
Cambeba	CB	Guajeru	GJ	Panamericano	PO	Serrinha	SR
Canindezinho	CN	Guararapes	GR	Papicu	PP	Siqueira	SQ
Carlito Pamplona	CP	Henrique Jorge	HJ	Parangaba	PG	Varjota	VR
Centro	CT	Itaoca	TC	Parque Araxá	PX	Vicente Pinzon	VZ
Cidade 2000	CD	Itaperi	TP	Parque Dois Irmãos	PD	Vila Manoel Sátiro	VM
Cid. dos Funcionários	FN	Jacarecanga	JG	Parque Iracema	PU	Vila Peri	VP
Coaçu	CO	Jangurussu	JS	Parque Manibura	PM	Vila União	VU
Cocó	CC	Jardim América	JA	Parque Santa Rosa	SS	Vila Velha	VV
Conjunto Ceará I	CE	Jardim Cearense	JM	Parque São José	SJ	-	-
Conjunto Ceará II	CA	Jardim das Oliveiras	JL	Parquelândia	PQ	-	-
Conjunto Esperança	ES	Jardim Guanabara	GN	Parreão	RR	-	-

Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

A Partir da extração das coordenadas geográficas de cada ponto, foi possível incrementar em uma planilha do programa *Microsoft Excel* diversas colunas, contendo informações referentes a cada furo de sondagem, como: regionalização (SER e bairro), cronologia (mês e ano), unidade litológica, origem do solo, zona geotécnica de Colares (1996), entre outras.

Em seguida, buscou-se essas diversas informações (dados qualitativos e quantitativos) para o preenchimento manual dessa planilha descritiva com esse banco de dados sendo importado para o ambiente de trabalho do QGIS, no qual pode-se aplicar o geoprocessamento. Por fim, a nomenclatura definitiva da pasta de cada furo foi composta pelo código do bairro, número de marcação, tipo de sondagem, mês e ano; a Figura 30 ilustra a organização dos arquivos, exemplificando o caminho para o bairro Guararapes.

Figura 30 – Organização dos relatórios de sondagem em pastas.



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

3.8 Produção cartográfica e documental

Nesta etapa buscou-se aplicar as bases cartográficas obtidas no levantamento, juntamente com as funcionalidades do programa QGIS, para produzir produtos cartográfico temáticos. Ressalta-se que a construção dos mapas foi realizada com o Sistema de Referência de Coordenadas EPSG:31984 - SIRGAS 2000, UTM Zona 24 Sul.

Uma parte dos mapas elaborados foram usados para ilustrar o capítulo de fundamentação teórica, na seção referente a caracterização geral de Fortaleza, com os seguintes mapas: localização geográfica, socioeconômico, densidade populacional, evolução urbana, divisão administrativa, pluviosidade, hidrografia, planialtimétrico e geológico simplificado.

Posteriormente, utilizou-se as linhas planialtimétricas (camada vetorial) de Fortaleza para gerar um Modelo Digital de Elevação (camada matricial), por meio de um algoritmo de geoprocessamento. A partir do MDE foi possível extrair novos mapas, como: altitude, hipsometria e declividade; com esse último seguindo a categorização estabelecida pela EMBRAPA (1979), a Tabela 11 apresenta a classificação de declividade.

Ademais, mediante a união do banco de dados com as bases cartográficas, foi possível produzir mais uma série de mapas, de caráter descritivo da abrangência geográfica dos furos de sondagem selecionados.

Tabela 11 – Classes de declividade.

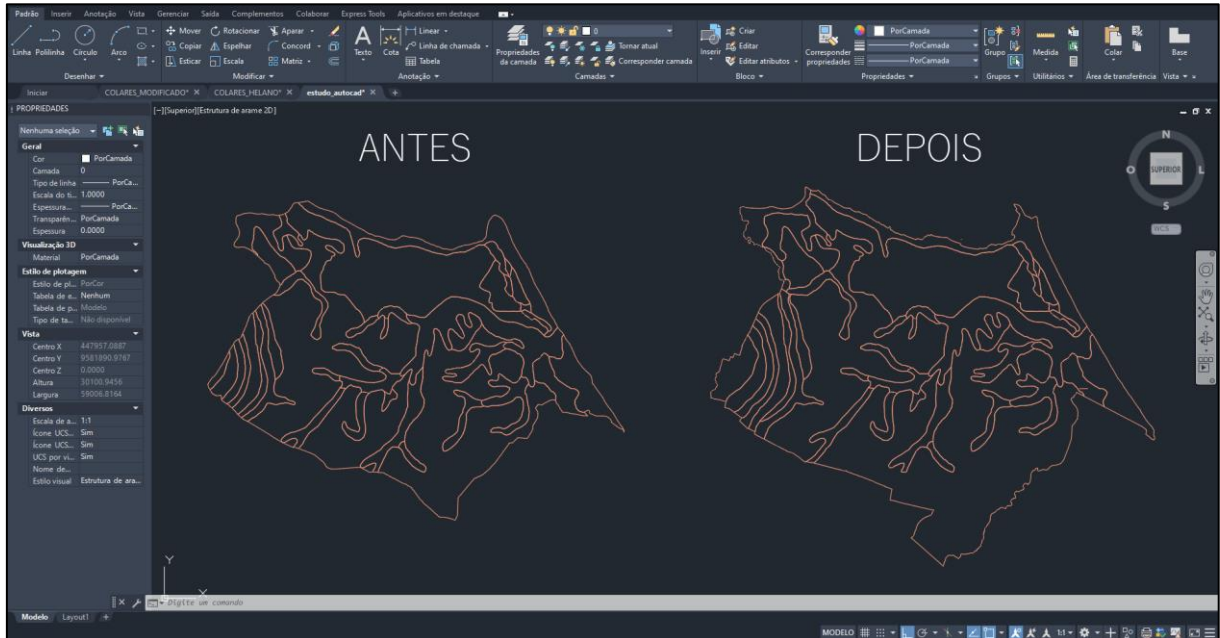
Relevo	Declividade (%)
Plano	0 - 3
Suave-ondulado	3 - 8
Ondulado	8 - 20
Forte-ondulado	20 - 45
Montanhoso	45 - 75
Forte-montanhoso	>75

Fonte: EMBRAPA (1979).

Em seguida, o arquivo KML disponibilizado pelo pesquisador Helano W. Pimentel, foi importado para o programa AutoCAD, no qual foi possível atualizar o zoneamento geotécnico de Colares (1996) para os novos limites municipais de Fortaleza. Dessa forma, esse novo arquivo foi inserido no QGIS, em que se incluiu uma tabela de atributos para cada zona

de Colares (1996), possibilitando a produção de novos mapas derivados. A Figura 31 mostra o resultado após esse processo.

Figura 31 – Comparação entre antes e depois da atualização da carta de Colares (1996).



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

Após a construção cartográfica, o presente autor concentrou-se em elaborar um arquivo DWG modelo no programa AutoCAD para uniformizar os boletins de sondagem que foram coletados, pois em muitos casos, tinha-se padronizações visuais diferentes e informações não relevantes. Além disso, haviam alguns mais antigos que estavam em formato escaneado, essa característica dificultava a leitura e identificação de informações importantes. Buscou-se seguir as orientações e recomendações estabelecidas pelas normativas ABNT NBR 13441/2021 e ABNT NBR 6484/2020.

Posteriormente, analisou-se os relatórios do bairro Guararapes, para exemplificar a uniformização dos boletins, gerando-se documentos em formato PDF. É importante ressaltar, que esse bairro foi escolhido, pois apresenta uma quantidade mediana de sondagens SPT e SM.

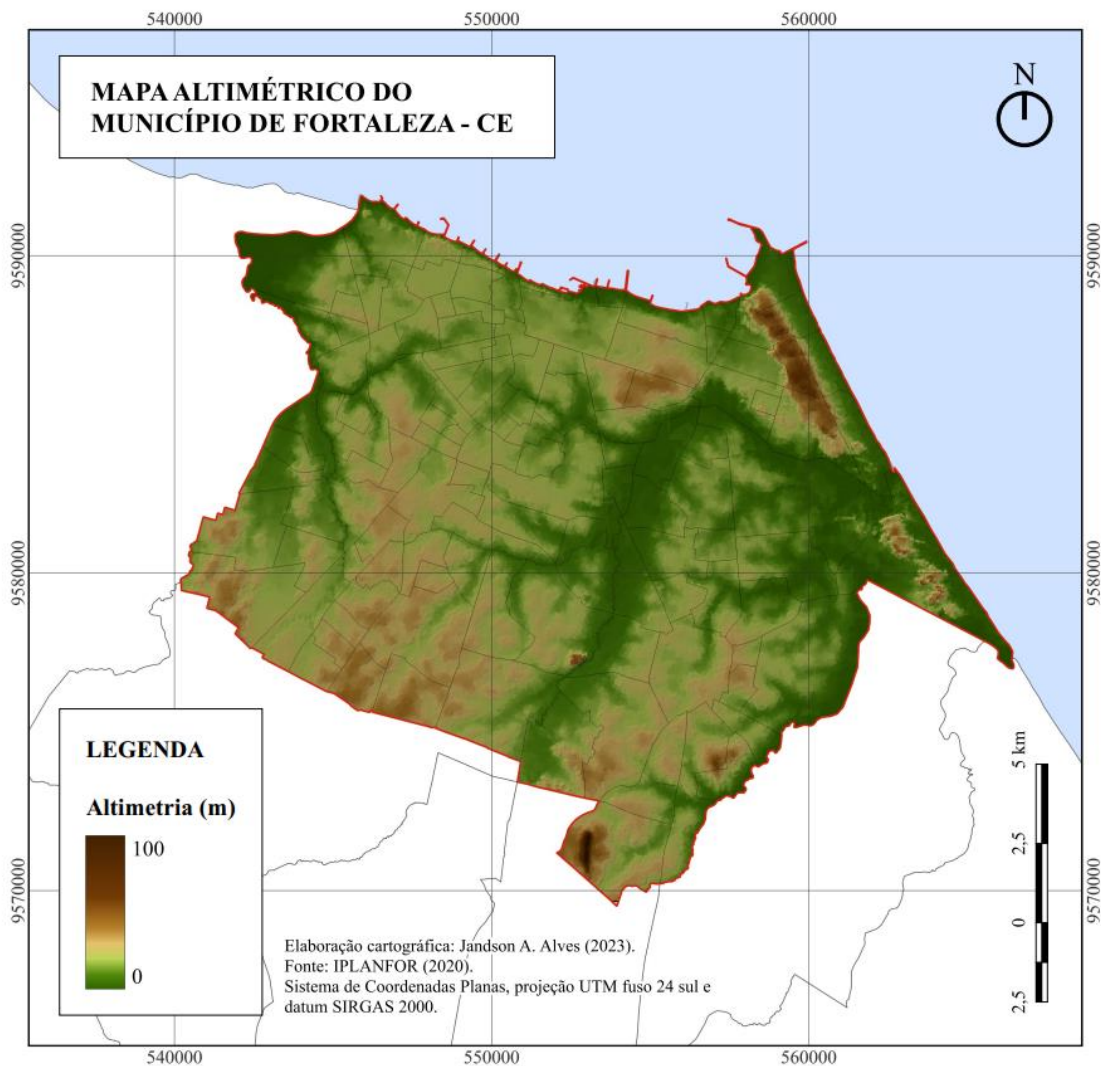
Por fim, esses boletins foram utilizados para alimentar a plataforma do *Google My Maps* em conjunto com o *Google Drive*, desta forma seria possível criar um ambiente *online* com informações geotécnicas compartilháveis entre pesquisadores. Enfatiza-se que esta iniciativa tem caráter preliminar e passível que ser aperfeiçoada, a qual almeja-se que diversos indivíduos alimentem esse ambiente com novos dados.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Modelo Digital de Elevação de Fortaleza

Primeiramente, ao acessar o programa QGIS importou-se a camada planialtimétrica composta de linhas (curvas de nível) que continham o atributo de altitude, em que para transformar essa camada vetorial em um Modelo Digital de Elevação (camada matricial), foi necessário aplicar um algoritmo de conversão, capaz de reprojeter as coordenadas. Esse modelo de elevação em formato *raster* possibilitou a geração de três mapas novos que detalham a composição do relevo do município de Fortaleza, dentre estes temos: altimétrico (Figura 32), hipsométrico (Figura 33) e de declividade (Figura 34).

Figura 32 – Mapa altimétrico de Fortaleza.



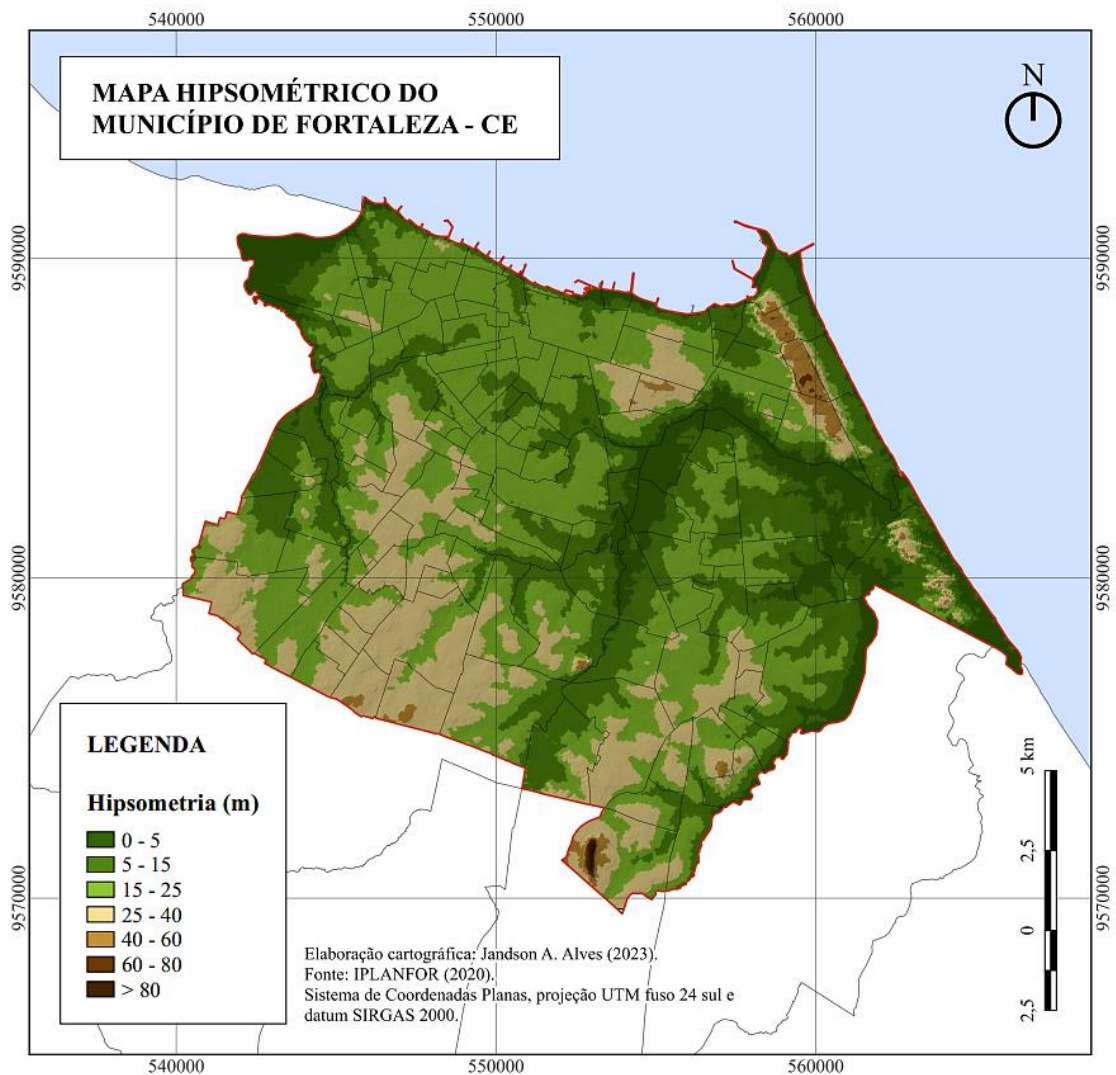
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

O mapa altimétrico apresenta um gradiente de cores para representar a informação de altitude armazenada em cada *pixel* da camada matricial, escolheu-se uma variação entre o verde (cota menos elevada) até o marrom (cota mais elevada). Utilizou-se também uma camada de relevo sombreado capaz de agregar mais detalhe visual ao produto cartográfico.

O mapa hipsométrico é baseado em uma camada *raster*, semelhante ao altimétrico, na qual a principal diferença é a categorização da altitude em intervalos de classe. Ainda mais, continuou-se com o mesmo padrão visual para diferenciar as classes.

Por fim, o mapa de declividade, utilizou-se as categorias estabelecidas pela EMBRAPA (1979), que variam em relação a inclinação do relevo expressa em porcentagem, na qual seguem as seguintes classificações: plano, suave-ondulado, ondulado, forte-ondulado, montanhoso e forte-montanhoso.

Figura 33 – Mapa hipsométrico de Fortaleza.

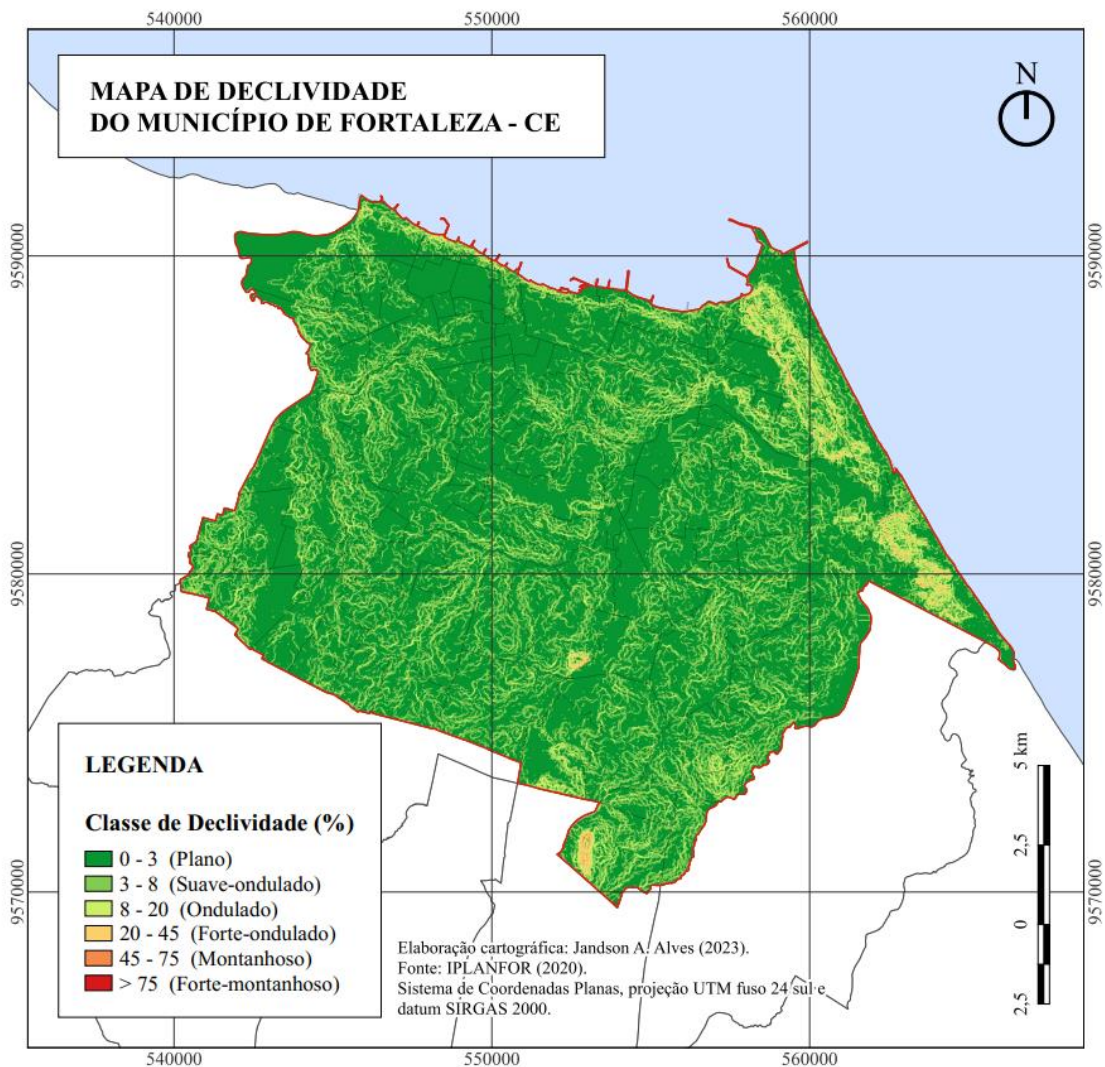


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Por meio da análise visual dos três mapas, conclui-se que o relevo de Fortaleza possui grande predominância de declividade plana, em que algumas regiões variam entre as classes suave-ondulado a forte-ondulado.

Pelo aspecto da altitude tem-se uma variação média relativamente pequena, onde a maior parte do território está até 25 m acima do nível do mar, e com pouquíssimos locais superiores a 40 m de altitude. É interessante ressaltar, que a geomorfologia do município recebe muita influência de rios, riachos e lagoas, na qual também há a presença marcante de dunas e paleodunas.

Figura 34 – Mapa de declividade de Fortaleza.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

4.2 Mapa atualizado do zoneamento geotécnico de COLARES (1996)

Essa etapa iniciou-se com o processo de ajuste do arquivo disponibilizado pelo pesquisador Helano W. Pimentel e que foi utilizado em sua dissertação de mestrado (Pimentel, 2015), onde utilizou-se o programa AutoCAD para o desenvolvimento. Ao final, essa versão ajustada foi importada para o QGIS e continha apenas as informações geométricas dos polígonos que formavam as zonas propostas por Colares (1996). Posteriormente, alterou-se a tabela de atributos desses polígonos, incluindo as características de cada zona, expostas nos trabalhos de Fonteles (2003) e Pimentel (2015), com isso foi possível representar as informações em um mapa atualizado. Ademais, utilizou-se uma conversão de nomenclatura das zonas com a finalidade de facilitar a compreensão, o Quadro 6 apresenta essa mudança de designação em relação a original. A Figura 35 apresenta a carta atualizada de Colares (1996).

Quadro 6 – Simplificação da codificação de Colares (1996).

Zonas de Colares (1996)	Designação Simplificada	Zonas de Colares (1996)	Designação Simplificada
1-3-1-1-1	A	3-5-3-4-1	M
1-5-3-6-1	B	3-5-3-5-1	N
2-2/6-1-2-1	C	4-1-2-5-2	O
3-1-3-7-1	D	4-1-3-5-1	P
3-2-1-3-1	E	4-1-3-6-1	Q
3-3-1-4-1	F	4-1-3-6-2	R
3-4-1-3-1	G	4-1-3-6-3	S
3-4-3-1-1	H	4-1-3-6-5	T
3-4-3-2-1	I	4-1-5-4-1	U
3-4-3-3-1	J	4-2-3-4-1	V
3-4-3-4-1	K	4-4-3-5-1	W
3-5-1-4-1	L	-	-

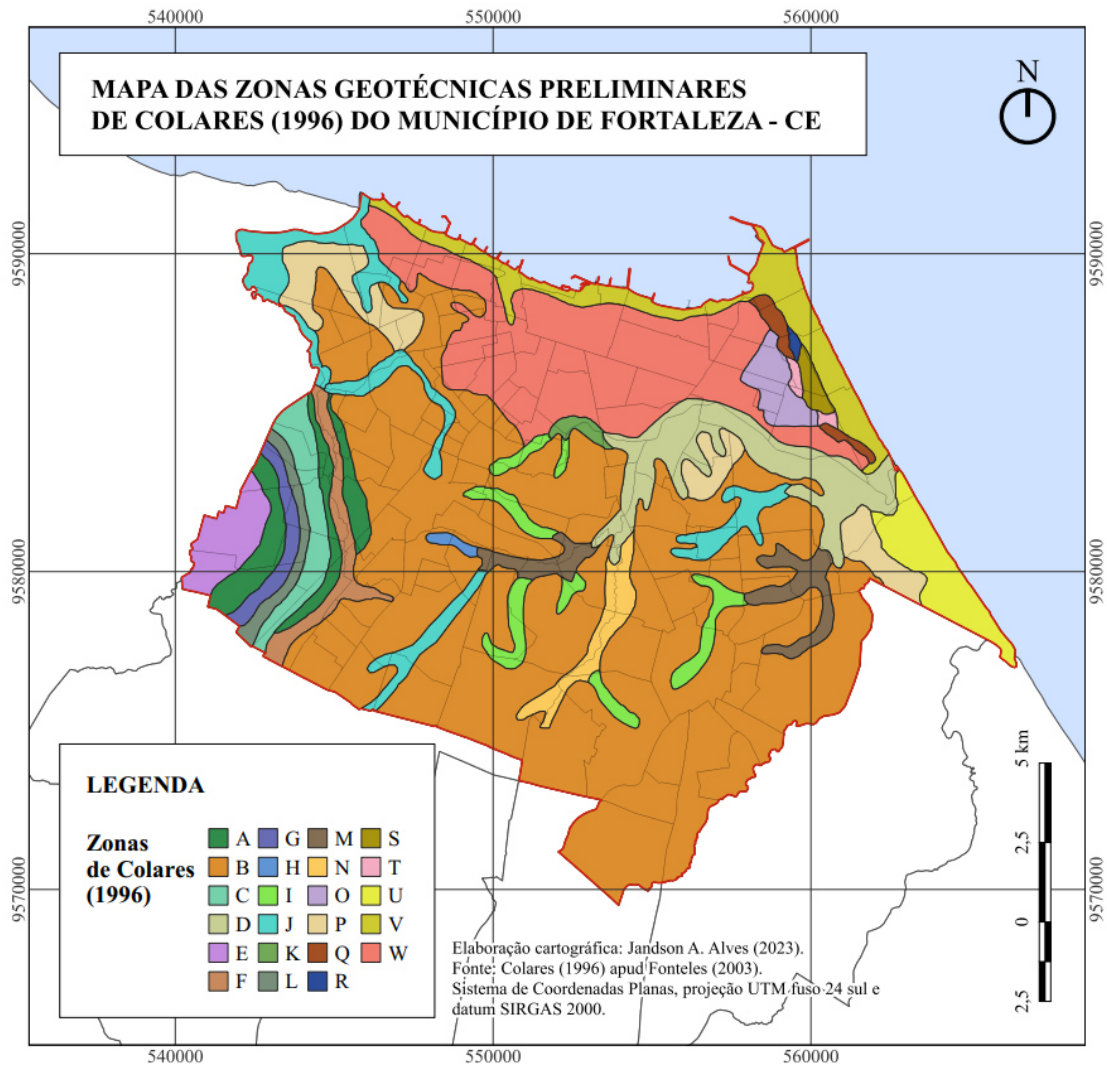
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Para esse mapa adotou-se o padrão de cores já estabelecido no trabalho de Pimentel (2015), com a inclusão de linhas destacando a divisão entre os bairros da cidade. Nota-se que a zona B é predominante em grande parte do território, principalmente em direção para o interior e bairros periféricos, destaca-se também:

- a) zona D, que engloba o solo de uma área expressiva do Parque Estadual do Cocó;
- b) zona V, presente na faixa litorânea, estendendo-se da foz do rio Cocó até a foz do rio Ceará;

c) zona W, predominante nos bairros da região centro-norte, marcada pelo adensamento urbano com edifícios maiores, esta característica homogênea do solo local contribuiu com os estudos geotécnicos preliminares durante os momentos de expansão imobiliária de Fortaleza.

Figura 35 – Mapa atualizado do zonamento geotécnico de Colares (1996).

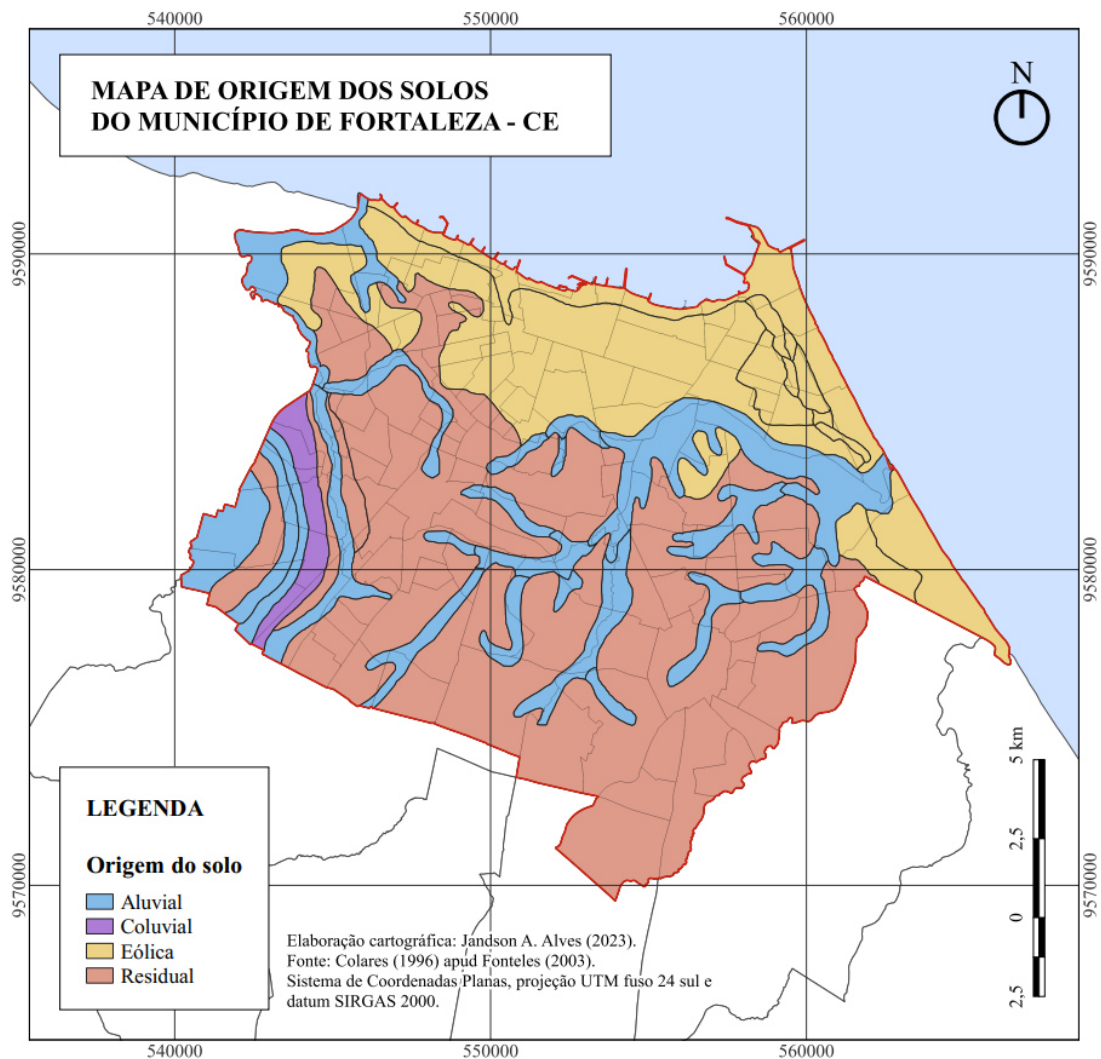


Fonte: Colares (1996) apud Fonteles (2003, p. 57), modificado pelo Autor (2023).

Cada polígono que compõe as zonas recebeu cinco colunas de atributos, que foram preenchidas segundo os trabalhos citados anteriormente, essas colunas são: origem do solo, textura do material, substrato rochoso associado, espessura do material e classe de declividade.

Após a inserção dessas informações, julgou-se válido apresentar um mapa contendo apenas o primeiro atributo, pois esta fonte de Colares (1996) foi a única encontrada pelo presente autor que detalhou as origens dos solos de Fortaleza (Figura 36).

Figura 36 – Mapa de origem dos solos de Fortaleza, de acordo com Colares (1996).

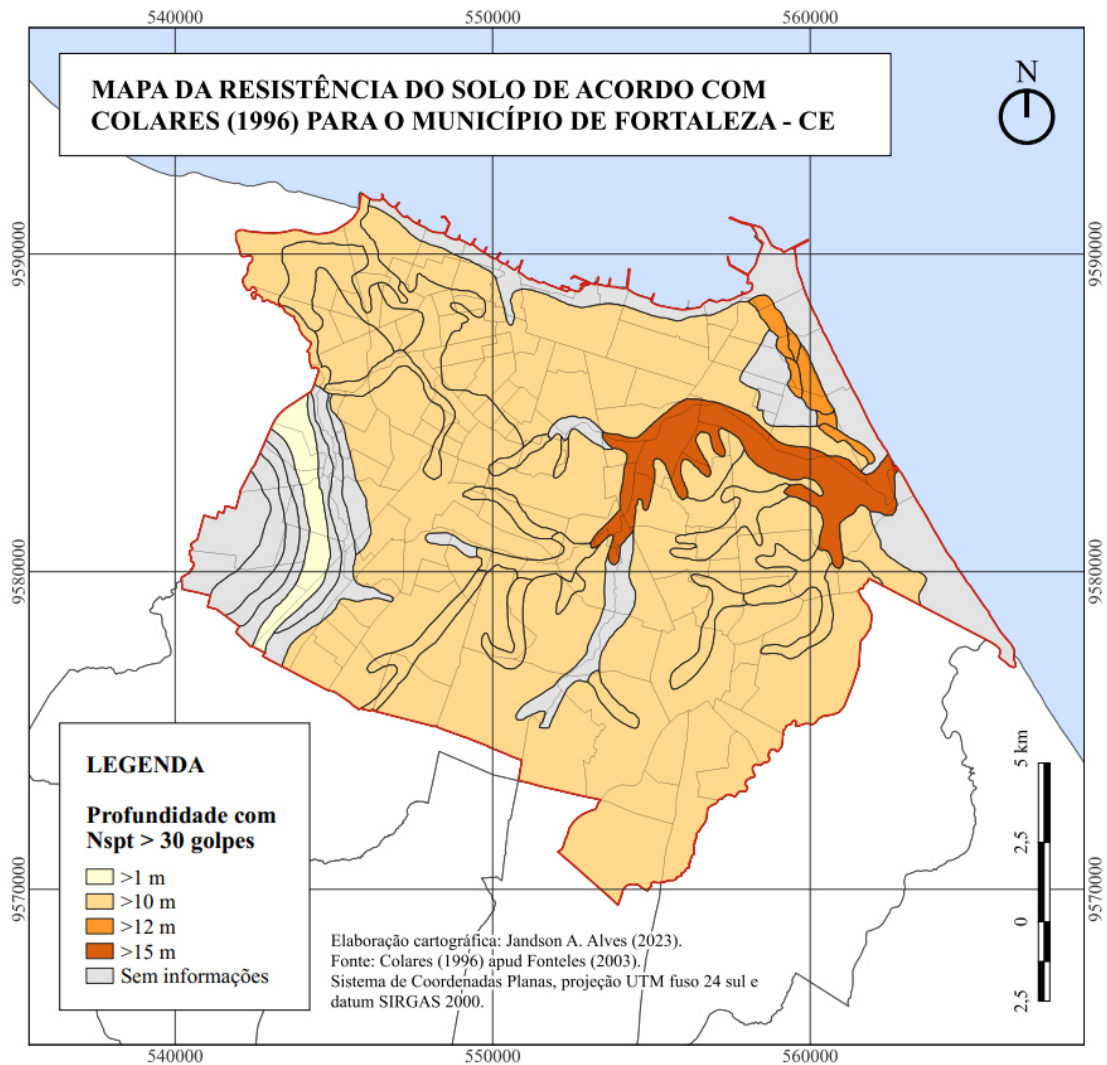


Fonte: Colares (1996) *apud* Fonteles (2003, p. 57), modificado pelo Autor (2023).

É notório observar como distribui-se essa característica do solo, onde há origem eólica ao longo de uma larga faixa do litoral, o que corrobora com o fato dessa faixa ter a presença de formações de dunas e paleodunas. Outro aspecto interessante é a existência de solos residuais nas porções mais centrais e periféricas, advindos diretamente da decomposição da rocha matriz local. Além disso, a marcante influência dos rios e riachos na origem dos solos, com amplas regiões pelo território.

Por fim, Fonteles (2003) expõem uma tabela elaborada por Colares (1996) que trata da resistência do solo com base no N_{spt}. Porém, apenas 12 das 23 zonas foram detalhadas, a Figura 37 apresenta estes resultados. Nota-se que ele utilizou como referência o N_{spt} superior a 30 golpes, com esse valor sendo considerado resistente. Quando essa quantidade de golpes ocorre em areias, a camada é classificada como compacta, já quando ocorre em argilas é classificada como dura.

Figura 37 – Mapa da resistência dos solos de Fortaleza, de acordo com Colares (1996).



Fonte: Colares (1996) apud Fonteles (2003, p. 57), modificado pelo Autor (2023).

4.3 Mapa da localização dos furos de sondagem

De acordo com o detalhamento da metodologia no capítulo 3, os relatórios de sondagem foram coletados e em seguida foi realizado o processo de escolha dos furos representativos e a organização de seus boletins. Ao total foram selecionados 751 furos de sondagem, nos quais 658 são de SPT, 91 são de SM e 2 de SR. Para a inserção das informações georreferenciada foi montada uma planilha no programa *Microsoft Excel*, conforme mostra a Figura 38.

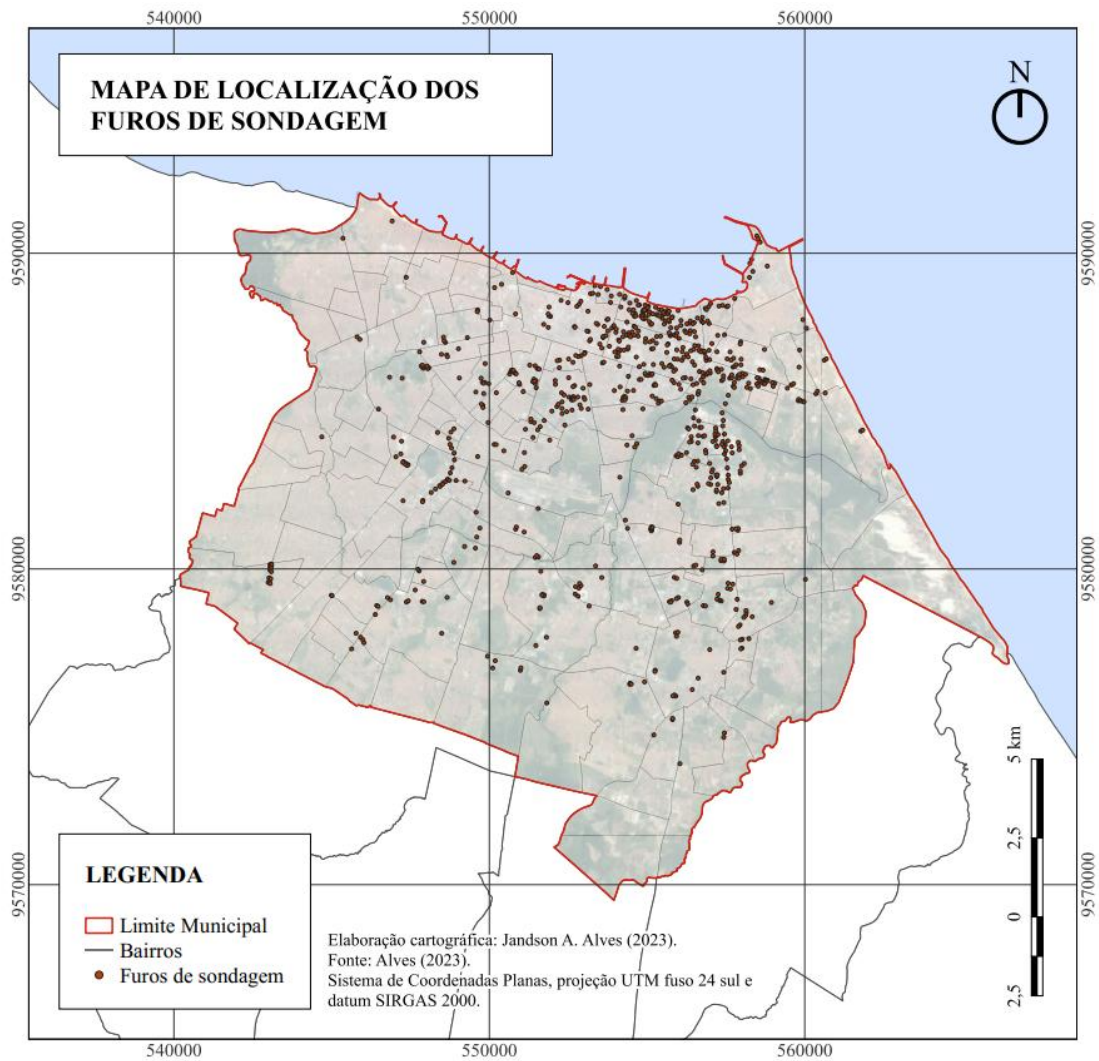
Em sequência, importou-se essa planilha para o ambiente de trabalho do QGIS, em que se produziu diversos mapas detalhados da área de estudo. A Figura 39, apresenta o mapa de localização com todos os furos escolhidos neste trabalho.

Figura 38 – Recorte da tabela de atributos do banco de dados de sondagens.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Identificador	Codigo	Ordem	X	Y	Z	Tipo	Regional	Bairro	Mes_num	Mes_texto	Ano
2	AB1	AB	1	545896	9587276	26	SP		3 Antonio Bezerra	3	MAR	2008
3	AB2	AB	2	545808	9587353	21	SP		3 Antonio Bezerra	3	MAR	2008
4	AD1	AD	1	554139	9582908	9	SP		6 Aerolandia	11	NOV	2010
5	AF1	AF	1	549050	9586051	24	SP		3 Amadeu Furtado	5	MAI	2008
6	AL1	AL	1	554674	9583973	7	SP		6 Alto da Balanca	2	FEV	2010
7	AL2	AL	2	554366	9583926	9	SP		6 Alto da Balanca	2	FEV	2010
8	AL3	AL	3	554610	9583865	6	SP		6 Alto da Balanca	2	FEV	2010
9	AP1	AP	1	550600	9582407	20	SP		4 Aeroporto	8	AGO	2007
10	AR1	AR	1	545636	9577470	47	SP		10 Aracape	6	JUN	2007
11	AT1	AT	1	554015	9587497	38	SP		2 Aldeota	4	ABR	2021
12	AT2	AT	2	556509	9586458	36	SP		2 Aldeota	9	SET	2009
13	AT3	AT	3	556107	9586608	37	SM		2 Aldeota	3	MAR	2010
14	AT4	AT	4	555429	9587378	44	SM		2 Aldeota	8	AGO	2009
15	AT5	AT	5	556440	9586563	34	SP		2 Aldeota	7	JUL	2010
16	AT6	AT	6	555782	9586408	44	SP		2 Aldeota	10	OUT	2007
17	AT7	AT	7	556164	9586706	34	SP		2 Aldeota	6	JUN	2009
18	AT8	AT	8	554355	9587410	33	SP		2 Aldeota	5	MAI	2010
19	AT9	AT	9	556486	9586954	30	SP		2 Aldeota	5	MAI	1995
20	AT10	AT	10	554094	9586864	29	SP		2 Aldeota	11	NOV	2011
21	AT11	AT	11	554661	9586712	33	SP		2 Aldeota	12	DEZ	1995
22	AT12	AT	12	555735	9586461	44	SP		2 Aldeota	12	DEZ	1989
23	AT13	AT	13	554528	9587511	31	SP		2 Aldeota	3	MAR	1992

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 39 – Mapa de localização dos furos de sondagem em Fortaleza.



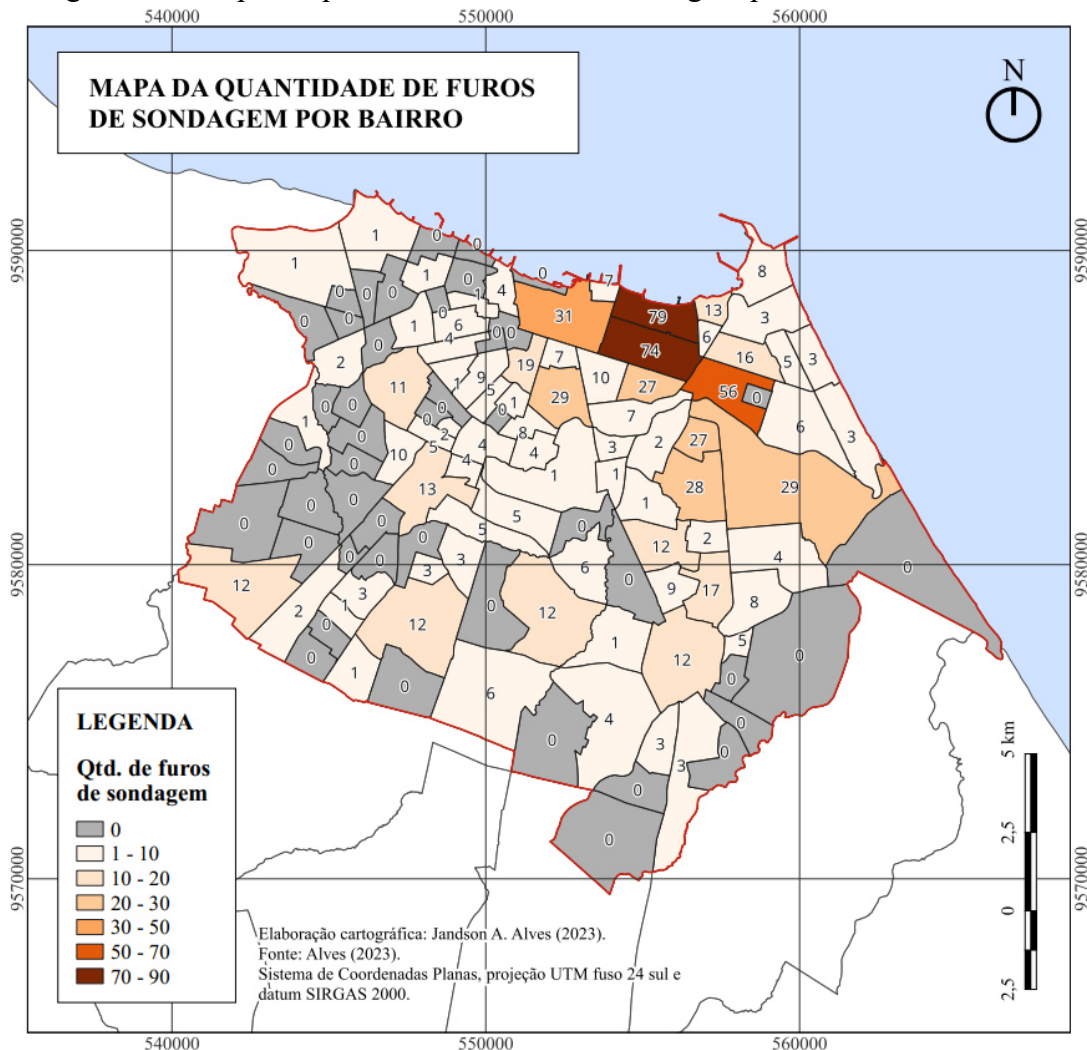
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

4.4 Mapas temáticos dos furos de sondagem

A presente seção detalha a relação entre a área de estudo e os furos de sondagem selecionados, por meio de diversos mapas temáticos. Primeiramente, o mapa da quantidade de furos por bairro de Fortaleza (Figura 40), o qual representou-se com uma escala de cor para ilustrar quais têm maior número. É interessante ressaltar, que os furos de sondagens mencionados estão distribuídos por toda a cidade, em que aproximadamente 63% dos bairros possuem pontos.

Porém, apenas 9 desses destacam-se no aspecto de quantidade, que são: Meireles, Aldeota, Cocó, Centro, Fátima, Edson Queiroz, Engenheiro Luciano Cavalcante, Guararapes e Dionísio Torres. Além disso, observa-se que há uma concentração de 153 furos nos dois primeiros bairros dessa listagem, representando 20% do total de 751.

Figura 40 – Mapa da quantidade de furos de sondagem por bairro de Fortaleza.

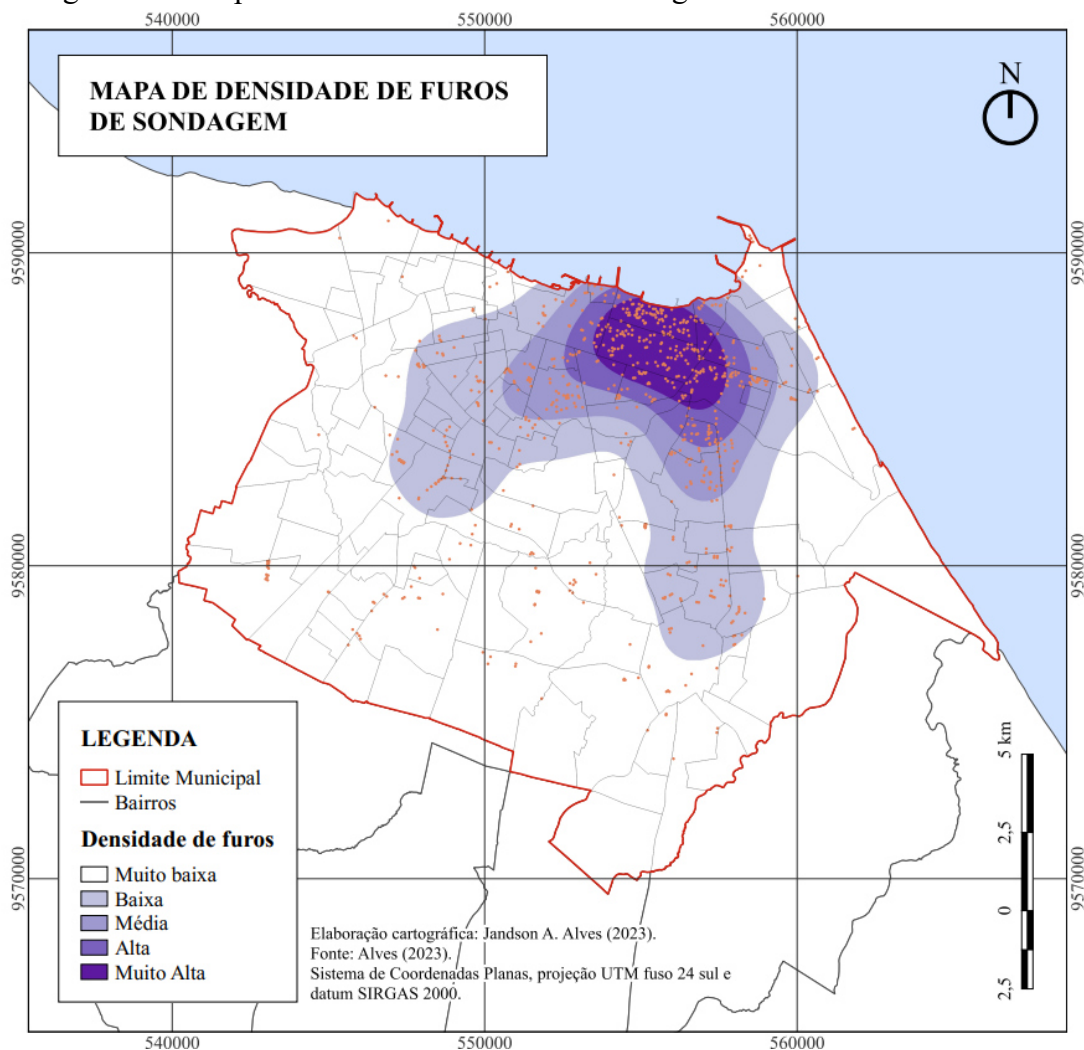


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Além disso, visando um tratamento espacial mais adequado para a presente pesquisa, utilizou-se um algoritmo de análise aplicado em camadas de pontos, esse geoprocessamento é capaz de gerar uma nova camada *raster* que ilustra visualmente as áreas com maior densidade de pontos, com relação a quantidade em si ou a algum atributo associado a esse vetor. Por meio deste processo, produziu-se os mapas apresentados na Figura 41 e na Figura 42 que mostram 5 categorias quali-quantitativas, relacionadas ao nível de concentração de furos de sondagem em cada área colorida.

Pelas figuras fica claro observar as melhores regiões para um estudo mais aprofundado de modelagem geológica-geotécnica, por apresentarem uma grande amostragem em relação a sua área. Nessa perspectiva, destaca-se as porções que são classificadas entre densidade média a muito alta, nas quais têm a capacidade de extrair maiores benefícios do geoprocessamento com interpoladores.

Figura 41 – Mapa de densidade de furos de sondagem.



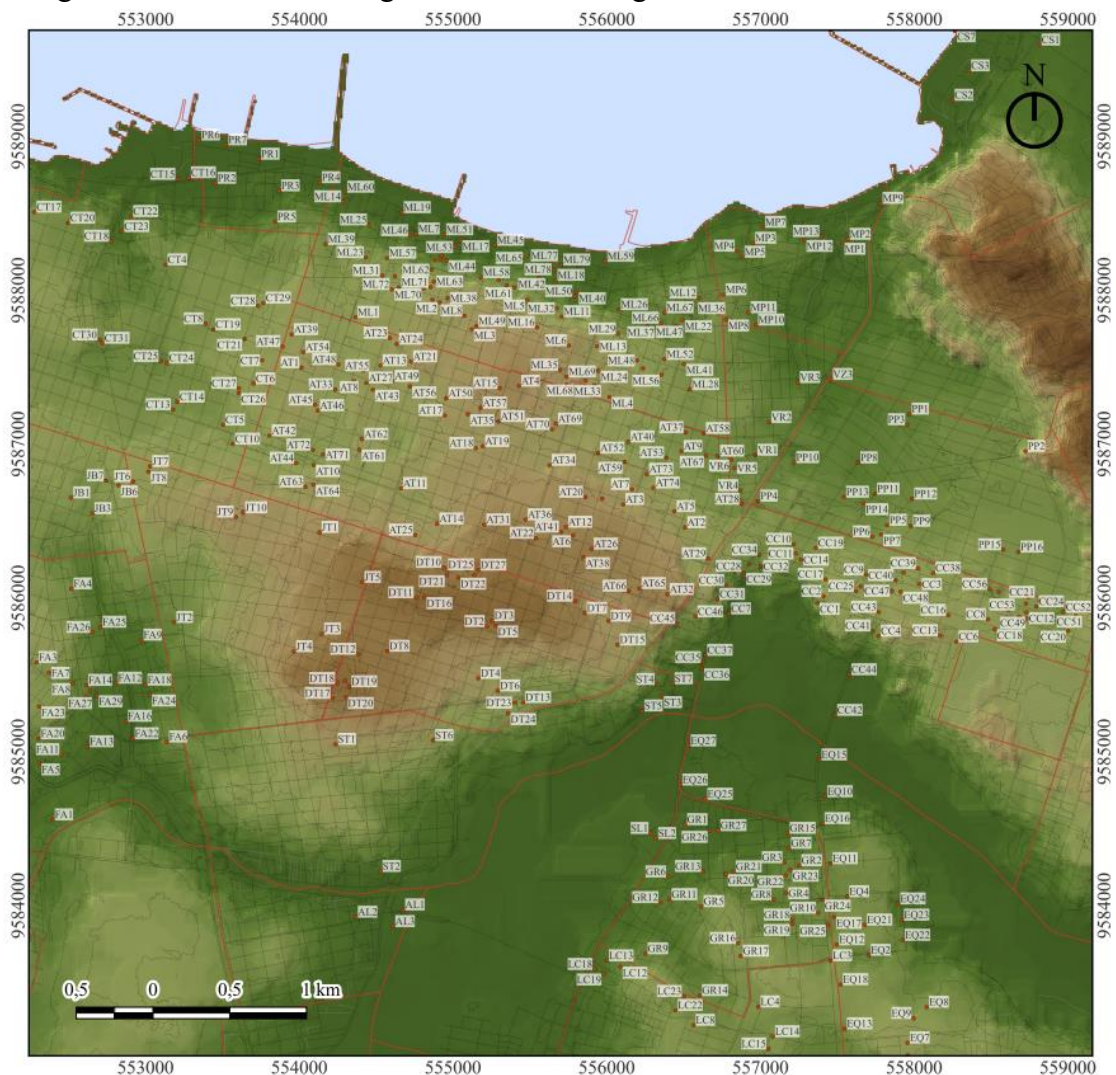
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

As Figura 43 e Figura 44 buscam ampliar o detalhe nessa região mais adensada, perante a altitude e ao zoneamento de Colares (1996), respectivamente.

No aspecto de altitude tem-se considerável distribuição dos pontos, entretanto observa-se duas porções com pouquíssima ou até mesmo ausência de furos, que são: a faixa ao longo do talvegue do rio Cocó, e as dunas mais elevadas a nordeste de Fortaleza. Essa baixa amostragem é compreensível, tendo em vista que o primeiro local abrange o Parque Estadual do Cocó, já o segundo é marcado pela predominância de edificações irregulares.

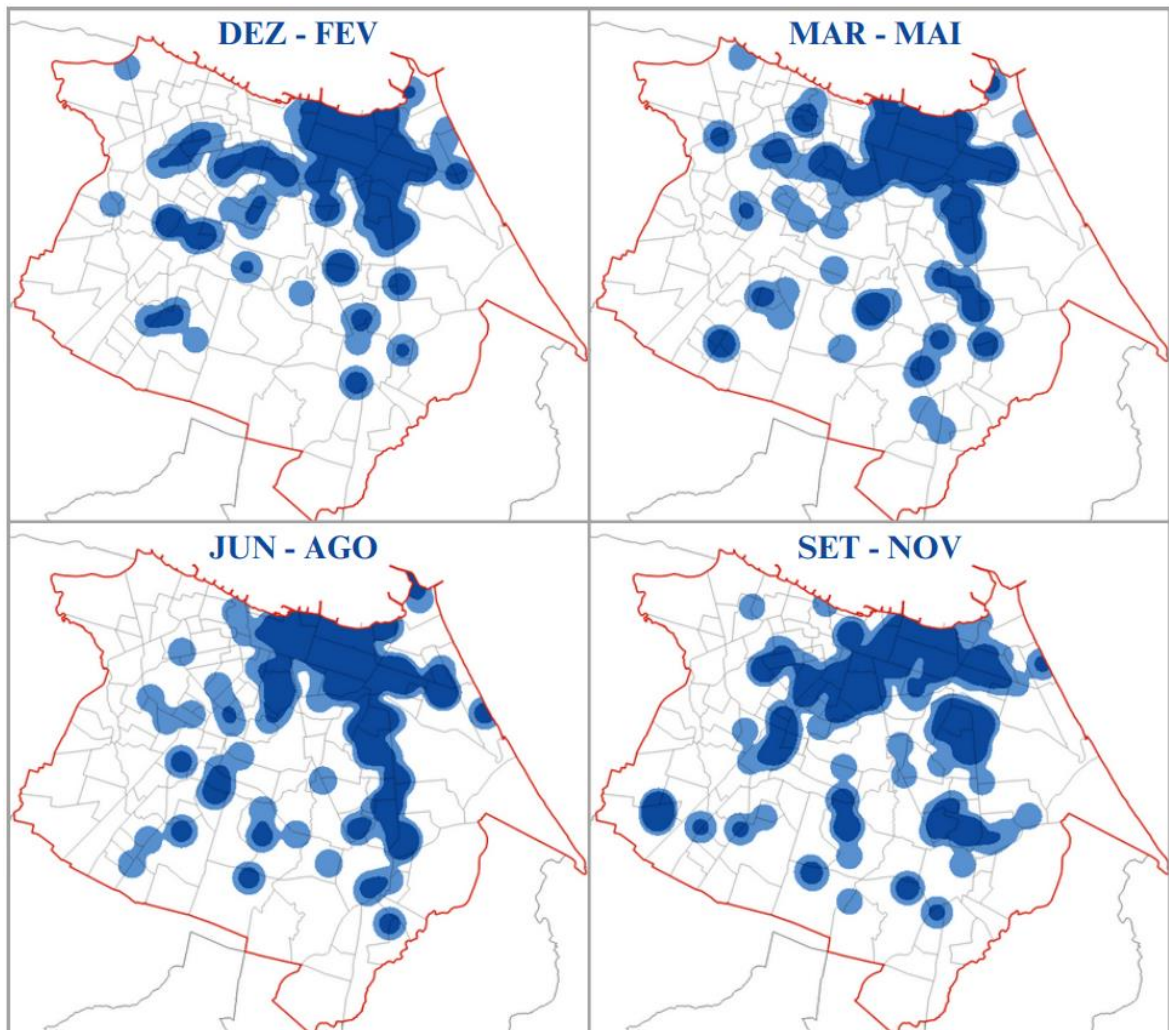
Sobre o aspecto geotécnico, observa-se que a Zona W (cor rosada) possui a maior proeminência nessa porção da cidade, contendo 270 furos de sondagem apenas nesse recorte. É importante ressaltar, que essa zona foi bastante explorada no trabalho de Pimentel (2015), com ênfase no Nspt e proposição de fundações prediais adequadas para a região.

Figura 43 – Furos de sondagem e altitude na região centro-norte.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 45 – Dispersão de furos de sondagem em quatro grupos de meses.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Observa-se relativa dispersão da presença de furos, representadas por meio de manchas azuis, apesar disso, tem-se uma concentração homogênea na porção centro-norte nos quatro grupos de meses. Essa característica corrobora com a possibilidade de modelagem do nível freático em diferentes cenários, podendo-se estimar a profundidade mais baixa e a mais alta de várias áreas de Fortaleza em função do tempo. Nesse sentido, destaca-se as seguintes regiões administrativas:

- a) SER 2, com os bairros Meireles, Aldeota, Dionísio Torres, Mucuripe e Varjota;
- b) SER 4, com os bairros Fátima e Benfica;
- c) SER 7, com os bairros Cocó, Edson Queiroz, Luciano Cavalcante e Guararapes;
- d) SER 12, com os bairros Centro e Praia de Iracema.

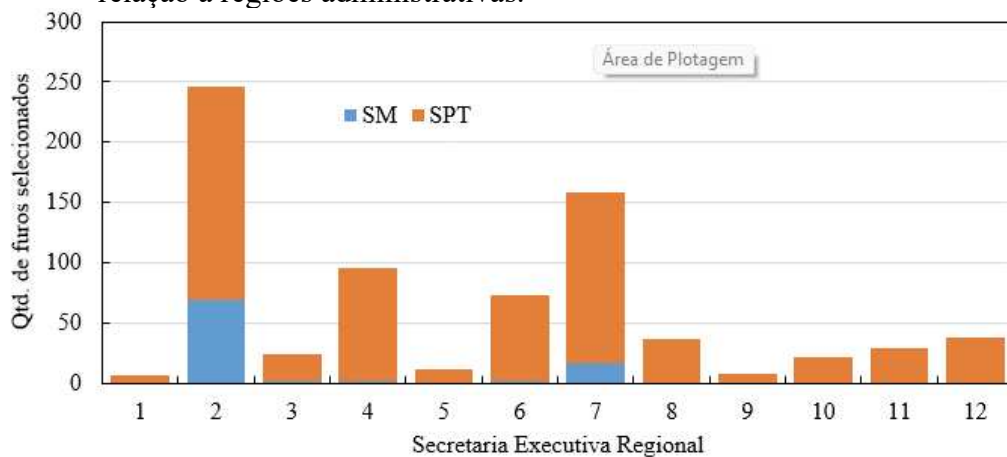
4.5 Análise do banco de sondagens

Esta seção detalha algumas características quali-quantitativas do banco de dados de 751 sondagens, por meio de diversos gráficos. Primeiramente, o gráfico de quantidade de furos em relação a SER (Gráfico 2), o qual representou-se com uma distinção de cores entre os furos advindos de ensaio SPT e SM para melhor diferencia-los no gráfico.

É válido ressaltar, que eles estão distribuídos por toda a cidade, em que todas as regionais possuem pontos, porém apenas duas delas concentram aproximadamente 50% das sondagens SPT e 95% das SM, que são a SER 2 e a SER 7.

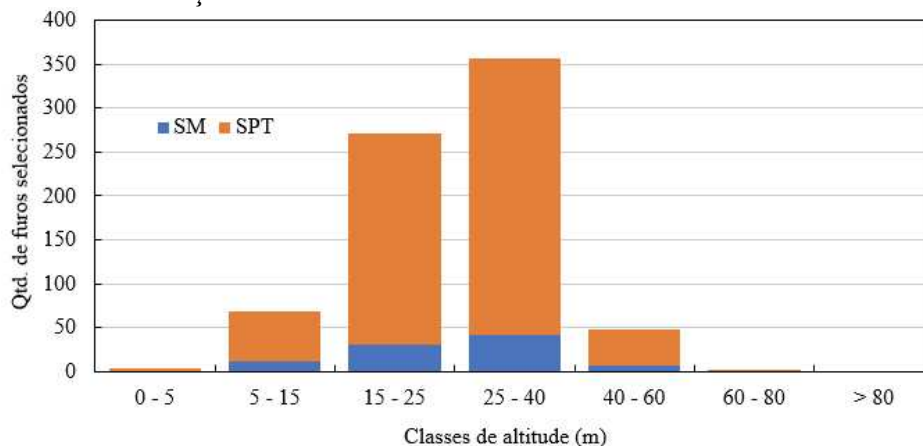
Ademais, também se agrupou a cota em que foi realizado cada furo, com base nas classes do mapa hipsométrico apresentado na seção 4.1, dessa forma, o Gráfico 3 indica que a faixa de 15 m a 40 m de altitude acumula 640 sondagens, representando 85% do total.

Gráfico 2 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a regiões administrativas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Gráfico 3 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação as classes de altitude.



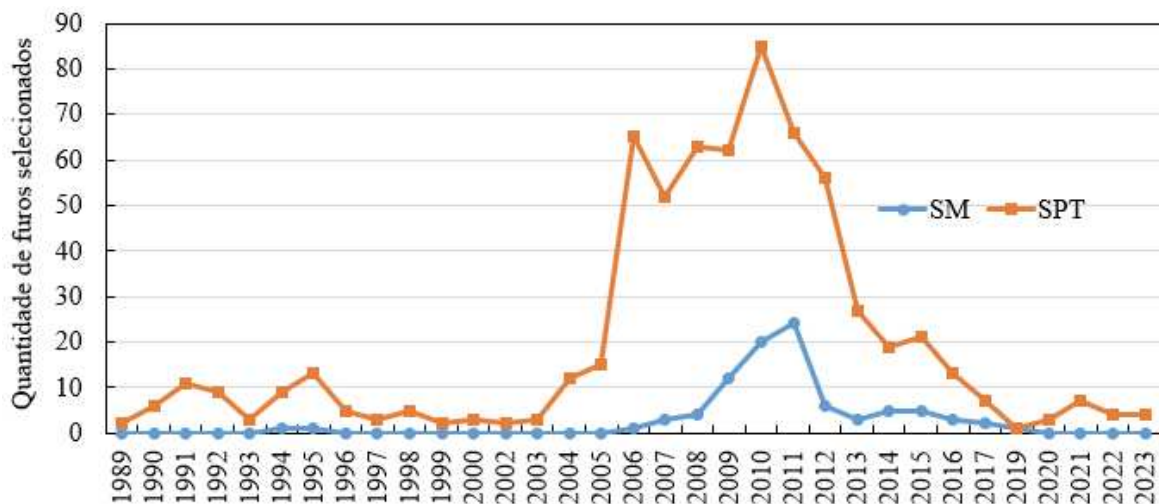
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Os aspectos temporais do banco de dados também são importantes de serem analisados, o Gráfico 4 apresenta a distribuição das sondagens SPT e SM ao longo dos anos, nos quais têm-se furos de 1989 até 2023, onde apenas 2001 e 2018 estão com ausência de amostragem.

Nota-se também, que há uma massiva concentração entre 2005 e 2015 (82% do total), essa característica é compreensível, tendo em vista que a fonte de origem mais expressiva foi a empresa Tecnord, a qual reduziu a prestação de serviços de sondagem no final da década de 2010. Também é interessante ressaltar, que o presente autor realizou apenas a coleta de arquivos digitais de sondagem, onde a empresa não tinha a cultura de armazenar digitalmente esses documentos durante o final do século XX até o início do século XXI.

Além disso, observa-se que houve entre 2008 a 2011 um crescimento relevante no número de sondagens SM, esse tipo de ensaio é indicado quando precisa-se caracterizar camadas rochosas. Esse aumento indica que ocorreu uma ampliação imobiliária no período, considerando que edificações de maior porte demandam fundações com maior capacidade de carga, e em consequência profundidades também maiores, principalmente quando trata-se do solo da zona W de Colares (1996).

Gráfico 4 – Distribuição de frequências de furos de sondagem ao longo dos anos.



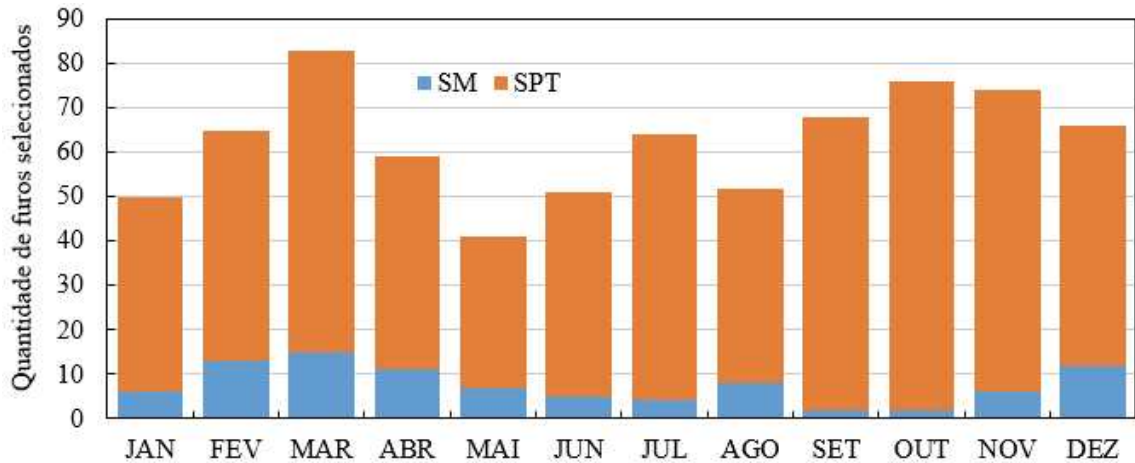
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Ao organizar a amostragem em função dos meses, tem-se o Gráfico 5, ele demonstra uma boa distribuição das sondagens SPT e SM nesse quesito, com o menor mês tendo 40 furos e o maior tendo cerca de 80.

Também, observa-se que ao arranjar os meses em quatro grupos, semelhante aos utilizados no final da seção 4.4, tem-se as seguintes quantidades:

- a) entre dezembro e fevereiro, 181 (24%);
- b) entre março e maio, 185 (25%);
- c) entre junho a agosto, 167 (22%);
- d) entre setembro a novembro, 218 (29%).

Gráfico 5 – Distribuição de frequências de furos de sondagem nos meses.

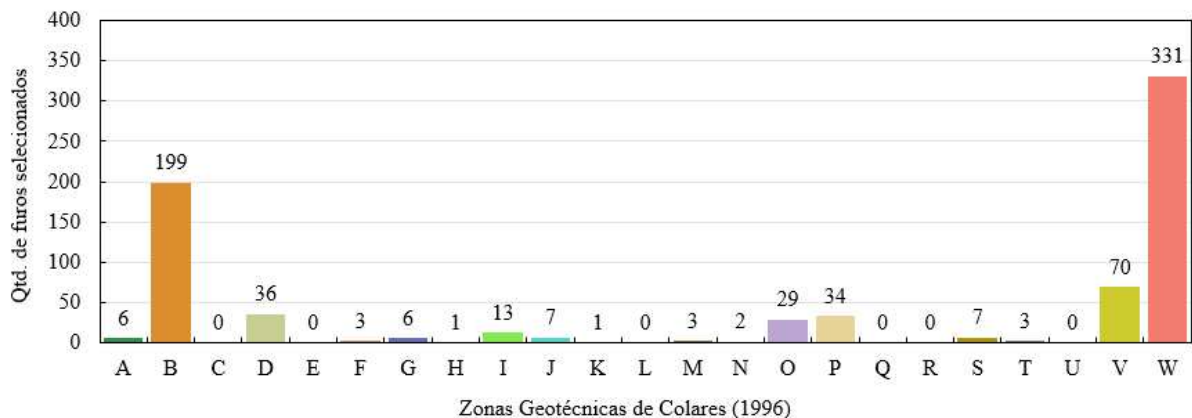


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Além disso, o Gráfico 6 mostra a distribuição em relação as zonas de Colares (1996), no qual apenas sintetiza de forma numérica aquilo que se percebe nos mapas apresentados anteriormente. Onde tem-se uma concentração de 44% dos furos na zona W, 26% na zona B e 9% na zona V.

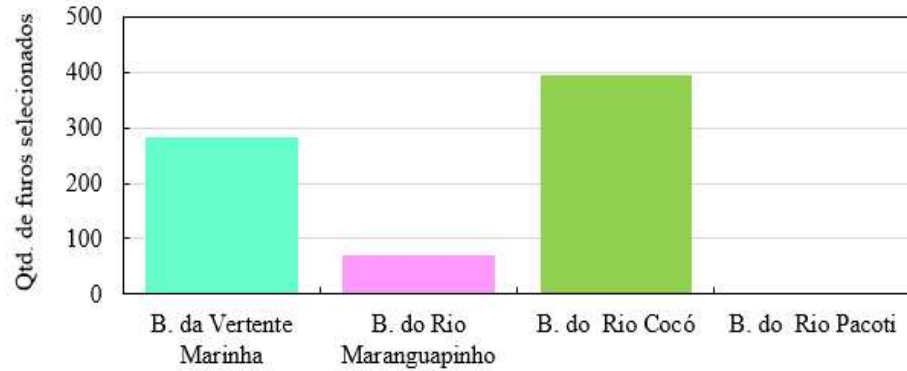
Por fim, para complementar a caracterização do banco de sondagens, produziu-se o Gráficos 7, Gráfico 8 e a Tabela 12, eles detalham a abrangência da quantidade de amostras perante a regionalização em: bacias hidrográficas, origens do solo e unidades litoestratigráficas.

Gráfico 6 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a zona geotécnica de Colares (1996).



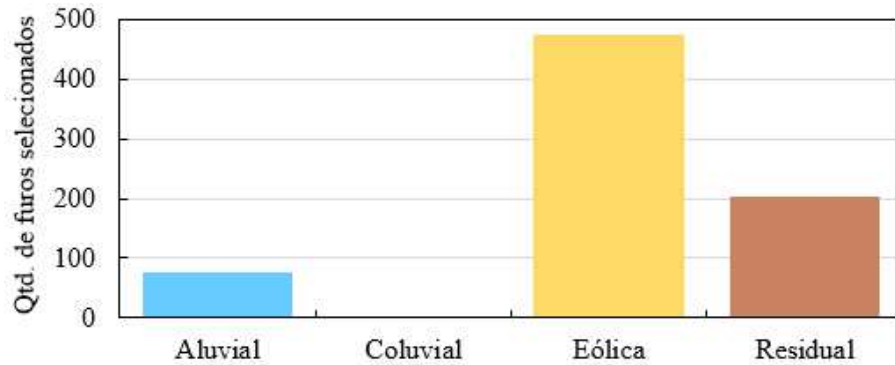
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Gráfico 7 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a bacia hidrográfica.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Gráfico 8 – Distribuição de frequências de furos de sondagem em relação a origem do solo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Tabela 12 – Quantidade de furos de sondagem em cada unidade litoestratigráfica.

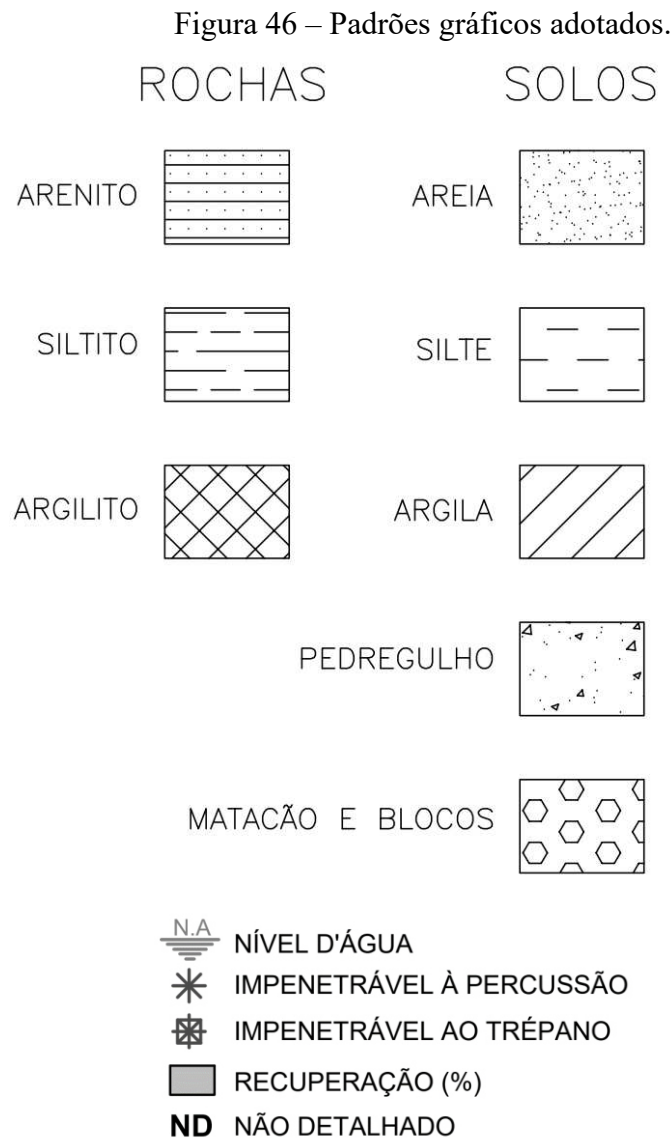
Unidade Litoestratigráfica	Qtd. de Furos	%
Grupo Barreiras	709	94%
Depósitos Litorâneos	20	3%
Complexo Tamboril-Santa Quitéria	22	3%
	751	100%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

4.6 Boletins uniformizados de sondagem

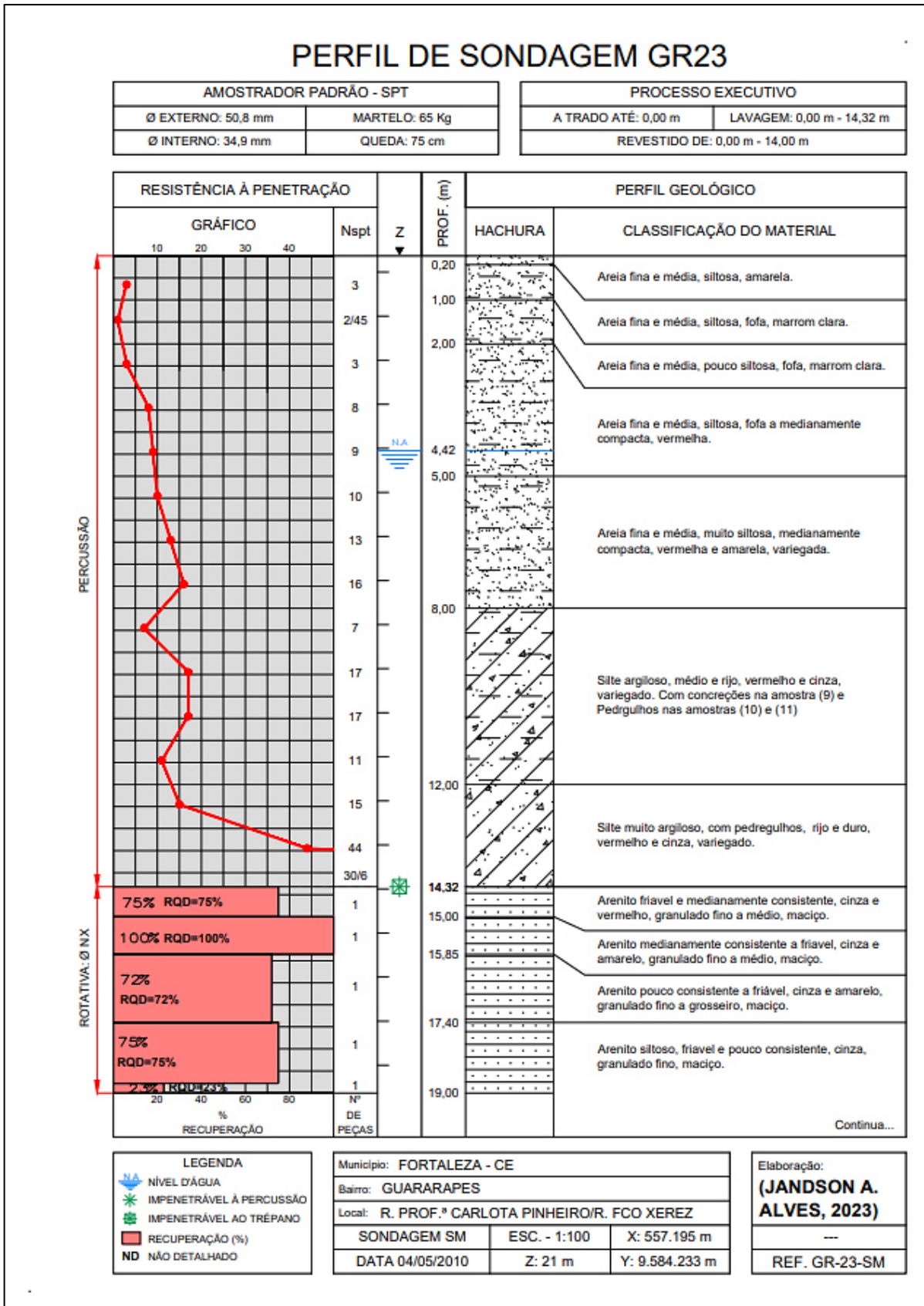
Conforme exposto no capítulo 3, criou-se um modelo de boletim de sondagem padronizado no programa AutoCAD, para uniformizar o padrão gráfico dos perfis, tendo em vista que há relatórios mais antigos escaneados. Além disso, essa ação manteve todos os boletins contendo a mesma linguagem, facilitando a interpretação das informações, mesmo que esses furos venham de origens totalmente diferentes.

Buscou-se seguir as orientações e recomendações estabelecidas pela normativa ABNT NBR 13441/2021 que trata da simbologia de solos e rochas. A Figura 46 mostra alguns dos padrões adotados pelo presente autor e a Figura 47 apresenta um exemplo do modelo com o devido preenchimento pelas informações do boletim GR23.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 47 – Boletim uniformizado da sondagem GR23.



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

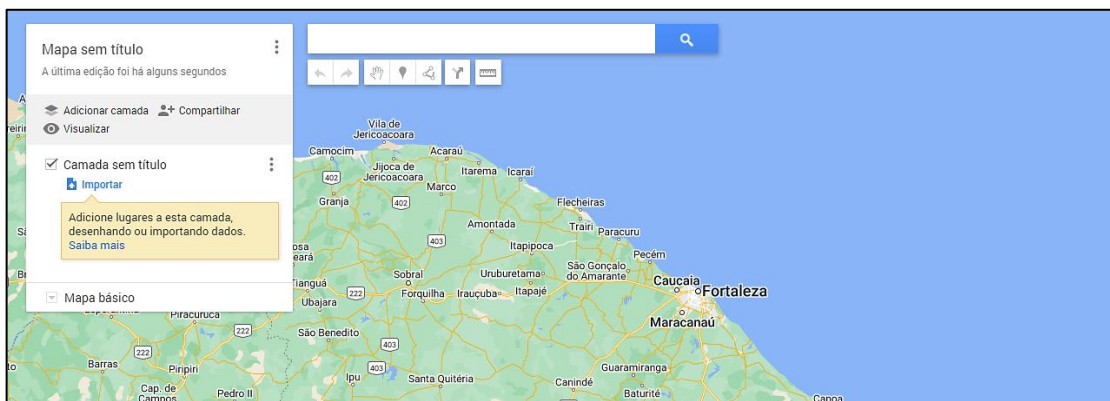
4.7 Ambiente colaborativo entre pesquisadores

Posteriormente, escolheu-se o bairro Guararapes para exemplificar a aplicação do modelo de boletim uniformizado e também para alimentar a ambiente colaborativo. É válido salientar, que esse bairro foi selecionado devido a um conjunto de características favoráveis, as quais muitas foram detalhadas nas seções anteriores.

O Guararapes contém uma quantidade mediana de sondagens SPT e SM, apresentando ótima relação entre área e número de furos, onde a maior parte do território está na faixa de densidade média para alta, utilizando-se da classificação proposta nesse trabalho. Ademais, destaca-se que esses pontos são bem distribuídos ao longo dos meses, favorecendo a visualização da variação freática local. Por fim, nota-se que no aspecto geotécnico o bairro é dividido em duas áreas pela categorização de Colares (1996), a zona D e a zona P.

Ao término da preparação dos boletins, iniciou-se o processo de estruturação do ambiente colaborativo, de modo geral, ele é composto por duas ferramentas *online*. A primeira é o *Google My Maps* (Figura 48), que permite a importação de arquivos KML e inserção de novas geometrias, além de liberar a edição visual e da tabela de atributos dos elementos adicionados. A segunda ferramenta é o *Google Drive*, que contribui com o armazenamento dos documentos PDF gerados, nos quais utiliza-se um *link* para acessá-los.

Figura 48 – Interface inicial da plataforma *Google My Maps*.



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

A partir dessa união foi possível criar a [Plataforma Colaborativa](#), facilmente acessada e operada via *internet*. Além disso, na versão final, foi incluído cinco camadas: limite dos bairros, limite municipal, classificação geológica simplificada, zoneamento atualizado de Colares (1996) e os pontos de sondagem no bairro Guararapes. A Figura 49 ilustra a ordem de ações para visualizar o boletim, exemplificando para a sondagem georreferenciada GR23.

Primeiramente, conecta-se a plataforma e marca-se a camada de pontos como visível, a partir desse momento é escolhido um furo e efetua-se a *click* com o cursor do *mouse*. Em seguida, surge a esquerda as informações daquele ponto, havendo um *link* que direciona o usuário para uma pasta no *Google Drive* contendo todos os boletins presentes no bairro.

Figura 49 – Funcionamento da Plataforma Colaborativa.

The figure illustrates the workflow of the collaborative platform. It is divided into four main sections:

- Platform Home:** A map view showing various survey points (GR01 to GR24) marked on a street grid. A red dashed box highlights a specific area. On the left, a sidebar lists layers like 'Limite dos bairros', 'Limite Municipal', and 'Sondagens GR (Guararapes)', which is checked.
- Sondagem GR23 Detail:** A detailed view of a specific survey point. It shows the name 'Sondagem GR23' and a Google Drive link: <https://drive.google.com/drive/folders/13M0uhmsWSvIumGixL9gsK83wR2h9f-LF7usp=sharing>. A hand cursor is shown clicking on the point on the map.
- File Explorer:** A view of a Google Drive folder named 'SR7 > SR7-GR-Guararapes'. It lists several PDF files, with 'BOLETIM GR23_SM_MAI_2010.pdf' highlighted in blue.
- Geological Profile:** A detailed report for 'PERFIL DE SONDAGEM GR23'. It includes technical specifications for the sampler and process, and a data table for the geological profile.

AMOSTRADOR PADRÃO - SPT		PROCESSO EXECUTIVO	
Ø EXTERNO: 50,8 mm	MARTELO: 65 Kg	A TRADO ATÉ: 0,00 m	LAVAGEM: 0,00 m - 14,32 m
Ø INTERNO: 34,9 mm	QUEDA: 75 cm	REVESTIDO DE: 0,00 m - 14,00 m	

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO		PERFIL GEOLÓGICO	
GRÁFICO	Napt	PROF. (m)	HACHURA
[Gráfico de Resistência]	3	0,25	Área fina e média, silteosa, amarela.
	245	1,00	Área fina e média, silteosa, fofa, marrom clara.
	3	2,00	Área fina e média, pouco silteosa, fofa, marrom clara.
	8	4,42	Área fina e média, silteosa, fofa a medianamente compacta, vermelha.
	10	5,00	Área fina e média, muito silteosa, medianamente compacta, vermelha e amarela, carregada.

Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

5 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

5.1 Considerações finais

Conforme exposto anteriormente, na construção civil muitos projetos são desenvolvidos sem o uso de investigações geotécnicas. Além disso, a idealização de modelos representativos dos solos requer a utilização de banco de dados locais, assim sendo possível aproximar-se das reais condições geotécnicas. Dessa forma, a justificativa para a realização deste trabalho envolveu a busca por um conjunto de informações georreferenciadas que auxiliassem e orientassem as soluções geotécnicas em Fortaleza, Ceará. Nesse sentido, os principais temas abordados incluem as investigações geotécnicas por sondagem, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e a caracterização geral do meio físico da área de estudo.

O objetivo geral desse trabalho foi estabelecido em estruturar, de modo preliminar, um banco de dados georreferenciado de sondagens SPT e SM realizadas no município de Fortaleza. Também foi objetivado que esse banco de dados fosse capaz de ser compartilhado facilmente. De acordo com os resultados obtidos e detalhados anteriormente, a presente pesquisa atendeu a esse objetivo geral, por meio do emprego de ferramentas digitais e computacionais: AutoCAD, Excel, Google Earth, Google My Maps e Google Drive; além da implementação de um ambiente de SIG, para espacializar os dados.

Além disso, definiu-se três objetivos específicos nessa pesquisa, o primeiro foi levantar uma quantidade expressiva de relatórios de sondagem, que se considera atendido, tendo em vista que foi coletado 751 boletins de sondagem, nos quais 658 são de SPT, 91 são de SM e 2 de SR. Essas quantidades estavam além das expectativas do presente autor, pois a maior coleta exposta na literatura foi a de Carvalho (2016) com 317 relatórios. De modo geral, esse resultado só pôde ser alcançado pela grande contribuição da empresa Tecnord, juntamente com o pesquisador Helano W. Pimentel.

Em sequência, o segundo objetivo específico foi de disponibilizar mapas temáticos da área de estudo, nesse aspecto o presente autor produziu mais de 15 mapas abordando diversas características de Fortaleza, por meio do uso do programa QGIS e das bases cartográficas reunidas na etapa de levantamento.

Por fim, o terceiro objetivo específico, que envolveu a proposição de uma plataforma colaborativa *online*, sistematizando a troca de informações geotécnicas georreferenciadas entre pesquisadores, a criação desse ambiente foi possível com o uso das

ferramentas disponibilizadas gratuitamente pelo *Google My Maps* e *Google Drive*. Enfatiza-se que essa iniciativa tem caráter preliminar e passível de ser aperfeiçoada futuramente.

Diante do exposto, a sequência metodológica proposta pelo presente trabalho atendeu todos os objetivos estabelecidos, com os programas apresentados tendo operação simples e curva de aprendizado rápida. Entretanto, é válido ressaltar, que houveram algumas limitações, principalmente relacionada com o volume de dados coletados. As etapas de seleção das sondagens, georreferenciamento dos furos, organização das pastas e preenchimento do banco de dados, exigiram a aplicação de bastante tempo e atenção, contendo uma série de procedimentos repetitivos. Além disso, também mostrou-se ser uma atividade demorada a transcrição das informações dos boletins do bairro Guararapes para o modelo uniformizado.

Em síntese, é possível observar a importância do conhecimento do meio físico e do solo local, tendo em vista que há uma grande variabilidade das características desses materiais. Nessa perspectiva, os bancos de dados de sondagens georreferenciados são de grande auxílio na Engenharia Civil, com eles tendo relevância tanto acadêmica para embasar pesquisas, quanto prática na sociedade em futuros projetos na capital cearense. Enfim, espera-se que o presente trabalho possa contribuir para a elaboração futura de um novo mapeamento geotécnico de Fortaleza, com a finalidade de nortear o planejamento de obras e orientar os programas de investigação geotécnica.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A presente seção tem a finalidade de propor sugestões e recomendações para pesquisas futuros, dando continuidade na linha temática desse trabalho. Sugere-se o aprofundamento no que se refere às seguintes questões:

- a) Aplicação de métodos geoestatísticos nas porções com maior densidade de pontos, visando a geração de produtos cartográficos que possam fornecer informações geotécnicas mais exatas com menos incertezas associadas;
- b) Modelagem da superfície impenetrável rochosa do subsolo de diversos bairros fortalezenses, buscando estimar a variabilidade de profundidades e de resistências dessa camada;
- c) Modelagem do nível freático com abordagem de diferentes cenários em função do volume de precipitações associadas aos meses, em consequência, gerando modelos hidrogeológicos de Fortaleza;

- d) Aplicação de álgebra de mapas com o cruzamento de diferentes características do meio físico de Fortaleza, visando propor novos zoneamentos geotécnicos mais atualizados;
- e) Aperfeiçoamento da plataforma colaborativa proposta nesse trabalho, incluindo mais pontos com seus boletins no formato uniformizado em diferentes bairros de Fortaleza.

Por fim, destaca-se que a contínua atualização e a incorporação de novas informações no banco de dados de sondagens SPT e SM são recomendadas, tendo em vista, que a efetividade das análises geradas é diretamente proporcional ao volume de informações.

REFERÊNCIAS

- ABGE. **Manual de Sondagens**. 5. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2013.
- ABNT. **Programa de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios**. NBR 8036. Rio de Janeiro, 1983.
- ABNT. **Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. NBR 6484. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT. **Solos e rochas – Simbologia**. NBR 13441. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT. **Solos e rochas – Terminologia**. NBR 6502. Rio de Janeiro, 2022.
- AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsáveis do estado de Pernambuco (SIGSEC-PE)**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- BARROSO, S. H. A. **Estudos dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- BERBERIAN, D. **Engenharia de Fundações**. 1. ed. Brasília: Editora UnB – Infrasoilo Technical, 2015.
- BRANDÃO, R. L. **Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto SINFOR: Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: CPRM, 1995.
- BRANDÃO, R. L. **Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto SINFOR: Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: CPRM, 1998.
- CARVALHO, I. B. C. **Banco de dados georreferenciado e caracterização geotécnica preliminar: o caso de Fortaleza - CE**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- COLARES, J. Q. S. **Mapeamento Geotécnico preliminar da Região Metropolitana de Fortaleza (CE) – Escala 1:100.000**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1996.

DIAS, S. P. **Interconexão UFPB – ligação viária entre as ruas Padre Zé, Ver. João Freire e a Avenida Pedro II**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

DINIZ, A. F. **Elaboração de um banco de dados com parâmetros geotécnicos vinculados a sistemas de informações geográficas - SIG**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia de Alegrete, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos: Súmula da 10: Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979.

FONTELES, H. R. N. **Caracterização Geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza - CE com base em Geoestatística**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GOMES, M. C. R. **Análise situacional qualitativa sobre as águas subterrâneas de Fortaleza, Ceará – Brasil como subsídio à gestão dos recursos hídricos**. 2013. Tese (Doutorado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

IBGE. **Introdução ao ambiente SIG QGIS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/introducao_sig_qgis/Introducao_ao_ambiente_SIG_QGIS_2edicao.pdf. Acesso em: 27 out. 2023.

IBGE. **Censo demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/apps/pgi/#/home/>. Acesso em: 23 out. 2023.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília: INMET, 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 23 out. 2023.

IPECE. **Perfil municipal 2017**: Fortaleza. Fortaleza: IPECE, 2017. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Fortaleza_2017.pdf. Acesso em: 23 out. 2023.

IPLANFOR. **Plataforma Fortaleza em mapas**. Fortaleza: IPLANFOR, 2020. Disponível em: <https://mapas.fortaleza.ce.gov.br>. Acesso em: 23 out. 2023.

ISOPPO, A.; COLZANI, R. **Estruturação e utilização de um banco de dados geotécnico da ilha de Santa Catarina em SIG**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

KNEIP, A. **Sistemas de Informação Geográfica: uma introdução prática**. 1. ed. Palmas: Editora da Universidade Federal do Tocantins, 2014.

MENDES, G. C. M. **Analysis of Geotechnical Parameters Variation on a Numerical Modelling of Aerogenerators Foundations on Sandy Soils**. 2023. Dissertação (Mestrado

em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

MICHELS, D. D. G. **Mapeamento Geotécnico para elaboração de Cartas de Aptidão para área urbana de Braço do Norte/SC**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

MILITISKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das fundações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

MOURA, A. S. **Caracterização Geotécnica para projetos de fundações de edifícios em Fortaleza-CE**. 1997. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

PIMENTEL, H. W. **Banco de Dados Georreferenciado e Carta Geotécnica Preliminar de Fundações da Região Centro-Norte de Fortaleza - CE com base em Geostatística**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

PIMENTEL, H. W.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. A. Proposta de uma Carta Geotécnica Preliminar de Fundações para a Região Centro-Norte de Fortaleza - CE: **Revista de geociências do nordeste**, Caicó, v. 6, n. 2, p. 83-90, (jul-dez). 2020.

PINHEIRO, S. T. **Cartografia geotécnica para a cidade de Palmas - TO**: descrição táctil visual do solo da região sudeste, entre as avenidas LO-03 e LO-27. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Campus Universitário de Palmas, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2018.

QGIS. **Descubra o QGIS**. QGIS, 2023. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/about/index.html. Acesso em: 25 set. 2023.

RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, C. A. U.; BARROSO, S. H. A. Metodologia para criação de um banco de dados georreferenciado a partir de dados geotécnicos obtidos em “as built” e projetos rodoviários: **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 12, n. 2, p. 1-13, (jun-dez). 2016.

SGB. **GEOSGB**: Dados, informações e produtos do Serviço Geológico do Brasil. Brasília: CPRM, 2017. Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/geosgb/>. Acesso em: 23 out. 2023.

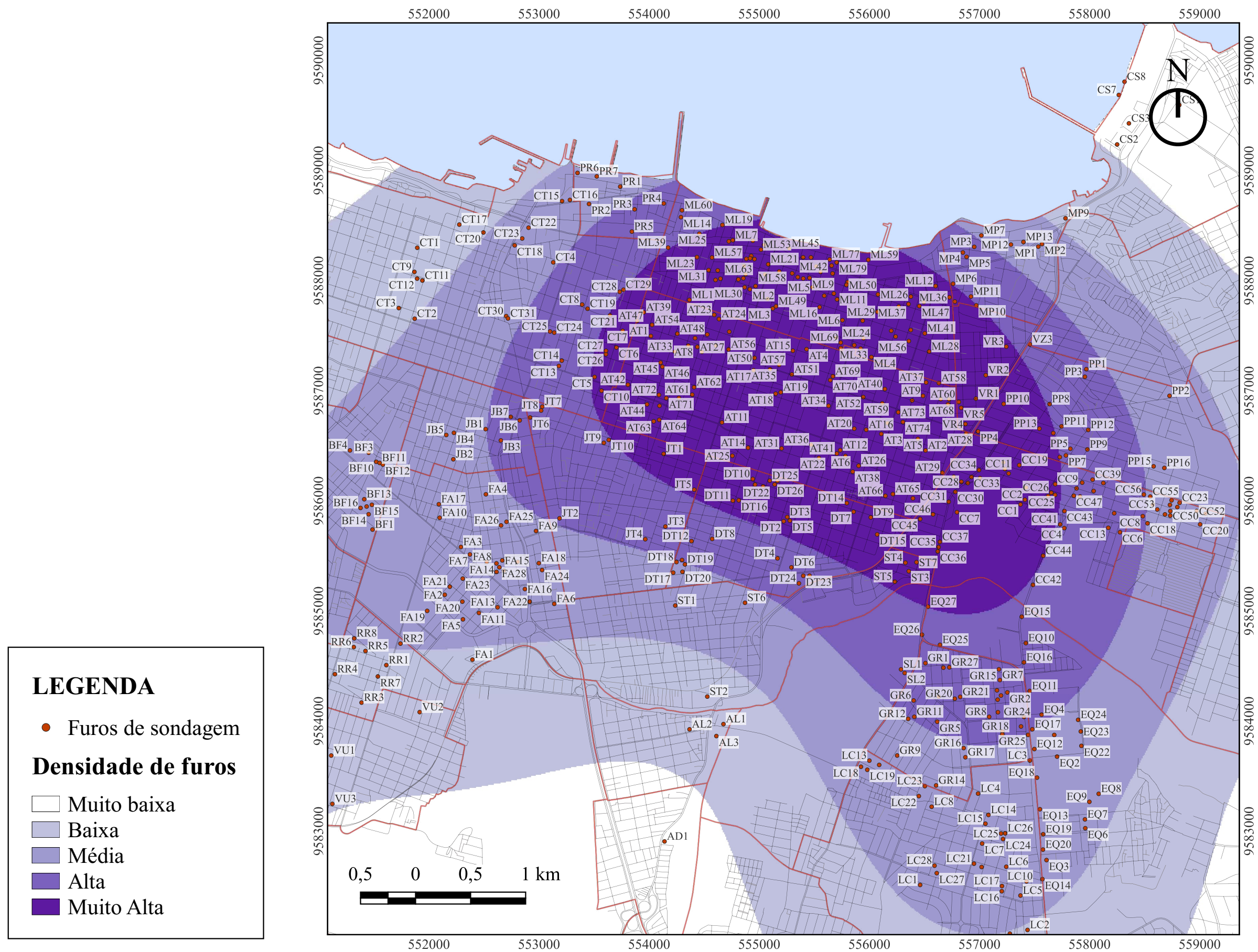
SGB. **Projeto mapa geológico e de recursos minerais do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2021.

SOBRÉ, J. L. **Análise das correlações entre o ensaio SPT e os parâmetros resistentes do solo por meio de um caso de estudo**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2018.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto: investigação de subsolo: fundações superficiais**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 1 v.

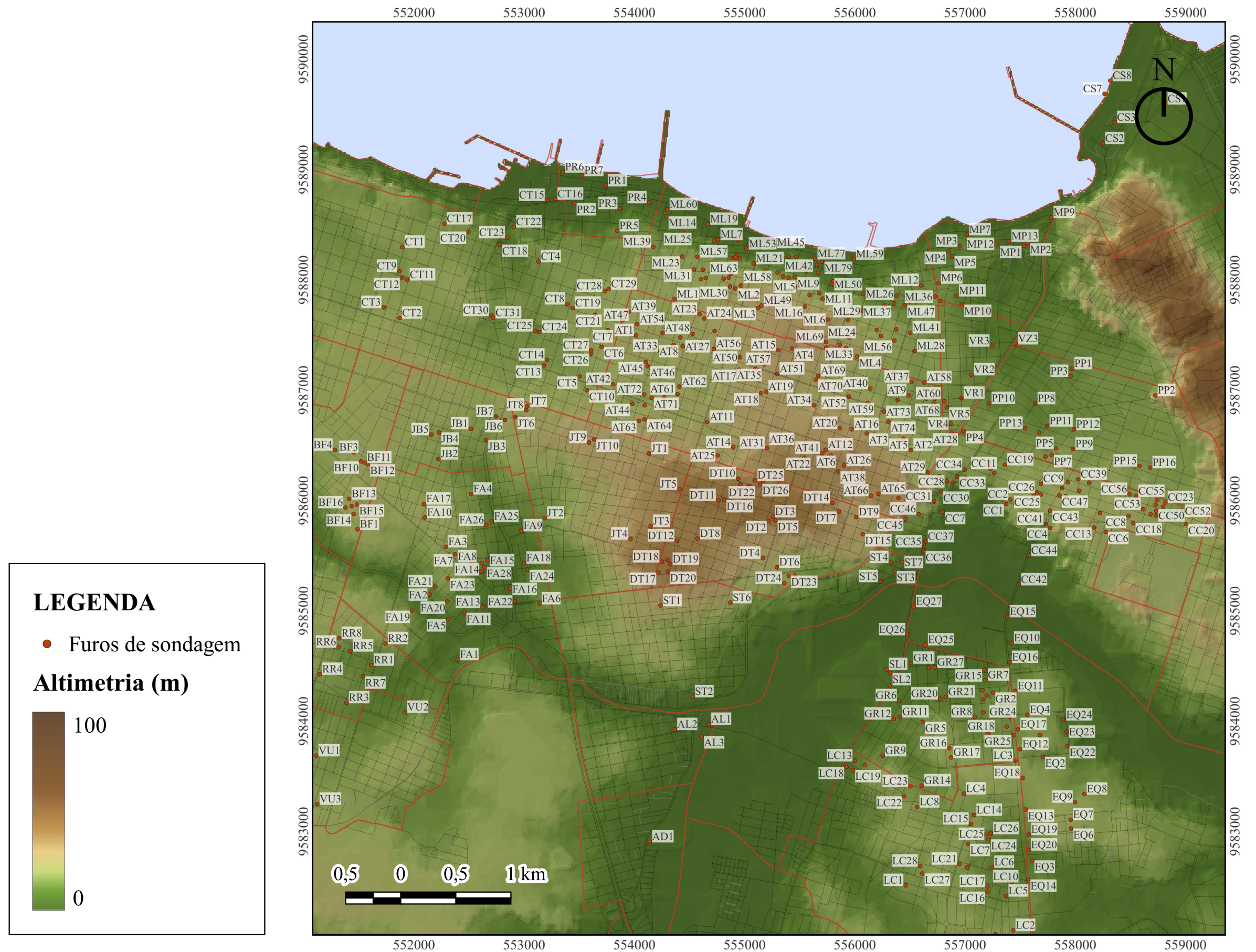
APÊNDICE A – AMPLIAÇÃO DE MAPAS COM FUROS DE SONDA GEM

Figura 50 – Ampliação em folha A3 da Figura 42.



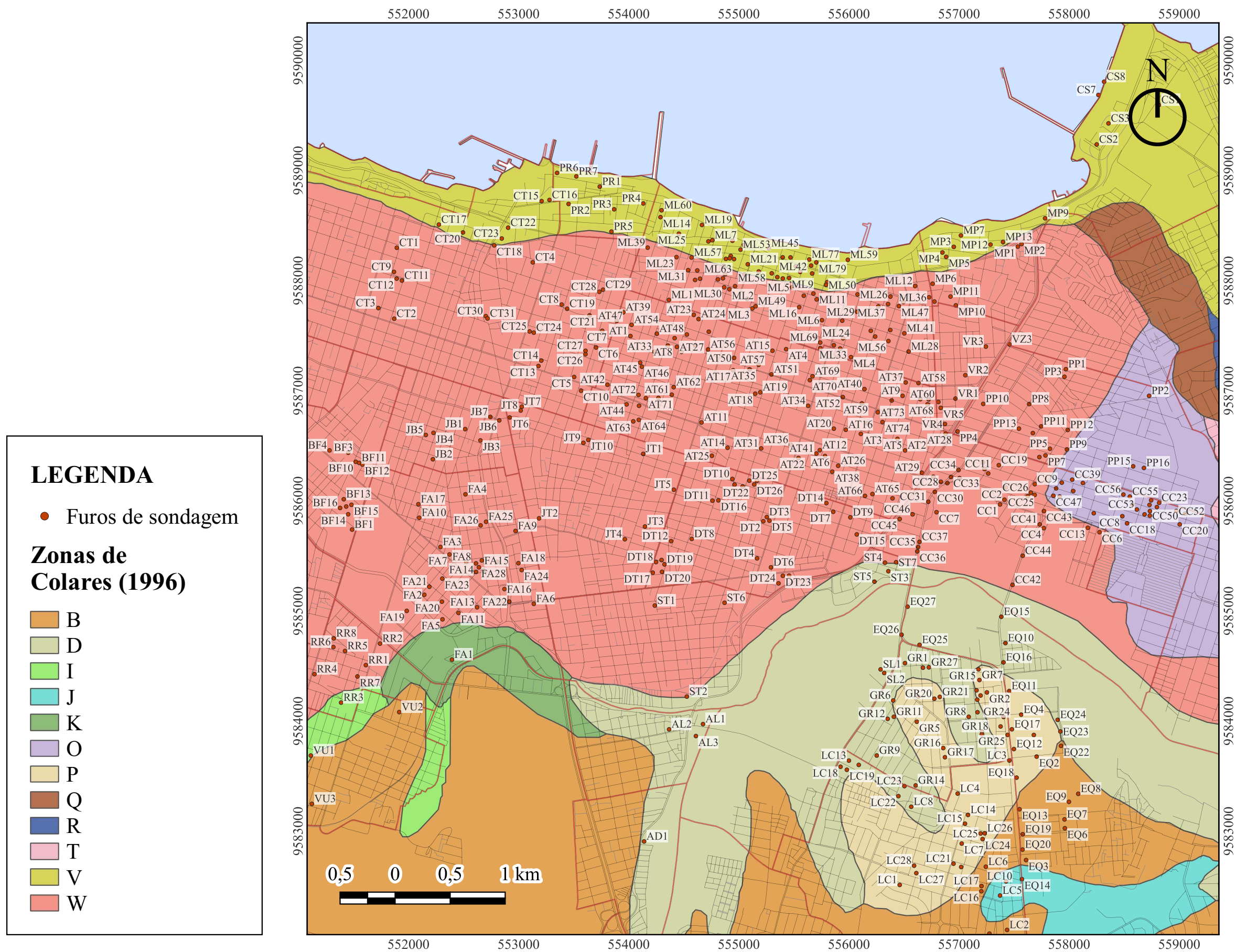
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 51 – Ampliação em folha A3 da Figura 43.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 52 – Ampliação em folha A3 da Figura 44.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).