



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

WISLAYNE SOUZA ALVES

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DO SPT DO BAIRRO DA PONTA VERDE -
MACEIÓ/AL**

Maceió/AL

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

WISLAYNE SOUZA ALVES

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DO SPT DO BAIRRO DA PONTA VERDE -
MACEIÓ/AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para o colegiado de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliane Andréia Figueiredo Marques

Coorientador: Prof. Dr. Manoel Mariano Neto da Silva

Maceió/AL

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Valter dos Santos Andrade – CRB-4 – 1251

A474M Alves, Wislayne Souza.

Mapeamento geoestatístico do SPT do bairro da Ponta verde –
Maceió/AL / Wislayne Souza Alves. – 2024.
57 f. : il.

Orientadora: Juliane Andréia Figueiredo Marques.
Coorientador: Manoel Mariano Neto da Silva.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 49-53.
Apêndices: f. 54-57.

1. Geotecnia. 2. Mapeamento geoestatístico - Ponta verde (Maceió,
AL). 3. Standart Penetration Test. I. Título.

CDU: 624.15

WISLAYNE SOUZA ALVES

**MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DO SPT DO BAIRRO DA PONTA VERDE -
MACEIÓ/AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel pelo Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Alagoas.

Aprovado em: 20/ 03/ 2024

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
JULIANE ANDREIA MARQUES HOSS
Data: 06/05/2024 14:03:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Juliane Andréia Figueiredo Marques - CTEC/UFAL



Documento assinado digitalmente
MANOEL MARIANO NETO DA SILVA
Data: 06/05/2024 16:32:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Mariano Neto da Silva - CTEC/UFAL



Documento assinado digitalmente
LUCIANA CORREIA LAURINDO MARTINS VIEIRA
Data: 06/05/2024 17:15:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Msc.^a Luciana Correia Laurindo Martins Vieira - CTEC/UFAL



Documento assinado digitalmente
MONAIRA CRISTIANE ALCIDES DA COSTA
Data: 06/05/2024 17:41:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc.^a Monaira Cristiane Alcides da Costa – Campus Palmeira dos Índios/IFAL

Maceió

2024

À minha mãe, Cristiane, a mulher mais forte que conheço; à minha irmã Willyane, sempre presente em meu coração, apesar da distância; e ao meu irmão Wallace, cuja paciência e apoio foram essenciais para minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais sincera gratidão à minha mãe, Cristiane. Mesmo diante de todas as adversidades, ela fez tudo ao seu alcance para que eu pudesse me dedicar inteiramente à minha formação acadêmica. Foi o calor de seu abraço e a certeza de seu amor que me deram coragem para enfrentar os desafios e acreditar em mim mesma.

Agradeço ao meu pai por instigar minha curiosidade na infância e à família pelo apoio na jornada acadêmica. Especialmente, reconheço o apoio fundamental do meu tio Nerinaldo, que me ajudou a comparecer às aulas mesmo em momentos de dificuldade financeira. Além disso, meu tio Inaldo sempre foi e continua sendo um exemplo para mim. Agradeço também à minha avó, que sempre demonstrou o poder e a força das mulheres em nossa família.

Ao meu padrasto, Carlos, por seu apoio valioso e incentivo ao me presentear com meu primeiro capacete, trena e botas, durante um dos momentos mais desafiadores da minha vida; e por ter demonstrado respeito, amor e generosidade para com a nossa família.

À minha irmã, Willyane, que se tornou uma figura materna para mim desde cedo, mesmo quando ainda era muito jovem e precisava de cuidados também. Sua dedicação e amor foram essenciais para o meu crescimento, e sua força e determinação me inspiram todos os dias. Ela é verdadeiramente a melhor irmã que eu poderia ter.

Ao meu irmão Wallace, agradeço por me ouvir pacientemente, por me inspirar a ser alguém melhor e por ser meu parceiro de jornada acadêmica. Sua presença e apoio foram fundamentais para mim, e não poderia ter pedido por um irmão melhor.

Agradeço profundamente ao meu namorado, Bruno, por seu apoio constante desde os momentos mais difíceis da graduação até a conclusão deste TCC. Seu incentivo e compreensão foram fundamentais para minha determinação e firmeza nos objetivos acadêmicos, tornando esta jornada acadêmica muito mais significativa e suportável. Muito obrigada por estar ao meu lado.

Aos meus amigos Samuel e Emilly, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, sempre dispostos a ouvir e oferecer seu apoio incondicional. Agradeço também a Jady, Bruna e Mirelly, que me acolheram como ninguém nos momentos difíceis, proporcionando conforto e amizade verdadeira. À Letícia, Thallycia, Maurício e todos os nossos encontros e ligações para escrever relatórios, estudar e escrever, expresso minha profunda gratidão.

Aos amigos de graduação Débora, Wellington, Juan, Márcio e Luan, expresso minha sincera gratidão por serem parceiros incríveis ao longo desta jornada. Durante a pandemia,

vocês estiveram ao meu lado, mesmo que remotamente, oferecendo apoio constante e nunca me deixando enfrentar os desafios sozinha. Obrigada pela parceria nos trabalhos, por cada momento de diversão e risada compartilhado.

À Escola Estadual Professora Irene Garrido, onde encontrei o apoio e a orientação valiosos da professora Ingrid, que me motivou a seguir meus sonhos; do professor Elenito que, por meio da robótica educacional e das maravilhosas aulas de matemática, me mostrou que eu poderia alcançar qualquer objetivo. Agradeço imensamente a todos os meus professores do ensino fundamental e médio, incluindo Stanislam, Jamerson, Amélia, Aline, Rita e outros, cujo apoio e orientação foram fundamentais para minha jornada e influenciaram minha escolha de seguir a carreira de professora.

Ao Centro Acadêmico de Engenharia Civil, expresso minha gratidão por todos os ensinamentos e experiências proporcionados ao longo desta jornada acadêmica, e pela oportunidade de contribuir de alguma forma para o curso que tanto me ajudou a crescer e evoluir. Da mesma forma, gostaria de estender meus agradecimentos ao Centro de Tecnologia, que me acolheu e impulsionou meu crescimento ao longo desses cinco anos de graduação, bem como aos professores da unidade, por proporcionar uma formação de qualidade.

Expresso minha sincera gratidão ao Programa de Apoio aos Estudantes das escolas públicas do estado, representado pelo Prof. Roberaldo e pela Professora Geiza, pela oportunidade de acesso à Universidade Pública. Agradeço por ter sido beneficiada pelo programa como aluna, instrutora e professora voluntária, e pela dedicação e apoio que foram fundamentais para minha trajetória acadêmica.

Ao PET Engenharia Civil, expresso minha profunda gratidão por todo acolhimento, aprendizado e contribuição acadêmica ao longo da minha trajetória. Agradeço imensamente aos petianos egressos Ariana, Bruno, Freitas, Yanna, José Matheus, Christian, Mariana, Fernanda, Alícia, Luis, Rayanne, Diana, Mateus, Chayanne, João, Davi, Pedro e Marcelo, bem como aos atuais Evelylyn, Márcio, Yelli, Samira, Juan, Emanuely, Marília, Jean, Ariana, De Lucca, Emily, Letícia, Nielton, Neto e Thiago, por toda contribuição e carinho dedicados ao grupo. Em especial, gostaria de agradecer à professora Karoline por seu ensinamento, apoio e acolhimento, e à professora Adriana pelos ensinamentos compartilhados.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à empresa AGM Geotécnica pela gentil contribuição à minha pesquisa e, em especial, às engenheiras professora Juliane, Monaira e Sanmara, e aos engenheiros Pedro, Douglas e Lucas, assim como a Josenildo, Luan e ao professor Abel. A experiência de estágio que me proporcionaram foi extremamente valiosa e

enriquecedora. Estou profundamente grata por ter tido a oportunidade de fazer parte desta equipe e aprender com profissionais tão comprometidos e experientes.

Agradeço ao professor Daniel, aos técnicos Basílio e Marcão, bem como aos mestrandos Francisco e Hermelindo, pela oportunidade e orientação proporcionadas. Aos discentes Emily, Giulyan, Clara, Marcelo, Lucas e Mateus, expresso minha gratidão pela colaboração nesses quase dois anos de pesquisa.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha orientadora, professora Juliane Marques, por sua confiança e por acreditar no meu potencial ao longo deste processo. Também desejo agradecer ao professor Mariano Silva por suas minuciosas correções e orientações, além do suporte e acolhimento em diversos momentos. Sua experiência, paciência e dedicação à excelência acadêmica foram fundamentais para o sucesso deste trabalho, e sou imensamente grata pela oportunidade de aprender sob a orientação de vocês.

Por fim, expresso minha sincera gratidão à Universidade Federal de Alagoas pelo seu compromisso com o ensino público, gratuito e de qualidade. Reconheço o papel fundamental que a instituição desempenha na promoção da educação de excelência e no acesso igualitário ao ensino superior. Agradeço à UFAL por seu comprometimento com a comunidade e por proporcionar oportunidades de desenvolvimento para todos os seus estudantes.

RESUMO

ALVES. W. S. MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DO SPT DO BAIRRO DA PONTA VERDE - MACEIÓ/AL. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2024.

O reconhecimento do subsolo é fundamental para a garantia da segurança e estabilidade das obras de engenharia, destacando a importância da sondagem à percussão. No entanto, em muitos casos os dados provenientes dessas sondagens não são completamente aproveitados, ressaltando a necessidade de métodos eficazes de análise, como o mapeamento geoestatístico. Este trabalho tem por objetivo a análise espacial dos resultados de sondagens de simples reconhecimento com SPT (*Standard Penetration Test*) no bairro da Ponta Verde, em Maceió (AL), a fim de caracterizar a variabilidade do ensaio, identificar padrões espaciais e fornecer informações sobre as características da região. Os procedimentos metodológicos empregados envolveram o uso de dados georreferenciados de relatórios de sondagens SPT para 0, 5, 10 e 15 metros de profundidade. Para realizar interpolações, foi utilizado o software QGIS, juntamente com o complemento *Smart-Map*, com destaque para o método *Support Vector Machine* (SVM). A distribuição espacial dos pontos de calibração e validação foi determinada para cada tipo de mapeamento, e os resultados foram validados por meio de análises estatísticas, garantindo a confiabilidade das superfícies interpoladas. Os resultados mostraram variações significativas nos valores de SPT nas profundidades analisadas, indicando áreas com maior e menor resistência. O mapeamento do nível do lençol freático evidenciou variações na profundidade, enquanto a análise da incidência de solos destacou uma diversidade de tipos em várias profundidades. Embora os resultados não eliminem a necessidade de sondagens, os mapas fornecem informações úteis para tomada de decisões em engenharia e planejamento urbano, facilitando a identificação de tendências relacionadas às características do solo e do lençol freático na região estudada.

Palavras Chave: Geotecnia; Mapeamento Geoestatístico; *Standart Penetration Test*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ábaco para o cálculo da profundidade de sondagem.	14
Figura 2 - Equipamento manual para standard penetration test (SPT).....	16
Figura 3 - Mapa probabilístico da camada superficial - Probabilidade do SPT estar situado no intervalo de 10.0 a 30.0.	20
Figura 4 - Mapa de incidência de rochas sedimentares na região costeira de Maceió, a 5 metros de profundidade.	21
Figura 5 - Mapa de localização do bairro da Ponta Verde - Maceió/AL.	23
Figura 6 - Geomorfologia do bairro da Ponta Verde - Maceió/AL.	24
Figura 7 - Mapa de habitats dos platôs recifais dos bairros de Ponta Verde e Jatiúca.	25
Figura 8 - Mapa de incidência de rochas sedimentares na planície costeira de Maceió-AL nas profundidades 10m e 15m.	26
Figura 9 - Fluxograma de etapas de realização do trabalho.	27
Figura 10 - Distribuição espacial dos pontos de calibração e validação do SPT: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.	30
Figura 11 - Distribuição espacial dos pontos de calibração e validação do mapa de nível d'água.	31
Figura 12 - Distribuição espacial dos pontos de calibração e validação dos tipos de solo: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.	32
Figura 13 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 0 metros.	33
Figura 14 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 5 metros.	34
Figura 15 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 10 metros.	35
Figura 16 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 15 metros.	36
Figura 17 - Gráfico de dispersão dos pontos de validação em torno da média do SPT: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.	37
Figura 18 - Boxplot do SPT na profundidade de 0 metros.	37
Figura 19 - Mapa interpolado do nível d'água.	38
Figura 20 - Mapas de Níveis do lençol freático.	39
Figura 21 - Gráfico de dispersão dos pontos de validação em torno da média do nível d'água.	40
Figura 22 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 0 metros.	41
Figura 23 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 5 metros.	42
Figura 24 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 10 metros.	43
Figura 25 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 15 metros.	44
Figura 26 - Gráfico de dispersão dos pontos de validação em torno da média dos tipos de solo: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.	45
Figura 27 - Boxplot do SPT na profundidade de 0 metros.	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Númeo de sondagens em função da área de projeção em planta do edifício segundo a NBR 8036/1983.....	12
Quadro 2 - correlações entre SPT, Peso específico, Coesão e Ângulo de atrito.....	16
Quadro 3 - Comparação dos resultados das ferramentas de geoestatística analisadas.....	20
Quadro 4 - Tipos de solos e numeração atribuída.....	26
Quadro 5 - Quantidade de pontos a cada profundidade.	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Considerações Iniciais	9
1.2 Objetivos.....	10
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 Justificativa.....	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Investigação do subsolo.....	12
2.2 Tipos de solo.....	15
2.3 Standard Penetration Test - SPT.....	15
2.4 Geoestatística e Mapeamento Geoestatístico	18
2.5 O Software QGis	21
3 MÉTODO	23
3.1 Área de estudo	23
3.2 Procedimentos metodológicos	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 SPT	33
4.2 Nível d'água	38
4.3 Caracterização dos tipos de solo.....	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
REFERÊNCIAS.....	48
APÊNDICE A - CÓDIGO PYTHON PARA TRATAMENTO DE DADOS DE SPT E NÍVEL D'ÁGUA.....	52
APÊNDICE B - CÓDIGO PYTHON PARA TRATAMENTO DE DADOS DE TIPOS DE SOLO.....	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A geotecnia, área da engenharia que estuda o solo, as rochas e suas características, desempenha um papel fundamental na concepção, construção e manutenção de estruturas que moldam o ambiente urbano, tornando a compreensão das características do solo essencial para a garantia da segurança e da integridade das edificações, visto que toda a carga da superestrutura da obra é transmitida ao solo através das fundações, que devem manter o empreendimento estável (MIRANDA *et al.*, 2018).

O reconhecimento do subsolo é essencial para tomada de decisão das soluções de engenharia, sendo uma etapa indispensável para a alternativas seguras e viáveis economicamente, visto que a investigação geotécnica indica fatores como o nível do lençol freático e os tipos de solo presentes no terreno (CASTRO; PARRILHA, 2022), fazendo-se necessária uma campanha de sondagem conforme a NBR 6484/2020 (ABNT, 2020).

Diante disto, a sondagem à percussão (*Standard Penetration Test* - SPT) é o ensaio de investigação geotécnica mais executado quando comparado com outros métodos (Miranda *et al.*, 2018). O SPT fornece parâmetros como a compacidade ou consistência, o tipo, a ocorrência ou não de água, e o número de golpes SPT (Nspt), valor que indica a resistência de um solo. No Brasil, o ensaio é regido pela norma NBR 6484/2020 (ABNT, 2020).

Porém, os relatórios resultantes das sondagens geotécnicas são utilizados para as realizações dos projetos e arquivados posteriormente, sendo desfrutados novamente apenas caso haja necessidade. Desta forma, há o armazenamento de dados referentes às características de solo da região que poderiam ser aproveitados de forma mais efetiva, como no caso da aplicação do Mapeamento Geoestatístico, o qual permite a criação de mapas que auxiliem na tomada de decisões em projetos de geotecnia com base na inferência de características, realizada por métodos estatísticos e de análises espaciais.

Nesse contexto, é importante reconhecer as limitações da abordagem estatística clássica ao lidar com dados geotécnicos, oriundos da natureza, que possuem dependência espacial e heterogeneidade, sendo necessário a utilização da geoestatística. Os métodos geoestatísticos permitem o entendimento da distribuição e das variabilidades espaciais dos dados georreferenciados, com determinação das incertezas associadas a eles, sendo aplicada em áreas

como Prospecção Mineira, Cartografia, Climatologia, Engenharia Florestal, Epidemiologia, Geologia, Geotecnia e Hidrogeologia, desde 1980 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Dentre as ferramentas empregadas para a elaboração de análises geoespaciais, destaca-se o Software *Quantum Geographic Information System* (QGIS), por se tratar de um SIG de código aberto que oferece uma ampla gama de recursos para a manipulação de dados. A ferramenta permite incorporar os princípios da geoestatística no processo de mapeamento, fornecendo resultados robustos e visualmente informativos, que facilitam a interpretação dos resultados, como é o caso do plugin *Smart-Map* (PEREIRA *et al.*, 2022). Assim, através do uso do QGIS é possível realizar o mapeamento geoestatístico de uma região.

Um dos desafios existentes para o mapeamento geoestatístico, é que este exige uma grande quantidade de dados com a menor distância de amostragem possível para que gere resultados com um menor erro de estimativa (SOUZA *et al.*, 2014). Diante disso, esse estudo abordará o Bairro da Ponta Verde, em Maceió-Alagoas, o qual foi escolhido justamente devido à quantidade de dados de sondagens disponíveis do bairro em estudo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar espacialmente os resultados da sondagem de simples reconhecimento com SPT (*Standard Penetration Test*) para o bairro da Ponta Verde, em Maceió-AL, a fim de caracterizar a variabilidade do ensaio, identificar padrões espaciais e fornecer informações relevantes sobre as características geotécnicas da região.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a distribuição espacial dos ensaios de sondagem realizados na área de estudo;
- Definir os métodos de interpolação a serem empregados na análise geoestatística do SPT;
- Elaborar superfícies geoestatísticas para distribuição do SPT, nível do lençol freático e composição do solo, em função da profundidade;

- Validar os modelos implementados por meio de comparações estatísticas e análise de consistência.

1.3 Justificativa

O conhecimento das características do solo de uma determinada área é a primeira etapa de um projeto de fundações, visto que as cargas estruturais das construções são direcionadas ao solo, que deve resistir sem romper ou deformar exageradamente (SOUZA E MENDES, 2015). Porém, é logístico e economicamente inviável realizar sondagens de reconhecimento do subsolo por todo o terreno, havendo a necessidade do estabelecimento de uma norma técnica que determina o número mínimo de sondagens, como a NBR 8036 (ABNT, 1983).

Desta forma, as técnicas e ferramentas do geoprocessamento são ótimas aliadas à geotecnia, visto que, com o georreferenciamento dos dados, é possível mapear e estudar o solo de forma facilitada. Thiesen (2016) afirma que o mapeamento geotécnico é útil para escolha do tipo de fundação, dimensionamento, previsão de profundidade de sondagem e escolha de terrenos, sendo uma ferramenta interessante para análise de viabilidade, redução de custo e tempo nos projetos de engenharia, mas que não substituem as sondagens geotécnicas.

Este trabalho se propõe a associar informações obtidas através de investigações geotécnicas à análise geoespacial, de modo a facilitar as tomadas de decisões dos profissionais de engenharia, além de proporcionar maior praticidade na interpretação das propriedades do solo. Para alcançar esse objetivo, será utilizado o software QGIS, uma ferramenta livre com código-fonte aberto e gratuito, que permite a análise e visualização de dados georreferenciados de forma eficiente e acessível.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão abordadas as temáticas Investigação do subsolo, *Standard Penetration Test* - SPT, Tipos de solo, Geoestatística e Mapeamento Geoestatístico, e o software QGis, que servirão como fundamentação teórica para este estudo.

2.1 Investigação do subsolo

A investigação do subsolo trata-se da coleta de informações de características do solo de uma determinada área para fins de projetos de engenharia. Segundo Marques, Marques e Marques (2008), existem vários tipos de sondagens que devem ser escolhidos de acordo com o tipo de obra, dimensões do terreno, formação geológica do local e intensidade das cargas, de forma que os tipos de ensaios de campo mais comuns são poço de inspeção, sondagem a trado, ensaio de cone (CPT) e piezocone (CPTU), ensaio de palheta, sondagem rotativa e a sondagem a percussão com determinação do índice de resistência à penetração (SPT).

A NBR 8036/1983, que trata dos procedimentos para programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios, também fixa as condições exigíveis para a execução de sondagens geotécnicas, coleta de amostras de solo e interpretação dos resultados obtidos, padronizando os métodos de sondagem (ABNT, 1983). A norma indica que o local e o número das sondagens a serem executadas devem depender do tipo de estrutura, das características especiais e condições geotécnicas do subsolo, visando a proporcionar a mais precisa representação das possíveis variações das camadas do subsolo (Quadro 1).

Quadro 1 - Número de sondagens em função da área de projeção em planta do edifício segundo a NBR 8036/1983.

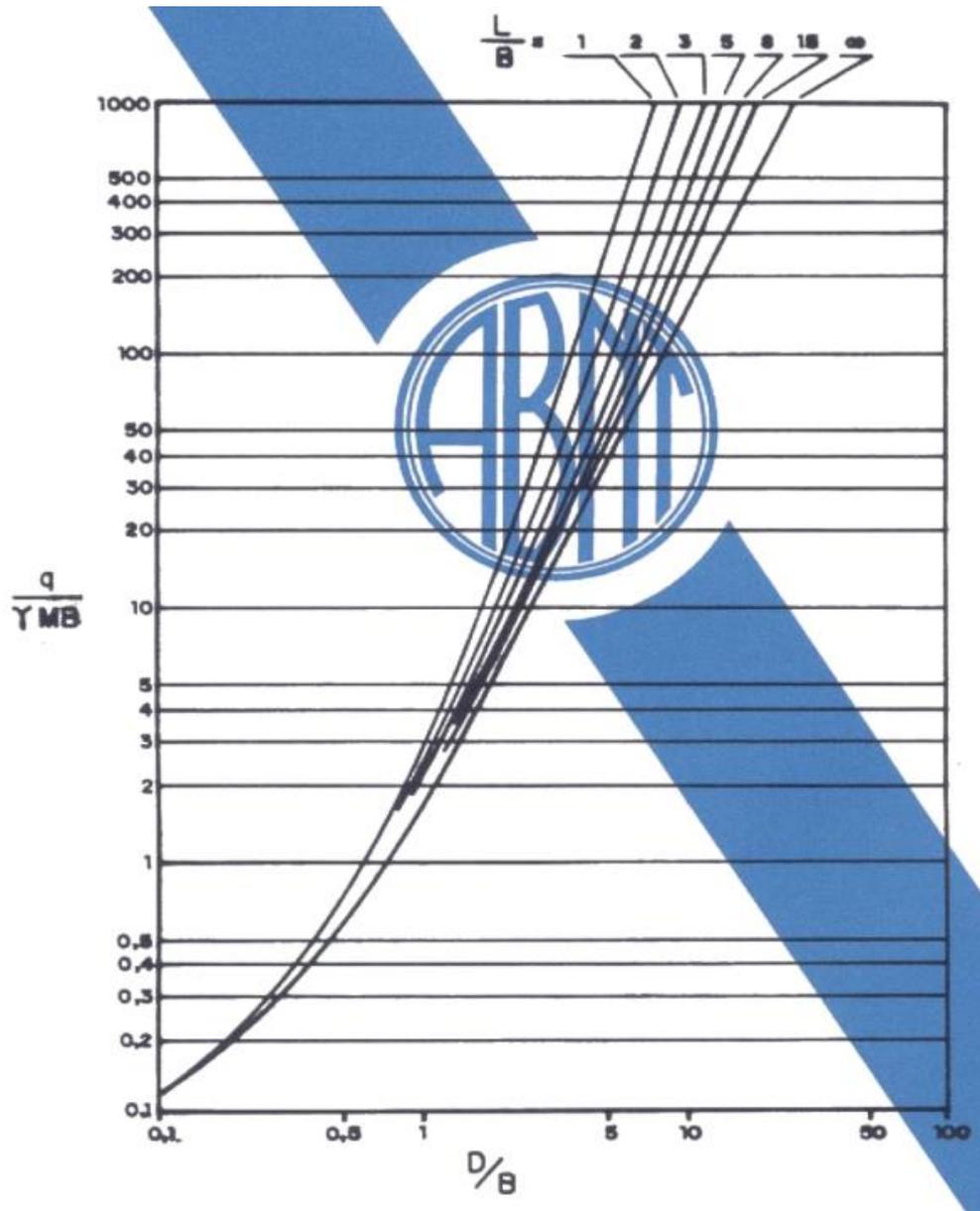
Área de projeção em planta do edifício	Número de sondagens
Até 200 m ²	No mínimo 2
Entre 200 m ² e 400 m ²	No mínimo 3
Até 1200 m ²	1 a cada 200 m ²
Entre 1200 m ² e 2400 m ²	1 a cada 400 m ²

Acima de 2400 m ²	Fixado de acordo com o plano particular de construção.
Caso não haja disposição em planta, o número de sondagens deve ser fixado de forma que a distância máxima entre elas seja de 100 m, com no mínimo 3 sondagens.	

Fonte: ABNT (1983). Elaborado pela autora.

A norma também define que as sondagens devem ser localizadas em planta, de forma que durante o planejamento do empreendimento as sondagens sejam igualmente distribuídas em toda área; na fase de projeto pode-se localizar as sondagens seguindo detalhes estruturais; e caso o número de sondagens seja superior a três, estas não devem ser distribuídas alinhadamente; bem como a profundidade das sondagens deve ser levada à distância vertical a qual o acréscimo de pressão do solo seja menor que 10% da pressão geostática efetiva, conforme ilustra a Figura 1:

Figura 1 - Ábaco para o cálculo da profundidade de sondagem.



Fonte: ABNT (1983).

Onde:

q = pressão média sobre o terreno (peso do edifício dividido pela área em planta);

γ = peso específico médio estimado para solos ao longo da profundidade em questão;

$M = 0,1$ = coeficiente decorrente do critério do acréscimo de pressão ser menor que 10% da pressão geostática efetiva;

B = menor dimensão do retângulo circunscrito à planta da edificação;

L = maior dimensão do retângulo circunscrito à planta da edificação;

D = profundidade de sondagem.

2.2 Tipos de solo

A NBR 6502 (ABNT, 2022) define rocha como um material sólido, consolidado e constituído por um ou mais minerais, com características físicas e mecânicas específicas variando de acordo com o tipo de rocha. Por outro lado, solo é definido como um sistema trifásico composto por sólidos, líquidos e gases, resultante da interação entre clima, material de origem, relevo e organismos ao longo do tempo, ou seja, o processo de intemperismo das rochas.

Para identificar os diferentes tipos de solo, são consideradas várias características, como textura, granulometria, plasticidade, consistência e compacidade. A NBR 6484 (ABNT, 2020) distingue os solos como grossos, como pedregulhos e areias, e finos, incluindo argilas e siltes. Enquanto isso, a NBR 6502 classifica os solos da seguinte forma:

- Argila: partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade;
- Silte: partículas com dimensões compreendidas entre 0,002 mm e 0,06 mm, apresentando baixa ou nenhuma plasticidade;
- Areia: partículas não coesivas e não plásticas formadas por minerais e rochas com diâmetros equivalentes compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm;
- Pedregulho: solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2 mm e 60 mm, podendo ser classificados como fino, médio ou grosso.

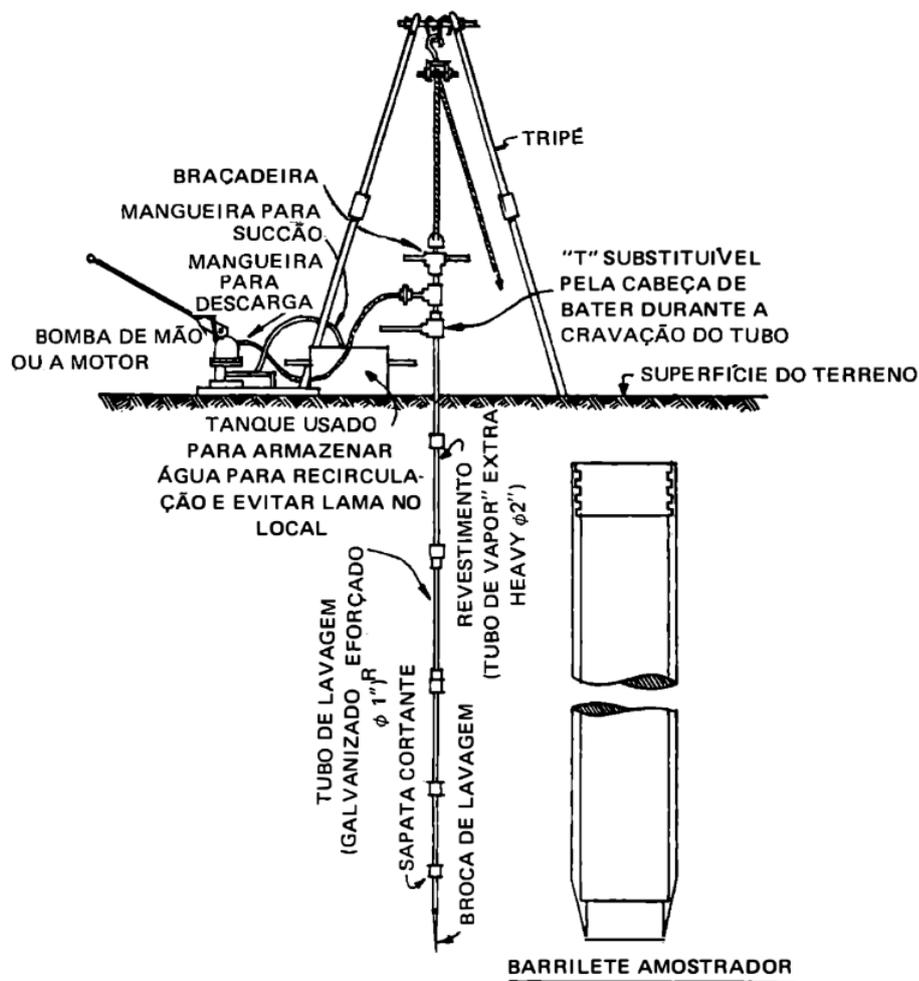
2.3 *Standard Penetration Test - SPT*

Dentre os métodos de prospecção geotécnica citados no tópico anterior, o SPT é o que mais se destaca devido à simplicidade e baixo custo, bem como eficiência na obtenção das propriedades do solo (MARQUES, A. G.; MARQUES, J. A. F.; MARQUES, R. F., 2015), colhendo amostras deformadas do solo e fornecendo informações como a resistência à penetração.

A NBR 6484/2020, que aborda as sondagens de simples reconhecimento com SPT, especifica o método de execução de sondagens de simples reconhecimento de solos com ensaio de SPT e a trado, fornecendo orientações quanto à execução, amostragem e registro de informações (ABNT, 2020).

O SPT é o ensaio realizado para a determinação do índice de resistência à penetração (N_{spt}), que corresponde ao número de golpes aplicados por um peso de 65 kg, a uma altura de queda de 75 cm, necessário para penetrar 30 cm de um amostrador padrão, pode ser realizado de forma manual (Figura 2) ou mecanizada com perfuratrizes.

Figura 2 - Equipamento manual para *standard penetration test* (SPT).



Fonte: CAPUTO (2003).

Em relação aos critérios de paralisação das sondagens, a NBR 6484/2020 estabelece que a definição das diretrizes é de responsabilidade técnica da contratante ou de seu preposto, devendo ser ajustada de acordo com as necessidades específicas do projeto. No entanto, na

ausência de um critério definido, a norma estabelece que as sondagens devem avançar até que seja atingido um dos seguintes critérios:

a) Quando, ao avançar a sondagem, forem obtidos 10 metros consecutivos de resultados indicando um valor de N igual ou superior a 25 golpes;

b) Quando, ao avançar a sondagem, forem obtidos 8 metros consecutivos de resultados indicando um valor de N igual ou superior a 30 golpes;

c) Quando, ao avançar a sondagem, forem obtidos 6 metros consecutivos de resultados indicando um valor de N igual ou superior a 35 golpes;

A cravação do amostrador-padrão também pode ser interrompida antes dos 45 cm de penetração, se forem ultrapassados 30 golpes em qualquer dos três segmentos de 15 cm e se não for observado avanço do amostrador padrão durante a aplicação de cinco golpes sucessivos, situação em que deve-se iniciar o ensaio de avanço da perfuração por circulação de água, tendo duração de 30 minutos e registro dos avanços do trépano a cada 10 minutos.

Com base nos dados obtidos no SPT, é possível gerar relatórios de perfil do solo no ponto ensaiado, indicando nível d'água, tipos de solos amostrados e SPT a cada profundidade. Com os resultados do ensaio, é possível estimar parâmetros geotécnicos do solo para fins de cálculo, como as correlações entre SPT, peso específico, coesão e ângulo de atrito (Quadro 2) (IGEOTEST, 2004).

Quadro 2 - correlações entre SPT, Peso específico, Coesão e Ângulo de atrito.

SOLOS	Nº DE GOLPES N (SPT)	PESO ESPECÍFICO γ (tf/m²)	COESÃO c (tf/m²)
ARGILA E SILTE ARGILOSO			
Muito Mole	≤ 2	-	< 1,25
Mole	3 a 5	1,5	1,25 - 2,5
Média (o)	6 a 10	1,6	2,5 - 5,0

Rija (o)	11 a 19	1,6	5,0 - 10,0
Muito rija (o)	20 a 30	1,7	10,0 - 20,0
Dura (o)	> 30	1,7	> 20,0
AREIA E SILTE ARENOSO			ÂNGULO DE ATRITO (ϕ)
Fofa (o)	≤ 4	< 1,5	< 26°
Pouco Compacta (o)	5 a 8	1,5	28° - 32°
Medianamente Compacta (o)	9 a 18	1,6	32° - 36°
Compacta (o)	19 a 40	1,7	36° - 40°
Muito Compacta (o)	> 40	1,8	> 40°

Fonte: IGEOEST (2004). Adaptado pela autora.

2.4 Geoestatística e Mapeamento Geoestatístico

Segundo Isaak e Srivastava (1989), a problemática da maioria dos métodos estatísticos clássicos é a não consideração da espacialidade em conjuntos de dados, ao contrário da geoestatística que descreve e explica a variabilidade espacial de fenômenos naturais ou físicos. Armstrong (1998) cita que a geoestatística, no contexto da mineração, pode ser utilizada para estimativa de reservas, espaçamento ótimo de amostras e interpolação para mapeamento de contornos, de forma que as estimativas são reproduzíveis, há uma melhoria na sua precisão e é possível realizar um planejamento de exploração de minas de recursos naturais de longo e curto prazo mais eficientemente.

Yamamoto e Landim (2013) afirmam que a estimativa geoestatística permite determinar a distribuição e a variabilidade do fenômeno espacial em estudo, trabalhando com funções locais de forma que a avaliação de um ponto depende dos valores em sua volta. A geoestatística usa de ferramentas como a krigagem e a simulação estocástica. A krigagem é uma técnica de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, baseando-se em valores adjacentes quando verificados interdependentes pela análise variográfica, podendo ser utilizada

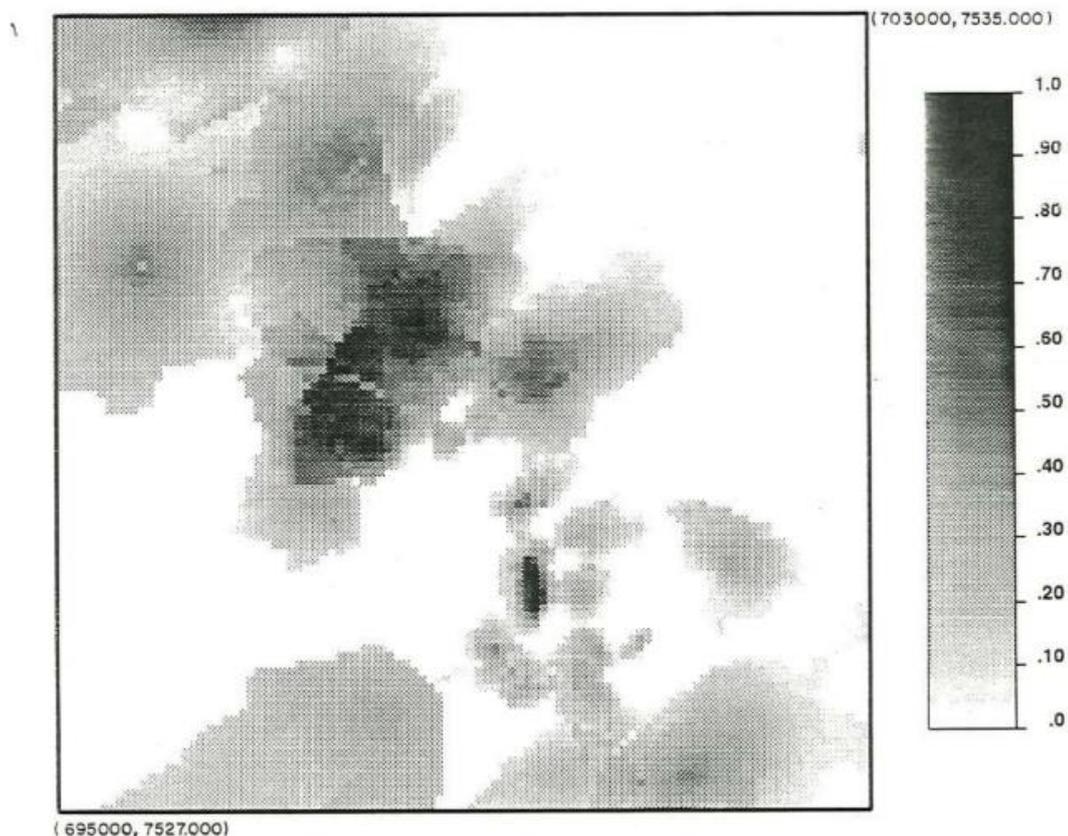
em variáveis contínuas e discretas, e possuindo abordagens como a multigaussiana, lognormal e indicadora. Enquanto a simulação estocástica pode ser utilizada para avaliação da incerteza espacial e geração de diferentes cenários possíveis para o comportamento de uma variável em uma determinada área.

No contexto da geotecnia, Fonteles (2014) concluiu, em sua análise sobre a aplicação da geoestatística ao mapeamento da superfície impenetrável ao SPT no nordeste de Fortaleza (CE), que através de técnicas de estimativa, é possível conhecer as variâncias, obtendo como resultado mapas de probabilidade condicionada que demonstram a possibilidade de encontrar camadas resistentes à penetração do SPT.

Schneiders e Cardoso (2016) realizaram a caracterização geotécnica do subsolo do perímetro urbano do município de Pato Branco (PR) com base em geoestatística, determinando valores de coesão e ângulo de atrito do solo com base em dados de SPT e obtendo como resultados modelos digitais de terreno, evidenciando a necessidade de um número maior de amostras, devido a descontinuidade de modelo. Foi possível ilustrar o potencial do uso de fundações profundas no perímetro urbano da região de estudo e destacar o uso dos modelos como base de estudo a respeito dos solos e das fundações, estimando o comportamento natural do solo.

Sturaro (1994) mapeou geoestatisticamente as propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens SPT no sítio urbano de Bauru (SP), apresentando as variáveis SPT como adequadas para a utilização da geoestatística não-linear, tal qual a krigagem indicativa, permitindo o uso para classificação espacial do meio físico (Figura 3).

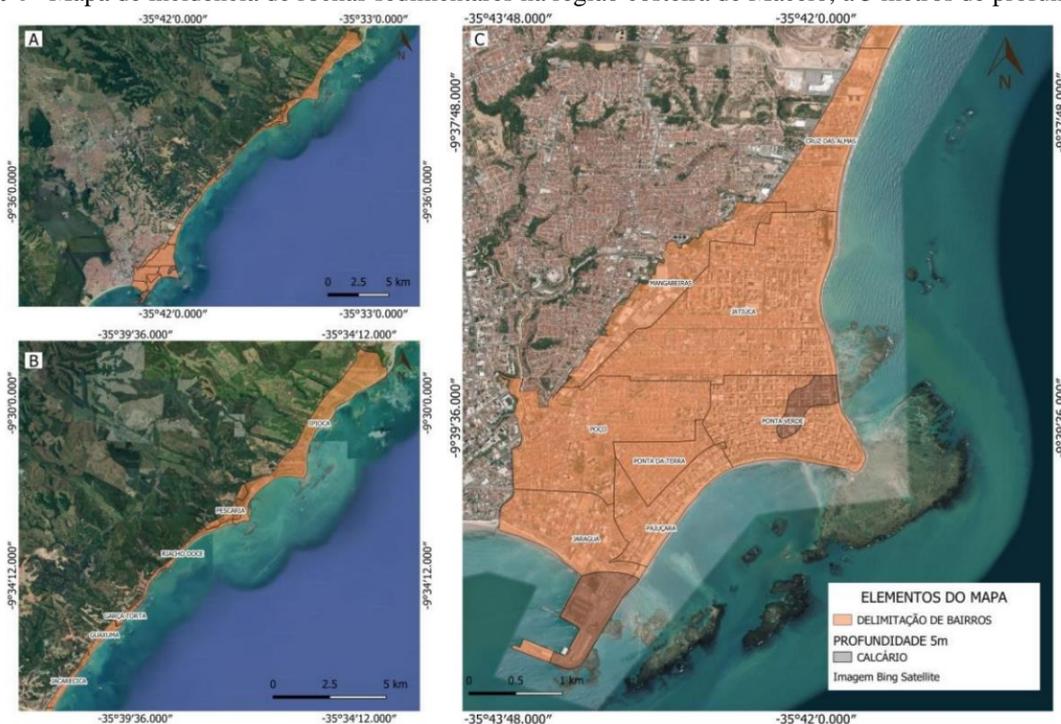
Figura 3 - Mapa probabilístico da camada superficial - Probabilidade do SPT estar situado no intervalo de 10.0 a 30.0.



Fonte: Sturaro (1994).

Costa e Costa (2020) elaboraram o georreferenciamento geológico-geotécnico da região de planície costeira de Maceió (AL) utilizando resultados de sondagem SPT e o *software* QGIS, identificando maiores incidências de areia fina siltosa, areia fina a média siltosa e silte arenoso e a incidência de rochas sedimentares na região (Figura 4).

Figura 4 - Mapa de incidência de rochas sedimentares na região costeira de Maceió, a 5 metros de profundidade.



Fonte: Costa e Costa (2020).

2.5 O Software QGis

Estudos recentes analisam os dados oriundos das análises geotécnicas espacialmente, facilitando a interpretação destes e, conseqüente, auxílio na tomada de decisões. Um exemplo é o estudo de Thiesen (2016), que utilizou uma ferramenta SIG para a realização do mapeamento geotécnico e a geração de cartas de aptidão para fundação a partir de dados de SPT da região de Blumenau/SC. Neste estudo, foi possível identificar diferentes padrões de comportamento para várias unidades de solo em Blumenau/SC com base em análises geotécnicas, como as áreas que apresentavam maior resistência do solo ou onde o lençol freático era mais profundo.

Da mesma forma, porém com uso direto do QGis, Vieira *et al.* (2021) realizaram a modelagem geológico-geotécnica em solos de um bairro da cidade de Belém, no Estado do Pará, mapeando as regiões as quais os solos possuem maior ou menor resistência à penetração, e utilizando a geoestatística para realizar a análise dos resultados.

Santana e Oliveira (2023) fizeram uma comparação entre programas geoestatísticos, incluindo o complemento *Smart-Map*, do QGis, que permite a realização de interpolações por

meio de Krigagem Ordinária e *Machine Learning*, por meio do algoritmo Support Vector Machine (SVM). No trabalho, observou-se que o complemento, além de disponibilizado de forma gratuita e ser executado dentro do *software* QGIS, possui recursos como uma ótima representação gráfica e um processamento de dados satisfatório quando comparado a outros softwares (Quadro 3).

Quadro 3 - Comparação dos resultados das ferramentas de geoestatística analisadas.

RECURSOS	SMART-MAP	SURFER	GEODA	S-GEMS
Acesso aos parâmetros	✓	✗	✗	✗
Análise gráfica	✓	✓	✓	✓
Modelos Matemáticos	✓	✓	✗	✓
Interpolador: krigagem	✓	✓	✗	✓
Representação gráfica	✓	✓	✓	✓
Custo benefício	✓	✗	✓	✓

Fonte: Santana e Oliveira (2023). Adaptado pela autora.

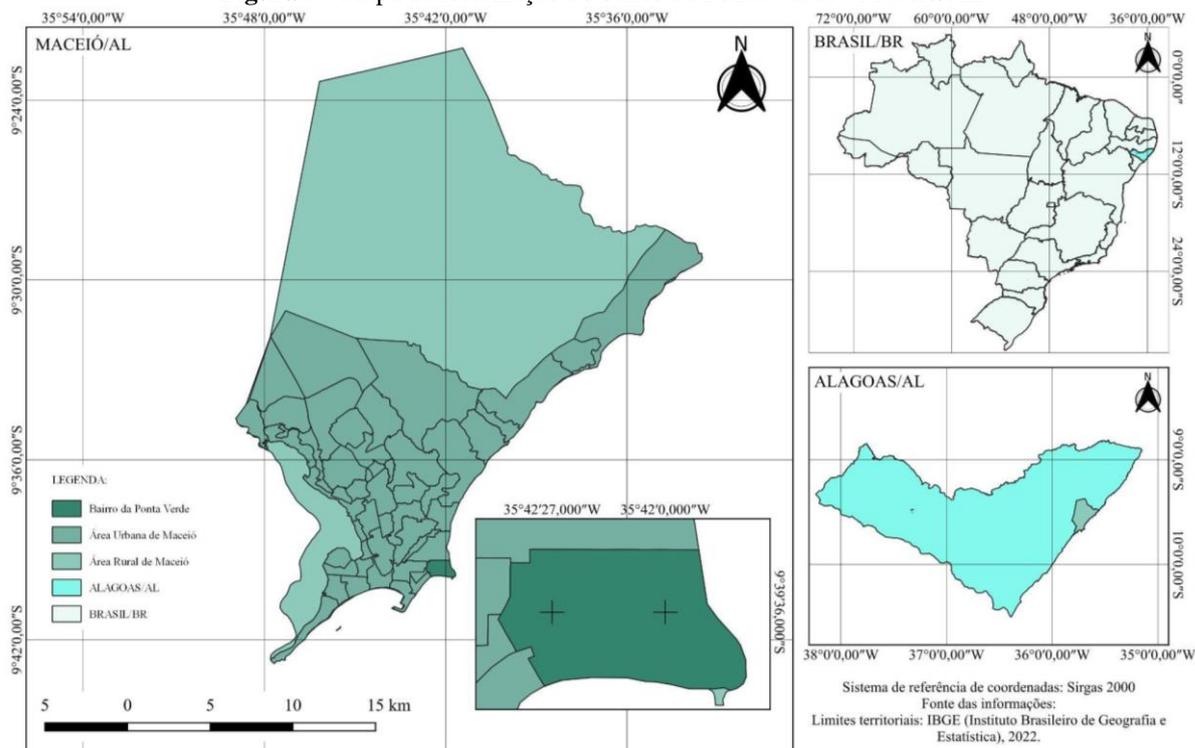
Ainda sobre o plugin Smart-Map, um estudo realizado por Pereira et al (2022) comparou a performance dos métodos de interpolação do Smart-Map, comprovando que o método de *Machine Learning* com utilização de covariáveis foi superior à Krigagem Ordinária. Ademais, o trabalho também analisou a melhor configuração para densidade amostrais, isto é, reduziu-se os dados a amostras menores para modelagem e teste, tendo resultados melhores na grade com 75% dos dados para calibração do modelo e 25% para validação.

3 MÉTODO

3.1 Área de estudo

O bairro da Ponta Verde (Figura 5), situado na cidade de Maceió/AL, possui uma área de 1,375 km² e está localizado no litoral sul da cidade, entre as coordenadas longitudinais 35°43'12,00W e 35°41'42,00W, e latitudinais 9°39'55,00S e 9°39'01,00.

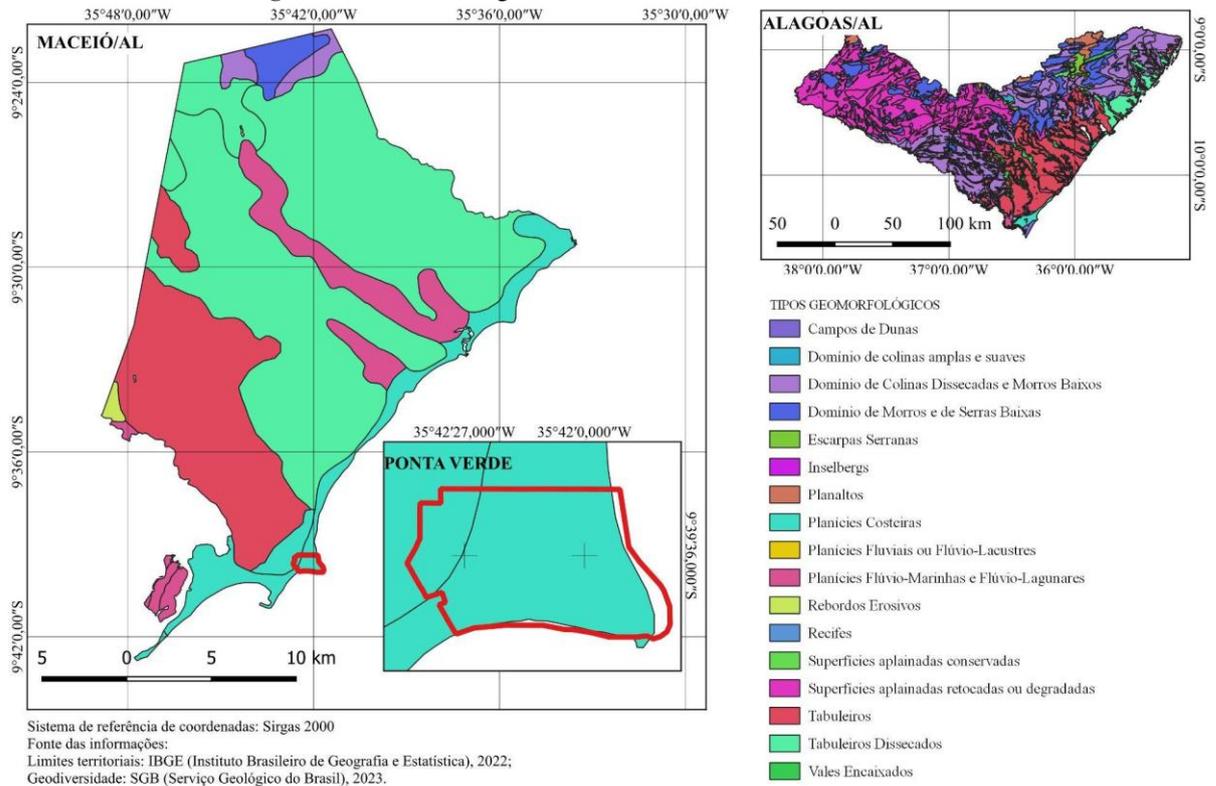
Figura 5 - Mapa de localização do bairro da Ponta Verde - Maceió/AL.



Fonte: Elaborado pela autora (2023), tendo como base IBGE (2022).

Com base em dados fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2023), é possível realizar um mapeamento da geomorfologia da cidade de Maceió e do bairro da Ponta Verde (Figura 6), que está totalmente inserido na região de Planície Costeira. Conforme os estudos de Santos (2004), a porção mais interior da Planície Costeira de Maceió é caracterizada por relevos altos e colinas provenientes do embasamento cristalino e, conforme aproxima-se a costa, as colinas dão origem a sedimentos da Formação Barreiras que formam os tabuleiros costeiros da região.

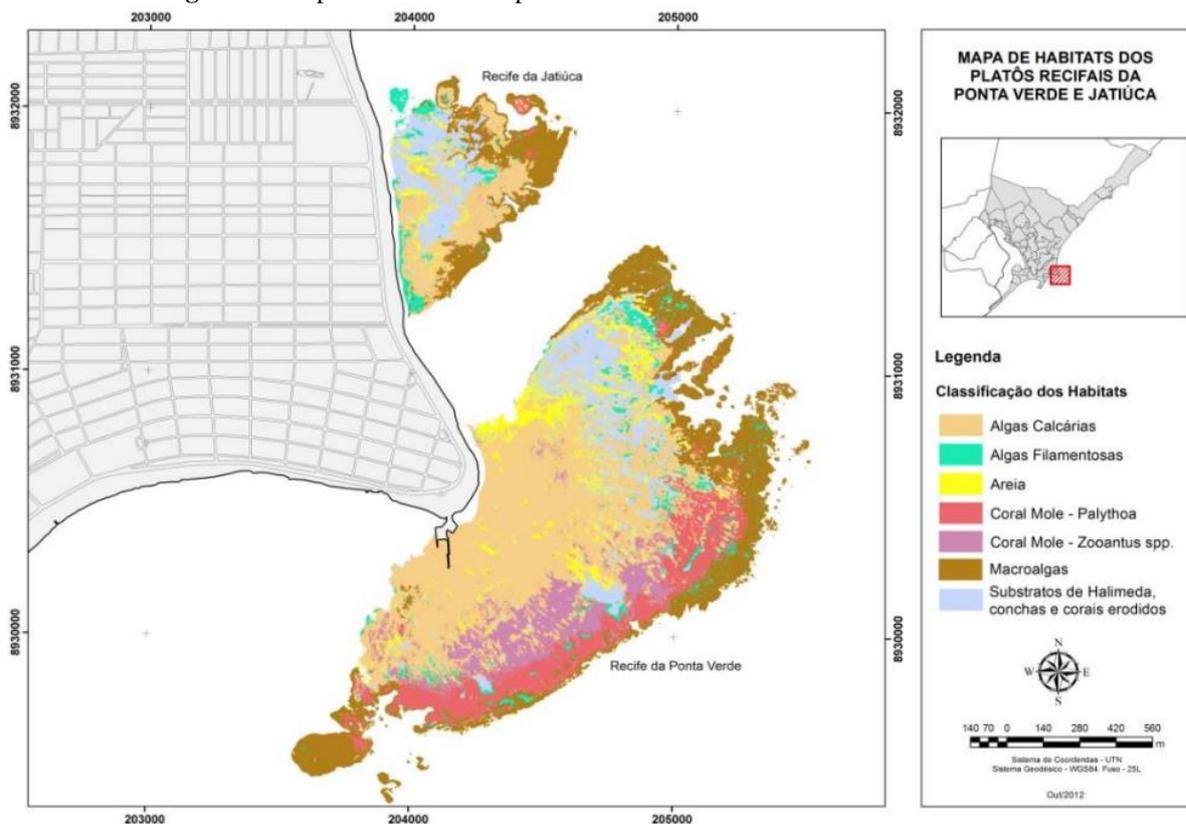
Figura 6 - Geomorfologia do bairro da Ponta Verde - Maceió/AL.



Fonte: Elaborado pela autora (2023), tendo como base IBGE (2022) e SGB (2023).

A orla do município de Maceió, é caracterizada pela presença predominante de rochas sedimentares, com destaque para os arenitos e calcários. Estudos realizados por Almeida et al. (2013) mapearam os recifes coralíneos, localizados na margem da praia urbana de Ponta Verde, revelando a presença de formações recifais emergentes, cujo topo da plataforma recifal é exposto durante marés baixas (Figura 7).

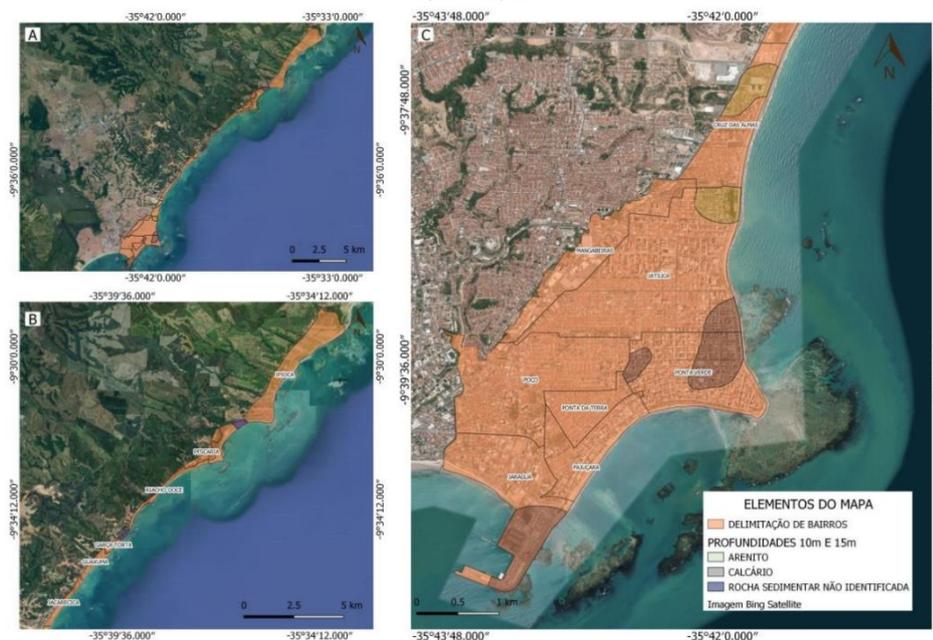
Figura 7 - Mapa de habitats dos platôs recifais dos bairros de Ponta Verde e Jatiúca.



Fonte: Almeida et al. (2013).

Esses recifes são compostos principalmente por calcário, conforme evidenciado por Marques (1997), que destaca que a cidade está localizada em uma Planície Costeira entre as falésias da Formação Barreiras e o mar, composta pela formação sedimentar do período geológico Quaternário Holoceno. Costa e Costa (2020) corroboram essa observação, ressaltando que o calcário é o tipo predominante de rocha sedimentar na região da Ponta Verde, abrangendo uma grande extensão do bairro (Figura 8).

Figura 8 - Mapa de incidência de rochas sedimentares na planície costeira de Maceió-AL nas profundidades 10m e 15m.



Fonte: Costa e Costa (2020).

De acordo com Xavier (2020), o crescimento imobiliário e a verticalização na cidade de Maceió direcionou-se para a orla marítima a partir da década de 1980. Desta forma, com a crescente oferta imobiliária na região, houve uma maior demanda por serviços de fundações (MARQUES, A. G.; MARQUES, J. A. F.; MARQUES, R. F., 2018) e, conseqüente, investigação do solo, devido a necessidade de conhecer as características geotécnicas do local e fornecer melhores soluções de engenharia.

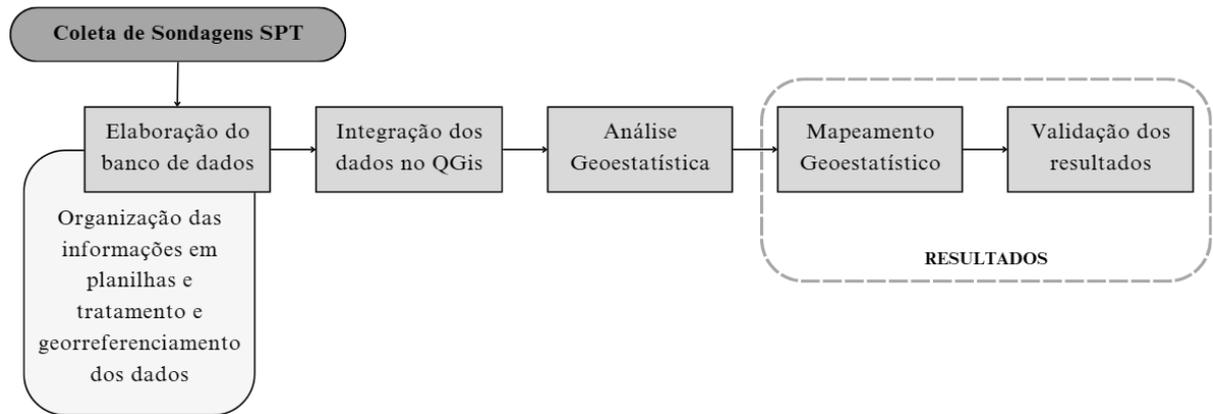
3.2 Procedimentos metodológicos

A metodologia empregada para abordar o problema de pesquisa proposto consistiu na pesquisa aplicada, a qual teve como objetivo aplicar conhecimentos de geotecnia e georreferenciamento para apoiar decisões de engenharia e planejamento urbano.

No âmbito metodológico, optou-se por uma abordagem descritiva, envolvendo procedimentos de levantamento e análise quantitativa de dados, com o propósito de caracterizar os tipos de solo na área de estudo.

O objeto da investigação foram os solos do bairro da Ponta Verde, em Maceió/AL, analisados por meio de relatórios de sondagem a percussão (SPT). As etapas a serem seguidas para elaboração do trabalho estão descritas na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma de etapas de realização do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a obtenção dos dados geotécnicos necessários para este trabalho, estabeleceu-se uma parceria com a empresa AGM Geotécnica, que forneceu acesso a 52 relatórios de sondagens SPT realizadas em 331 pontos do bairro da Ponta Verde, compreendendo o período entre os anos de 2012 e 2022.

As informações foram organizadas em planilhas contendo código identificador, Local da Obra, Ano, Furo, Nível d'água, SPT e tipo de solo em cada profundidade. Foi escolhido um único furo por obra, optando-se pelo ponto mais central do terreno. Criou-se duas planilhas, uma com informações de nível d'água e valores de SPT, e outra com os tipos de solo a cada profundidade.

Posteriormente, os dados foram georreferenciados com o auxílio do *Google Maps*, visto que os relatórios não forneceram as coordenadas dos pontos, limitando-se a apresentar o endereço e a posição em cada loteamento.

Inicialmente, identificou-se as necessidades de ajustes no conjunto de dados, tais como a conversão dos valores fracionários (*strings*) de SPT para o formato numérico, utilizando arredondamento simples, tendo em vista a utilização em campo e a facilitação da análise e interpretação dos dados. Para tanto, empregou-se a linguagem de programação Python, por meio de bibliotecas especializadas, como Pandas e PyProj, no tratamento dos dados, que consistiu na remoção de dados ausentes e padronização das informações.

Além disso, foram realizadas operações para a formatação das coordenadas geográficas para garantir consistência e precisão nos cálculos espaciais, preparando-as para uso em análises geoespaciais a partir da conversão para o sistema de coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*), associado ao Sistema Geodésico Brasileiro SIRGAS 2000.

Outra etapa importante do tratamento foi a atribuição de valores inteiros aos diferentes tipos de solo identificados, semelhante à metodologia utilizada por Oliveira (2018). Cada tipo de solo recebeu um código numérico correspondente (Quadro 4), facilitando a aplicação das ferramentas das etapas seguintes. Essa codificação permitiu a visualização e análise das variações dos tipos de solo em um mapa, abrangendo as 18 variações identificadas nos relatórios.

Quadro 4 - Tipos de solos e numeração atribuída.

TIPOS DE SOLO	NUMERAÇÃO ATRIBUÍDA
AREIA	1
ARGILA	2
SILTE	3
AREIA ARGILOSA	4
ARGILA ARENOSA	5
AREIA SILTOSA	6
ARGILA SILTOSA ou AREIA COM SILTE	7
SILTE ARENOSO ou SILTE COM AREIA	8
SILTE ARGILOSO	9
AREIA SILTO-ARGILOSA	10
AREIA ARGILO-SILTOS	11
ARGILA SILTO-ARENOSA	12
ARGILA ARENO-SILTOSA	13
SILTE ARENO-ARGILOSO	14
SILTE ARGILO-ARENOSO	15
AREIA CALCÁRIA ou AREIA COM CALCÁRIO	16
CALCÁRIO	17
FRAGMENTOS DE CRUSTÁCEOS	18

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os códigos desenvolvidos para o tratamento das informações encontram-se disponíveis nos Apêndices A e B.

Para realizar as análises geoestatísticas e o mapeamento, foi empregado o *software* QGIS (*Quantum Gis*), versão 3.28.15. Inicialmente, os dados geotécnicos tratados foram integrados ao QGIS como camada *shapefile*. Após a integração dos dados, realizou-se o mapeamento geoestatístico utilizando complemento *Smart-map*, do qual foi escolhida a ferramenta de interpolação Máquina de Vetores de Suporte ou *Support Vector Machine* (SVM), tendo em vista as recomendações de Pereira et al. (2022). O SVM é um Método de aprendizado de Máquinas (Machine-learning) supervisionado que foi implementado no Smart-Map, cujo propósito é estabelecer limites de decisão que otimizem a separação entre diferentes classes, minimizando assim os erros, conforme descrito por Nascimento et al. (2009).

O mapeamento dos valores de SPT foi realizado a cada cinco metros de profundidade, resultando em mapas nas profundidades de 0 m, 5 m, 10 m e 15 m. Para cada profundidade foram utilizados diferentes quantidades de pontos (Quadro 5), tendo em vista a quantidade de pontos disponíveis a cada camada.

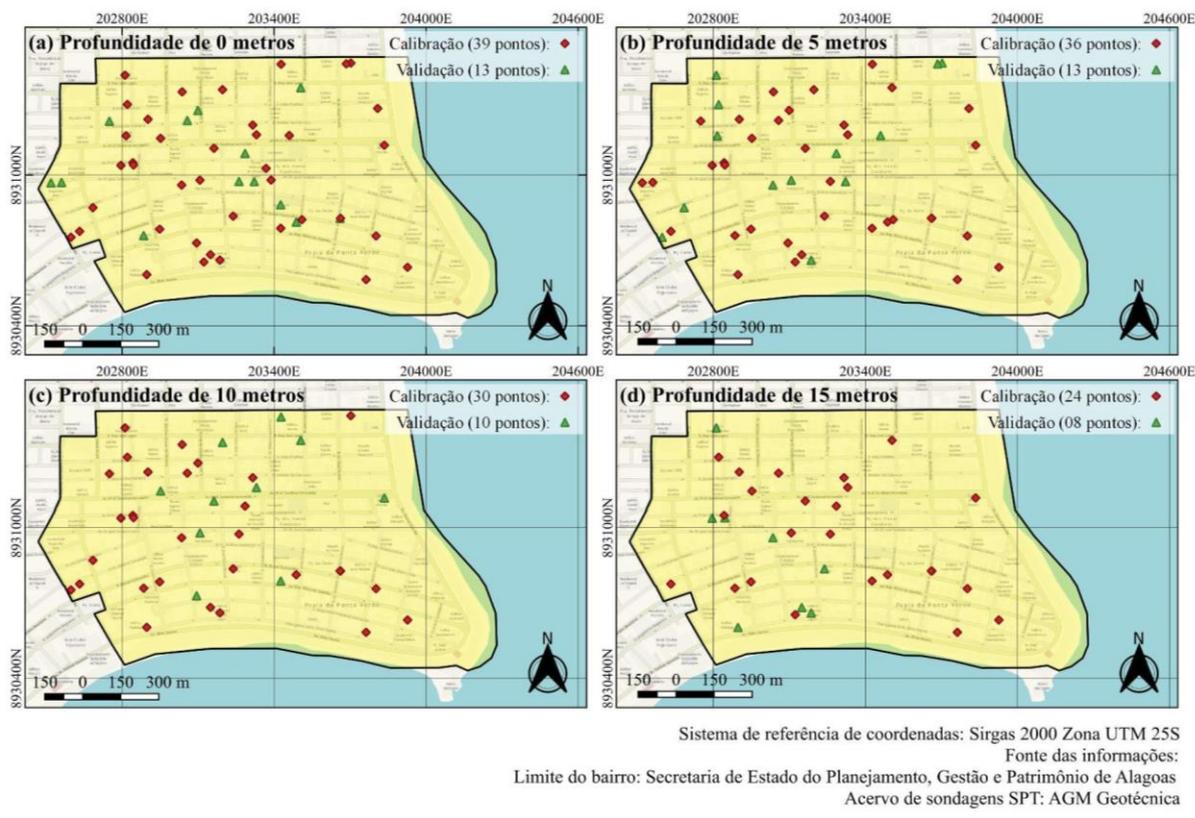
Quadro 5 - Quantidade de pontos a cada profundidade.

PROFUNDIDADE	QUANTIDADE DE PONTOS
0 m	52
5 m	49
10 m	40
15 m	32

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para elaboração dos modelos, optou-se por utilizar os valores de SPT medidos em campo utilizando-se das distribuições espaciais apresentadas na Figura 10, as quais foram estabelecidas de forma aleatória. Optou-se por utilizar 75% dos dados amostrais para calibração do modelo e 25% para validação em todos os modelos, também seguindo a análise feita por Pereira et al. (2022).

Figura 10 - Distribuição espacial dos pontos de calibração e validação do SPT: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.

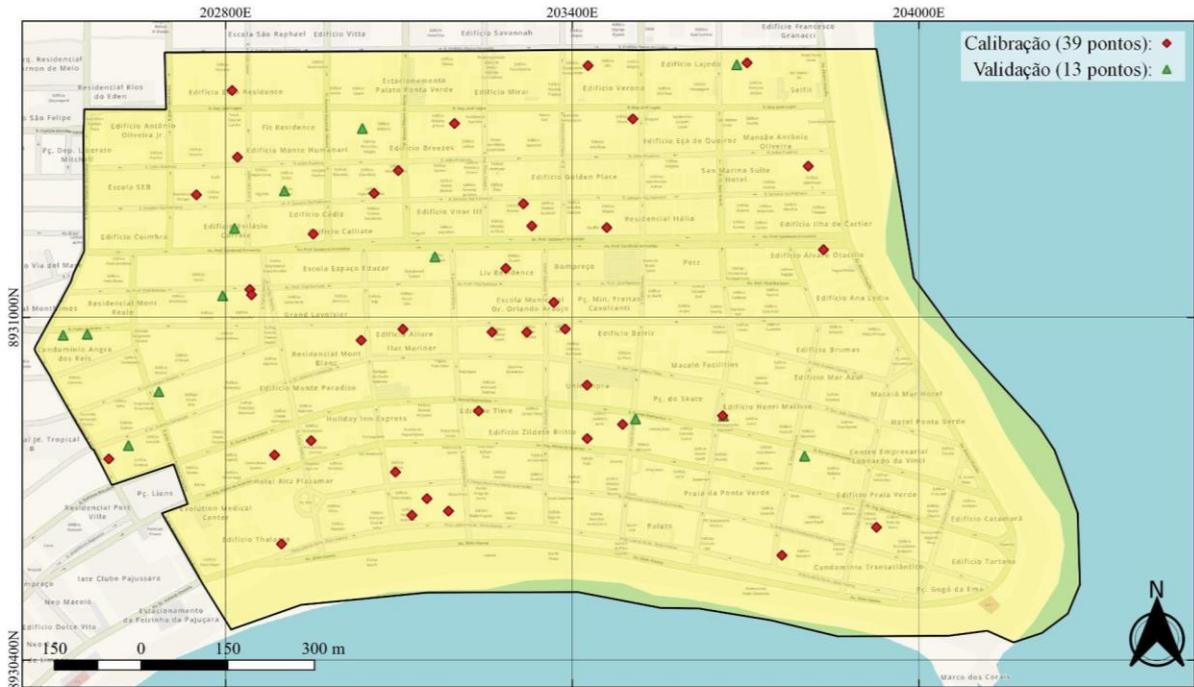


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para elaboração do mapa de nível de lençol freático, cabe ressaltar que, devido às limitações das informações disponibilizadas, não foi possível diferenciar a composição da água encontrada no lençol freático, seja ela salgada, salobra ou doce. Além disso, considerando a limitada disponibilidade de dados, as sondagens não foram organizadas de acordo com as datas de realização, o que impossibilitou a análise da sazonalidade, como variações no nível d'água em períodos de maior ou menor precipitação.

Foram utilizados todos os 52 pontos disponíveis para o mapeamento, os quais foram classificados como pontos para calibração e validação seguindo a Figura 11.

Figura 11 - Distribuição espacial dos pontos de calibração e validação do mapa de nível d'água.



Sistema de referência de coordenadas: Sirgas 2000 Zona UTM 25S

Fonte das informações:

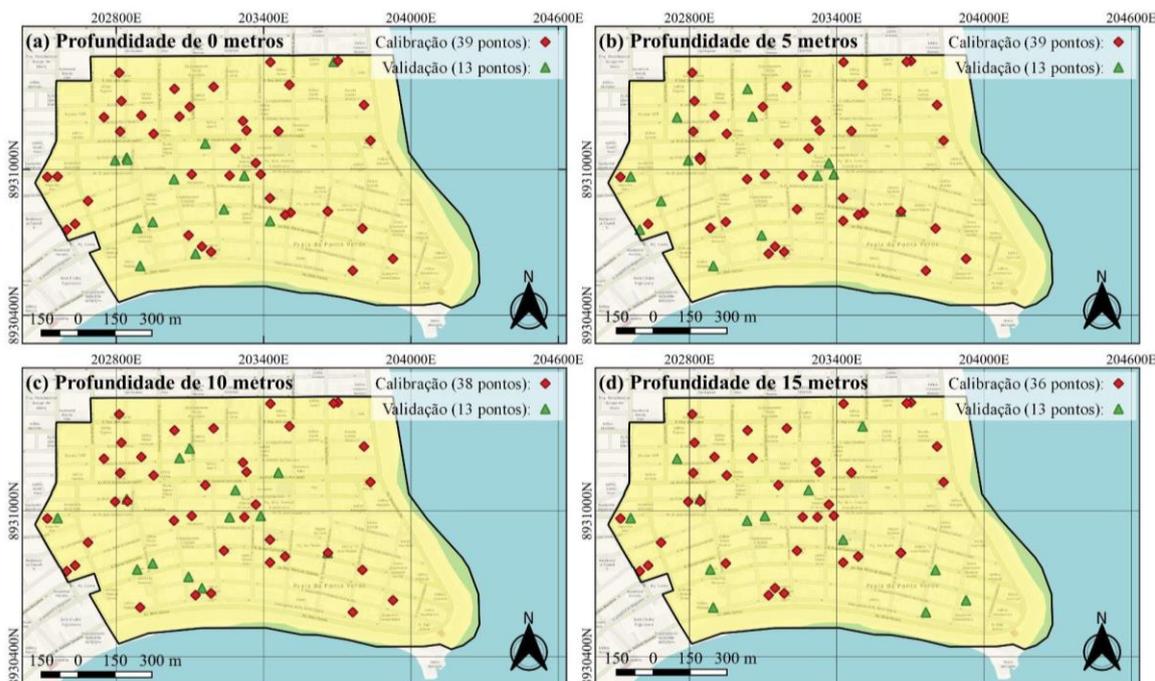
Limite do bairro: Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio de Alagoas

Acervo de sondagens SPT: AGM Geotécnica

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A fim de mapear os tipos de solos a cada profundidade, utilizou-se todos os pontos disponíveis, com exceção da profundidade 15 m, a qual utilizou-se 50 pontos. Os pontos foram selecionados para calibração e validação seguindo a Figura 12.

Figura 12 - Distribuição espacial dos pontos de calibração e validação dos tipos de solo: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.



Sistema de referência de coordenadas: Sirgas 2000 Zona UTM 25S

Fonte das informações:

Limite do bairro: Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio de Alagoas

Acervo de sondagens SPT: AGM Geotécnica

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para validar o modelo, calculou-se a média e o desvio-padrão dos valores reais dos conjuntos de dados reservados para validação, sendo este último empregado para estabelecer os limites inferior e superior em relação à média, proporcionando uma faixa de variação aceitável para os dados. Para tanto, analisou-se a disposição dos valores obtidos para as mesmas coordenadas dos pontos de validação, em relação à média e aos limites estabelecidos dos valores reais, a fim de verificar a capacidade do modelo em reproduzir as variações observadas nos dados reais durante a validação.

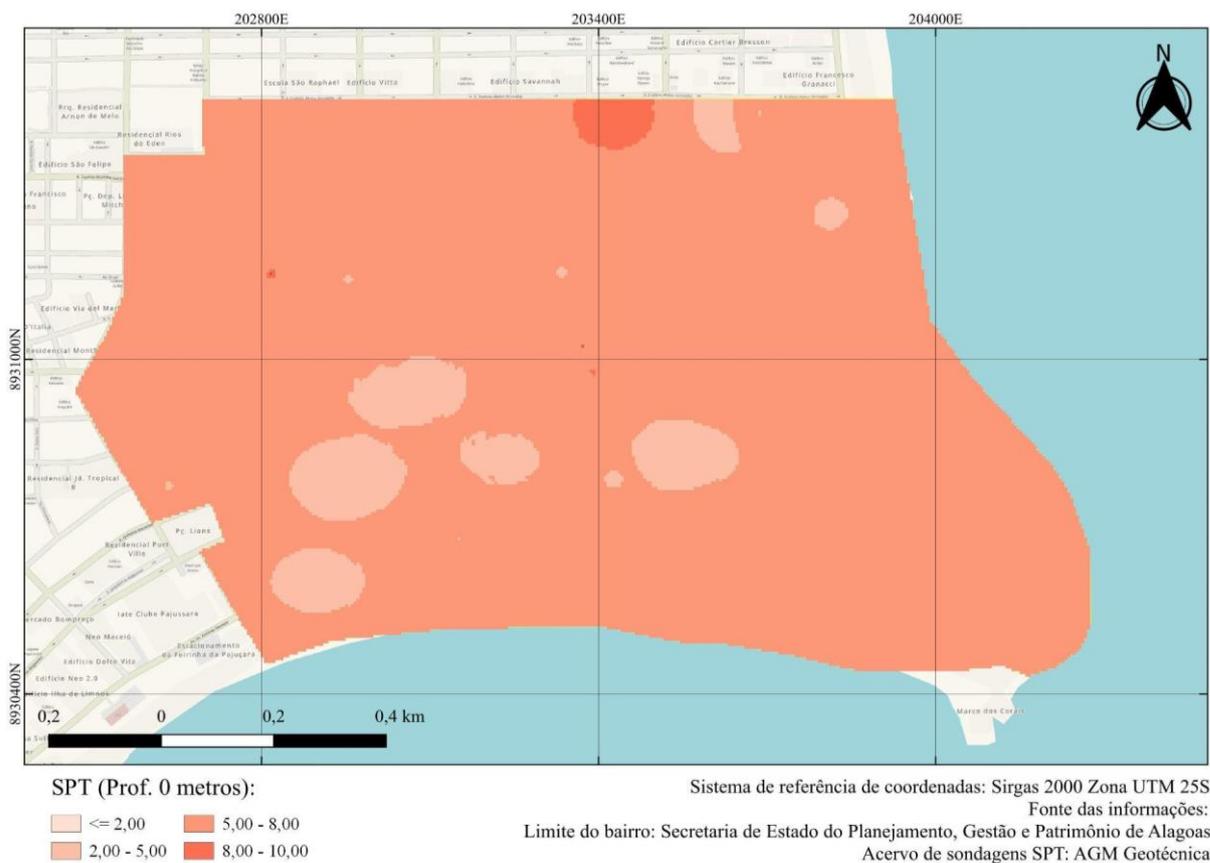
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados da metodologia descrita anteriormente, referente ao mapeamento do SPT, à superfície do lençol freático e ao mapeamento geotécnico, bem como à validação dos modelos.

4.1 SPT

O resultado do mapeamento geoestatístico do SPT na profundidade de 0 metros pode ser observado na Figura 13, onde observa-se que os valores de SPT variaram de valores menores que 2 até 10, de maneira uniformizada, de forma que as cores mais claras representam valores de SPT menores, enquanto as mais escuras representam valores maiores. Predomina-se uma faixa de valores entre 5 e 8.

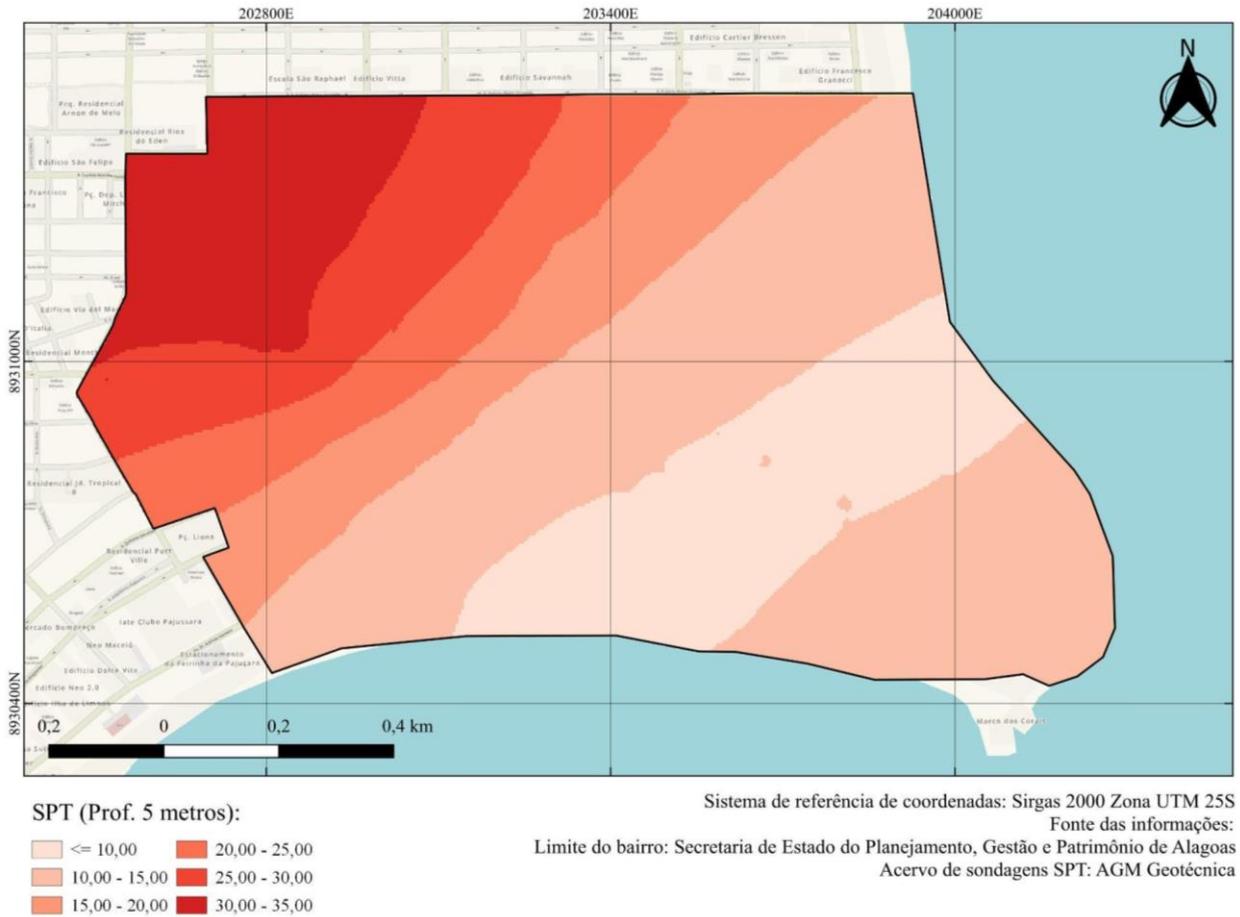
Figura 13 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 0 metros.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a profundidade de 5 metros (Figura 14), observou-se uma maior variação do SPT no modelo, indo de valores menores que 10 a 35, com os valores maiores concentrados à oeste do bairro. Nota-se a maior ocorrência de valores entre 15 e 20 e há uma indicação de maior resistência do solo nesta profundidade quando comparada com a camada a 0 m.

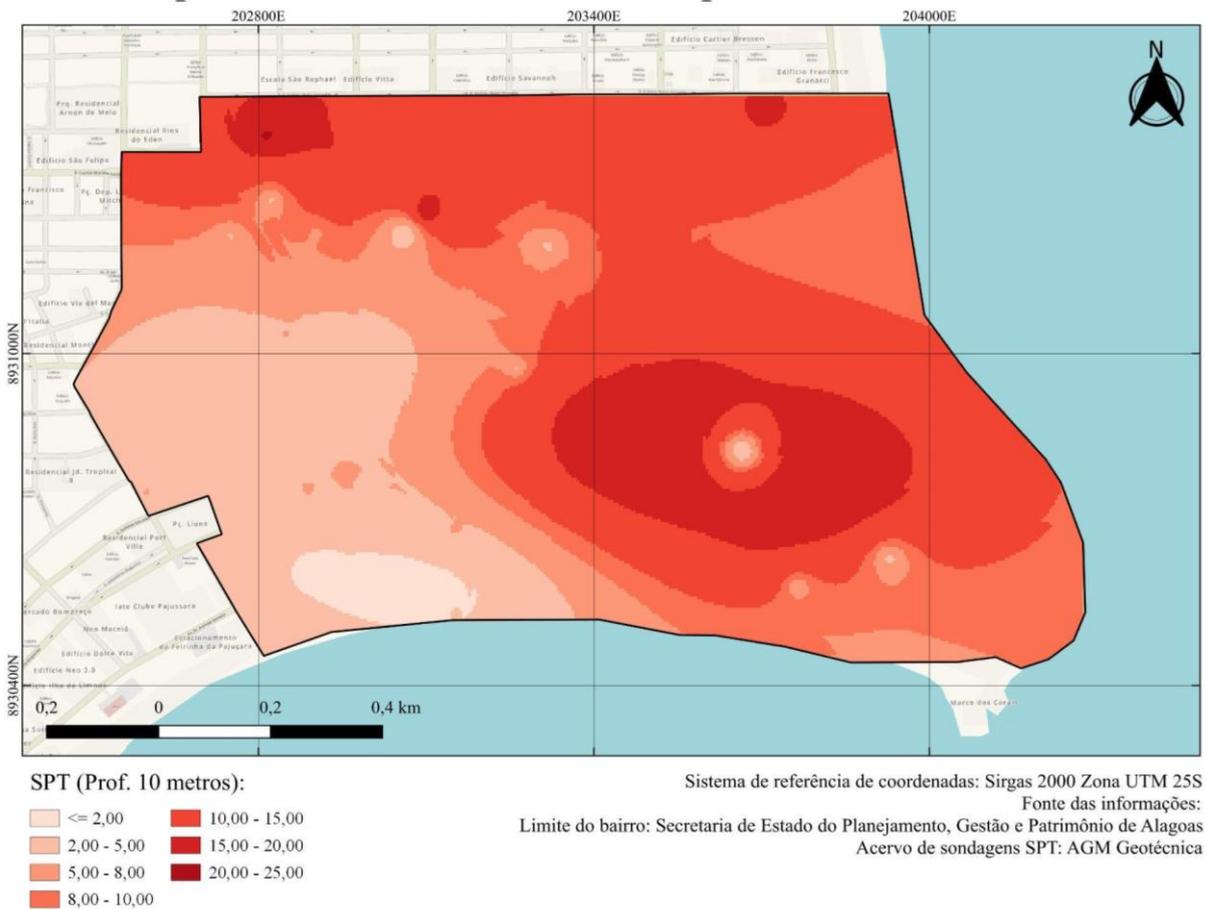
Figura 14 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 5 metros.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Da mesma forma, para a profundidade de 10 metros (Figura 15), os valores variaram entre valores menores que 2 a 25, de forma mais desordenada, com maior incidência de valores entre 10 e 15.

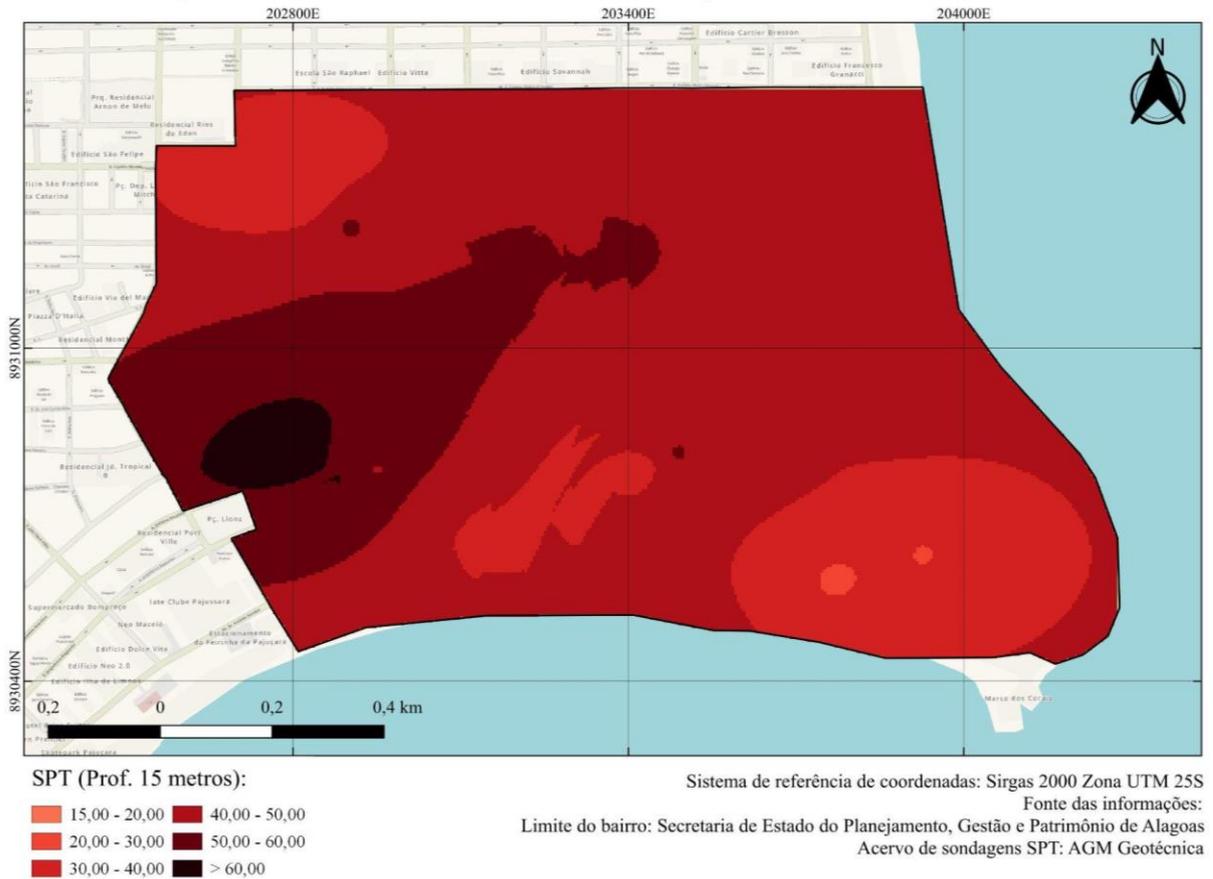
Figura 15 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 10 metros.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De forma semelhante, para a profundidade de 15 metros (Figura 16), observou-se variações de 15 a valores maiores que 60, sendo a faixa de valores entre 40 e 50 mais frequente, bem como os intervalos de 30 a 40, e 50 a 60; evidenciando solos mais resistentes nesta camada em comparação com as anteriores.

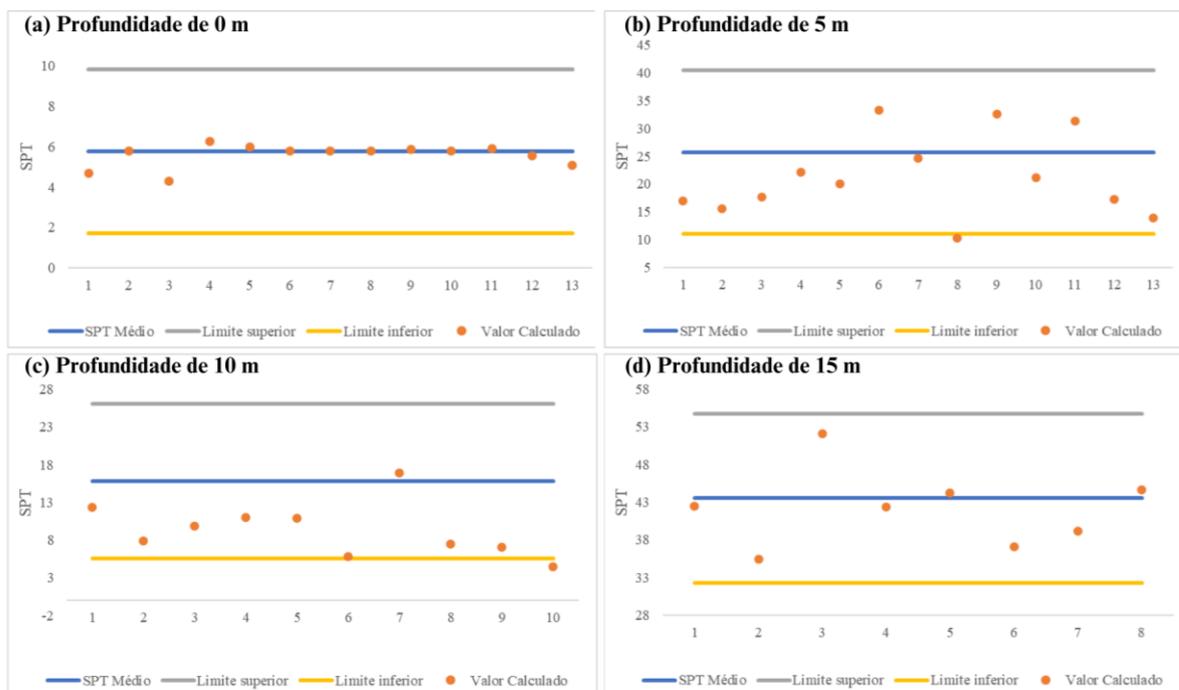
Figura 16 - Mapa interpolado do SPT na profundidade de 15 metros.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A análise da distribuição do SPT ao longo das diferentes profundidades revela que à medida que a profundidade aumenta, há uma perda gradual de homogeneidade da superfície, acompanhada por um aumento na variação dos valores de SPT. Esta transição é evidenciada por valores de SPT mais elevados e dispersos, indicando heterogeneidade do solo em profundidades maiores. Os gráficos de dispersão dos pontos de validação em torno da média (Figura 17) mostram que, para a profundidade de 0 metros, os pontos mantiveram-se próximos à média, dentro dos limites inferior e superior estabelecidos pela variância. O mesmo ocorreu para as profundidades de 5, 10 e 15 metros que, embora apresentem uma distribuição mais espaçada ao redor da média, ainda continuam dentro dos limites estabelecidos.

Figura 17 - Gráfico de dispersão dos pontos de validação em torno da média do SPT: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O erro absoluto médio dos valores de SPT e a eficiência para cada profundidade, representada pelo percentual dos pontos dentro do intervalo estabelecido pelos limites inferior e superior em relação à média, podem ser vistos no Quadro 6:

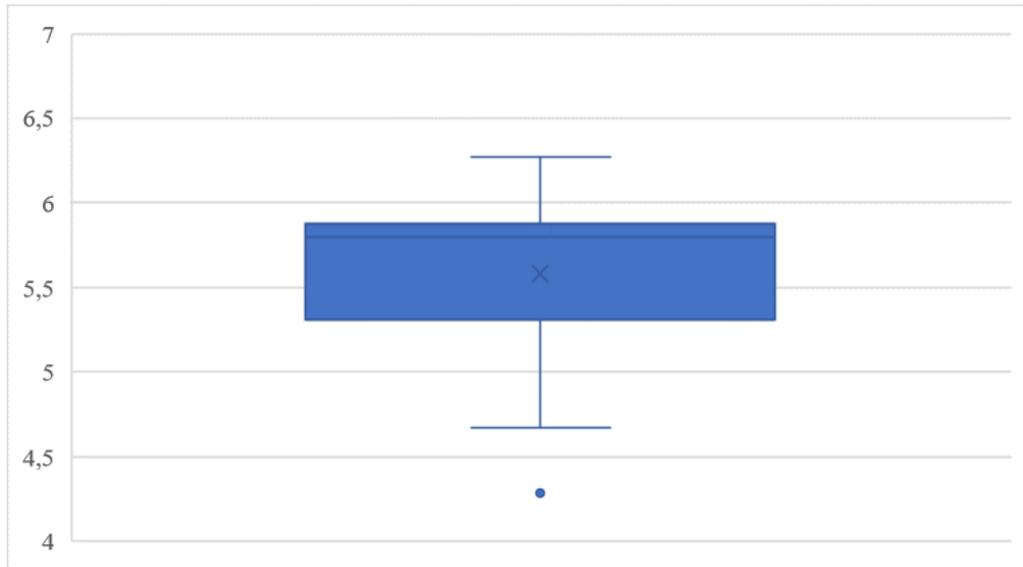
Quadro 6 - Erro absoluto médio e a eficiência para cada profundidade para os valores de SPT.

PROFUNDIDADE	ERRO ABSOLUTO MÉDIO	EFICIÊNCIA (%)
0 m	2,998	100
5 m	9,962	92
10 m	11,508	90
15 m	7,205	100

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

No caso da profundidade de 0 metros, observou-se a existência de *outliers* por meio da observação do boxplot (Figura 18) o qual mostra que, com exceção deste ponto o modelo está bem calibrado.

Figura 18 - Boxplot do SPT na profundidade de 0 metros.

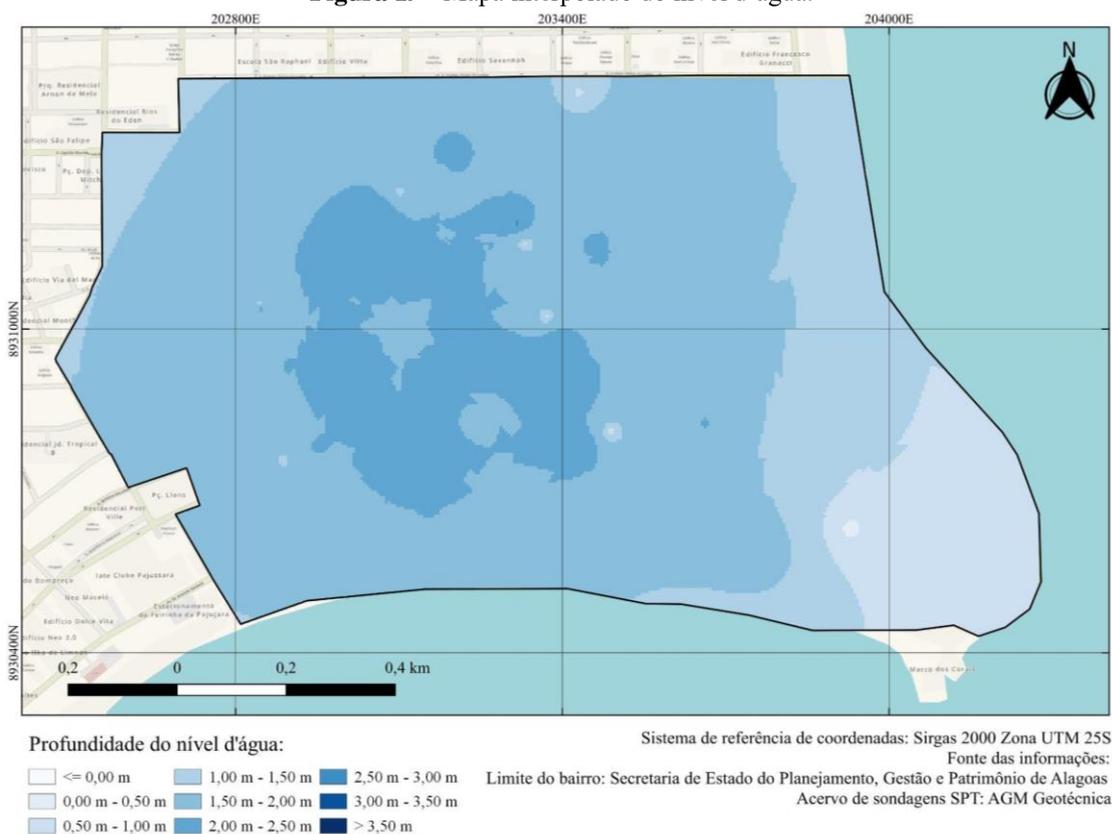


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.2 Nível d'água

O mapa foi gerado com base nos dados de profundidade do nível d'água apresentados nas sondagens, permitindo visualizar a variação do lençol freático na área de estudo de forma simplificada (Figura 19).

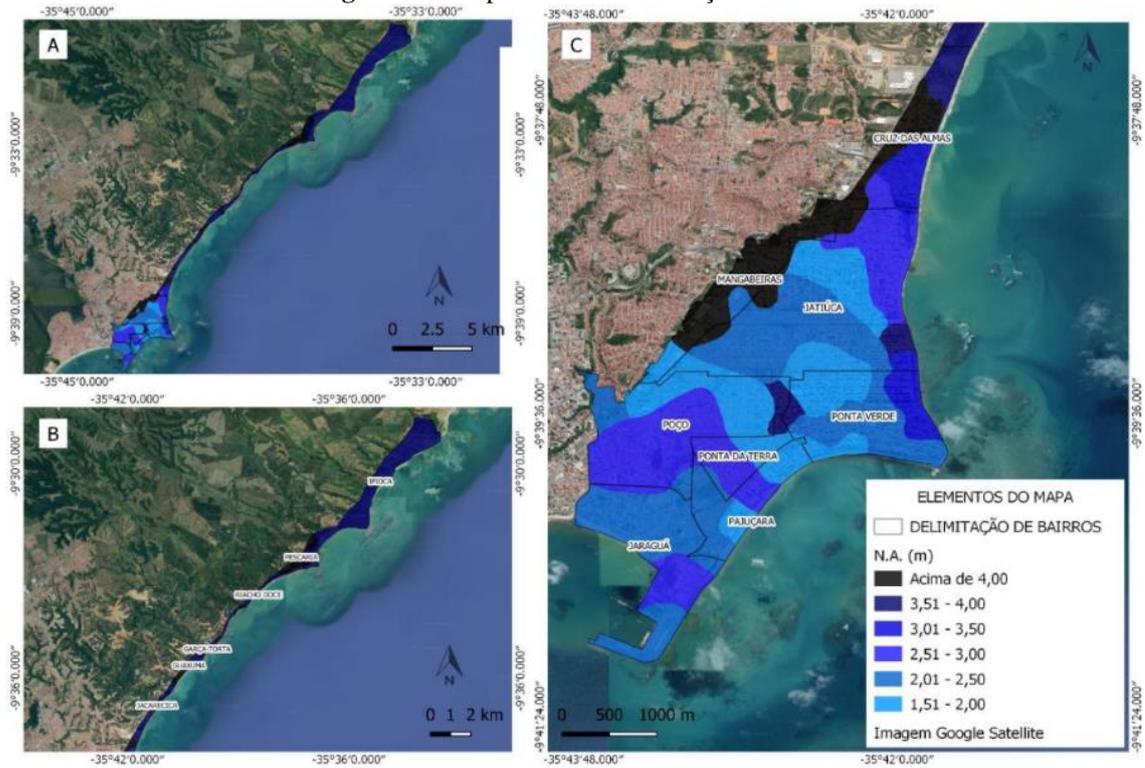
Figura 19 - Mapa interpolado do nível d'água.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É possível visualizar, por meio da superfície resultante, as regiões de maior e menor profundidade do lençol freático, que varia de 0 m a 3 m na região, situada na orla marítima, destacando-se a faixa de 1 m a 2,5 m ao centro da região. Os valores obtidos no mapeamento geostatístico do nível d'água foram coerentes aos resultados apresentados por Costa e Costa (2020), os quais apresentaram maior frequência na faixa de 1,51 m a 3 m na área estudada (Figura 20).

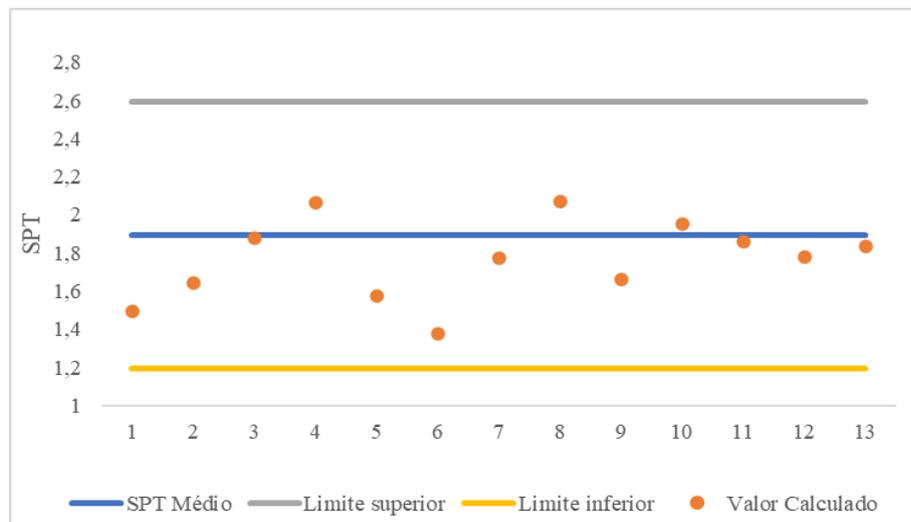
Figura 20 - Mapas de Níveis do lençol freático.



Fonte: Costa e Costa (2024).

O gráfico de dispersão dos pontos de validação em torno da média (Figura 21) mostram que os pontos mantiveram-se próximos à média, dentro dos limites inferior e superior estabelecidos pela variância, mesmo com uma grande distribuição.

Figura 21 - Gráfico de dispersão dos pontos de validação em torno da média do nível d'água.



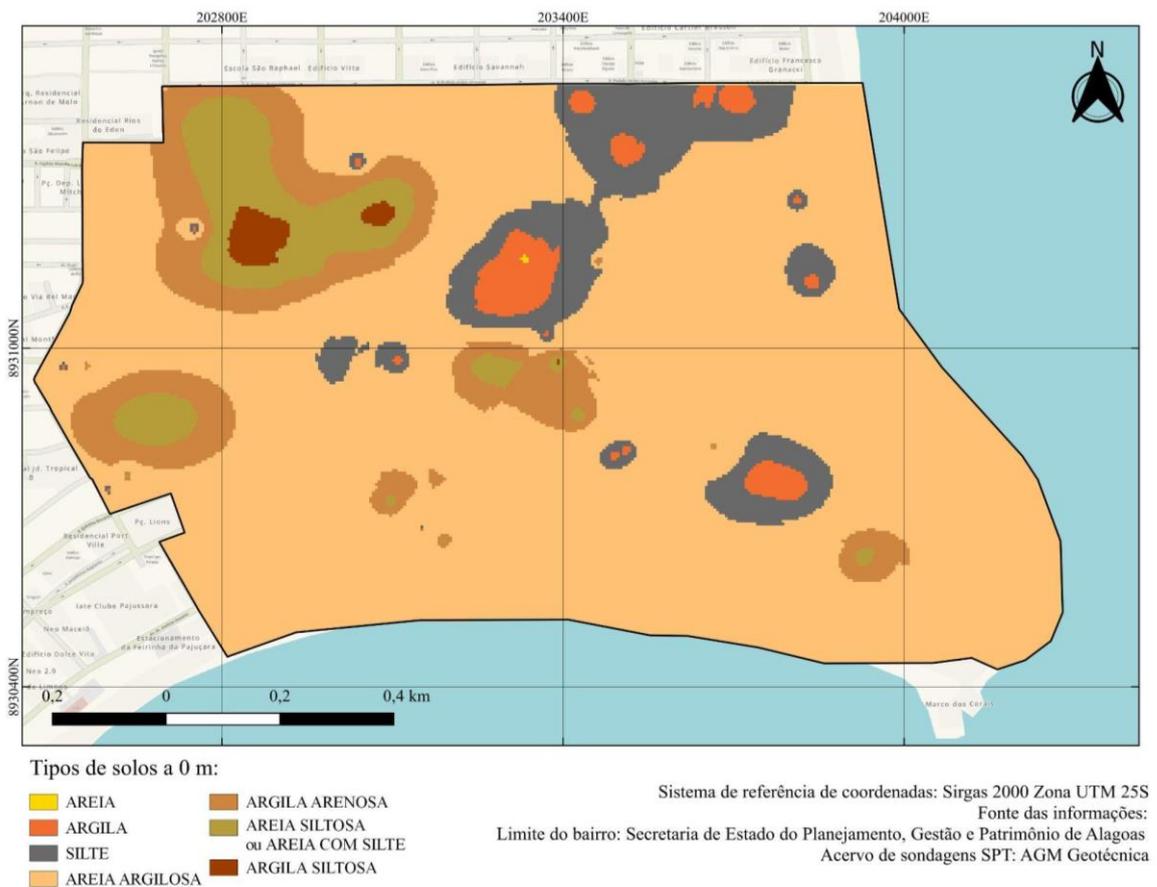
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O erro absoluto médio dos valores do nível d'água foi de 0,6569 a eficiência de 100%.

4.3 Caracterização dos tipos de solo

Os mapas de tipos de solo na profundidade de 0 metros (Figura 22) demonstram que há a predominância de Areia argilosa na superfície do bairro, com alguns depósitos de Silte, Argila, Argila arenosa, Areia siltosa ou Argila com silte e um pouco de Areia.

Figura 22 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 0 metros.

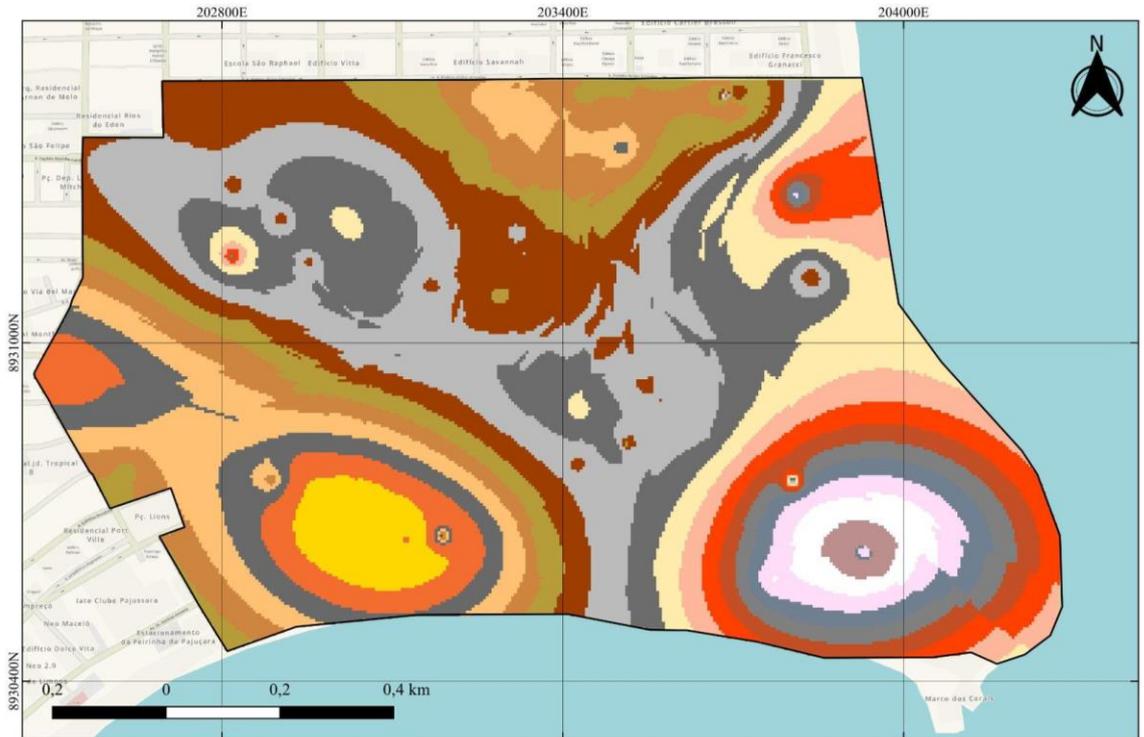


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É notável que, na profundidade de 5 metros (Figura 23) há uma maior diversidade de tipos de solo, destacando a presença de Silte arenoso ou Silte com areia, Areia argilosa, Areia siltosa ou Areia com silte, Argila siltosa, Silte argiloso, Areia silto-argilosa, Areia argilo-siltosa, argila silto-arenosa, argila areno-siltosa, silte areno-argiloso e silte argilo-arenoso. É destacável

também a presença de Areia Cálctica ou Areia com Calcário, Calcário e Fragmentos de Crustáceos a sudeste da área em estudo.

Figura 23 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 5 metros.



Tipos de solos a 5 m:

 AREIA	 AREIA SILTO-ARGILOSA
 ARGILA	 AREIA ARGILO-SILTOSA
 SILTE	 ARGILA SILTO-ARENOSA
 AREIA ARGILOSA	 ARGILA ARENO-SILTOSA
 ARGILA ARENOSA	 SILTE ARENO-ARGILOSO
 AREIA SILTOSA ou AREIA COM SILTE	 SILTE ARGILO-ARENOSO
 ARGILA SILTOSA	 AREIA CÁLCCTICA ou AREIA COM CALCÁRIO
 SILTE ARENOSO ou SILTE COM AREIA	 CALCÁRIO
 SILTE ARGILOSO	 FRAGMENTOS DE CRUSTÁCTEO

Sistema de referência de coordenadas: Sirgas 2000 Zona UTM 25S

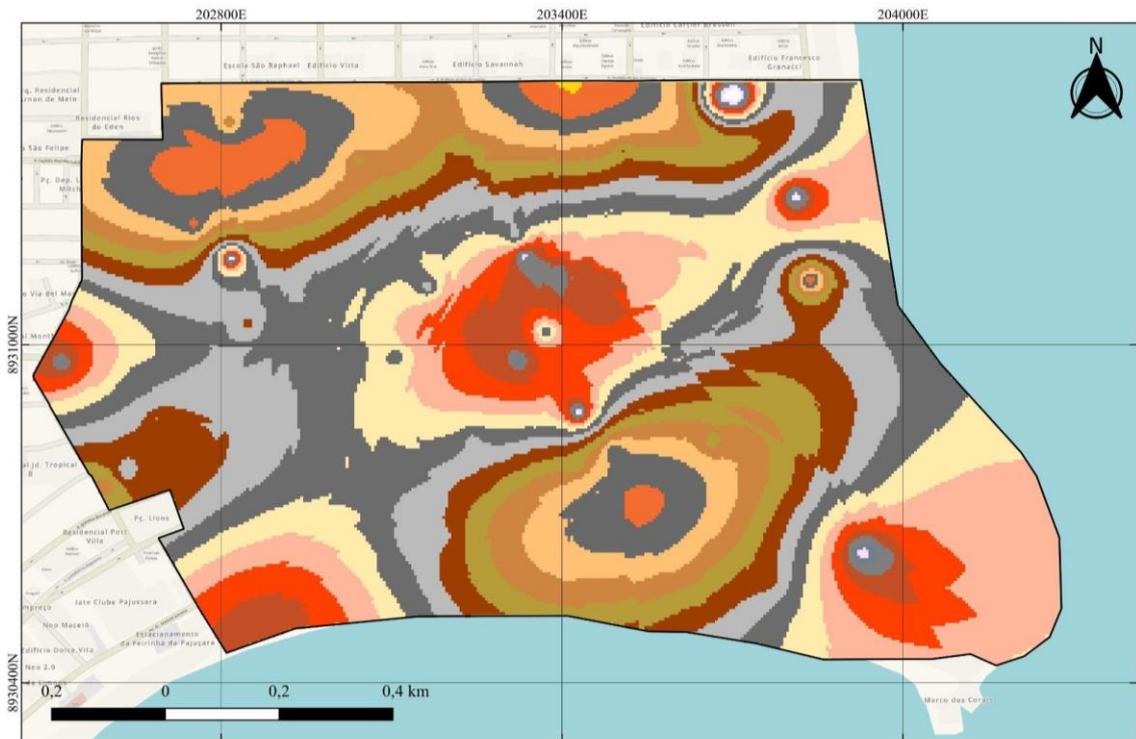
Fonte das informações:

Limite do bairro: Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio de Alagoas
Acervo de sondagens SPT: AGM Geotécnica

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na profundidade de 10 metros (Figura 24), de forma semelhante à profundidade de 5 metros, há uma grande diversidade de solos, destacando os tipos Areia silto-argilosa, Areia argilo-siltosa, Argila silto-arenosa, Argila areno-siltosa, Silte argiloso, Silte arenoso ou Silte com Areia, Argila siltosa, Areia siltosa ou Areia com Silte, Argila arenosa, Silte, Argila e Areia. É possível identificar, com menor frequência, os tipos Areia cálcctica ou Areia com calcário e Calcário, a nordeste do bairro.

Figura 24 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 10 metros.



Tipos de solos a 10 m:

 AREIA	 AREIA SILTO-ARGILOSA
 ARGILA	 AREIA ARGILO-SILTOSA
 SILTE	 ARGILA SILTO-ARENOSA
 AREIA ARGILOSA	 ARGILA ARENO-SILTOSA
 ARGILA ARENOSA	 SILTE ARENO-ARGILOSO
 AREIA SILTOSA ou AREIA COM SILTE	 SILTE ARGILO-ARENOSO
 ARGILA SILTOSA	 AREIA CÁLCICA ou AREIA COM CALCÁRIO
 SILTE ARENOSO ou SILTE COM AREIA	 CALCÁRIO
 SILTE ARGILOSO	

Sistema de referência de coordenadas: Sirgas 2000 Zona UTM 25S

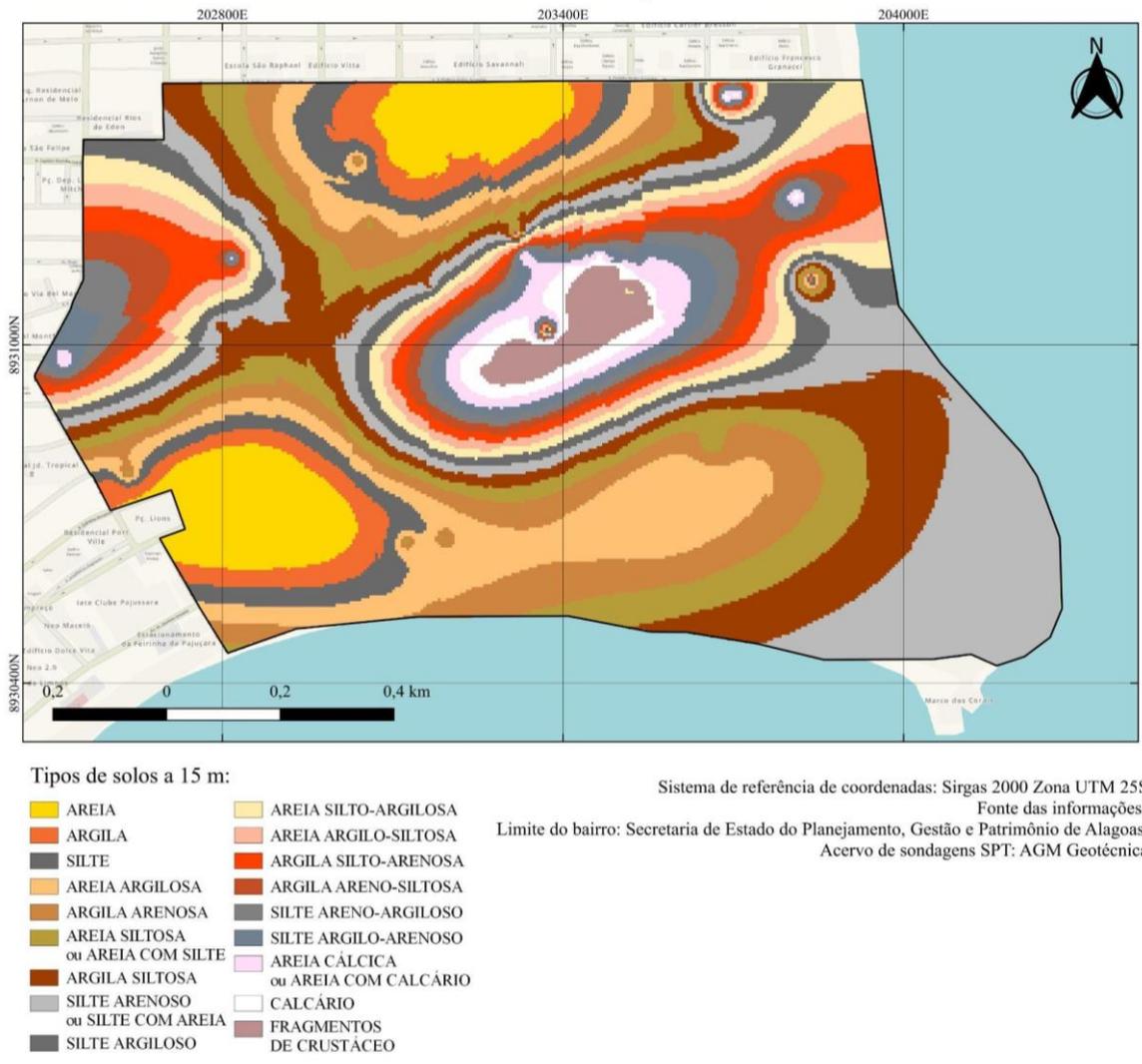
Fonte das informações:

Limite do bairro: Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio de Alagoas
Acervo de sondagens SPT: AGM Geotécnica

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A profundidade de 15 metros (Figura 25), de forma semelhante às camadas anteriores, destacou a presença dos tipos Areia, Argila, Silte, Areia argilosa, Argila arenosa, Areia Siltosa ou Areia com silte, Argila siltosa, Silte arenoso ou Silte com areia, Silte argiloso. Houve também a presença, em menor proporção, de Areia silto-argilosa, Areia argilo-siltosa, Argila silto-arenosa, Argila areno-siltosa, Silte areno-argiloso e Silte argilo-arenoso. Por fim, no centro da região de estudo, destaca-se a presença de Areia Cálcica ou Areia com calcário, Calcário e Fragmentos de crustáceo.

Figura 25 - Mapa interpolado dos tipos de solo na profundidade de 15 metros.

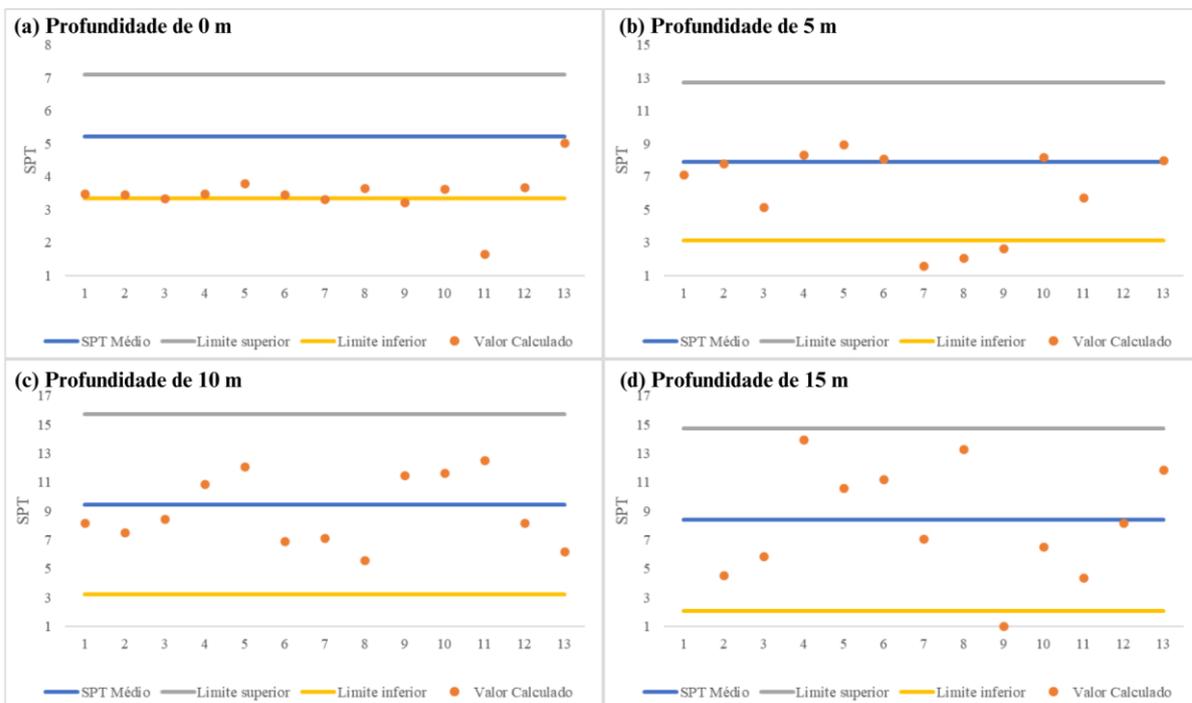


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Desta forma, observa-se que há uma maior homogeneidade na superfície, onde os tipos de solo se distribuem de forma mais uniforme na profundidade de 0 metros. No entanto, à medida que a profundidade aumenta, ocorre uma ampliação na diversidade dos tipos de solo, indicando uma maior complexidade e variação nas características geológicas em profundidades mais profundas.

A validação (Figura 26) demonstra que os pontos mantiveram-se próximos à média, dentro dos limites inferior e superior estabelecidos pela variância, mesmo com uma grande distribuição. Logo, os modelos calibrados são válidos.

Figura 26 - Gráfico de dispersão dos pontos de validação em torno da média dos tipos de solo: a) Profundidade de 0 metros; b) Profundidade de 5 metros; c) Profundidade de 10 metros; d) Profundidade de 15 metros.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O erro absoluto médio a cada profundidade e a eficiência podem ser vistos no Quadro 7:

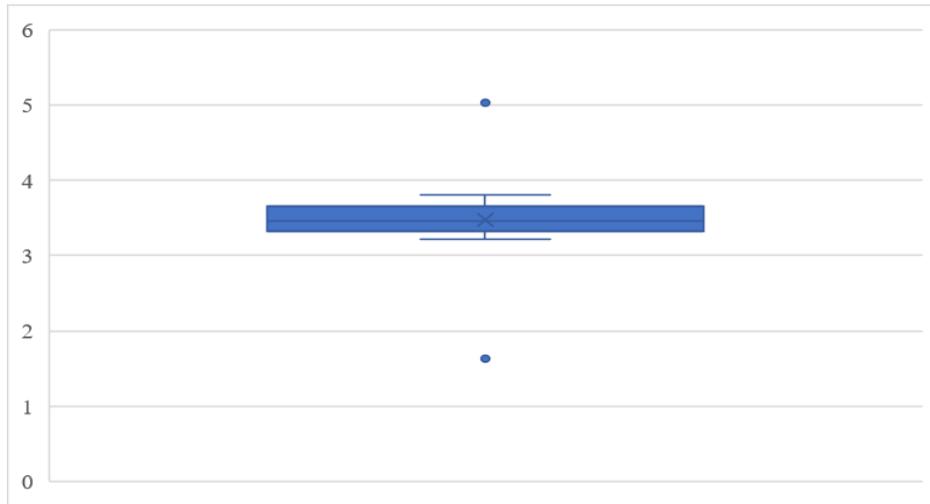
Quadro 7 - Erro absoluto médio e a eficiência para cada profundidade para os tipos de solo.

PROFUNDIDADE	ERRO ABSOLUTO MÉDIO	EFICIÊNCIA (%)
0 m	2,518	77
5 m	4,229	77
10 m	4,402	100
15 m	4,596	92

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

No caso da profundidade de 0 m metros, observou-se a existência de *outliers* por meio da observação do boxplot (Figura 27) o qual mostra que, com exceção destes pontos o modelo está bem calibrado.

Figura 27 - Boxplot do SPT na profundidade de 0 metros.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, utilizou-se do Mapeamento Geoestatístico como ferramenta para análise espacial do bairro da Ponta Verde, em Maceió-AL. O método permitiu a interpretação e representação de dados geoespaciais de forma prática e acessível, podendo ser amplamente utilizado na engenharia geotécnica para caracterização do solo e mapeamento geotécnico de regiões de forma facilitada.

O mapeamento geoestatístico do SPT da região indica uma distribuição heterogênea da resistência do solo em diferentes profundidades ao longo do bairro estudado. A análise geoestatística proporcionou informações valiosas sobre as variações nos valores de SPT, destacando que a resistência da região em função da profundidade, além de destacar áreas com maior e menor resistência a cada profundidade. Notou-se que, para profundidade de 0 metros, os valores de SPT variaram de 2 a 10, enquanto a uma profundidade de 5 metros, os valores foram observados variando de valores menores que 10 a 35. A 10 metros de profundidade, foram observadas variações entre 2 e 25. A uma profundidade de 15 metros, houve um aumento significativo na resistência do solo, com valores variando entre valores próximos a 15 a superiores que 60. Ademais, a distribuição do SPT mostra homogeneidade superficial, mas maior heterogeneidade em profundidades maiores.

O mapeamento do nível do lençol freático, revelou variações da profundidade na faixa de 0 m a 3 m, permitindo visualizar as regiões cujo nível d'água está mais próximo da superfície da região. Por outro lado, a análise geoestatística da incidência de solos demonstrou uma diversidade de tipos de solo em diferentes profundidades do bairro, destacando a presença de Areia argilosa, Silte, Silte arenoso ou Silte com areia e Argila arenosa. Observa-se também a presença de Areia cálcica ou Areia com calcário, bem como a ocorrência de Calcário nas camadas mais profundas. Esses resultados indicam uma homogeneidade relativa no nível do lençol freático, com pequenas variações de profundidade, enquanto a diversidade de tipos de solo sugere uma heterogeneidade ao longo das diferentes camadas do terreno, destacando maior presença de diferentes tipos de solo.

A validade dos modelos desenvolvidos foi confirmada por meio de análises estatísticas, que demonstraram uma boa calibração global do mapeamento, apesar dos erros associados e da presença de outliers em algumas profundidades.

Embora os resultados do mapeamento geoestatístico não permitam excluir a realização de sondagens, é importante considerar que, apesar dos erros associados aos modelos, os mapas permitem uma boa visualização do comportamento e da distribuição dos valores de SPT, profundidade do lençol freático e tipos de solo na região em estudo, podendo ser utilizado como auxílio para tomada de decisões de engenharia, no campo imobiliário e no planejamento urbano. Para além das aplicações práticas, este estudo também pode servir como base para pesquisas futuras, contribuindo para o progresso do conhecimento acadêmico na geotecnia e na geoestatística.

Dado o exposto, conclui-se que o trabalho desenvolvido contribui para identificação de padrões relacionados a características referentes à resistência do solo, nível do lençol freático e tipos de solo da região em estudo.

Sugere-se o aprofundamento do tema do trabalho no que diz respeito a:

- Utilizar mais furos de sondagem na região do Bairro da Ponta Verde (Maceió/AL), repetindo o mapeamento geoestatístico;
- Mapear a área de estudo com outras ferramentas de geoestatística;
- Mapear a superfície impenetrável e a incidência de rochas da região em estudo;
- Realizar o mapeamento do SPT em outras áreas de Maceió/AL.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8036**: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ALMEIDA, A. J. P.; ANDRADE, E. L.; GRANDE, H.; NASCIMENTO, M. A. D. Classificação digital de imagem de satélite de alta resolução espacial na identificação de habitats de recifes de coral das praias de Ponta Verde e Jatiúca, Maceió-AL. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, XVI., 2013, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais**.

ARMSTRONG, M. **Basic linear geostatistics**. Springer Science & Business Media, 1998.

CASTRO, A. P. A.; PARRILHA, F. C. Dimensionamento da Fundação sem Sondagem do Solo: Análise do Método Adotado para Edificações Residenciais em Marília/SP. In: COBRAMSEG 2022, Campinas, SP. **Anais eletrônicos**[...] Campinas, Galoá, 2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Itc - livros Técnicos e Científicos. Vols. 1 e 2, 2003.

COSTA, B. C. A.; COSTA, M. C. A. **Georreferenciamento Geológico-Geotécnico da região de planície costeira do município de Maceió/AL utilizando resultados de sondagem SPT**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Tiradentes, 2020.

FONTELES, H. R. N. Geoestatística aplicada ao mapeamento da superfície impenetrável ao SPT: o caso da porção nordeste de Fortaleza/CE, Nordeste do Brasil. **Geologia**, v. 27, n. 1, p. 39-52, 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Página Principal do IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

IGEOTEST. **Ensayos Geotécnicos In Situ – su ejecución e interpretación**. Girona, Espanha, 2004.

ISAACKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

LIMA, R. C. A. **Evolução da Linha de Costa a Médio e Curto Prazo Associada ao Grau de Desenvolvimento Urbano e aos Aspectos Geoambientais na Planície Costeira de Maceió-Alagoas**. 2004. Tese de Doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

Nascimento, R.F.F., Alcântara, E.H., Kampel, M., Stech, J.L., Novo, E.M.L.M. & Fonseca, L.M.G. 2009, 'O algoritmo Support Vector Machines (SVM): avaliação da separação ótima de classes em imagens CCD-CBERS-2'. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Natal. **Anais**. 25-30 Abril, vol. 14, pp. 2079-2086.

MARQUES, A. G. **Métodos de investigação do subsolo**. Alagoas, Maceió: Edufal, 2008.

MARQUES, A. G.; MARQUES, J. A. F.; MARQUES, R. F. **Métodos de investigação do subsolo**. 3. ed. Maceió-AL: Edufal, 2015. v. único.

MARQUES, J. A. F.; MARQUES, A. G. **Prática de Fundações no Estado de Alagoas**. In: ABMS – Núcleo Nordeste. (Org.). Geotecnia no Nordeste. Recife: Universidade da UFPE, 2005, v. único, p. 247-264.

MARQUES, Juliane Andréia Figueiredo. **Execução e previsão de capacidade de carga de estacas rotativas-injetadas**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

MARQUES, J.; MARQUES, R.; MARQUES, A. Desenvolvimento das Fundações Profundas em Maceió-AL. *In*: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2018, Maceió-AL. **Anais**.

MIRANDA, E. C. N.; JUNIOR, H. C.; SANTIAGO, A. N.; SALOMÃO, P. E, A. A importância da sondagem SPT no dimensionamento de fundações. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, 347-370, 2018.

OLIVEIRA, J. C. C. **Construção de um Banco de Dados Geotécnicos com Base em Sondagens SPT e Uso de Ferramenta SIG**: estudo de caso solos do Tocantins, com ênfase na capital Palmas - TO. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Luterano de Palmas, 2018.

PEREIRA, G.W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.; COELHO, A.L.F.; COSTA, M.M.; Grift, T. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. **Agronomy**, 2022.

QGIS Development Team, 2024. QGIS Geographic Information System. Versão 3.28.15 [Software]. Disponível em: <https://www.qgis.org>.

SANTANA, K. K. M.; OLIVEIRA J.Valterci R. Análise da modelagem espacial do fator de conversão de altitude geométrica em altitude normal para região metropolitana de Goiânia utilizando geoestatística. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2023.

SCHNEIDERS, I.; CARDOSO, V. A. **Caracterização geotécnica do subsolo do perímetro urbano do município de Pato Branco (PR) com base em geoestatística**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SGB. Mapa de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: <https://www.sgb.abc.br/mapas>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

SOUZA, A. L. T.; MENDES, C. M. **A Importância Da Investigação Geotécnica Para A Economia E Segurança Nas Fundações – Estudo De Caso Na Cidade De Caratinga/Mg.** 2015. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Tecnológico De Caratinga, 2015.

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 2, p. 261–268, 2014.

STURARO, J. R.. **Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens de simples reconhecimento.** 1994. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1994.

THIESEN, S. **Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: um estudo de caso em Blumenau/SC.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

VIEIRA, M. N. A.; ALVES, C. N.; FERREIRA, V. S.; BARBOSA, C. N. L. Modeling of geological-geotechnical properties in soils of Belém do Pará. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i2.12664. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/12664>. Acesso em: 13 mar. 2023.

XAVIER, R. N. G. **Localização e flexibilidade de uso em edifícios residenciais e a imagem urbana, através da rede social, na percepção de felicidade na orla da Ponta Verde em Maceió/AL.** 2020. Tese (Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo:
Ed. Oficina de Textos, 2013.

APÊNDICE A - CÓDIGO PYTHON PARA TRATAMENTO DE DADOS DE SPT E NÍVEL D'ÁGUA

```
import pandas as pd
from google.colab import files
from pyproj import Proj, transform

# Carregar o arquivo Excel para um DataFrame
df = pd.read_excel('[SPT] BANCO DE DADOS.xlsx')
# Criar coluna de coordenada x
df['Coordenada_x'] = df['Coordenadas'].apply(lambda x:
float(x.split(',')[1]))
# Criar coluna de coordenada y
df['Coordenada_y'] = df['Coordenadas'].apply(lambda x:
float(x.split(',')[0]))
# Excluir a coluna 'Coordenadas'
df.drop('Coordenadas', axis=1, inplace=True)
# Definir o sistema de coordenadas de origem (latitude/longitude) como
EPSG:4326 (WGS 84)
proj_origem = Proj(init='EPSG:4326')
# Definir o sistema de coordenadas de destino como EPSG:31985 (UTM zona 25S)
proj_destino = Proj(init='EPSG:31985')
# Converter as coordenadas para UTM
df['Coordenada_UTM_x'], df['Coordenada_UTM_y'] = transform(proj_origem,
proj_destino, df['Coordenada_x'].values, df['Coordenada_y'].values)
# Excluir a coluna 'Coordenada x'
df.drop('Coordenada_x', axis=1, inplace=True)
# Excluir a coluna 'Coordenada y'
df.drop('Coordenada_y', axis=1, inplace=True)
# Configurar opções de exibição de ponto flutuante para evitar notação
científica
pd.set_option('display.float_format', lambda x: '%.6f' % x)
# Função para converter os dados de SPT
def converter_spt(valor_spt):
    if isinstance(valor_spt, int) or isinstance(valor_spt, float):
        return round(valor_spt * 30 / 30, 2)
    elif isinstance(valor_spt, str) and '/' in valor_spt:
        golpes, profundidade = map(int, valor_spt.split('/'))
        return round(golpes * 30 / profundidade, 2)
    else:
```

```

    return None
# Aplicar a função para converter os dados de SPT em todas as colunas de SPT
for coluna in df.columns[7:34]: # SPT-h0 a SPT-h26
    df[coluna] = df[coluna].apply(converter_spt)
# Substituir valores vazios, isto é, NaN e NaT por '-'
df.fillna('-', inplace=True)
# Excluir as colunas que não serão utilizadas no QGIS
colunas_para_excluir = ['SPT-h1', 'SPT-h2', 'SPT-h3', 'SPT-h4', 'SPT-h6',
'SPT-h7', 'SPT-h8', 'SPT-h9', 'SPT-h11', 'SPT-h12', 'SPT-h13', 'SPT-h14',
'SPT-h16', 'SPT-h17', 'SPT-h18', 'SPT-h19', 'SPT-h20', 'SPT-h21', 'SPT-h22',
'SPT-h23', 'SPT-h24', 'SPT-h25', 'SPT-h26']
df.drop(colunas_para_excluir, axis=1, inplace=True)
# Índices das linhas a serem removidas (Fora da área de interesse)
indices_para_remover = [7, 9, 12, 26, 30, 44, 48, 55, 58]
# Remover as linhas
df = df.drop(indices_para_remover)
# Salvar o DataFrame de volta para um arquivo Excel
df.to_excel('dados_limpos.xlsx', index=False)
# Realizar o download do arquivo Excel
files.download('dados_limpos.xlsx')

```

APÊNDICE B - CÓDIGO PYTHON PARA TRATAMENTO DE DADOS DE TIPOS DE SOLO

```
import pandas as pd
from google.colab import files
from pyproj import Proj, transform

# Carregar o arquivo Excel para um DataFrame
df = pd.read_excel('[SOLOS] BANCO DE DADOS.xlsx')

# Dicionário de mapeamento dos tipos de solo para números
mapeamento_tipos_solo = {
    'AREIA': 1,
    'ARGILA': 2,
    'SILTE': 3,
    'AREIA ARGILOSA': 4,
    'ARGILA ARENOSA': 5,
    'AREIA SILTOSA': 6,
    'ARGILA SILTOSA': 7,
    'AREIA COM SILTE': 6,
    'SILTE ARENOSO': 8,
    'SILTE COM AREIA': 8,
    'SILTE ARGILOSO': 9,
    'AREIA SILTO-ARGILOSA': 10,
    'AREIA ARGILO-SILTOSA': 11,
    'ARGILA SILTO-ARENOSA': 12,
    'ARGILA ARENO-SILTOSA': 13,
    'SILTE ARENO-ARGILOSO': 14,
    'SILTE ARGILO-ARENOSO': 15,
    'AREIA CALCICA': 16,
    'AREIA COM CALCARIO': 16,
    'CALCARIO': 17,
    'FRAGMENTOS DE CALCARIO': 17,
    'FRAGMENTOS DE CRUSTÁCEOS': 18}

# Lista das colunas relevantes
colunas_relevantes = ['SPT-h0', 'SPT-h5', 'SPT-h10', 'SPT-h15']

# Substituir os nomes dos tipos de solo pelos números em cada coluna relevante
for coluna in colunas_relevantes:
    df[coluna] = df[coluna].replace(mapeamento_tipos_solo)
```

```
# Salvar o DataFrame de volta para um arquivo Excel
df.to_excel('dados_solos_limpos.xlsx', index=False)
# Realizar o download do arquivo Excel
files.download('dados_solos_limpos.xlsx')
```