

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Arthur Campagnoli Morossino

**Aplicação de SIG para o mapeamento geotécnico e a elaboração de cartas  
de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT para o bairro de  
Jurerê – Florianópolis/SC**

Florianópolis  
2021

Arthur Campagnoli Morossino

**Aplicação de SIG para o mapeamento geotécnico e a elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT para o bairro de Jurerê – Florianópolis/SC**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Florianópolis  
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Morossino, Arthur Campagnoli

Aplicação de SIG para o mapeamento geotécnico e a elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT para o bairro de Jurerê - Florianópolis/SC / Arthur Campagnoli Morossino ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi, 2021.

162 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Sistemas de Informações Geográficas (SIG). 3. Mapeamento Geotécnico. 4. Sondagens SPT. 5. Cartas de Aptidão para Fundações. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Arthur Campagnoli Morossino

**Aplicação de SIG para o mapeamento geotécnico e a elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT para o bairro de Jurerê – Florianópolis/SC**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 05 de maio de 2021.

---

Prof<sup>a</sup>. Liane Ramos da Silva, Dra.  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Cláudio Cesar Zimmermann, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Civil Caroline Ester Christ, Dra.  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho àqueles que fazem parte da minha vida, em especial à minha mãe, Nancy.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, pelo apoio incondicional durante esses anos, o qual me permitiu realizar este sonho.

À Gisele, pelo amor, pelo companheirismo, pelo apoio, pela compreensão e pelos momentos inesquecíveis, sem os quais essa jornada não teria sido a mesma.

Ao meu orientador, Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência e presteza ao longo da grande caminhada que foi este trabalho.

Ao Professor Dr. Cláudio Cesar Zimmermann, pelos ensinamentos, pela oportunidade e confiança depositada em mim em meu tempo no Grupo de Trabalho em Sistemas de Informações Geográficas (GTSIG).

À Eng. Dr. Caroline Ester Christ, pela gentileza de compartilhar seu trabalho, sem o qual o presente estudo não seria realizado.

Aos meus queridos amigos Cícero, Eduardo, Gabriel, Marcello, Paulo e Vincent, pela parceria de longa data e pela compreensão de minha ausência ao longo da graduação.

Aos amigos de GTSIG, pelos bons momentos e almoços no RU. Em especial, à Daniela Agüero Sanchez pelos ensinamentos no ArcGIS durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), em especial ao Eng. Dr. Adosindro Joaquim de Almeida, pelo exemplo de competência profissional e pelos valiosos conselhos que me permitiram realizar este trabalho da melhor forma possível.

Aos companheiros da turma 15.1, por terem tornado a graduação uma experiência mais divertida.

*"Fate rarely calls upon us at the moment of our choosing."*

(Optimus Prime)

## RESUMO

Em virtude da capacidade de modelagem de superfícies terrestres ao integrar diversos dados à elementos geográficos, bem como realizar análises complexas e gerar mapas digitais dinâmicos e de fácil interpretação, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) vêm se consolidando como poderosas ferramentas na elaboração de mapeamentos geotécnicos. Nesse sentido, foram reunidos dados gráficos relativos à caracterização do relevo da área de estudo composta pelo bairro de Jurerê como o mapa setorial, os cursos de água, o Modelo Digital de Elevação (MDE) e a ortofoto da região. A partir desses dados, foram elaborados os mapas temáticos compostos pelo Modelo Digital do Terreno (MDT), pelo mapa de declividade e pelo mapa de hidrografia. Em seguida, foi estruturado um banco de dados geotécnico contendo os principais parâmetros geomecânicos do maciço de solo da região estudada, por meio de ajustes de uma base de dados contendo laudos de sondagens SPT, do termo inglês *Standard Penetration Test*. Além disso, ao associar os mapas temáticos com o banco de dados geotécnico instituído, foram desenvolvidas cartas de aptidão para fundações, descrevendo o subsolo de Jurerê em mapas da superfície do impenetrável à percussão, da superfície freática e de um mapa para orientação em relação ao tipo de fundação mais indicada – superficial ou profunda. Complementarmente, foram elaborados mapas de isovalores de tensão admissível para fundações superficiais e mapas de isovalores de  $N_{SPT}$  e comprimento máximo das estacas mais comumente executadas para fundações profundas. O estudo permitiu concluir que os resultados obtidos a partir do mapeamento realizado são válidos como caráter de orientação para os profissionais da área de fundações e os gestores do poder público para o planejamento do uso e ocupação do espaço urbano. Ademais, demonstrou-se a versatilidade e praticidade da manipulação e processamento de dados em ambiente SIG.

**Palavras-chave:** Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Mapeamento Geotécnico. Sondagens SPT. Cartas de Aptidão para Fundações.

## ABSTRACT

Due to the ability to model terrestrial surfaces by integrating various data with geographic elements, as well as performing complex analyzes and generating dynamic digital maps that are easy to interpret, Geographic Information Systems (GIS) have been consolidating themselves as powerful tools in the elaboration of geotechnical engineering mapping. Graphic data were collected to characterize the landscape of the study area composed by the neighborhood of Jurerê such as the sectorial map, the water courses, the Digital Elevation Model (DEM) and the orthophoto of the region. Using these graphic data, thematic maps such as the Digital Terrain Model (DTM), the slope map and the hydrography map were elaborated. Also, a geotechnical database was structured containing the main geomechanical parameters of the soil massif in the studied region, through adjustments to a database containing SPT boreholes. In addition, by associating thematic maps with the instituted geotechnical database, foundation suitability maps were developed, describing the Jurerê subsoil in terms of the impenetrable layer surface, groundwater level and orientation maps regarding the most suitable type of foundation – shallow or deep. In addition, allowable stress contour lines for shallow foundations and  $N_{SPT}$  contour lines, as well as maximum length of piles, for deep foundations were elaborated. The study led to the conclusion that the results obtained from the mappings are valid as guidelines for professionals in the field of foundations and public managers for urban planning and land usage in the region. In addition, the study demonstrated the versatility and practicality of manipulating and processing data in a GIS software.

**Keywords:** Geographic Information Systems (GIS). Geotechnical Engineering Mapping. Standard Penetration Test (SPT). Foundation Suitability Maps.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de instalação para equipamentos do ensaio SPT.....	24
Figura 2 – Exemplificação de um laudo de sondagem SPT de um ponto genérico ..	26
Figura 3 – Distribuição normal dos valores de capacidade de carga.....	28
Figura 4 – Exemplificação da propagação de tensões .....	30
Figura 5 – Exemplificação do bulbo de tensões .....	31
Figura 6 – Superposição de dados espaciais no SIG .....	35
Figura 7 – Componentes de um SIG .....	36
Figura 8 – Objetos do modelo vetorial.....	40
Figura 9 – Representação do modelo matricial ( <i>raster</i> ).....	41
Figura 10 – Processo de transformação entre as representações espaciais.....	41
Figura 11 – Exemplo de um MDT elaborado a partir da rede de triangulação.....	51
Figura 12 – Semivariograma experimental, modelo teórico e seus parâmetros.....	53
Figura 13 – Localização da área de estudo.....	60
Figura 14 – Fluxograma do método de trabalho.....	66
Figura 15 – <i>Buffers</i> de 500 (a), 600 (b), 700 (c) e 1000 m (d) .....	77
Figura 16 – Tabela de atributos do banco de dados de sondagens SPT .....	78
Figura 17 – Exemplo de análise do modelo de krigagem .....	82

## LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Área de estudo – Jurerê (Florianópolis/SC) .....	70
Mapa 2 – Modelo Digital do Terreno – Jurerê (Florianópolis/SC) .....	72
Mapa 3 – Mapa de Declividade – Jurerê (Florianópolis/SC) .....	74
Mapa 4 – Mapa de Hidrografia – Jurerê (Florianópolis/SC) .....	75
Mapa 5 – Superfície do impenetrável à percussão .....	88
Mapa 6 – Cota do impenetrável à percussão .....	90
Mapa 7 – Superfície do lençol freático.....	92
Mapa 8 – Cota freática .....	94
Mapa 9 – Orientação para fundação: 1 metro de profundidade .....	96
Mapa 10 – Orientação para fundação: 2 metros de profundidade .....	97
Mapa 11 – Tensão admissível para fundação superficial: 1 metro de profundidade	99
Mapa 12 – Tensão admissível para fundação superficial: 2 metros de profundidade .....	101
Mapa 13 – Tensão admissível para fundação superficial: 3 metros de profundidade .....	102
Mapa 14 – Tensão admissível para fundação superficial: 4 metros de profundidade .....	103
Mapa 15 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 1 metro de profundidade.....	105
Mapa 16 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 2 metros de profundidade .....	106
Mapa 17 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 3 metros de profundidade .....	107
Mapa 18 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 4 metros de profundidade .....	108
Mapa 19 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 8 metros de profundidade .....	109
Mapa 20 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 12 metros de profundidade .....	110
Mapa 21 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 16 metros de profundidade .....	111
Mapa 22 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 20 metros de profundidade .....	112
Mapa 23 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 24 metros de profundidade .....	113
Mapa 24 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 28 metros de profundidade .....	114
Mapa 25 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 32 metros de profundidade .....	115
Mapa 26 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 36 metros de profundidade .....	116
Mapa 27 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 40 metros de profundidade .....	117
Mapa 28 – Isovalores de $N_{SPT}$ : 44 metros de profundidade .....	118
Mapa 29 – Comprimento máximo de estaca pré-moldada ( $\emptyset < 30$ cm).....	122

Mapa 30 – Comprimento máximo de estaca pré-moldada ( $\varnothing \geq 30$ cm).....	123
Mapa 31 – Comprimento máximo de estaca hélice contínua .....	124
Mapa 32 – Resolução espacial das sondagens à percussão – Jurerê/SC .....	128

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Profundidade do bulbo de tensões para diferentes geometrias de sapata .....	31
Quadro 2 – Carga de catálogo para diferentes diâmetros de estaca de madeira ....	33
Quadro 3 – Valores limites de $N_{SPT}$ para a parada das estacas .....	33
Quadro 4 – Comparação entre o modelo vetorial e matricial .....	42
Quadro 5 – Atributos do banco de dados geotécnico de Christ (2019) .....	45
Quadro 6 – Mapas digitais e banco de dados SPT .....	67
Quadro 7 – Relação entre a dimensão do <i>buffer</i> e o aumento de dados de sondagem .....	77
Quadro 8 – Descrição da tabela de atributos do banco de dados de sondagem .....	80
Quadro 9 – Número mínimo de observações e distância entre os pontos .....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência de área da profundidade do impenetrável.....	89
Tabela 2 – Frequência de área da cota do impenetrável.....	91
Tabela 3 – Frequência de área da profundidade do lençol freático .....	93
Tabela 4 – Frequência de área da cota freática .....	95
Tabela 5 – Frequência de área para o tipo de fundação .....	98
Tabela 6 – Frequência de área para as faixas de tensão admissível .....	104
Tabela 7 – Frequência de áreas de $N_{SPT}$ para 4 metros.....	119
Tabela 8 – Frequência de áreas para as faixas de $N_{SPT}$ .....	120
Tabela 9 – Frequência de área para os comprimentos máximos das estacas .....	125

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AQsq	Areia Quartzosa sedimentos quaternários
Cde	Cambissolo depósito de encosta
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
ECW	<i>Enhanced Compression Wavelet</i>
ELS	Estado-limite de Serviço
ELU	Estado-limite Último
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Epagri	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
GTSIG	Grupo de Trabalho em Sistemas de Informações Geográficas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Identificador
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MPa	Mega Pascal
NA	Nível de Água
Pde	Plintossolo com substrato depósitos de encosta
PMF	Prefeitura Municipal de Florianópolis
PVgi	Podzólico Vermelho-Amarelo granito ilha
PZsq	Podzol Hidromórfico sedimentos quaternários
RN	Referência de Nível
SAD	<i>South American Datum</i>
SC	Santa Catarina
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SGSD	Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIGSC	Sistemas de Informações Geográficas de Santa Catarina
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>

TIN	Triangulação com Interpolação Linear
UTM	Sistema Universal Transverso de Mercator
WGS	<i>World Geodetic System</i>

### LISTA DE SÍMBOLOS

$F_s$	Fator de segurança global
$N_{SPT}$	Índice de resistência à penetração determinado pelo número de golpes correspondente à cravação do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm
R	Resolução espacial de dados georreferenciados
$R_k$	Resistência característica
$R_{med}$	Resistência média
$S_a$	Solicitação admissível
$S_k$	Solicitação característica
$S_{med}$	Solicitação média
$\sigma$	Tensão
$\sigma_r$	Capacidade de carga
$\emptyset$	Diâmetro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	20
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	22
<b>2.1.1</b>	<b>Ensaio de sondagem à percussão .....</b>	<b>23</b>
2.2	TENSÃO E CARGA ADMISSÍVEL.....	27
<b>2.2.1</b>	<b>Parâmetros e correlações .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Fundações diretas .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Fundações profundas .....</b>	<b>32</b>
2.3	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) .....	34
<b>2.3.1</b>	<b>Conceitos utilizados em uma ferramenta SIG .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Modelos vetoriais e matriciais .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Resolução espacial .....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Banco de dados geotécnico .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Banco de dados geotécnico elaborado por Christ (2019) .....</b>	<b>44</b>
2.4	GEOESTATÍSTICA.....	47
<b>2.4.1</b>	<b>Variável regionalizada.....</b>	<b>48</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Interpolação .....</b>	<b>49</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Triangulação com Interpolação Linear (TIN) .....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Krigagem.....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Semivariograma.....</b>	<b>52</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Validação cruzada .....</b>	<b>54</b>
2.5	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO.....	55
<b>2.5.1</b>	<b>Metodologias brasileiras de mapeamento geotécnico .....</b>	<b>57</b>

<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>60</b>
3.1	CLIMA .....	61
3.2	GEOMORFOLOGIA, GEOLOGIA E PEDOLOGIA.....	62
3.3	UNIDADE GEOTÉCNICAS .....	63
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO DE TRABALHO .....</b>	<b>65</b>
4.1	LEVANTAMENTO DE DADOS PREEXISTENTES.....	67
4.2	AVALIAÇÃO E GEORREFENCIAMENTO.....	68
4.3	DADOS GRÁFICOS.....	68
<b>4.3.1</b>	<b>Dados gráficos – Tratamento dos dados.....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Dados gráficos – Elaboração dos mapas temáticos.....</b>	<b>71</b>
4.3.2.1	<i>Modelo Digital do Terreno - MDT.....</i>	<i>71</i>
4.3.2.2	<i>Mapa de declividade.....</i>	<i>73</i>
4.3.2.3	<i>Mapa de hidrografia.....</i>	<i>75</i>
4.4	DADOS ALFANUMÉRICOS .....	76
<b>4.4.1</b>	<b>Dados de sondagens SPT – Tratamento dos dados.....</b>	<b>76</b>
4.4.1.1	<i>Análise dos dados de impenetrável.....</i>	<i>78</i>
4.4.1.2	<i>Análise dos dados de nível de água.....</i>	<i>79</i>
<b>4.4.2</b>	<b>Dados de sondagem SPT – Definição do banco de dados.....</b>	<b>79</b>
4.5	APLICAÇÃO DE GEOESTATÍSTICA .....	81
<b>4.5.1</b>	<b>Mapas gerais de aptidão para fundações .....</b>	<b>82</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Fundação superficial – Mapa de isovalores de tensão admissível.....</b>	<b>84</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Fundação profunda – Mapa de isovalores de <math>N_{SPT}</math> .....</b>	<b>85</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Mapa de comprimento máximo de estacas .....</b>	<b>85</b>
4.6	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	86
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>87</b>
5.1	CARTAS DE SUPERFÍCIE DO IMPENETRÁVEL À PERCUSSÃO.....	87
5.2	CARTAS DE SUPERFÍCIE FREÁTICA .....	91
5.3	CARTAS DE ORIENTAÇÃO PARA O TIPO DE FUNDAÇÃO .....	95

5.4 CARTAS DE ISOVALORES DE TENSÃO ADMISSÍVEL .....	98
5.5 CARTAS DE ISOVALORES DE $N_{SPT}$ .....	104
5.6 COMPRIMENTO MÁXIMO DE ESTACAS .....	121
5.7 LIMITAÇÕES E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	125
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS....</b>	<b>130</b>
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	130
6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	133
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE – MAPAS DE ISOVALORES DE <math>N_{SPT}</math> PARA AS PROFUNDIDADES DE 1 A 45 METROS .....</b>	<b>140</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do meio físico acerca de seus recursos naturais desempenha um papel essencial no desenvolvimento de sociedades organizadas (HIGASHI, 2006). Dessa forma, a necessidade de implementar formas de representar as características geográficas de uma determinada localidade levou à criação de diversas áreas de estudo relacionadas à gestão territorial, haja vista que o crescimento populacional e a ocupação do espaço desenfreados ocasionam o surgimento de áreas de risco e resultam em grandes impactos ao meio ambiente.

Nesse contexto, o solo constitui o berço de todas as obras de engenharia, tornando imprescindível o conhecimento fidedigno de sua constituição ao longo do espaço geográfico e, em virtude de sua complexidade, exigindo a utilização de ferramentas que possam armazenar, tratar, processar e integrar uma variedade de informações. Assim, o mapeamento geotécnico, por meio da criação de mapas, tem se consolidado cada vez mais como uma forte ferramenta para a descrição do solo e das propriedades geológicas e geotécnicas decorrentes de sua gênese.

Diante do exposto, uma das formas de investigação geotécnica mais tradicional e popularmente difundida é a sondagem à percussão ou SPT, do termo em inglês *Standard Penetration Test*, a qual fornece parâmetros quantitativos e qualitativos acerca do perfil do solo. Além disso, tendo em vista o desenvolvimento tecnológico e a constante demanda dos profissionais por mais informações referentes ao relevo, plataformas de geoprocessamento denominadas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) foram desenvolvidas a fim de permitir a realização de análises complexas.

Cabe mencionar que essas tecnologias viabilizam a automação e a produção de documentos cartográficos digitais por meio da integração de dados de diversas fontes de forma prática e eficaz e da criação de bancos de dados geotécnicos georreferenciados (HIGASHI, 2006). Nesse sentido, frente aos mapas impressos, os mapas digitais são mais versáteis devido à possibilidade de atualização e disposição dinâmica de seus dados, facilitando a visualização e interpretação por parte dos usuários.

Perante as colocações feitas, este trabalho orienta-se no sentido de utilizar um banco de dados de sondagens SPT para o bairro de Jurerê, em Florianópolis, adaptado de acordo com as normativas e a literatura de ciências dos solos e

incrementado com dados provenientes de órgãos oficiais, como o Modelo Digital de Elevação (MDE), mapas setoriais e de cursos de água, desenvolvendo-se mapas temáticos e mapas de aptidão para fundações, os quais, em associação, fornecem o conhecimento prévio a respeito dos principais parâmetros geotécnicos para auxiliar profissionais de engenharia no desenvolvimento de anteprojetos de estruturas de fundações e gestão territorial para o planejamento e o zoneamento urbano.

Ademais, observa-se um potencial estímulo para trabalhos e estudos futuros que visem a atualização ou expansão do banco de dados utilizado, permitindo o desenvolvimento de outras análises como o perfil estratigráfico do solo ou sazonalidade do lençol freático.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver cartas de aptidão para fundações superficiais e profundas utilizando um banco de dados de sondagem SPT, por meio de uma ferramenta SIG, para o bairro de Jurerê – Florianópolis/SC.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Este estudo propõe-se a cumprir os seguintes objetivos específicos, desenvolvidos em consonância com o objetivo geral:

- a) Isolar os dados de sondagem à percussão para a área de estudo e complementar o banco de dados geotécnico criado por Christ (2019) visando à aplicação da geoestatística.
- b) Modelar os dados para a interpolação pelo método da krigagem.
- c) Elaborar mapas temáticos para a área de estudo: Modelo Digital do Terreno (MDT), declividade e hidrografia.
- d) Desenvolver cartas de aptidão para fundações a partir de sondagens SPT: superfície do impenetrável à percussão, superfície freática, orientação para o tipo de fundação, tensões admissíveis para fundações superficiais, isovalores de  $N_{SPT}$  e comprimento máximo de estacas para fundações profundas.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 contém a introdução, em que é contextualizada a inserção do trabalho, seus objetivos gerais, bem como os objetivos específicos para cumprir os resultados propostos, e a organização dos capítulos.

Já o Capítulo 2 apresenta todo o embasamento teórico fundamental para o desenvolvimento dos objetivos do trabalho. É composto pelas seções de investigação geotécnica, de tensão e carga admissível, de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), de geoestatística e de mapeamento geotécnico.

Por sua vez, o Capítulo 3 tem como propósito apresentar a área de estudo e suas principais características do meio físico como clima, geomorfologia, geologia, pedologia e unidades geotécnicas.

Os materiais e método de trabalho utilizados encontram-se no Capítulo 4, o qual explica detalhadamente as fontes em que os dados foram obtidos, o tratamento aplicado a eles e os critérios adotados para a elaboração das cartas de aptidão para fundações.

No Capítulo 5 são exibidos os mapas de profundidade do impenetrável à percussão e do lençol freático, os mapas de orientação para fundações superficiais e profundas, o mapa de tensões admissíveis para fundações superficiais e os mapas de isovalores de  $N_{SPT}$  e comprimento máximo de estacas para fundações profundas, acompanhados das análises quantitativas e qualitativas de suas principais características. Ademais, são expostas as limitações do mapeamento, assim como a validação desses resultados.

Finalmente, o Capítulo 6 encerra o trabalho com as principais considerações acerca do conteúdo produzido e sugestões para o aprimoramento do presente estudo em trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo tem como objetivo elaborar o embasamento teórico utilizado para o desenvolvimento do trabalho. São abordados os assuntos de investigação geotécnica, a apresentação das correlações para determinação das tensões admissíveis dos elementos de fundação, a conceituação e as aplicações da ferramenta SIG, definição dos conceitos de geoestatística e, por fim, a metodologia acerca do mapeamento geotécnico.

### 2.1 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

O solo desempenha um papel fundamental ao receber as cargas provenientes das estruturas, portanto, a realização de uma investigação geotécnica adequada e o mais completo conhecimento possível de seu comportamento mecânico, bem como de suas características, é imprescindível para o desenvolvimento de projetos de engenharia. Segundo Caputo (1996), o objetivo é determinar a interação do sistema terreno-fundação-estrutura a fim de prever e adotar medidas que evitem recalques prejudiciais ou a ruptura do terreno, alcançando a maior estabilidade e o menor custo da obra.

Em virtude da alta complexidade do solo – e de não poder ser observado em sua totalidade –, os ensaios laboratoriais e em campo são as principais ferramentas responsáveis pelo fornecimento dos parâmetros necessários a elaboração dos projetos de fundações. Para isso, o engenheiro deve utilizar as normativas, o histórico da composição do solo da região e sua experiência técnica a fim de obter resultados precisos a partir desses ensaios. Caramenz e Higashi (2011) afirmam que a obtenção de dados coerentes e precisos sobre as propriedades do solo é indispensável para um estudo geotécnico confiável, com credibilidade para uso na elaboração de um banco de dados geotécnico. Esse fato é reforçado por Caputo (1996) ao esclarecer que a confiabilidade dos resultados é alcançada quando esses estudos são orientados por empresas e profissionais idôneos e com experiência, ressaltando que por mais completa que seja a investigação, sempre existe um risco associado às condições desconhecidas.

Diante disso, a falta de investigação ou interpretação de dados inadequada compromete o desempenho da fundação, ocasionando patologias que, além de

onerar o custo da obra em valores superiores ao previsto, podem implicar em interdições da estrutura, litígios, entre outras complicações (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2015). Em relação aos custos envolvidos na execução de sondagens, o mesmo varia de 0,2% e 0,5% do custo total de obras convencionais no Brasil (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Caputo (1996) é categórico ao declarar que o mesmo é negligenciável, em vista aos custos de recuperação ou do próprio colapso da estrutura. Isso é ratificado por Caraméz e Higashi (2011) ao afirmarem que os custos envolvidos com estudos geotécnicos adequados são extremamente inferiores aos necessários para recuperar problemas posteriores à execução.

Os ensaios reconhecidos e de prática consagrada em todo o mundo, de acordo com Hachich *et al.* (1998) e Schnaid e Odebrecht (2012), são: o de sondagem de reconhecimento simples – do termo em inglês, *Standard Penetration Test* (SPT) –, o ensaio de penetração de cone – *Cone Penetration Test* (CPT), *Vane Test*, pressiômetros (de Ménard e auto-perfurantes) e dilatômetro. Dentre esses, Schnaid e Odebrecht (2012) reconhecem o SPT como a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação geotécnica em praticamente todo o mundo.

Perante o exposto e a utilização sistemática dos resultados de SPT pelos métodos rotineiros de projeto de fundações diretas e indiretas, especialmente no Brasil, de acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), esse tipo de sondagem foi escolhido para a compor a base de dados utilizada no presente trabalho. Nesse sentido, a seção 2.1.1 discorre a respeito do método de execução e dos resultados provenientes do ensaio de SPT.

### **2.1.1 Ensaio de sondagem à percussão**

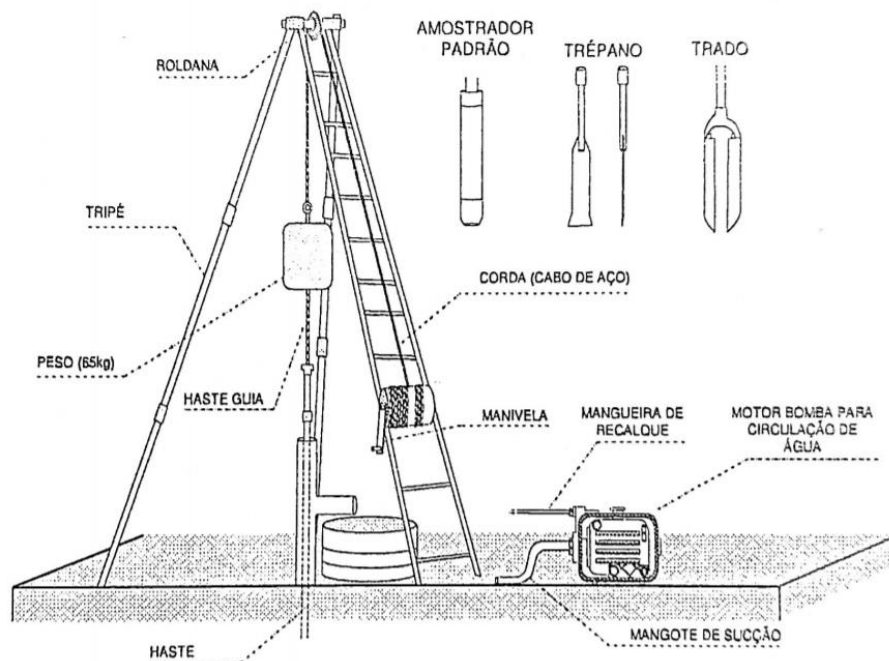
A sondagem à percussão é um procedimento geotécnico de campo capaz de amostrar o subsolo. Quando associada ao ensaio de penetração dinâmica SPT, mede a resistência do solo ao longo da profundidade perfurada (HACHICH *et al.*, 1998). Existem duas abordagens distintas ao realizar a análise dos resultados para a elaboração de um projeto geotécnico, os métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos têm fundamentação estatística, a partir da qual os resultados dos ensaios são correlacionados ao desempenho de obras geotécnicas. Já os métodos indiretos estimam as propriedades do solo, utilizando como base os conceitos e formulações da Mecânica dos Solos. A escolha da abordagem (direta ou indireta) depende da

técnica de ensaio utilizada, do tipo de solo investigado, de normas e códigos específicos, bem como de práticas regionais (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

A NBR 6484 – Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio (ABNT, 2020) define o *Standard Penetration Test* (SPT) como um método de investigação do solo que consiste na perfuração e cravação dinâmica de um amostrador-padrão para determinação do índice de resistência à penetração  $N_{SPT}$ . Além disso, o ensaio fornece informações como estratigrafia do solo e as profundidades de ocorrência de cada tipo de solo, bem como a indicação do nível de água.

De acordo com a norma supracitada, esse ensaio pode ser realizado através de um sistema manual ou mecanizado com o auxílio de uma torre desmontável ou tripé equipado com roldanas e cabos para a suspensão do martelo padronizado, hastes de perfuração e de cravação do amostrador-padrão, trado, trépano de lavagem e uma bomba d'água motorizada. A configuração de instalação pode ser conferida na Figura 1.

Figura 1 – Configuração de instalação para equipamentos do ensaio SPT



Fonte: Higashi (2016)

Antes de iniciar a instalação dos equipamentos, deve-se realizar a locação – fornecida em planta pelo contratante e, preferencialmente, com a cota da referência de nível (RN) georreferenciada – e nivelamento dos furos de sondagem. Esses pontos são marcados mediante a cravação de um piquete devidamente identificado, de modo

a servirem como referência de nível para a execução da sondagem e determinação da cota através de nivelamento topográfico.

Uma vez localizado o furo de sondagem e montados os equipamentos, inicia-se a escavação de 1 metro de profundidade com o trado, coletando uma amostra representativa do solo para, posteriormente, examinar e identificar a espessura da camada com presença significativa de raízes. Ao atingir o primeiro metro de profundidade, instala-se o primeiro segmento do tubo de revestimento.

Em seguida, conecta-se o amostrador-padrão à composição de cravação, descendo-o livremente até ser apoiado no fundo do furo de sondagem. É feita a marcação de 45 cm na haste de perfuração divididos em três segmentos de 15 cm e, então, o amostrador é golpeado sucessivamente com o martelo padronizado de 65 kg elevado a uma altura de 75 cm por meio de um cabo têxtil. O número de golpes necessários para a cravação de cada segmento de 15 cm é anotado separadamente, obtendo-se o  $N_{SPT}$  expresso pela soma do número de golpes requeridos para a segunda e terceira camadas de 15 cm. A cravação é interrompida antes dos 45 cm em duas situações, a saber:

- Se em qualquer dos três segmentos de 15 cm, o número de golpes ultrapassar 30.
- Se o amostrador-padrão não avançar durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo.

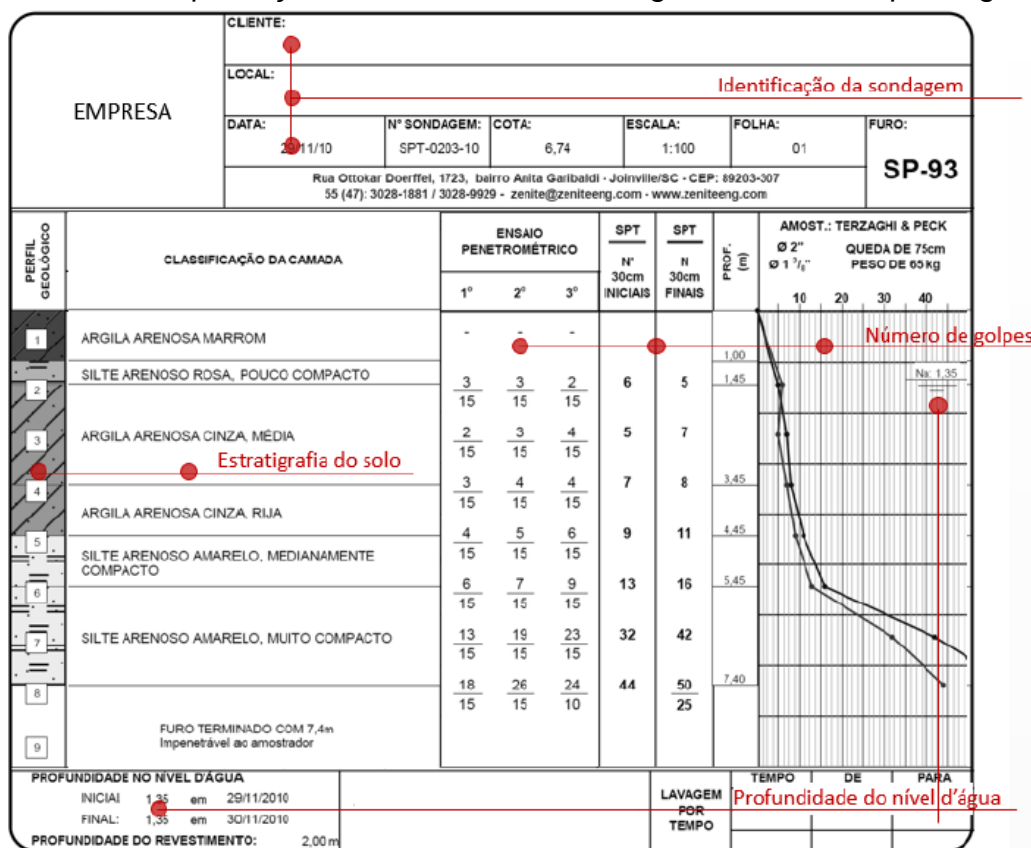
Perante o exposto, ao final da sondagem a profundidade do impenetrável deve ser registrada no relatório. Ademais, devem ser colhidas amostras do solo por meio do amostrador-padrão para exame tátil-visual com o intuito de determinar as características do solo como granulometria, plasticidade, cor e origem.

Na sequência, intercaladas as operações de ensaio e amostragem, utiliza-se o trado helicoidal até se atingir o nível do lençol freático ou caso o avanço seja inferior a 5 cm após 10 min de operação e, a partir de então, a perfuração prossegue com o uso de lavagem realizada pelo trépano através da circulação de água, onde o material escavado é removido pela bomba d'água motorizada. Durante a operação, é preciso anotar as profundidades em que ocorrem as transições de camadas detectadas pela mudança na coloração do material trazido à superfície pelo trado ou pela água em circulação. Esse procedimento é realizado até que seja alcançado o critério de

paralisação definido de acordo com as necessidades do projeto, sob responsabilidade técnica do contratante, ou pelos critérios preconizados pela NBR 6484 (2020).

Por fim, ao constatar a presença de água no furo ou ao término da sondagem, deve ser feito o registro da profundidade após o máximo rebaixamento da coluna de água e após decorridas, no mínimo, 12 h a partir do encerramento do ensaio para a determinação do nível do lençol freático. Posteriormente, todos os dados coletados são apresentados em um perfil do subsolo investigado e documentados em laudo de sondagem (SANTOS, 2016), conforme exemplificado pela Figura 2.

Figura 2 – Exemplificação de um laudo de sondagem SPT de um ponto genérico



Fonte: Santos (2016)

Acerca da determinação da quantidade e locação das sondagens durante os estudos preliminares, a NBR 8036 – Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios (ABNT, 1983) estabelece o número de sondagens e sua localização em planta em função da área de projeção em planta da edificação, conforme os seguintes critérios:

- Para edifícios com área da projeção em planta de até 1200 m<sup>2</sup>, fazer uma sondagem a cada 200 m<sup>2</sup>.

- Para edifícios com área de projeção em planta entre 1200 m<sup>2</sup> e 2400 m<sup>2</sup>, fazer uma sondagem para cada 400 m<sup>2</sup> que excederem de 1200 m<sup>2</sup>.
- Para edifícios com área de projeção em planta acima de 2400 m<sup>2</sup>, fixar o número de sondagens de acordo com o plano particular da construção.

Além do mais, em quaisquer circunstâncias, o número mínimo de sondagens deve ser:

- Dois para área de projeção em planta do edifício até 200 m<sup>2</sup>.
- Três para área entre 200 m<sup>2</sup> e 400 m<sup>2</sup>.

Em casos em que não houver disposição em planta dos edifícios, o número de sondagens deve ser fixado de forma que a distância máxima entre elas seja de 100 m, com um mínimo de três sondagens.

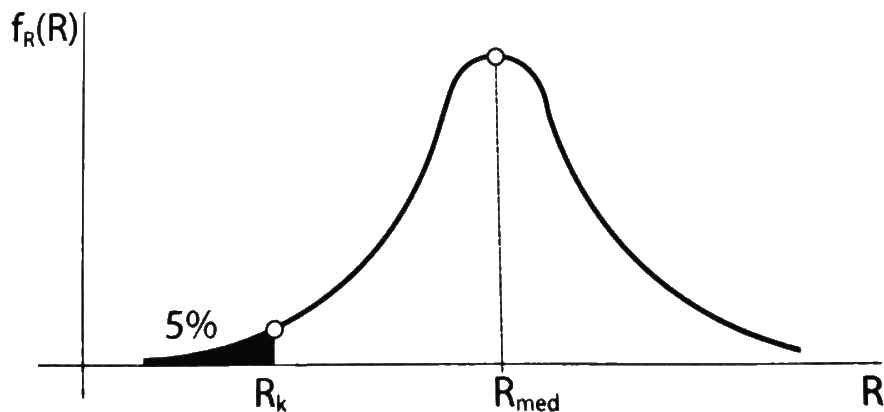
Diante do exposto, confirmada a simplicidade do ensaio, pela obtenção de um valor numérico de ensaio que pode ser correlacionado ao desempenho geotécnico do solo e, apesar de críticas pertinentes ao procedimento, esse é o processo dominante na prática de Engenharia de Fundações (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Na seção 2.2, são apresentadas as correlações que utilizam os resultados do ensaio de SPT para o cálculo da tensão admissível.

## 2.2 TENSÃO E CARGA ADMISSÍVEL

O conjunto de fundações diretas e indiretas transmite e propaga uma tensão que deve ser suportada pelo maciço de solo. Por meio da investigação geotécnica, são obtidos os parâmetros geotécnicos do solo necessários na determinação de sua capacidade de carga ( $\sigma_r$ ) – a tensão que leva o maciço à ruptura – e de suas deformações (recalques, vibrações). Devido à alta variabilidade do solo e à disposição das fundações ao longo do terreno, essa capacidade de carga varia de acordo com o perfil do solo e as dimensões dos elementos de fundação. Cintra, Aoki e Albiero (2011) atribuem a esse fator a possibilidade de tratar a capacidade de carga como uma variável aleatória, permitindo a construção do gráfico da função de densidade de probabilidade em que a  $\sigma_r$  é trocada por R para representar a resistência de forma

geral, conforme a Figura 3. Surgem, então, os valores de resistência média ( $R_{med}$ ) e resistência característica ( $R_k$ ).

Figura 3 – Distribuição normal dos valores de capacidade de carga



Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Analogamente, a força atuante nas fundações, transmitida para o solo através da área de contato, dividida pela área resulta em uma tensão ( $\sigma$ ), supostamente distribuída uniformemente. Esses valores de  $\sigma$ , substituídos por  $S$  para obter uma representação geral de solicitação, também variam dentro do conjunto de fundações diretas e indiretas, dando origem ao valor de solicitação média ( $S_{med}$ ) e de solicitação característica ( $S_k$ ).

Desses conceitos de resistência e solicitação, média e característica, surgem duas filosofias de projeto que representam a verificação de segurança em termos dos estados-limites últimos – a de solicitação admissível ( $S_a$ ), ou tensão admissível para fundações diretas e carga admissível para fundações profundas, e a dos valores de cálculo (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

Em relação à filosofia de valores de cálculo, essa utiliza fatores de ponderação parciais, também chamados de fatores de segurança parciais, para minorar a resistência característica e para majorar a solicitação característica, obtendo os valores de projeto. Já o conceito de tensão e carga admissível utiliza o  $R_{med}$  minorado pelo fator de segurança global ( $F_s$ ), garantindo que as solicitações em cada elemento de fundação não superem a solicitação admissível, de acordo com a Equação (1):

$$S_a = \frac{R_{med}}{F_s} \quad (1)$$

Aoki (2010) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2011) observa que essa substituição da curva por um ponto referente ao valor médio ou ao característico, dependendo da

filosofia de projeto adotada, desconsidera a variabilidade dos valores de resistência e de sollicitação, tornando imprescindível complementar o projeto com a análise de confiabilidade para a verificação da probabilidade de ruína da fundação.

De acordo com Cintra, Aoki e Albiero (2011), os geotécnicos projetistas de fundações dão preferência à filosofia de tensão admissível ou carga admissível, apontando que isso talvez se deva ao fato de que, na verificação do estado-limite de serviço (ELS), a estimativa de recalque dos elementos de fundação não pode considerar valores de cálculo das sollicitações para posterior comparação com o recalque admissível.

Face ao exposto, este capítulo se propõe a apresentar os parâmetros e correlações utilizados no trabalho para determinação das tensões ou cargas admissíveis.

### **2.2.1 Parâmetros e correlações**

Visando a obtenção da tensão admissível para fundações diretas e da carga admissível para as fundações profundas, a NBR 6122: Projeto e execução de fundações (ABNT, 2019) prevê os métodos teóricos e semiempíricos. De acordo com o item 7.3.2 da norma,

podem ser empregados métodos analíticos (teorias de capacidade de carga) nos domínios de validade de sua aplicação, desde que contemplem todas as particularidades do projeto, inclusive a natureza do carregamento (drenado ou não drenado). (ABNT, 2019, p. 22)

Os métodos teóricos principais para o cálculo da capacidade de carga citados por Cintra, Aoki e Albiero (2011) para fundações diretas são a teoria de Terzaghi e preposição de Vesic, contudo, existem outros métodos como o de Skempton, o de Meyerhof e o de Brinch Hansen. Ademais, os autores também explanam que as fórmulas teóricas para fundações profundas são diversas devido à dificuldade de ajustar um bom modelo físico e matemático acerca da ruptura destas.

Em relação aos métodos semiempíricos, segundo a norma supracitada,

são métodos que relacionam resultados de ensaios (tais como o SPT, CPT etc.) com tensões admissíveis ou tensões resistentes de cálculo. Devem ser observados os domínios de validade de suas aplicações, bem como as dispersões dos dados e as limitações regionais associadas a cada um dos métodos. (ABNT, 2019, p. 22)

Portanto, esses são métodos baseados em correlações com resultados de campo. Por fim, uma vez que os modelos semiempíricos englobam os dois tipos de fundações, esses serão os métodos de escolha para a obtenção das tensões e cargas admissíveis e as próximas seções têm como objetivo descrever o método de cálculo para fundações diretas e profundas.

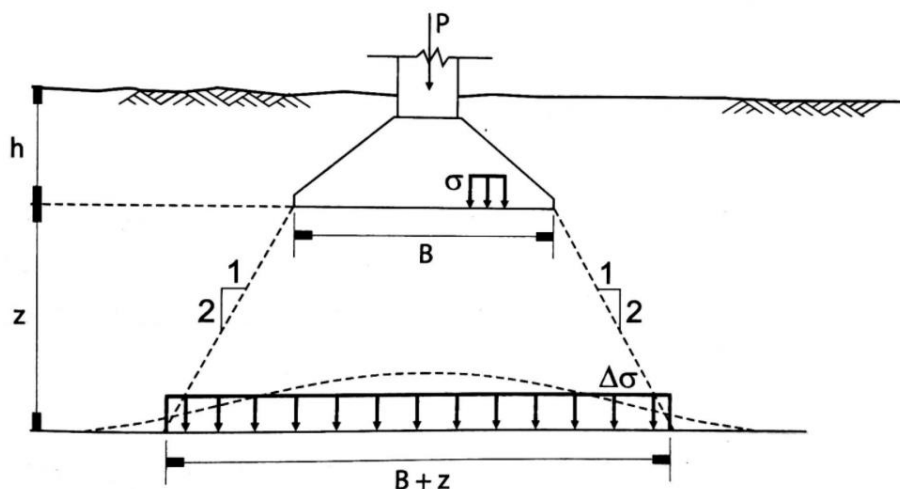
### 2.2.2 Fundações diretas

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), são elementos de fundação que estão assentados a uma profundidade menor que duas vezes sua menor dimensão. Considerando a aplicação de uma força de compressão  $P$  no topo de uma sapata com comprimento  $B$  e largura  $L$ , a tensão se distribui uniformemente para o maciço de solo segundo a Equação (2):

$$\sigma = \frac{P}{B.L} \quad (2)$$

É admitido que a propagação de tensões ocorra de forma simplificada, para efeito de cálculo, mediante uma inclinação de 1:2 ou  $27^\circ$  (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011), *vide* Figura 4, em que  $z$  é a distância da base da sapata ao topo da segunda camada.

Figura 4 – Exemplificação da propagação de tensões



Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Essa configuração resulta em uma profundidade  $z = 2B$ , em que a parcela propagada de tensões pela base corresponde a 10% da tensão aplicada. A partir dessa configuração, a Mecânica dos Solos define o conceito de bulbo de tensões, ou

seja, a área de influência das tensões resultantes do carregamento do elemento de fundação. O conhecimento e análise do bulbo de tensões é essencial, uma vez que o solo é estratificado em camadas distintas, sendo necessário determinar sua profundidade para calcular a capacidade de carga e, posteriormente, a tensão admissível. Para efeitos práticos em fundações, Cintra, Aoki e Albiero (2011) recomendam os valores de profundidade para o bulbo de tensões apontados pelo Quadro 1.

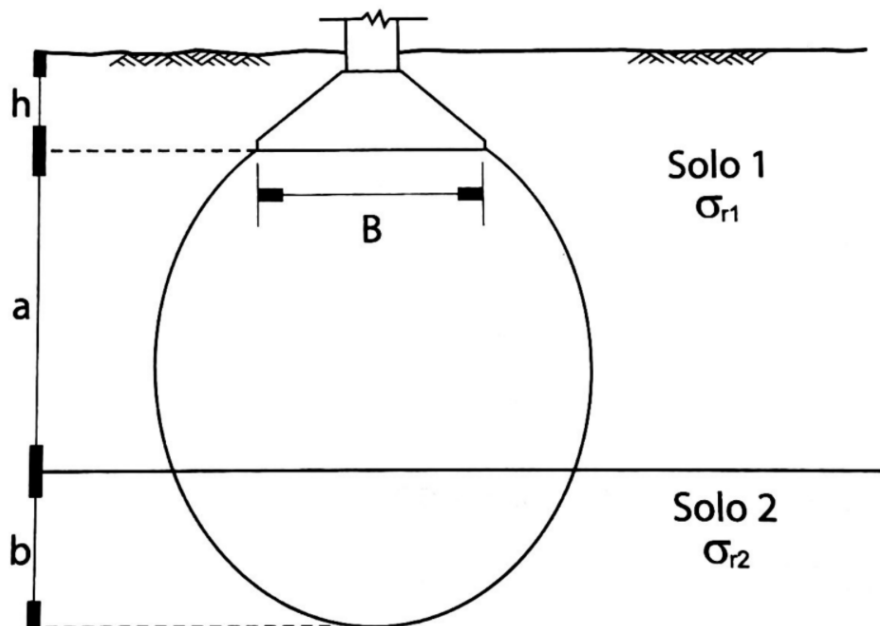
Quadro 1 – Profundidade do bulbo de tensões para diferentes geometrias de sapata

Geometria da sapata	Profundidade do bulbo de tensões
Sapata circular ou quadrada ( $L = B$ )	$z = 2B$
Sapata retangular ( $L = 2$ a $4B$ )	$z = 3B$
Sapata corrida ( $L \geq 5B$ )	$z = 4B$

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Conclui-se que a superfície de ruptura se desenvolve no interior do bulbo de tensões e, portanto, apenas as camadas, bem como suas respectivas propriedades geotécnicas, dentro do mesmo devem ser consideradas. A Figura 5 exemplifica a representação do bulbo de tensões.

Figura 5 – Exemplificação do bulbo de tensões



Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Diante disso, esses conceitos são aplicados aos métodos teóricos ou semiempíricos para determinação da tensão admissível, a qual as tensões exercidas pelos elementos de fundação podem atuar com o risco mínimo de ruptura do solo.

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), no meio técnico brasileiro, a correlação conhecida para a obtenção da tensão admissível em fundações diretas por sapatas, em função do índice de resistência à penetração do SPT, é representada pela Equação (3):

$$\sigma_a = \frac{N_{spt}}{50} + q \text{ (MPa) com } 5 \leq N_{SPT} \leq 20 \quad (3)$$

Em que o  $N_{SPT}$  é o valor médio no bulbo de tensões e  $q$  é a parcela correspondente à sobrecarga, caso seja considerada.

Mello (1975) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2011) relata o uso, na prática profissional, de uma correlação sem distinção de solo conforme a Equação (4):

$$\sigma_a = 0,1(\sqrt{N_{SPT}} - 1) \text{ (MPa) com } 4 \leq N_{SPT} \leq 16 \quad (4)$$

Por fim, Teixeira (1996) *apud* Cintra, Aoki e Albiero (2011) desenvolve uma correlação para areias, a partir da equação de capacidade de carga de Terzaghi, *vide* Equação (5):

$$\sigma_a = 0,05 + (1 + 0,4B) \frac{N_{SPT}}{100} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

É importante salientar que as correlações já possuem o fator de segurança implícito, obtendo-se a tensão admissível diretamente.

Em relação à escolha da fundação profunda, Rebello (2008) aconselha que essa deva ser feita pelo SPT e pela profundidade, sendo a fundação direta mais econômica para  $N_{SPT}$  maior ou igual a 8 e profundidade não superior a 2 metros. Caso contrário, a escolha mais indicada é pela fundação profunda.

### 2.2.3 Fundações profundas

A definição normatizada pela NBR 6122 é de que as fundações profundas são

aquelas que transmitem a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e, no mínimo, 3 m. (ABNT, 2019, p. 5)

De acordo com Cintra e Aoki (2010), uma forma simplificada de descrever o funcionamento das fundações profundas é de que, conforme a carga é aplicada, são mobilizadas tensões resistentes pelo atrito lateral até sua mobilização máxima e, em

seguida, a resistência de ponta passa a atuar. Conforme mencionado anteriormente, apesar de existirem diversas propostas para modelos teóricos na determinação da capacidade de carga para estacas, é muito difícil ajustar um bom modelo matemático e, portanto, são utilizados modelos semiempíricos como os de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), Teixeira (1996), entre outros. Cintra e Aoki (2010) atentam para o fato de que além da carga admissível, a qual corresponde ao aspecto geotécnico, é preciso considerar a carga admissível da estaca, também chamada de carga de catálogo, exemplificadas pelo Quadro 2 para estacas de madeira.

Quadro 2 – Carga de catálogo para diferentes diâmetros de estaca de madeira

Madeira	Diâmetro (cm)	Carga de catálogo (kN)*
$\sigma_e = 4,0 \text{ MPa}$	Ø 20	150
	Ø 25	200
	Ø 30	300
	Ø 35	400
	Ø 40	500

\*Esses valores representam apenas uma ordem de grandeza, pois dependem do tipo e da qualidade da madeira.

Fonte: Alonso (1998a) *apud* Cintra e Aoki (2010)

Além disso, Cintra e Aoki (2010) recomendam que todo projeto geotécnico culmine com a previsão da cota de parada das estacas, a qual pode ser conferida no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores limites de  $N_{SPT}$  para a parada das estacas

Tipo de estaca		$N_{SPT}$ limite
Pré-moldada de concreto	Ø < 30 cm	$15 < N_{SPT} < 25$ $\sum N_{SPT} = 80$
	Ø ≥ 30 cm	$25 < N_{SPT} \leq 35$
Perfil metálico		$25 < N_{SPT} \leq 55$
Tubada (oca, ponta fechada)		$20 < N_{SPT} \leq 40$
Strauss		$10 < N_{SPT} \leq 25$
Franki	Em solos arenosos	$8 < N_{SPT} \leq 15$
	Em solos argilosos	$20 < N_{SPT} \leq 40$
Estação e diafragma, com lama bentonítica		$30 < N_{SPT} \leq 80$
Hélice contínua		$20 < N_{SPT} \leq 45$
Ômega		$20 < N_{SPT} \leq 40$
Raiz		$N_{SPT} \geq 60$ (penetra na rocha sã)

Fonte: Cintra e Aoki (2010)

Enfim, em posse dos resultados dos ensaios de sondagens e escolhida a correlação para obtenção das tensões admissíveis, é fundamental utilizar uma

ferramenta adequada para o tratamento desses dados e auxiliar na análise para a escolha das fundações. Portanto, a próxima seção discorre a respeito dos Sistemas de Informações Geográficas.

### 2.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

O conhecimento sobre a distribuição geográfica de recursos naturais sempre foi uma importante atividade das sociedades organizadas e, em decorrência disso, a ação antrópica tem causado impactos ambientais que contribuem para uma crescente demanda por informações geográficas, o que requer uma análise mais detalhada que combine diversos mapas e dados (HIGASHI, 2006). Nesse sentido, graças ao desenvolvimento simultâneo da tecnologia computacional e pela obtenção de imagens via satélite, tornou-se possível integrar e representar essas informações por intermédio dos Sistemas de Informações Geográficas. Esse campo do conhecimento é denominado de Geoprocessamento, o qual utiliza técnicas temáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica, caracterizando-se pelo grande fator de universalização e compartilhamento de informações que, por sua vez, são a matéria prima responsável pela qualidade das decisões tomadas pelos administradores e influenciam as áreas de Cartografia, Geotecnia, Transportes, entre outros (CALIJURI, 2006 e HIGASHI, 2006). Apesar de uma tecnologia relativamente nova no Brasil, os Sistemas de Informações Geográficas são largamente utilizados, possibilitando a visualização dos processos computacionais empregados para a criação de variados mapas temáticos (HIGASHI, 2006).

Para Chang (2019), um Sistema de Informações Geográficas captura, armazena, analisa, gerencia e apresenta dados digitalizados associados a um ou mais locais em um mapa. O sistema é baseado em computadores e armazena dados em uma série de camadas e, por meio da combinação dessas camadas ou dados, fornecem novas informações e interpretações de uma área.

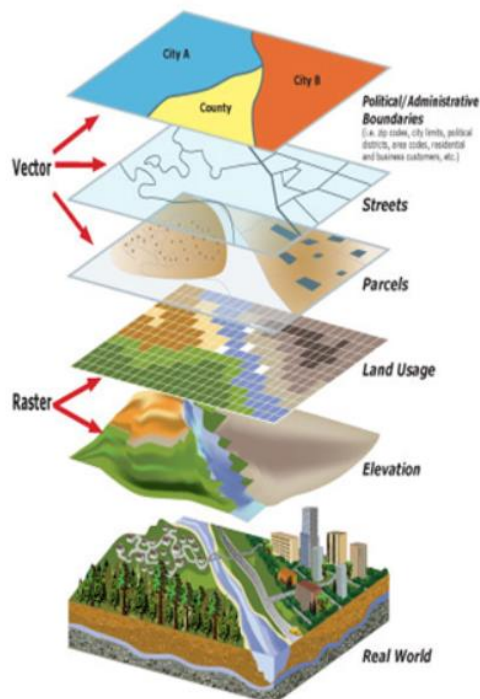
Burrough *et al.* (2015), por sua vez, definem o SIG como um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados espaciais do mundo real para determinados propósitos. Além disso, segundo Higashi (2006), as ferramentas computacionais para o geoprocessamento como o SIG, permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados, tornando possível a automação e produção de documentos cartográficos.

Ademais, apesar de existirem diversos *softwares* de SIG, todos eles possuem quatro funcionalidades em comum (BURROUGH *et al.*, 2015), a saber:

- Inserção e validação de dados.
- Armazenamento e gerenciamento do banco de dados.
- Saída de dados e visualização.
- Tratamento, análise e modelagem de dados.

Os autores discorrem que a aquisição de dados pode ser realizada de inúmeras formas, desde dados digitais preexistentes, observações de campo ou da digitalização de mapas e imagens. O SIG trata esses dados de acordo com as relações espaciais entre os objetos geográficos e, para tal, é necessário que no processo de integração sejam consideradas as relações topológicas para a tradução dessas informações para o modelo computacional. Outro aspecto importante é a apresentação desses dados que pode ser feita em formato de mapas, os quais correspondem às informações espaciais georreferenciadas (HIGASHI, 2006; BURROUGH *et al.*, 2015). Esses processos de tradução das entidades do meio físico em ambiente SIG são ilustrados pela Figura 6.

Figura 6 – Superposição de dados espaciais no SIG



Fonte: IRWMP<sup>1</sup> (2013)

<sup>1</sup> Disponível em: <https://inyo-monowater.org/resources/giswhat/layers/>. Acesso em: 13/12/2020.

Já a Figura 7 elenca os componentes de uma ferramenta SIG segundo UNESCO (2012), Bolstad (2016) e Chang (2019).

Figura 7 – Componentes de um SIG



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

De acordo com os autores, a plataforma SIG é composta pelos dados – os quais representam as propriedades quantitativas e qualitativas referentes às feições geográficas –, pelos métodos utilizados para gerar os modelos computacionais, pelos usuários (desenvolvedores, engenheiros, gestores) que interagem com a ferramenta, pelo *software* SIG utilizado e pelo *hardware* capaz de armazenar e processar esses dados.

Por fim, o SIG permite várias aplicações em diversos campos do conhecimento e, de acordo com Burrough *et al.* (2015), essa tecnologia auxilia os engenheiros civis a planejarem o uso e ocupação do solo e estimar custos de construções, os médicos a mapearem doenças, os departamentos de polícia conseguem determinar a disposição espacial de diferentes crimes, entre outros. Em relação ao campo do mapeamento geotécnico, as aplicações do SIG

proporcionam a elaboração de mapas temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análise de risco, avaliação geotécnica e gerenciamento ambiental, além de possibilitarem análises como um sistema de apoio à tomada de decisões, bem como um sistema de gerenciamento de informações. (HIGASHI, 2006, p. 19)

Perante o exposto, é fundamental conhecer os conceitos envolvidos na modelagem de informações geográficas em ambientes SIG.

### **2.3.1 Conceitos utilizados em uma ferramenta SIG**

Os dados em SIG representam versões simplificadas de feições físicas do mundo real como rodovias, montanhas, camadas de solo, entre outros. Esses modelos digitais são constituídos por um conjunto de regras para converter essas feições em atributos e formas geométricas, os quais incluem informações a respeito da localização espacial e da dimensão dessas entidades (UNESCO, 2012 e BOLSTAD, 2016). Bolstad (2016) acrescenta que esses objetos são representações abstratas da realidade armazenadas em bancos de dados espaciais e, portanto, suas representações são imperfeitas, haja vista a limitação da forma como são registradas.

Nesse sentido, são elencados os conceitos fundamentais para a compreensão de como o meio físico pode ser representado em ambiente SIG.

#### **a) Topologia**

Todas as informações geográficas podem ser reduzidas a elementos básicos como pontos, linhas e áreas (polígonos). A topologia expressa a relação entre essas feições (CHANG, 2019). Além disso, Higashi (2006) afirma que o SIG utiliza uma estrutura de dados especial para definir a topologia do mapa, por meio de nós, arcos e áreas, os quais são associados à dados atributos e dados geométricos espaciais, o que permite a melhor descrição dessas informações. Chang (2019) destaca que a importância da topologia é de manter a qualidade e integridade dos dados, uma vez que diversas operações não utilizam coordenadas, permitindo a detecção de linhas que não se unem, de polígonos abertos, por exemplo. Ademais, o SIG permite o acesso aos dados espaciais e atributos ao mesmo tempo, além de possibilitar a consulta e o relacionamento desses dados (HIGASHI, 2006).

#### **b) Atributos**

Bolstad (2016) discorre que atributos, também chamados de itens ou variáveis, são utilizados para armazenar características de uma feição geográfica e no SIG podem ser listagens de números ou caracteres de características descritivas como cor, peso, tipo de solo, entre outros. Constumam ser representados por tabelas, em que cada linha corresponde a um objeto espacial e cada coluna a um atributo.

### c) Dados vetoriais

Dados vetoriais utilizam objetos geométricos como pontos, linhas e polígonos para representar feições espaciais bem definidas e caracterizadas por pares ordenados  $(x, y)$  em um sistema de coordenadas plano (HIGASHI, 2006 e CHANG, 2019).

Higashi (2006), Longley (2015) e Chang (2019) caracterizam esses objetos fundamentais conforme o seguinte:

- Ponto: adimensional, é um par ordenado  $(x, y)$  de coordenadas espaciais ou do conjunto desses. O ponto pode ser utilizado para identificar localizações ou ocorrências no espaço como a localização de ensaios, ocorrências de doenças e localização de espécies vegetais.
- Linha: unidimensional, além da localização possui a propriedade de comprimento. É um conjunto de pontos conectados, podendo também ser formada pela conexão de segmentos de linhas retas. Normalmente associadas a uma topologia arco-nó.
- Polígono: possui duas dimensões e armazena as propriedades de área e perímetro, além da localização. Definido por uma série de pontos ou vértices conectados por linhas fechadas e não interseccionadas, cujo perímetro ou seus limites definem uma área, em que o último ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro da próxima.

Longley (2015) destaca que é uma forma mais simples e eficiente de representação do que os objetos matriciais (*raster*).

### d) Tabela de feições

Representa uma tabela ligada às camadas (*layers*) que compõe os dados em ambiente SIG e armazena as informações sobre o conjunto de feições, as linhas da tabela, destes (HIGASHI, 2006).

### e) Mapas temáticos

Mostram uma região geográfica particionada em polígonos, segundo valores relativos a certo tema como uso do solo, dados de elevação, unidades geológicas, entre outros. Esses valores são inseridos por meio de digitalização ou de forma automatizada, a partir de classificação de imagens.

Uma vez assimilados esses conceitos, é possível diferenciar os dois modelos principais que constituem a representação computacional de objetos reais, os modelos vetoriais e matriciais (*raster*).

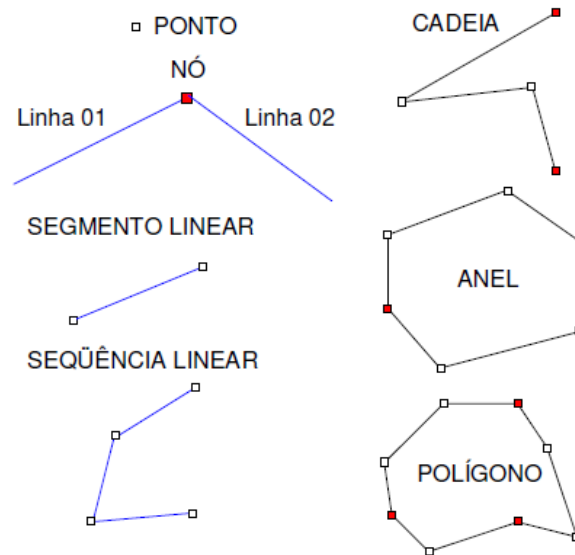
### **2.3.2 Modelos vetoriais e matriciais**

Longley (2015) afirma que existem dois métodos utilizados para reduzir fenômenos geográficos em formas passíveis de codificação em bancos de dados computacionais, esses métodos são denominados de vetorial e matricial. Burrough e McDonnell (1998) complementam ao explicar que os modelos de dados geográficos são formalizações equivalentes aos modelos conceituais da percepção humana de fenômenos geográficos.

Nesse sentido, a forma mais simples e frequente de representar a realidade em modelos digitais é usando entidades básicas especificadas por atributos e localização geográfica, as quais são divididas em três elementos geográficos elementares: o ponto, a linha e o polígono. Estes são elementos dos modelos vetoriais e representam o espaço físico como uma série de entidades discretas geograficamente referenciadas e imutáveis, ou seja, não contém informação temporal ou variabilidade espacial (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Segundo UNESCO (2012), os pontos podem representar locais específicos como cidades, as linhas reproduzem córregos, estradas, linhas de força e tubulações, já os polígonos retratam formas complexas como limites territoriais e áreas de estudo. Ademais, Higashi (2006), por meio da Figura 8, exemplifica os objetos que podem ser criados dentro do modelo vetorial.

Figura 8 – Objetos do modelo vetorial

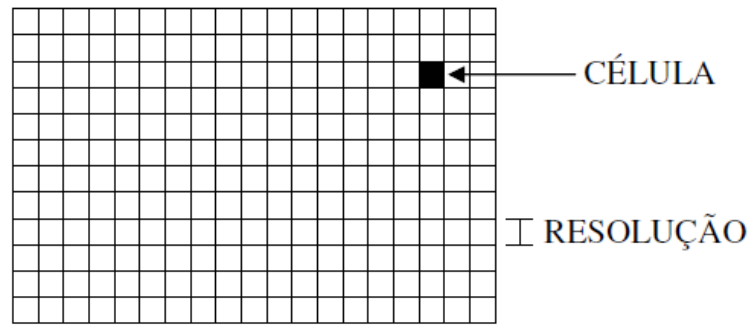


Fonte: Higashi (2006)

Burrough e McDonnell (2015) definem o princípio de objetos matriciais pela abordagem de campos contínuos, denominados modelo de tesselação ou *raster*. Em um modelo matricial, a representação espacial é feita por meio de um arranjo retangular de células contíguas dispostas em um padrão de grades. Os fenômenos geográficos são expressos por propriedades e atributos associados à essas células ou *pixels* e cada uma contém um dado que é usado para representar uma entidade do mundo real ou uma porção dele (UNESCO, 2012 e LONGLEY, 2015). Bolstad (2016) explica que esse modelo representa características espaciais contínuas como elevações e precipitações. Chang (2019) complementa descrevendo que pontos são representados por uma única célula, as linhas por uma sequência de células adjacentes e polígonos por uma coletânea de células contíguas. O autor afirma que pelo fato de a localização dessas células serem fixas, o *raster* pode ser tratado como uma matriz de linhas e colunas e, portanto, são mais fáceis de serem manipulados, agregados e analisados do que dados vetoriais. Porém, esse modelo não é preciso para representar características que possuem um limite ou formato distinto (UNESCO, 2012).

Higashi (2006) destaca que a cada célula é atribuído um código referente ao atributo estudado, de forma que o computador saiba a que elemento ou objeto pertence determinada célula. Além disso, a resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou documento e a área por ela coberta no terreno. Este tipo de modelo é ilustrado pela Figura 9.

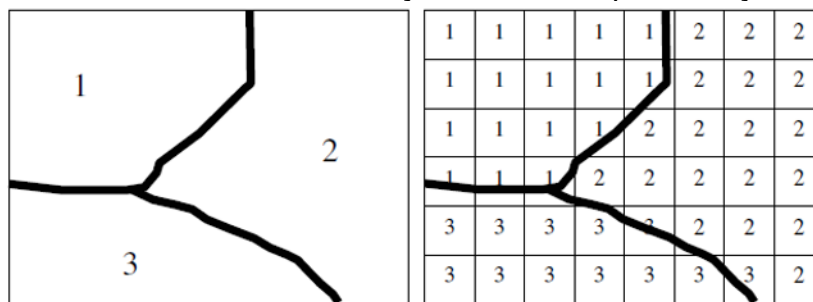
Figura 9 – Representação do modelo matricial (*raster*)



Fonte: Higashi (2006)

Longley (2015) afirma que os modelos matriciais e vetoriais possuem uma ligação forte, visto que as estruturas de dados para campos temáticos admitem ambas as representações. Para a produção de cartas e em operações onde se requer mais precisão, a representação vetorial é a mais adequada. Já na representação matricial, uma vez que o armazenamento requerido é substancialmente maior, para o mesmo grau de precisão, as operações de álgebra de mapas são mais facilmente realizadas (HIGASHI, 2006). Ademais, a Figura 10 exemplifica o processo de conversão entre as representações.

Figura 10 – Processo de transformação entre as representações espaciais



Fonte: Higashi (2006)

O Quadro 4 detalha as vantagens e desvantagens de cada modelo.

Quadro 4 – Comparação entre o modelo vetorial e matricial

Aspecto	Formato vetorial	Formato matricial
Relações espaciais entre objetos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relacionamentos topológicos entre objetos disponíveis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relacionamentos espaciais devem ser <i>interpixel</i>.</li> </ul>
Ligação com banco de dados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilita associar atributos aos elementos gráficos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Associa atributos apenas às classes do mapa.</li> </ul>
Análise, Simulação e Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representação indireta de fenômenos contínuos.</li> <li>• Álgebra de mapas é limitada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representa melhor os fenômenos com variação contínua no espaço.</li> <li>• Simulação e modelagem mais fáceis.</li> </ul>
Escalas de trabalho	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adequado tanto a grandes quanto a pequenas escalas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais adequado para pequenas escalas (1:25.000 e menores).</li> </ul>
Algoritmos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas com erros geométricos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processamento mais rápido e eficiente.</li> </ul>
Armazenamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por coordenadas (mais eficiente).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por matrizes.</li> </ul>

Fonte: Câmara e Monteiro (2005) *apud* Higashi (2006)

Em função dessas ferramentas serem utilizadas para representar objetos geográficos digitalmente, é necessário abordar o conceito de resolução espacial.

### 2.3.3 Resolução espacial

Higashi (2006) cita a definição de Tobler (1979) de que a resolução espacial de dados georreferenciados ( $R$ ) como o conteúdo do domínio geométrico dividido pelo número de observações, normalizadas pela dimensão espacial. Esse domínio geométrico representa a área coberta pelas observações, que para esse trabalho são os pontos de sondagem SPT. A resolução espacial é calculada por meio da Equação (6).

$$R = \sqrt{\frac{\text{Área}}{\text{Número de Observações}}} \quad (6)$$

De acordo com Silva (1999) *apud* Higashi (2006), a alta resolução está associada à maior discriminação dos elementos, portanto a um número maior de observações e, contrariamente, a baixa resolução está associada a uma pobre discriminação dos elementos, associada a um número menor de observações.

Além disso, no domínio digital a resolução espacial da base de dados parece ser uma dimensão mais relevante que a escala, de modo que a resolução espacial é,

tal e qual a escala o é no domínio analógico, um dos elementos de controle para a generalização (INPE, 2001).

Segundo Thiesen (2016), a resolução espacial é conhecida como a mínima distância para a distinção de dois objetos, é um parâmetro aplicável à nitidez de uma imagem. Ainda, a autora explica que quanto menor for o tamanho real do *pixel*, maior será a resolução espacial desta imagem, o que significa que maior será a capacidade de registrar objetos dispostos na superfície terrestre.

#### **2.3.4 Banco de dados geotécnico**

Conforme Huisman e By (2009), um banco de dados é um repositório para armazenar grandes quantidades de dados e deve permitir o acesso para múltiplos usuários. O mesmo também deve oferecer técnicas para a otimização do armazenamento e ser capaz de manter a integridade desses dados, utilizando uma linguagem de fácil uso para a manipulação e, posteriormente, o processamento de dados. Burrough e McDonnell (2015) descrevem que o armazenamento de dados, assim como o gerenciamento de um banco de dados, deve se preocupar em estruturar e organizar elementos geográficos em relação à localização, à topologia, aos atributos, de forma que o computador possa lidar com eles.

Segundo Yuaça (2003 *apud* SOARES, 2011), os bancos de dados georreferenciados e interligados ao SIG, também têm alcançado grande expansão de aplicação prática em vários municípios brasileiros, subsidiando ações de gerenciamento de finanças, como atualização cadastral para cálculo de impostos territoriais ou de planejamento de infraestrutura urbana, como seleção de locais para implementação de postos de saúde ou escolas públicas.

Soares (2011), por sua vez, afirma que os Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD) acoplados em SIG, em que as informações armazenadas apresentam um atributo específico de coordenada geográfica (dados georreferenciados), apresentam um perfil mais adequado para a implementação de um banco de dados geotécnico.

Segundo Ellison *et al.* (2002) *apud* Soares (2011), um banco de dados proveniente de sondagens, juntamente com o modelo digital do terreno e os mapas geológicos, é essencial para possibilitar relações tridimensionais das informações geológicas, para uma melhor visualização e entendimento.

A autora continua explicando que as tabelas de atributos das sondagens podem ser estruturadas utilizando programas de planilha eletrônica ou de banco de dados que posteriormente podem ser incorporadas ao SIG para gestão e análise das sondagens cadastradas. Essa planilha apresenta dados gerais dos furos, destacando o identificador (ID), suas coordenadas geográficas, cotas da boca, do fim do furo e do nível de água. Também podem ser incorporadas descrições mais detalhadas do local da sondagem, empresa executora, data de execução, além da profundidade de cada furo.

Ademais, os SIG modernos dispõem de ferramentas estatísticas que facilitam o desenvolvimento destas correlações e a combinação da distribuição espacial das principais unidades geológico-geotécnicas com os furos de sondagens cadastrados, permite um melhor controle das condições de contorno e da validação dos resultados obtidos por meio destas.

### **2.3.5 Banco de dados geotécnico elaborado por Christ (2019)**

No presente estudo, foram utilizados os dados de sondagem SPT originados do banco de dados geotécnico criado por Christ (2019) com o objetivo de analisar as características dos solos obtidas no ensaio e compará-las às unidades geotécnicas, melhorando a escala do mapeamento geotécnico realizado por Santos (1997). A etapa inicial de sua criação decorreu por meio do levantamento de dados preexistentes, em que se buscou obter dados cartográficos, mapas e resultados de ensaios geotécnicos relacionados ao município de Florianópolis. No que se refere aos dados cartográficos, a autora priorizou aqueles relativos ao relevo, à geologia, à pedologia, à litologia, à geotecnia, à hidrografia, às delimitações de bairros e às imagens de satélite ou aerofotogrametria (CHRIST, 2019).

No que tange ao levantamento de dados geotécnicos, o banco de dados foi composto pelos resultados do *Borehole Shear Test* que indicam a resistência ao cisalhamento do solo, bem como relatos de ocorrência de deslizamentos de encostas ocorridos na área de estudo, e de ensaios de SPT – cedidos por empresas de sondagem que atuam em Florianópolis –, em que foram avaliados e cadastrados 511 laudos realizados entre os anos de 1997 e 2017 (CHRIST, 2019).

Mediante o exposto, em virtude da diversidade de informações contidas nesses laudos de sondagem, a autora identificou a necessidade de estruturar um banco de dados e de definir uma metodologia para o cadastramento dos parâmetros

obtidos por meio do ensaio. Nesse sentido, foi realizada a identificação dos locais em que cada ensaio foi executado, uma vez que os laudos não são acompanhados pelas coordenadas geográficas dos furos de sondagem, o que constitui uma etapa fundamental para a criação de um banco de dados geotécnico georreferenciado. Para tal, foi aceita uma margem de erro de localização do ponto de até 30 metros, haja vista o fato de as sondagens serem executadas antes da construção das edificações e, portanto, tratam-se de locais com a existência de um prédio ou condomínio sem nome e/ou sem número. Apesar disso, houve o descarte de alguns ensaios devido à impossibilidade de determinação exata do local (CHRIST, 2019).

Em relação à manipulação dos dados, os mesmos foram manipulados com o auxílio do *software* ArcGIS®, no qual esses dados foram inseridos em diversas colunas, formando a tabela de atributos, a qual é apresentada pelo Quadro 5.

Quadro 5 – Atributos do banco de dados geotécnico de Christ (2019)

<b>Atributo</b>	<b>Descrição</b>
Identificação	Nome da pessoa que cadastrou o laudo, seguido de um número. Esta mesma identificação foi anotada no laudo impresso ou com o nome do arquivo ou pasta em formato .docx ou .xlsx, a fim de facilitar eventuais consultas posteriores.
Empresa	Nome da empresa que executou e cedeu o ensaio.
Sondagem	Número de furos de sondagem referente ao laudo.
Profundidade do impenetrável	Para laudos de ensaios executados até o impenetrável foi inserido o valor obtido, do contrário atribuir o valor 1000.
Profundidade de paralisação	Para laudos que foram paralisados antes de atingir o impenetrável (quando o ensaio não era executado até o impenetrável atribui-se o valor 1000 nesta coluna).
Profundidade do nível de água	Menor valor obtido no laudo (quando não havia a informação foi atribuído o valor 1000 nesta coluna).
Profundidade do nível de água após 24h	Menor valor obtido no laudo (quando não havia a informação foi atribuído o valor 1000 nesta coluna).
Data	Data de realização do ensaio.

Fonte: Adaptado de Christ (2019)

O preenchimento das demais colunas foi baseado na escolha do furo de sondagem que apresentasse a maior profundidade de execução. Além disso, quando havia dois ou mais furos com características bem distintas em um mesmo laudo de sondagem, foram cadastrados os dois furos com a maior diferença entre si, por indicarem a provável localização da delimitação entre duas unidades geotécnicas. Ademais, também foram cadastrados os valores de  $N_{SPT}$ , a textura e a cor para as diversas camadas de sondagem (CHRIST, 2019).

Dessa forma, com base no banco de dados de sondagem, foi realizada a avaliação e o melhoramento do mapeamento geotécnico de Santos (1997), a partir das características dos pontos como consistência, cor e profundidades do nível de água e impenetrável presentes em cada unidade de solos de encostas. Christ (2019) destaca que quando um ponto apresentava características muito distintas dos demais na mesma unidade e se encontrava próximo a borda da unidade, era avaliada a necessidade de adequação.

Christ (2019) discorre que para a avaliação do nível de água foi considerada a informação da profundidade quando determinada após 24h, em que as profundidades foram divididas em intervalos de metro a metro e determinados os percentuais para o número de pontos de cada intervalo relativo ao grupo de solo correspondente de plano ou de encosta. Durante a análise, o nível de água mais superficial em solos de plano e mais profundos em solos de encostas não se mostrou evidente. Para justificar essa incompatibilidade, a autora avaliou a distância entre esses pontos e a malha hidrográfica (rios, lagos e nível do mar) por meio de testes para intervalos de distâncias diferentes. O impenetrável passou por uma análise similar, porém, devido à maior variação, em intervalos menores de profundidade.

Além disso, unidades de solos de plano podem ser identificadas pela presença de camadas de argila mole, de argila muito mole, de silte argiloso mole ou de silte argiloso muito mole. Portanto, a avaliação da presença de solo mole foi realizada para as três primeiras camadas, haja vista que o mapeamento geotécnico é baseado no mapa pedológico, o qual avalia uma profundidade provavelmente inferior à 3 metros. Nesse sentido, foram inseridas três colunas, cada uma para as camadas de solo com a possível presença de solos moles, seguido da adição de mais três colunas para as quais foi atribuído um valor numérico referente à classificação de solos moles, sendo que uma última coluna foi inserida para o somatório dessas. Essa análise permitiu a identificação de pontos com a presença de aterros, de pontos que não continham camadas de solos moles e, na existência de camadas desse tipo de solo, dar uma noção de sua intensidade (CHRIST, 2019).

No que se refere aos grupos de solos sedimentares e residuais e de solos de plano de encostas, Christ (2019) explica que existe uma tendência desses grupos de apresentarem determinadas colorações. De forma a possibilitar essa avaliação, as camadas de cada ponto foram classificadas de acordo com essas colorações típicas, ou seja, cores mais frias e tons de cinza ou azuladas para solos sedimentares e cores

quentes ou com as quais permitem a atribuição do termo variegado para solos sedimentares. Analogamente à análise para solos moles, foram inseridas colunas para cada camada, classificando-as quanto à coloração com a atribuição de valores numéricos e, após o somatório, identificando o número de camadas com cores típicas de solos residuais ou sedimentares. Em seguida foi criada uma coluna com o número de camadas com as cores de solos residuais e uma coluna com o número de camadas residuais, sendo que as camadas foram divididas em grupos de predominância para as camadas com cores de solo sedimentar, de solo residual e para aquelas com o mesmo número de camadas desses dois grupos de cores de solo ou em que todas são de cores sem classificação definida. Finalmente, houve a comparação do grupo de solo e sua localização, de forma que pontos incompatíveis, foram avaliados individualmente (CHRIST, 2019).

## 2.4 GEOESTATÍSTICA

A variabilidade espacial das características do solo é uma preocupação antiga de pesquisadores, a hipótese era de que a variação dos parâmetros de um local para o outro era aleatória e, portanto, utilizava-se a estatística clássica para descrever, com uma grande quantidade de dados, a distribuição espacial de fenômenos geográficos (CAMARGO, 1998). Na década de 1950, Daniel C. Krige percebeu, por meio de seus estudos desenvolvidos em mineração sobre a concentração de ouro, que apenas a variância era insuficiente para descrever o fenômeno estudado, sendo necessário considerar a distância entre as observações. No entanto, foi na década seguinte que o engenheiro francês Georges Matheron formalizou, matematicamente e estatisticamente, o trabalho de Krige ao publicar a Teoria das Variáveis Regionalizadas, a qual se baseia na localização geográfica e na dependência espacial das variáveis regionalizadas, distinguindo-o como o criador da ciência que veio a se chamar de Geoestatística (CAMARGO, 1998; VIEIRA, 2000; SILVA, 2011; YAMAMOTO E LANDIM, 2013).

Silva (2011) acrescenta que o desenvolvimento da Geoestatística se deu principalmente para atender as aplicações de engenharia relacionadas com a distribuição espacial de um ou mais atributos que fazem parte de uma amostra finita de valores medidos, relativos a uma base espacial de um fenômeno contínuo, tal como as propriedades do solo. Nesse sentido, para Yamamoto e Landim (2013), a Geoestatística tem como objetivo a caracterização espacial de uma variável de

interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial com a determinação das incertezas associadas.

Além disso, a metodologia se difundiu para diversas áreas correlatas das ciências dos solos devido à facilidade em compreender os fenômenos naturais quando é possível visualizar a dependência espacial e temporal das variáveis, permitindo, assim, o mapeamento por meio de técnicas de predição ou de simulação (DIAS, 2013). Ademais, a Geoestatística possibilita a descrição e modelagem de padrões espaciais, estimando os valores das variáveis regionalizadas em locais não amostrados (ANDRIOTTI, 2009 *apud* SILVA, 2011).

### **2.4.1 Variável regionalizada**

Uma variável regionalizada é definida como uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples (CAMARGO, 1998). Yamamoto e Landim (2013) explicam que essa é uma função irregular em que se percebem dois aspectos contraditórios e complementares. Um deles é o aspecto aleatório – o qual não permite a previsão das variações entre dois pontos – e o outro é um aspecto estruturado, que reflete as características estruturais do fenômeno regionalizado. Portanto, surge o conceito geoestatístico de que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados (ANDRIOTTI, 2009 *apud* SILVA, 2011). Os autores ainda discorrem que a Teoria das Variáveis Regionalizadas procura descrever a correlação espacial e resolver problemas de estimativa de uma variável regionalizada com base em uma amostra. Ademais, Camargo (1998) comenta a pressuposição de que essas variações podem ser expressas pela soma de uma componente estrutural associada a um valor médio ou a uma tendência constantes, uma componente aleatória espacialmente correlacionada e um erro residual.

Dessa forma, de acordo com Yamamoto e Landim (2013), qualquer variável dependente do espaço que apresente, além do caráter aleatório, um caráter estrutural, pode ser tratada como uma variável regionalizada e, portanto, o melhor estimador para a mesma deve considerar suas respectivas posições relativas, ou seja, a característica estrutural do fenômeno. Diante disso, os métodos geoestatísticos fornecem um conjunto de técnicas para estabelecer uma função de correlação

espacial entre a aparente aleatoriedade dos dados e sua possível estruturação espacial.

As principais características de uma variável regionalizada são listadas por Soares (2011), a saber:

- **Localização:** uma variável regionalizada é numericamente definida por um valor, o qual está associado a uma amostra de tamanho, forma e orientação específicos. Essas características geométricas da amostra são denominadas suporte geométrico.
- **Anisotropia:** algumas variáveis regionalizadas são anisotrópicas, isto é, apresentam variações graduais numa direção e rápidas ou irregulares em outra.
- **Continuidade:** dependendo do fenômeno, a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser grande ou pequena.

Por fim, o processo de inferência espacial consiste em reproduzir as características desse fenômeno baseado em pontos amostrais, recebendo a denominação de interpolação ou estimativa.

#### **2.4.2 Interpolação**

A interpolação ou estimativa é o método pelo qual se estimam os valores de uma variável na área interna aos pontos de amostragem, permitindo representar o comportamento dessas de forma contínua, por meio do ajuste de funções matemáticas locais para pontos mais próximos ao ponto não amostrado e globais para todos os pontos amostrais (SILVA, 2011; YAMAMOTO E LANDIM, 2013).

Ainda, Yamamoto e Landim (2013) afirmam que a interpolação é sempre necessária, haja vista que por motivos de limitação econômica, por exemplo, a amostragem nunca é feita em pontos muito próximos entre si. Segundo os autores, a diferença fundamental entre os diversos métodos estimadores existentes se dá na maneira em como esses pontos, e seus respectivos pesos, são calculados e aplicados durante o processo de estimativa. Além disso, esses métodos podem ser divididos entre modelos determinísticos – aqueles que têm como base critérios puramente geométricos e não fornecem medidas de incerteza – como é o caso da Triangulação com Interpolação Linear (TIN), do termo em inglês *Triangular Irregular Network*, e os métodos estocásticos, ou probabilísticos, em que os valores coletados são

interpretados como provenientes de processos aleatórios e são capazes de quantificar a incerteza associada ao estimador, são os modelos geoestatísticos como a krigagem.

Por fim, Landim (2000) descreve a respeito de algumas considerações que compõe uma interpolação ideal:

- A superfície interpolada ajusta-se aos dados a um determinado nível de precisão, ou seja, é fiel aos dados dentro de um limite arbitrário definido pelo usuário.
- A superfície interpolada é contínua e suave em todos os locais, ou seja, tem um gradiente finito em todo local onde a interpolação for necessária.
- Cada valor interpolado depende apenas do subgrupo local de dados, e os membros deste subgrupo são determinados somente pela configuração dos dados que, de algum modo, são próximos ao ponto interpolado.
- O método de interpolação pode ser aplicado à todas as configurações e padrões de densidade dos dados.

As seções 2.4.3 e 2.4.4 dedicam-se a detalhar os métodos de interpolação utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

### **2.4.3 Triangulação com Interpolação Linear (TIN)**

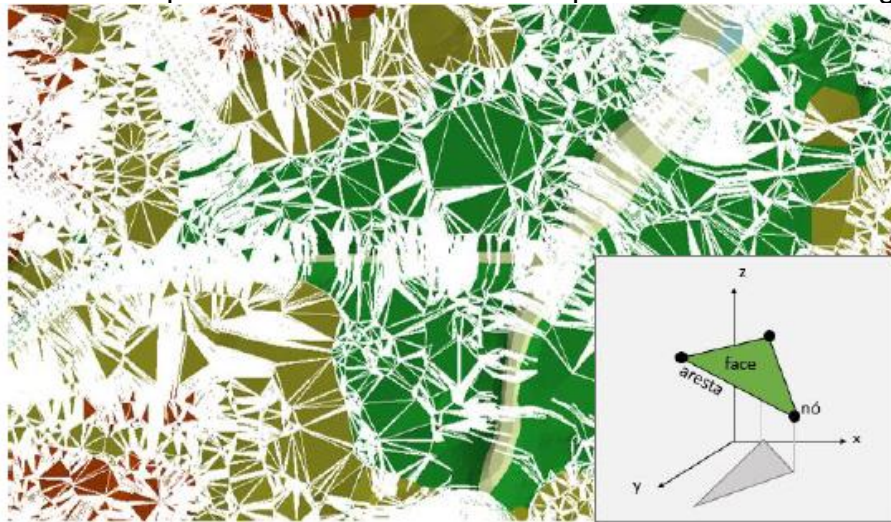
Nesse tipo de interpolador, os pares de dados são unidos por linhas retas para a formação de uma rede triangular, em que uma equação matemática, um algoritmo, é utilizada para ajustar a superfície através dos pontos dados (LANDIM, 2000). Soares (2011) explica que os triângulos são criados a partir de pontos originais de entrada, sem que nenhum venha a interceptar o outro, formando uma rede triangular irregular. Os pontos estimados de igual valor, chamados de isovalores, entre os dados medidos e posicionados nos vértices dos triângulos são conectados para os intervalos especificados. Segundo Landim (2000), são considerados métodos de estimação diretos, pois os contornos derivam do padrão original dos dados, não permitindo a extrapolação e limitando as estimativas à área amostrada.

Uma das aplicações dessa interpolação é a criação de modelos digitais de terreno que são utilizados para representar a variabilidade de um atributo ou fenômenos geográficos que ocorrem em determinada região, sendo de grande

importância em aplicações de geoprocessamento desenvolvidas em ambiente SIG, em decorrência da possibilidade de extração de derivados desses modelos como mapas de declividade, mapas de drenagem, mapas de curva de nível, entre outros (FELGUEIRAS, 1999).

A Figura 11 exemplifica o processo aplicado na geração do Modelo Digital do Terreno (MDT).

Figura 11 – Exemplo de um MDT elaborado a partir da rede de triangulação



Fonte: Santos (2016)

Apesar de seu fácil entendimento, sua rapidez e sua fidelidade aos dados originais, o método não extrapola os valores além da área de distribuição dos pontos amostrados, além de que os contornos podem ser “angulares” nas bordas dos triângulos, gerando uma superfície angulada, o que pode distorcer os resultados. Soares (2011) complementa que o interpolador TIN é muito utilizado para visualizações 3D, pois tem uma estrutura de dados compacta, o que facilita o processamento mais rápido das modelagens tridimensionais.

Landim (2000) indica sua utilização quando a distribuição de dados é bem regular dentro de uma área amostrada e houver a presença de grandes diferenças entre os dados estudados, como a declividade, e os dados topográficos. Por outro lado, não se recomenda quando se deseja um mapa com contornos suaves.

#### 2.4.4 Krigagem

Landim (2000) define a krigagem no método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis

regionalizadas, nas quais deve existir certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem possam parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável é desconhecido. O autor diz que o método utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis, pelos quais os pesos adequados são obtidos a partir da modelagem do semivariograma e que quando este é adequadamente elaborado, a estimativa por krigagem é reconhecida como sendo a estimativa linear melhor e não tendenciosa, do termo em inglês, BLUE (*Best, linear, unbiased estimate*). O método possibilita a construção de mapas de contorno, ou de isolinhas, com alta precisão, uma vez que após a interpolação a densidade dos dados será muito maior do que antes, além de oferecer os limites de confiança para o mapa pela variância estimada (VIEIRA, 2000). Nesse sentido, foi escolhido o método da *krigagem*, visto que o mesmo é muito utilizado na literatura de ciências do solo como método de interpolação para gerar as cartas de aptidão para fundações (PESCIM, URBANO e DEMÉTRIO, 2010).

Landim (2006) aponta que a krigagem mais usual é a ordinária e Sturaro (1994) afirma que esse método pode ser considerado o melhor estimador linear devido ao fato de se basear em um modelo probabilístico, cujo erro residual médio, bem como a variância dos erros pode ser estimado. Dessa forma, pode-se atribuir pesos às amostras utilizadas nas estimativas de tal modo que o erro médio seja zero e a variância seja mínima.

Ademais, o método da krigagem deve ser utilizado quando houver tanto tendências regionais quanto anomalias locais, estas desde que não estejam presentes em toda a área (ambiente fluvial), e os dados estiverem irregularmente amostrados ou agrupados. Contudo, o mesmo não deve ser usado com menos de 30 pontos amostrados pela insuficiência de pares para modelar o semivariograma, bem como na presença de erros grandes e inexplicados. Por fim, essas considerações demonstram que o usuário deve possuir um entendimento de geoestatística para preparar o semivariograma e obter resultados condizentes com a realidade (LANDIM, 2000).

#### **2.4.5 Semivariograma**

Uma vez necessária a interpolação de amostras coletadas em uma região de estudo para a elaboração de um mapa de isolinhas, é preciso utilizar uma ferramenta adequada para medir a dependência espacial dos dados denominada de

semivariograma (VIEIRA, 2000). De acordo com Camargo (1998), o semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem ao representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. No caso de dados geotécnicos, o semivariograma é uma medida da variabilidade geológico-geotécnica em relação à distância (SILVA, 2011). Ao considerar duas variáveis regionalizadas, o nível de dependência espacial é representado pelo semivariograma segundo a Equação (7).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (7)$$

Em que:

$\gamma(h)$  = variância experimental

$Z(x)$  = valor da variável medida no ponto  $x$

$Z(x+h)$  = valor da variável medida no ponto  $x+h$

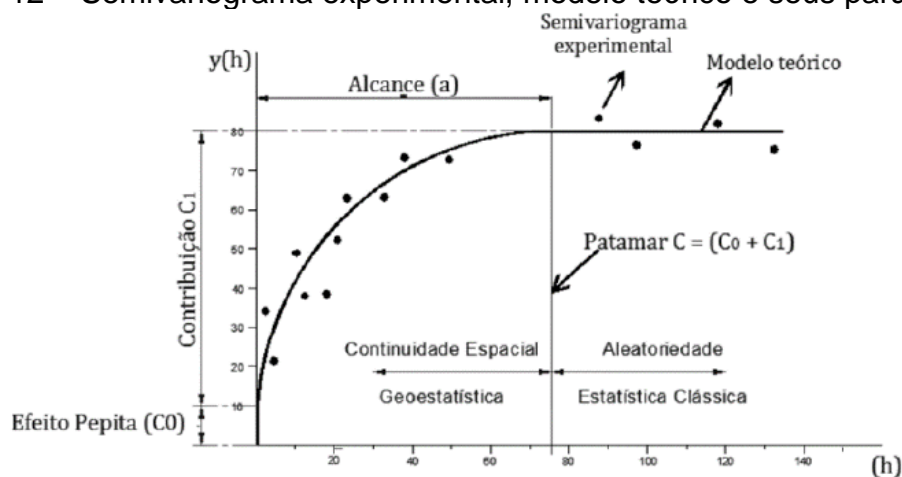
$h$  = distância que separa as duas amostras (m)

$i$  = posição das amostras

$n$  = número de pares de dados para a distância de separação ( $h$ )

A partir da Equação (7) é traçado o gráfico ilustrado pela Figura 12, sendo possível inferir diversos parâmetros e características do semivariograma.

Figura 12 – Semivariograma experimental, modelo teórico e seus parâmetros



Fonte: Santos (2016)

O gráfico demonstra a variância das amostras em função da distância, ou seja, evidencia a dependência espacial dos dados. À medida que a distância aumenta, a variância cresce, indicando uma menor dependência espacial entre as variáveis – pontos mais distantes entre si tendem a apresentar valores distintos – até atingir um

valor constante representado pelo patamar ( $C$ ), em que a variância não se altera mais com o aumento da distância e as variáveis passam a apresentar um caráter aleatório. Portanto, a distância máxima para a qual as variáveis possuem dependência espacial, para a qual são válidos os conceitos de geoestatística, é representada pelo alcance ( $a$ ). Por outro lado, com a diminuição da distância, as variáveis tendem a ficar com valores mais próximos entre si. Conforme a distância se aproxima de zero, é esperado que a variância também se aproxime de zero, porém, na prática, a variância se aproxima de um valor positivo chamado de efeito pepita ( $C_0$ ), o qual revela uma descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte dessa descontinuidade pode ser atribuída à erros de medição. Por fim, a diferença entre o patamar e o efeito pepita é chamado de contribuição ( $C_1$ ) (CAMARGO, 1998; VIEIRA, 2000; SOARES, 2011 e DIAS, 2013).

Em seguida, é realizado o ajuste do semivariograma a um modelo teórico, ou seja, a uma função que definirá seus parâmetros, o efeito pepita, o alcance e o patamar (LANDIM, 2006). Essa constitui uma etapa crucial, haja vista que todos os cálculos geoestatísticos dependem do modelo do semivariograma para cada distância especificada. Por isso, se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos também o estarão (VIEIRA, 2000). Além disso, é importante que esse represente a tendência de variância em relação à distância entre as amostras, obtendo estimativas mais precisas e confiáveis. O procedimento de ajuste não é direto e automático, mas sim interativo, pois nesse processo após o primeiro ajuste é verificada a adequação do modelo teórico e, dependendo do ajuste obtido, pode-se refazer o ajuste até alcançar o resultado pretendido (CAMARGO, 1998). De acordo com Landim (2006), entre os modelos disponíveis, os mais utilizados são o esférico, o exponencial e o gaussiano (com patamar).

#### **2.4.6 Validação cruzada**

É uma maneira de checar as suposições sobre o modelo usado na krigagem. Em uma validação cruzada, é especificado um modelo de semivariograma e uma vizinhança de pesquisa e, em seguida, é feita uma krigagem dos valores em cada local amostrado. A diferença entre ambos os valores é chamada de resíduo da validação cruzada e tem como função verificar a performance do modelo. Contudo, a validação cruzada não prova que o modelo de semivariograma esteja correto, é

apenas uma maneira de provar que o mesmo não está grosseiramente incorreto (ANDRIOTTI, 2002).

## 2.5 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Davison Dias (1995) afirma que o uso e ocupação do solo no ambiente urbano é um fator preocupante no Brasil devido ao aumento contínuo de áreas críticas e deve ser otimizado de forma a diminuir os riscos provenientes das ocupações descontroladas. Nesse sentido, Christ (2019) explana que no âmbito da gestão territorial, a qual compreende o zoneamento e a implantação da infraestrutura urbana, o mapeamento geotécnico corresponde a um mapa de descrição do solo ou da rocha sob o aspecto geotécnico, a partir do qual é possível gerar mapas relacionados à problemas ligados à geotecnia.

Perante o exposto, os mapas geotécnicos representam as primeiras atuações em conjunto entre geólogos e engenheiros em projetos de engenharia e ao longo do tempo, conforme o aumento da exigência por dados geológicos, esses mapas foram complementados com textos explicativos, legendas e informações técnicas e interpretativas em relação aos fenômenos geológicos (FONTES, 1999).

Segundo Higashi (2006),

O mapeamento geotécnico pode ser definido como uma metodologia, em que, sob forma de um mapa, são representadas as principais características geomecânicas do solo, podendo ser utilizado na previsão do comportamento de polígonos de solos chamados de unidades geotécnicas, o que possibilita a sua aplicação em projetos ambientais e de engenharia (Higashi, 2006, p. 25).

Por sua vez, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) conceitua o mapeamento geotécnico como uma ferramenta de planejamento que integra dados e informações básicas a respeito das características geotécnicas dos terrenos sujeitos às intervenções humanas relacionadas ao uso e ocupação do solo. Essas informações tem como objetivo contribuir com o planejamento e ordenamento territorial, bem como com a gestão de riscos e a prevenção de desastres naturais (BITAR, 2005).

Christ (2019) afirma que para a elaboração dos mapas é importante reunir cartas de hidrologia, de altimetria, de divisão política, de declividade e, especialmente, mapas pedológicos e geológicos. A partir desses dados, realiza-se uma análise em campo para identificar melhor a delimitação das unidades geotécnicas e, assim, definir

os pontos de coleta de amostras, resultando em um mapeamento geotécnico de melhor escala.

De forma complementar, Higashi (2006) explana que a cartografia geotécnica permite a formulação de modelos de previsão do comportamento dos terrenos e o estudo de soluções para problemas decorrentes da intervenção de empreendimentos sobre o meio físico.

Acerca do desenvolvimento do mapeamento geotécnico, UNESCO (1976) *apud* Fontes (1999), destaca os princípios básicos que devem ser seguidos, a saber:

- Apresentar as informações de maneira que sejam facilmente compreendidas pelo usuário não especializado.
- Conter as informações necessárias à avaliação das feições geológicas e de engenharia envolvidas no planejamento regional, para que estas possam auxiliar na seleção do local e dos métodos construtivos mais apropriados à região em questão.
- Prever prováveis mudanças na situação geológica causadas pela atuação de empresas ou pela ocupação urbana, bem como as possíveis medidas preventivas a serem adotadas.

Zuquette (1993) corrobora com o exposto, explicando que, devido à complexidade do mapeamento geotécnico, devem ser seguidas algumas orientações em seu desenvolvimento para facilitar o entendimento por parte dos usuários que não estejam familiarizados com o assunto. Para tal, deve-se limitar o número de atributos considerados em cada documento para resguardar a fidelidade do mapa e respeitar a sua finalidade, apresentando apenas as informações pertinentes. O autor destaca ainda que o conteúdo desses documentos é apenas temporário, estando sujeito ao enriquecimento por atualizações periódicas e que, de forma alguma, substitui o reconhecimento local, constituindo-se, portanto, em uma ferramenta de suporte (ZUQUETTE, 1993).

Adicionalmente, Bitar (2015) coloca que os mapas são apresentados na forma de documentos cartográficos, elaborados por meio de um conjunto de mapeamentos realizados em campo e em laboratório, sintetizando o conhecimento do meio físico e de seus processos geodinâmicos, contendo as recomendações para garantir que eventuais intervenções no ambiente sejam adequadas às características geotécnicas do terreno.

Ademais, segundo a mesma fonte o desenvolvimento de cartas geotécnicas é obrigatório, especialmente em localidades que estejam inclusas no cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto e inundações bruscas (BITAR, 2005).

### **2.5.1 Metodologias brasileiras de mapeamento geotécnico**

Diversos países utilizam o mapeamento geotécnico e desenvolveram suas próprias metodologias ou adaptações daquelas efetivamente comprovadas com base em suas realidades geográficas e variedade dos tipos de solo. Portanto, torna-se pertinente apresentar, resumidamente, duas metodologias bastante difundidas no cenário brasileiro.

A primeira foi proposta por Zuquette (1987) e é baseada em feições do relevo relativas às condições brasileiras. Esta metodologia utiliza como base informações preexistentes e fundamentais para cada região, as quais, após levantamento e análise, são compiladas em mapas básicos (topográficos e geológicos), mapas opcionais (pedológicos e climáticos), mapas auxiliares de documentação e cartas derivadas ou interpretativas, como cartas de erodibilidade de fundações (ZUQUETTE, 1987).

Segundo Higashi (2006), essa metodologia realiza um levantamento por meio de geoprocessamento, de identificação de fotografias aéreas e de trabalhos de campo com expedições *in loco*, visando identificar unidades de solo cada vez menores nas áreas de interesse que apresentam uniformidade em função das feições do relevo. Em seguida, estas unidades homogêneas são associadas aos materiais inconsolidados e à litologia existe em um ambiente SIG, gerando um mapa de feições e um mapa de informações sobre as condições geotécnicas da área, o que possibilita a interpretação do comportamento geotécnico com fins de planejamento urbano. Ademais, o autor explica que os mapas resultantes devem apresentar preferencialmente escalas entre 1:50.000 e 1:10.000 e se encontram em três formas, a saber:

- Mapas de condições geotécnicas gerais: retratam todos os atributos, caracterizam o meio físico, sem separar áreas similares ou indicar potenciais e limitações.

- Mapas de zoneamento geotécnico geral: representam as condições do meio físico através do zoneamento de áreas similares, segundo os atributos considerados, porém sem considerar qualquer finalidade específica.
- Mapa de zoneamento geotécnico específico ou carta de aptidão: a região é zoneada segundo condições geotécnicas que afetam uma única finalidade, como fundações, estradas, entre outras (HIGASHI, 2006).

A segunda metodologia utilizada no Brasil, desenvolvida por Davison Dias (1995), é baseada na estimativa de unidades geotécnicas – regiões cujo comportamento geotécnico frente ao uso e à ocupação do solo é semelhante –, e consiste no emprego de dados reunidos e interpretados em um trabalho cartográfico que visa delimitar as zonas de ocorrência de solos com perfis de origem e características físicas e morfológicas semelhantes.

Para isso, é utilizada a técnica de superposição de cartas geológicas, pedológicas e topográficas com o objetivo de originar uma nova carta. Para cada unidade geotécnica, a caracterização do solo em altas profundidades é realizada pela geologia, enquanto que a pedologia se encarrega de permitir as inferências a respeito das características superficiais do solo, ambas recebem o suporte da topografia na definição dos limites entre as unidades geotécnicas (DAVISON DIAS, 1995).

Diante do exposto, a classificação da unidade geotécnica é estimada utilizando a simbologia “ABCxyz”, em que as letras maiúsculas “ABC” correspondem à classificação pedológica (horizontes A e B) e as minúsculas “xyz” à classificação geológica, caracterizando os horizontes C, RA e R (DAVISON DIAS, 1995).

Higashi (2006) afirma que a utilização da pedologia como ciência orientadora do comportamento dos solos consiste em uma ferramenta importante no conhecimento das unidades geotécnicas e que, portanto, a metodologia desenvolvida por Davison Dias (1995) é uma forma abrangente para se formular estimativas de unidades geotécnicas para prever o comportamento do solo em relação à sua gênese e obter o mapeamento geotécnico mediante o cruzamento dos mapas geológico e pedológico.

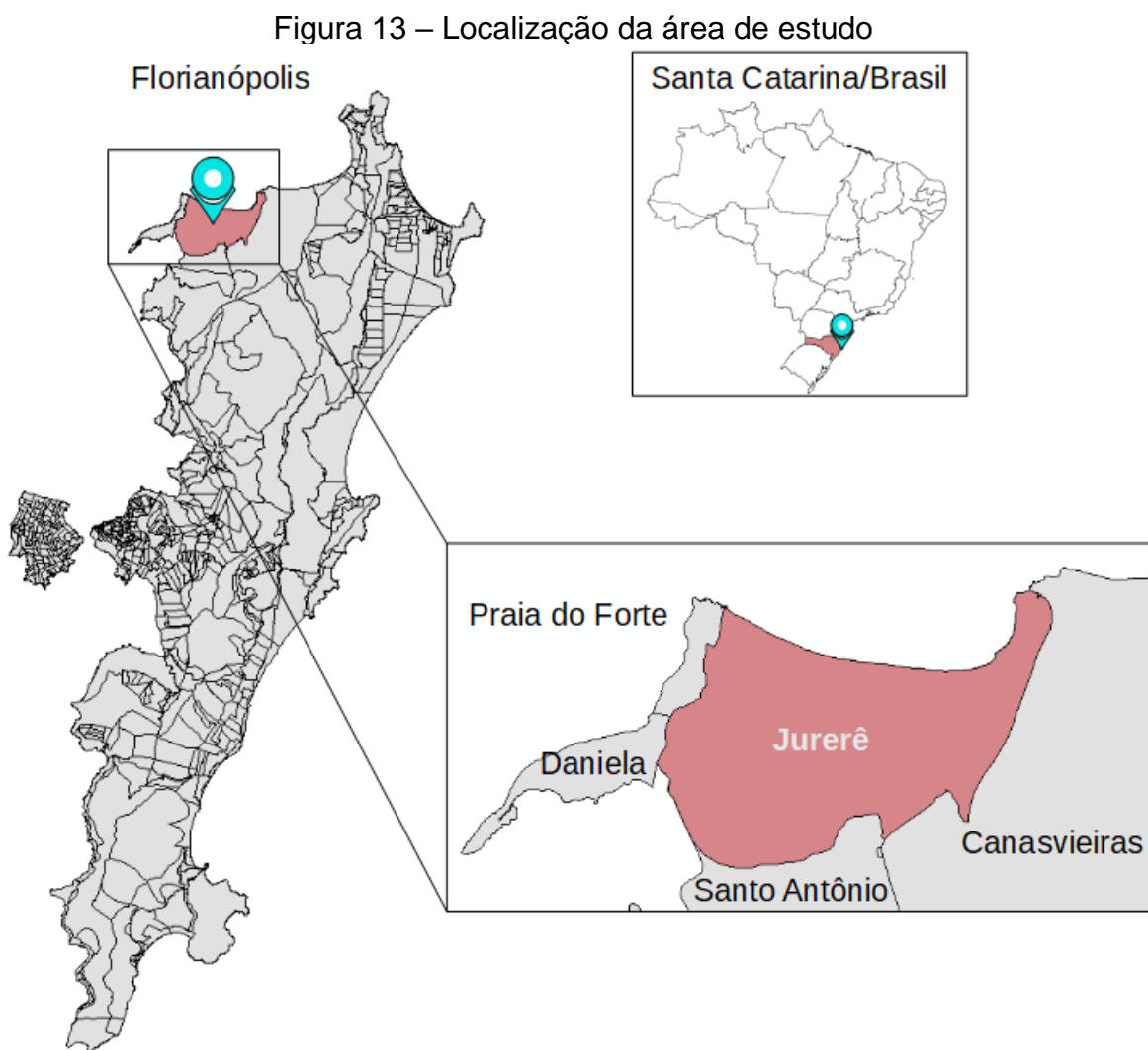
Ademais, salienta-se que os resultados advindos da metodologia de Davison Dias (1995) de mapeamento geotécnico apenas fornecem os subsídios necessários

para uma estimativa do comportamento geotécnico do solo e não podem ser usados como valores de projeto (HIGASHI, 2006).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

O bairro de Jurerê está localizado na região norte da parte insular do município de Florianópolis em Santa Catarina (SC), é compreendido pelas suas divisões leste e oeste, denominadas como Jurerê Tradicional e Internacional, respectivamente, perfazendo uma área de 9,2 km<sup>2</sup>, conforme levantamento dos setores censitários de 2010 pela Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF, 2018), e faz divisa com os bairros de Canasvieiras, Santo Antônio de Lisboa, Forte e Daniela.

A localização geográfica da área de estudo em território brasileiro encontra-se na Figura 13.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O município de Florianópolis pertence a região Sul do Brasil, entre os paralelos de 27°10'S e 27°50'S e os meridianos de 48°25'O e 48°35'O, abrangendo

uma área territorial de 674,8 km<sup>2</sup> e abrigando uma população de 421.240 pessoas. Em 2020, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estimou que a população aumentou para 508.826, o que representa uma expansão populacional de aproximadamente 21% (IBGE, 2020).

Covello *et al.* (2017) caracterizam Florianópolis pela presença de maciços rochosos interligados por depósitos da planície costeira, que associados ao clima, possibilitaram a formação de uma diversidade de ecossistemas costeiros.

### 3.1 CLIMA

Segundo Caraméz (2017) e Rupp (2018), Florianópolis possui características climáticas particulares do litoral sul brasileiro, isto é, um clima mesotérmico úmido em que as estações são bem caracterizadas com verões quentes, estação de maior índice pluviométrico, e invernos amenos com ocorrência de precipitação ao longo do ano, sem período de seca. De acordo com a classificação climática de Köppen, esse tipo de clima é rotulado como Cfa, ou seja, uma região de clima tropical chuvoso e quente Af, cuja temperatura média é superior a 18°C e úmido o ano inteiro, e clima temperado chuvoso e quente Cfa, de temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e úmido o ano inteiro (CARAMÉZ, 2017). As temperaturas médias anuais variam de 16°C a 24°C (CARAMÉZ, 2017 e MARINOSKI; GHISI, 2018). Nesse sentido, Andrade (1996) afirma que a temperatura média mensal é de 24°C em janeiro e 16°C em julho, sendo a temperatura média anual em torno de 20°C junto à orla marítima e 22°C no interior da ilha.

Acerca da pluviosidade, Marinowski; Ghisi (2018) e Rupp (2018) afirmam que Florianópolis apresenta precipitação pluviométrica média de 1.518 mm ao ano para o período de 1961 a 1990. Em particular, no norte da ilha a precipitação anual é de 1.600 mm e de 1.400 mm no Sul, ocasionando uma umidade relativa anual de 85% (ANDRADE, 1996). Além disso, Andrade (1996) explica que durante os meses de dezembro, quando as temperaturas externas são maiores, ocorrem as chuvas de verão que costumam ser diárias e de curta duração, ao passo que as chuvas de inverno são intermitentes durante dois ou mais dias. Caraméz (2017) incrementa essa informação ao detalhar que a distribuição anual de precipitações indica que 35,9% delas ocorrem no verão, 27,3% na primavera, 17,9% no outono e 18,9% no inverno.

Ademais, Caraméz (2017) complementa dizendo que a Massa Tropical Atlântica predomina na primavera e verão e a Massa de Ar Polar Atlântica tem mais

frequência nos meses de outono e inverno. Essa última é a principal responsável pelas grandes amplitudes térmicas diárias peculiares no clima de Florianópolis ao se chocarem com as massas de ar tropicais marítimas em períodos de entrada de frentes frias polares (MENDONÇA; LOMBARDO, 2009).

### 3.2 GEOMORFOLOGIA, GEOLOGIA E PEDOLOGIA

De acordo com Santos (1997), a Ilha de Santa Catarina era, originalmente, constituída por um arquipélago de rochas cristalinas e, a partir do período Quaternário, esse conjunto de ilhas foi ligado por formações compostas por sedimentos marinhos, lacustres, eólicos e fluviais. Atualmente, as rochas cristalinas são representadas pelos morros e as formações sedimentares pelas planícies. Além disso, a autora explica que os terrenos cristalinos (Pré-Cambrianos) formam as partes mais elevadas da ilha e, segundo sua morfologia, apresenta linhas de cristas, dada sua disposição alongada e a forte declividade de suas encostas. Já os terrenos sedimentares abrangem pequenas áreas de sedimentação de baixa altitude, onde na planície sedimentar verifica-se a atuação de processos erosivos e deposicionais sob várias condições distintas de ambiente, em que os rios, os mangues, as praias e as lagoas aí existentes, constituem a Unidade Geomorfológica Planícies Costeiras (HERRMANN, 1989).

No aspecto geológico, Tomazzoli e Pellerin (2015) afirmam que a Ilha de Santa Catarina pode ser dividida em dois domínios fundamentais: domínio de morros, montanhas e elevações e pelo domínio das planícies costeiras. O primeiro é constituído por migmatitos do Complexo Águas Mornas, pelos granitos Ilha e Itacorubi e por rochas vulcânicas ácidas da Suíte Cambirela, todos cortados por diques do Enxame Florianópolis interligados pelo domínio das planícies costeiras, as quais são constituídas por depósitos quaternários inconsolidados de origem variada (TOMAZZOLI; PELLERIN, 2015). Por sua vez, Silva e Horn Filho (2011) descrevem a geologia da Ilha de Santa Catarina como um conjunto de rochas cristalinas, granitóides e vulcanitos associados. As rochas cristalinas (ígneas) constituem os morros, formando um conjunto de elevações grosseiramente alinhadas na direção nordeste, ao longo de toda a Ilha, conferindo a esta, um aspecto alongado como uma cunha. Esses morros, servem como anteparos para o acúmulo de material sedimentar, comumente retrabalhados, muitas vezes derivados dos próprios morros. Os granitóides afloram sob a forma de matacões de médio e grande porte e lajeados, usualmente apresentando uma alteração superficial, bastante pronunciada, que

produz um horizonte C bastante espesso (solo residual). Os diques de diabásio possuem extensão limitada, apresentando-se geralmente alterados devido ao intemperismo. Estes diques, ocorrem cortando os granitóides, ao longo de toda a Ilha, alcançando em geral, alguns metros a dezenas de metros de largura e centenas de metros de extensão. Já os depósitos sedimentares possuem diferentes características e gêneses e formam as baixadas e planos da Ilha.

Em relação à pedologia de Florianópolis, conforme Dias e Herrmann (2002), as encostas são recobertas por solos Podzólicos Vermelho-Amarelos e Cambissolos argilosos, originários dos granitos Ilha e Itacorubi, e por solos Podzólicos Vermelho-escuros, provenientes de diques de diabásio. Ainda, as áreas de planície são recobertas por solos Glei e solos indiscriminados de mangue, em que, na interface planície-baixa encosta, há acumulações colúvio-eluviais.

### 3.3 UNIDADE GEOTÉCNICAS

Davison Dias (1995), conforme mencionado na seção 2.5.1, define unidades geotécnicas como regiões cujo comportamento geotécnico – perfis de solo de origem e características físicas e morfológicas – é semelhante frente ao uso e a ocupação do solo. Nesse sentido, a partir do mapeamento geotécnico desenvolvido por Santos (1997), e posteriormente melhorado por Christ (2019), verifica-se que o bairro de Jurerê é composto principalmente pelas unidades geotécnicas de Cambissolo depósito de encostas (Cde), Podzol Hidromórfico sedimentos quaternários (PZsq), Podzólico Vermelho-Amarelo granito ilha (PVgi) e Areia Quartzosa sedimentos quaternários (AQsq).

Santos (1997) explica que a unidade Cde é uma classe de solos minerais não hidromórficos que podem apresentar textura franco arenosa ou mais fina, sendo que o teor de argila é pequeno e não varia com a profundidade. Ocorrem na região de transição entre o morro e a planície e, no caso de Jurerê, está localizado na elevação leste de seu território. Ainda, a autora afirma que essa unidade apresenta formação coluvionar, característica muito importante do ponto de vista geotécnico, podendo apresentar problemas de estabilidade quando se cortam taludes e na execução de fundações por apresentar mudanças abruptas de resistência. Além disso, são problemáticos na utilização como apoio de fundações pois, normalmente, apresentam matacões dispersos em seu meio, o que pode mascarar o resultado das sondagens e dificultar o processo executivo das mesmas. Ademais, pode ser encontrado

juntamente o Plintossolo com substrato depósitos de encosta (Pde), o qual pode ser rico ou pobre em matéria orgânica na seção superficial, assim como apresentar mudança de textura abrupta e argila de atividade baixa.

Acerca do PZsq, Santos (1997) o descreve como solos minerais hidromórficos com predominância de textura arenosa, podendo apresentar na base do horizonte B uma camada extremamente dura, compacta e pouco permeável. Essa unidade geotécnica dispõe de 74,4% do solo da área de estudo, sendo característica de relevo plano. Na prática de engenharia, apresenta problemas para instalação de fossas e sumidouros.

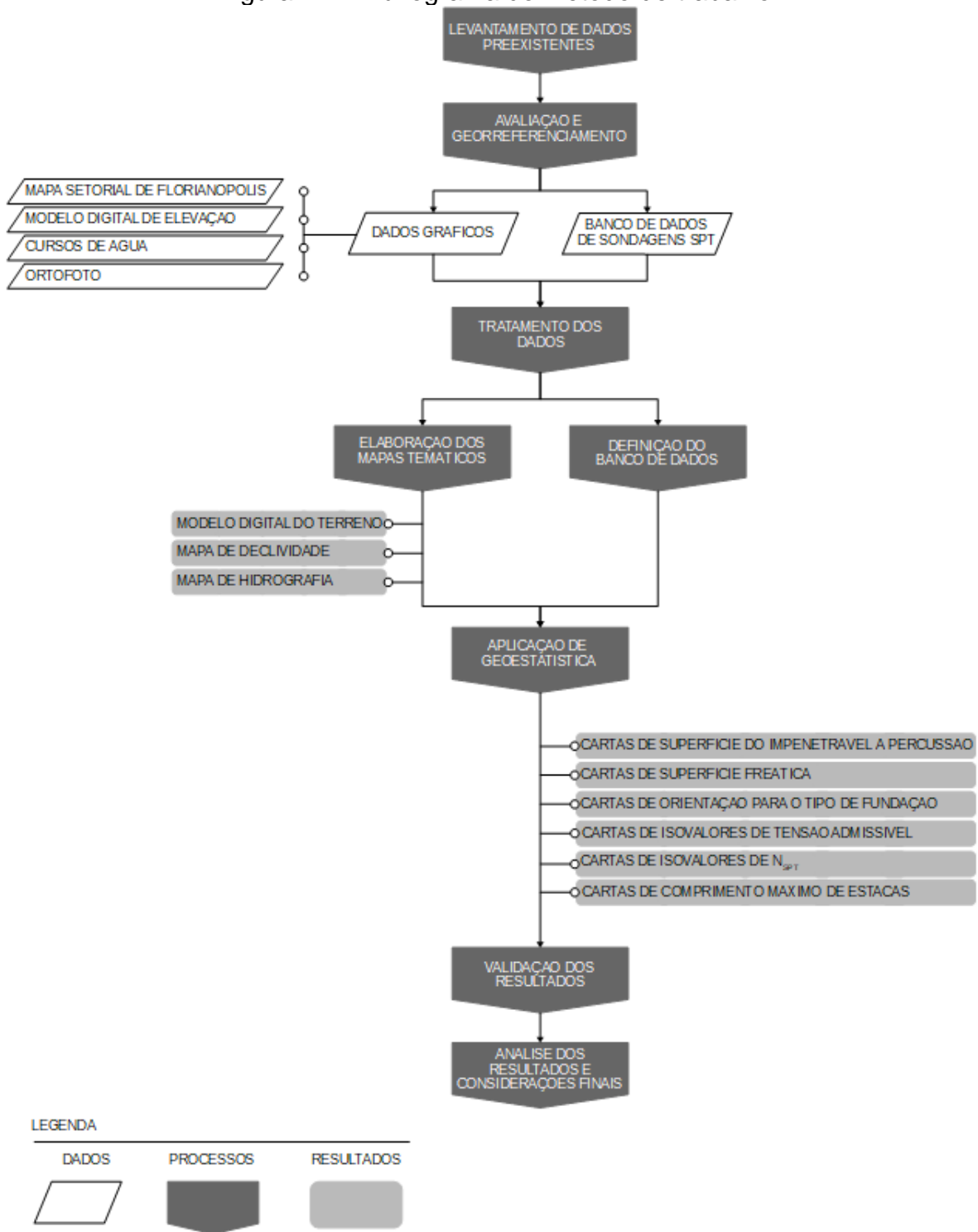
Já os PVgi ocorrem nas elevações oeste e leste da área de estudo e são formados por solos originados do granito Ilha, o qual apresenta cores mais claras em tonalidades de cinza e cores rosadas, de textura grosseira e originando solos bastante granulares. Trata-se do tipo de solo onde a ocupação urbana tem causado os maiores problemas de estabilidade de encostas e por apresentar maior ocorrência na ilha, além de ser muito heterogêneo. Além do exposto, devido a variabilidade das granulometrias, apresentam grande diversidade de propriedades para aplicação, quando compactados, em bases e sub-bases de rodovias assim como para barragens. A profundidade do impenetrável à percussão é bastante variável em função da formação de matacões de grandes dimensões típica do processo de alteração dos granitos (SANTOS, 1997).

Finalmente, a unidade geotécnica AQsq fica na faixa norte próxima ao mar da área de estudo e ocorre em relevo plano a suave ondulado. São solos soltos, sem estrutura e bem drenados que exibem cor acinzentada e comportamento muito homogêneo, constituído por solos não hidromórficos provenientes de sedimentos areno-quartzosos não consolidados, muito arenosos, de origem marinha. Segundo Santos (1997), deve-se garantir seu confinamento para obter bom comportamento como fundação, caso contrário, precisa ser estabilizado com solo argiloso ou com outro agente cimentante. Ademais, o lençol freático se encontra, em geral, a profundidades superiores a 2 metros, permitindo a execução de valas de infiltração para absorver os efluentes domésticos, desde que não existam poços de captação de água nas proximidades (SANTOS, 1997).

#### **4 MATERIAIS E MÉTODO DE TRABALHO**

Este capítulo detalha os materiais e o método de trabalho utilizados na elaboração de mapas temáticos e de cartas de aptidão para fundações, por meio da manipulação de dados gráficos do relevo e de sondagens à percussão em ambiente SIG, com o intuito de auxiliar na análise do perfil geotécnico do solo. No que se refere aos procedimentos realizados, o fluxograma apresentado na Figura 14 esclarece as etapas desde o levantamento de dados até a análise dos resultados.

Figura 14 – Fluxograma do método de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

As próximas seções discorrem detalhadamente sobre as principais etapas do processo.

#### 4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PREEXISTENTES

Preliminarmente, foi efetuada a busca pelos dados essenciais para o estudo proposto em bibliografias e órgãos oficiais de fácil acesso e credibilidade, haja vista a afirmação de Thiesen (2016) sobre a acurácia e o nível de detalhamento do produto desejado estarem diretamente relacionados aos dados de entrada.

Nesse sentido, o conjunto de dados é composto pelo mapa setorial de Florianópolis, segundo censo realizado em 2010 e obtido na Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF, 2018), pelos cursos de água obtidos por meio do Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS, 2015), pelo modelo digital de elevação (MDE) disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI, 2005), pela ortofoto do levantamento aerofotogramétrico cedida pelo Grupo de Trabalho em Sistemas de Informações Geográficas (GTSIG, 2016) e, por fim, pelo banco de dados de sondagens SPT elaborado por Christ (2019b). O resumo dos dados utilizados, tal qual suas respectivas fontes, para o desenvolvimento desse trabalho estão dispostas no Quadro 6.

Quadro 6 – Mapas digitais e banco de dados SPT

<b>Dado</b>	<b>Fonte</b>	<b>Ano</b>
Mapa setorial de Florianópolis	PMF	2018
Cursos de água	SDS	2015
Modelo Digital de Elevação	Epagri	2005
Ortofoto	GTSIG	2016
Banco de dados de sondagem SPT	Christ	2019

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Em seguida, os arquivos obtidos passaram pelas etapas de avaliação e georreferenciamento, tratamento – visando a adequação dos dados – e, finalmente, o processamento para elaboração dos mapas temáticos e cartas de aptidão. Em especial, os processos de tratamento e processamento foram divididos em duas partes, uma referente aos dados gráficos – delimitação da área de estudo, curvas de nível, cursos de água e ortofoto – e outra aos dados alfanuméricos oriundos do banco de dados de sondagem SPT, discutidos nas seções 4.3 e 4.4, respectivamente.

## 4.2 AVALIAÇÃO E GEORREFENCIAMENTO

Antes de gerar os mapas e as cartas propostos, é fundamental realizar uma avaliação dos dados gráficos e alfanuméricos levantados para garantir que as informações estejam compatíveis com o ambiente SIG. Para tanto, foi verificado se todos os arquivos possuíam uma extensão apropriada para importação no *software* escolhido para o processamento dos dados, o ArcGIS®.

Os arquivos contendo os setores de Florianópolis, os cursos de água e os pontos de sondagem SPT estão no formato *shapefile*. Já o MDE está em formato TIF, ou seja, uma imagem *raster*, e a ortofoto do levantamento aéreo da ilha está em formato ECW, uma imagem *raster* otimizada para fotografias aéreas. Em virtude da compatibilidade de todos os formatos supracitados com o ArcGIS®, esses arquivos foram todos importados ao *software* e tiveram seus dados georreferenciados.

De forma a possibilitar a sobreposição dos dados e padronização dos mapas e cartas gerados, foi definido um sistema de projeção para todas as camadas que serão criadas a partir da importação dos arquivos e de subseqüentes aplicações das ferramentas do *software*. Sendo assim, a projeção escolhida possui o sistema de referência geodésica horizontal definido pelo Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) na zona 22S, utilizando o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) datado em 2000, o SIRGAS 2000, estabelecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em definitivo, no ano de 2015 como o sistema referencial geodésico brasileiro. No tocante ao *datum* vertical, foi utilizado o marégrafo de Imbituba/SC como referencial.

Para georreferenciar os dados, fez-se o uso da extensão ArcCatalog, a qual identifica o sistema de projeção, o *datum* e a zona dos arquivos importados e, em seguida, realiza a conversão para o sistema definido. Excetuando-se o MDE e a ortofoto, os quais se encontram em WGS 84 e SAD 69, respectivamente, os demais arquivos não precisaram sofrer transformações quanto ao referencial geodésico.

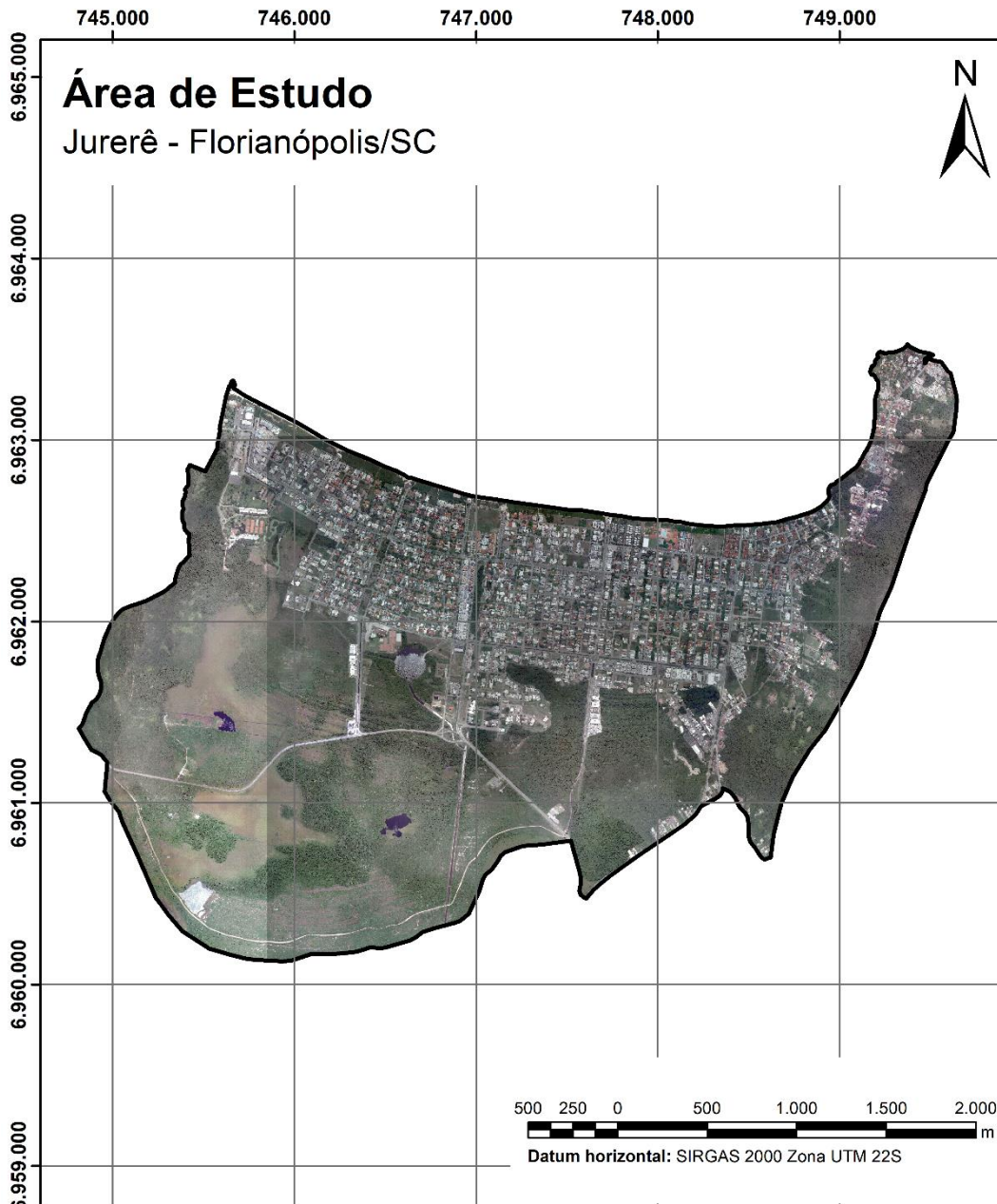
## 4.3 DADOS GRÁFICOS

Conforme citado anteriormente, os setores de Florianópolis, os cursos de água, o modelo digital de elevação e a ortofoto compõem a base de dados gráfica do trabalho. As seções a seguir dedicam-se a explicar o tratamento desses dados e os processos envolvidos no desenvolvimento dos mapas temáticos.

#### **4.3.1 Dados gráficos – Tratamento dos dados**

Uma vez que todos os arquivos já estavam em formato adequado para a manipulação, essa etapa não demandou um tratamento extensivo de dados. A delimitação da área de estudo foi realizada por meio da junção de todas as feições na tabela de atributos dos dados vetoriais referentes aos setores de Florianópolis que compõem Jurerê (Jurerê, Jurerê Leste e Jurerê Oeste) e, posteriormente, filtrando a camada para limitar a visualização apenas para a camada unificada. Também, foi sobreposta a camada contendo a ortofoto para melhorar a localização da área, a qual pode ser identificada no Mapa 1.

Mapa 1 – Área de estudo – Jurerê (Florianópolis/SC)



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Ortofoto GTSIG | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Em seguida, a área de estudo foi utilizada para delimitar tanto os dados gráficos quanto os de sondagens SPT para essa região, de modo a auxiliar na manipulação e na velocidade de processamento do *software*. Ademais, foram extraídas as curvas de nível de metro em metro, a partir do MDE, para a construção do Modelo Digital do Terreno (MDT).

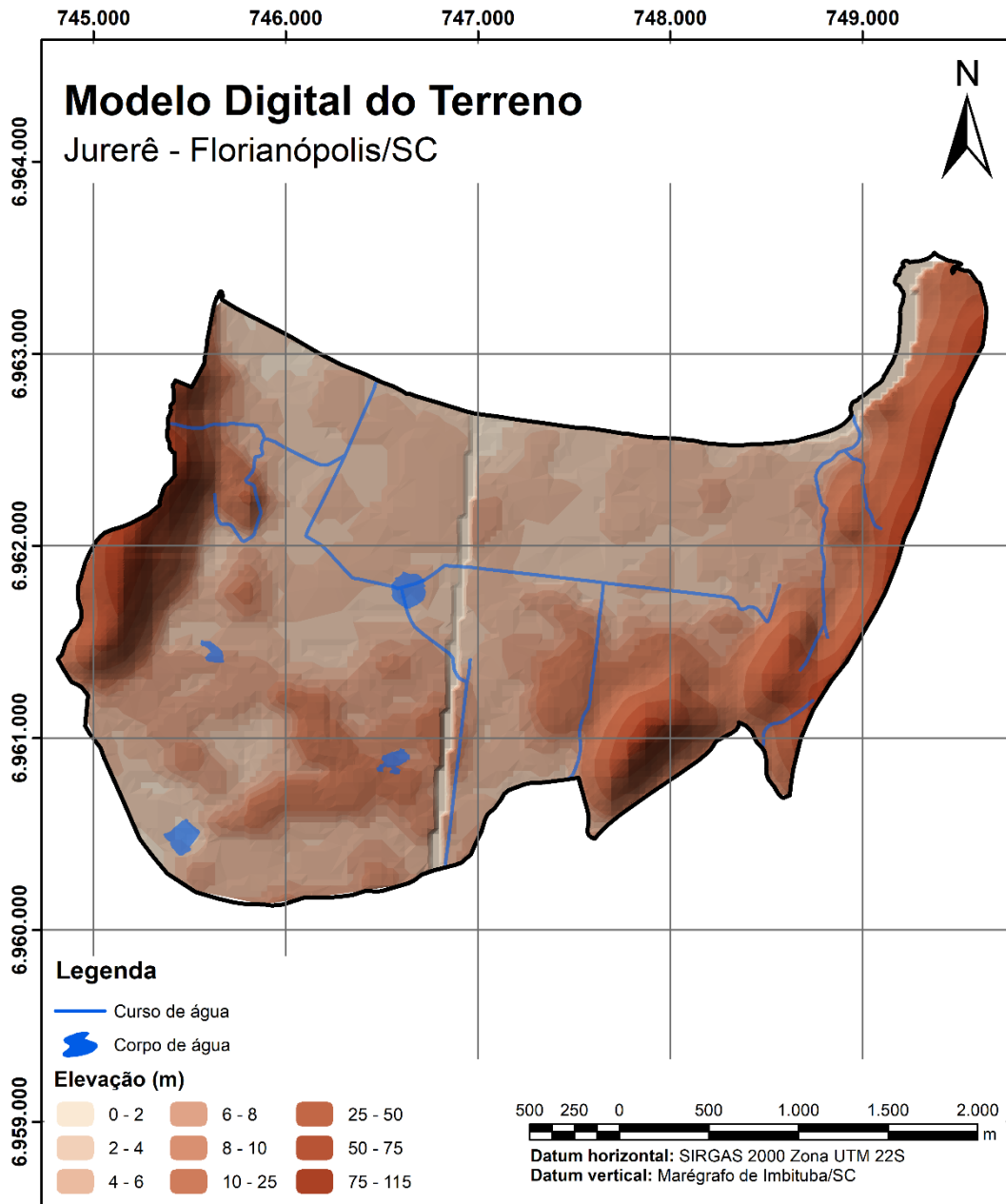
### **4.3.2 Dados gráficos – Elaboração dos mapas temáticos**

Os mapas temáticos foram desenvolvidos com o intuito de auxiliar a caracterização da área de estudo por meio do MDT, do mapa de declividade e de sua hidrografia e, inclusive, foram de grande serventia no ajuste do banco de dados de sondagem em preparação para a interpolação.

#### *4.3.2.1 Modelo Digital do Terreno - MDT*

Foi elaborado um MDT a partir das curvas de nível para cada metro, buscando representar a variabilidade da elevação da área de estudo, incluindo os cursos e corpos de água para melhor visualização das características geográficas do terreno, *vide* Mapa 2.

Mapa 2 – Modelo Digital do Terreno – Jurerê (Florianópolis/SC)



Base de dados: Curvas de nível Epagri. Cursos de água SDS | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Destaca-se que o desenvolvimento do MDT foi realizado por meio de interpoladores TIN, em que as coordenadas tridimensionais conhecidas associadas às curvas de nível criaram um modelo digital para representar a elevação do terreno (SANTOS, 2016). O referido modelo serviu como auxílio nos ajustes do banco de dados de sondagem SPT, na geração do mapa de declividade e na produção das cartas de aptidão para fundações.

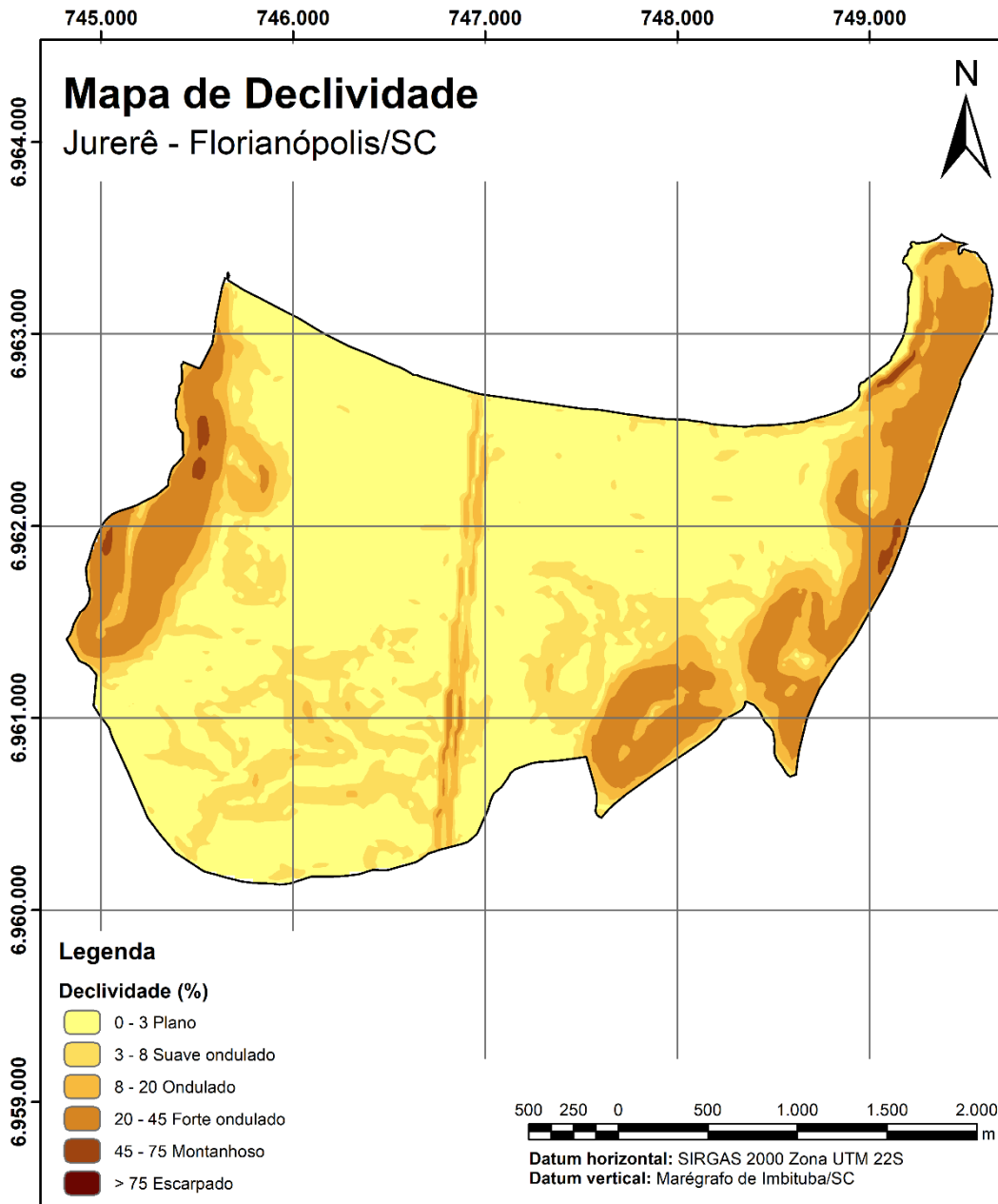
#### 4.3.2.2 Mapa de declividade

A partir do MDE em formato matricial, em que cada *pixel* contém dados relativos à elevação do terreno, as declividades são calculadas por meio da derivação dos dados de elevação de cada célula e aquelas ao seu redor para conceber o mapa de declividade (HUISMAN; BY, 2009).

Associado aos demais mapas, o mapa de declividade permite, por exemplo, a verificação da viabilidade de mobilização de equipamentos em um determinado local, a análise do risco de deslizamentos e a ratificação de informações de composição e origem dos solos (THIESEN, 2016). Higashi (2006) acrescenta que a ocorrência dos solos também pode ser estimada em função da declividade ou cota de elevação.

Nesse sentido, o mapa de declividade, apresentado no Mapa 3, foi classificado conforme o sugerido pelo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018).

Mapa 3 – Mapa de Declividade – Jurerê (Florianópolis/SC)



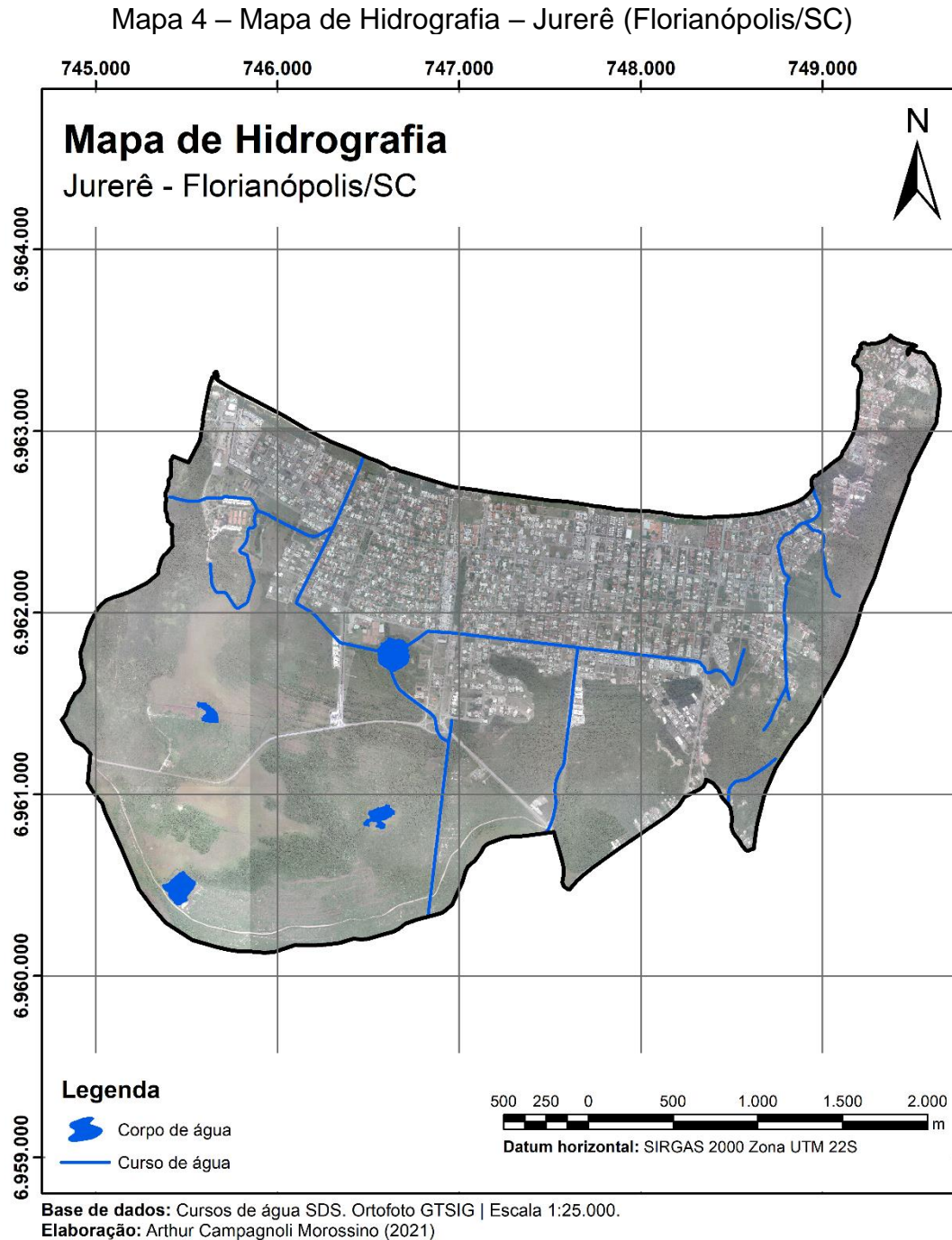
Base de dados: Curvas de nível Epagri | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

No presente trabalho, o mapa de declividade, em conjunto com o MDT, foi utilizado para caracterizar o relevo e ajustar os dados de sondagem. Ademais, foi extraído desse mapa as declividades dos furos de sondagem, em porcentagem, para incrementar o banco de dados em futuras análises topográficas e de identificação e caracterização do tipo de solo (SANTOS, 2016).

#### 4.3.2.3 Mapa de hidrografia

Por sua vez, o mapa de hidrografia foi desenvolvido com a sobreposição da ortofoto e os cursos de água obtidos do SDS e, como complemento, foram identificados e hachurados os corpos de água e feitas as conexões visíveis pela ortofoto dos cursos de água, de acordo com o Mapa 4.



Por fim, além de enriquecer a caracterização da área de estudo, o mapa de hidrografia auxiliou nos ajustes dos dados desconhecidos no que se refere ao nível

de água do banco de dados de sondagem. Ademais, segundo Thiesen (2016), o mesmo também pode ser utilizado para ratificar informações de origem e composição do solo.

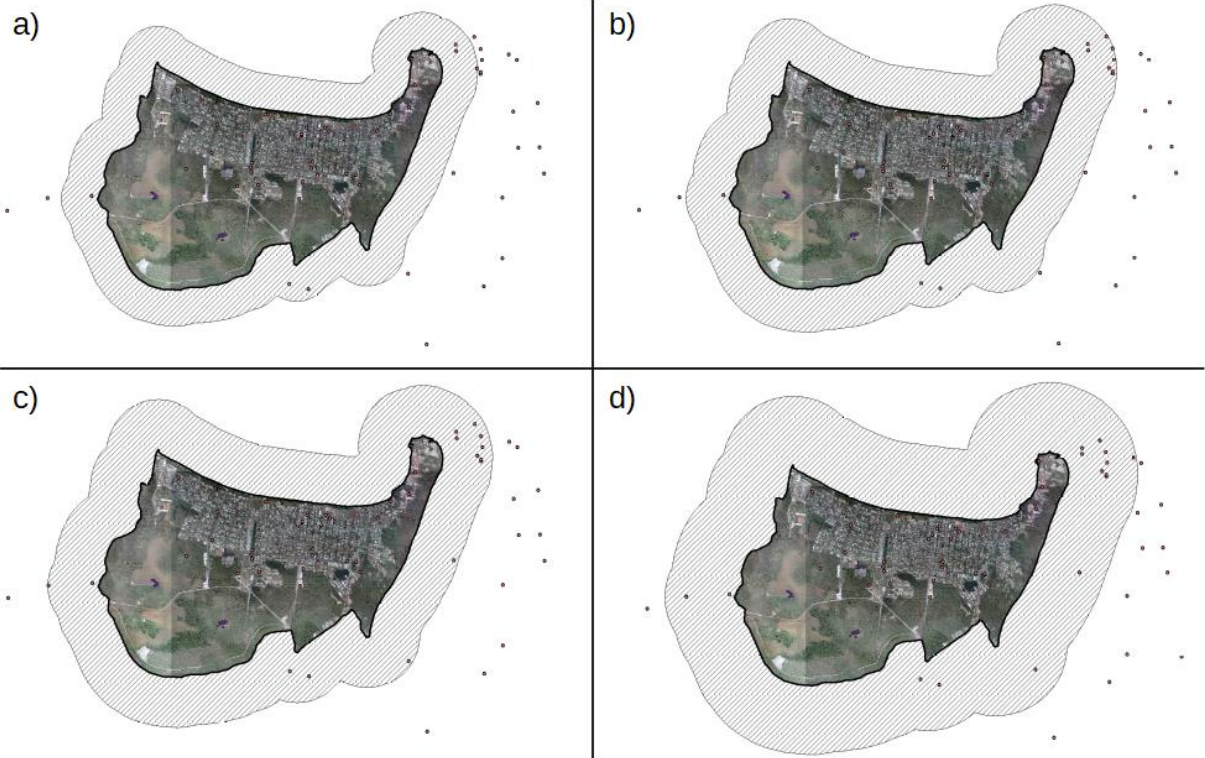
#### 4.4 DADOS ALFANUMÉRICOS

Similarmente, os dados de sondagens SPT obtidos de Christ (2019b) passaram inicialmente pela etapa de seleção, em que se definiu o critério de escolha da quantidade de dados utilizada no estudo, seguido pela preparação desses dados – objetivando sua adequação para a interpolação – e, por fim, informações adicionais foram incluídas ao banco de dados possibilitando análises futuras. Esse processo foi baseado nos trabalhos de Santos (2016) e Thiesen (2016) ao corroborarem a necessidade da criação de um banco de dados alfanumérico compatível, contendo informações que permitissem o processamento dos dados e o desenvolvimento das análises desejadas.

##### 4.4.1 Dados de sondagens SPT – Tratamento dos dados

O banco de dados de sondagens à percussão originalmente possui um total de 504 pontos de sondagem espalhados pela ilha de Florianópolis, sendo que 29 desses pontos se encontram dentro dos limites de Jurerê. Devido à quantidade limitada de dados na região escolhida, quando comparado aos trabalhos de Santos (2016) e Thiesen (2016), buscou-se pontos de apoio fora da área de estudo para contribuir com a interpolação e contemplar toda a região estudada. Para tal, foram testados e analisados *buffers* com extensões diferentes que incorporassem mais dados de sondagem ao estudo, a Figura 15 exemplifica os testes realizados.

Figura 15 – *Buffers* de 500 (a), 600 (b), 700 (c) e 1000 m (d)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O Quadro 7 demonstra a relação entre a dimensão do *buffer* e o aumento da quantidade de pontos de sondagem.

Quadro 7 – Relação entre a dimensão do *buffer* e o aumento de dados de sondagem

Dimensão (m)	Aumento de dados	Total
500	6	35
600	5	40
700	3	43
1000	1	44

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Por fim, foi optado pelo *buffer* de 700 metros pois, além de suprir a necessidade de pontos de apoio fora da área de estudo e respeitar a recomendação de amostras mínimas de Landim (2000), *vide* seção 2.4.4, possui uma proporção melhor entre o aumento da dimensão do mesmo para o número de dados, totalizando 43 pontos de sondagem para o banco de dados.

Uma vez finalizada a seleção do conjunto de furos de sondagem, foi feita a adequação dos dados de impenetrável e nível de água para posterior processamento no ambiente SIG. Para tal, foram analisados os dados de impenetrável e de nível de água apresentados no Quadro 5.

Os itens 4.4.1.1 e 4.4.1.2 detalham as decisões tomadas.

4.4.1.1 Análise dos dados de impenetrável

Seguindo os preceitos dos estudos de Santos (2016) e Thiesen (2016), a fim de garantir uma interpolação consistente e que todas as sondagens sejam consideradas nas diferentes profundidades analisadas, adotou-se por um padrão de  $N_{SPT} = 50$  abaixo do impenetrável. Desta forma, os campos de  $N_{SPT}$  abaixo do impenetrável puderam ser incluídos no modelo matemático, independentemente da profundidade analisada nos mapas, sem causar distorções nos resultados da interpolação e evitando, assim, a exclusão de dados.

Além disso, em consequência da quantidade limitada de dados de sondagem, foram realizados ajustes adicionais em relação aos furos que não atingiram o impenetrável, utilizando como referência o limite de sondagem. Para tanto, foi analisada a tabela de atributos apresentada na Figura 16 e, quando não era conhecida a profundidade do impenetrável, bem como a profundidade de paralisação do ensaio, foi adotado para o impenetrável a profundidade em que foi verificado o valor de 1000 para o  $N_{SPT}$ . Finalmente, quando o ensaio fora paralisado antes de atingir o impenetrável, considerou-se a profundidade imediatamente superior.

Figura 16 – Tabela de atributos do banco de dados de sondagens SPT

Nspst13	Nspst14	Nspst15	Nspst16	Nspst17	Nspst18	Nspst19	Nspst20	Nspst21	Nspst22	Nspst23	Nspst24	Nspst25	Nspst26	Nspst27	Impenetrav	Paralisação
30	13	9	43	42	42	22	22	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	40	20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15,8
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11,45
3	13	13	2	3	4	5	7	5	2	10	29	10	1000	1000	25,5	
4	4	7	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15,45
4	4	4	5	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	16,45
13	12	13	14	32	24	23	6	5	4	4	5	4	5	4	1000	1000
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	13
10	13	9	5	5	6	4	5	6	5	5	28	20	27	45	29,07	1000
3	2	2	3	6	7	11	13	27	30	45	43	1000	1000	1000	24,15	1000
4	3	3	4	5	5	5	6	6	7	15	10	12	12	13	1000	30
10	5	4	6	5	4	3	5	6	2	4	5	6	7	5	1000	44,45
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	10,45
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	12,3
31	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	13,3
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11,3
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	8,56
4	11	9	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15,86
3	2	2	3	7	4	5	5	6	3	5	15	13	8	1000	32,74	
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11,45
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	12,89
44	31	17	2	3	5	5	5	6	7	6	6	6	7	8	1000	37,56
3	3	5	3	5	4	4	5	5	4	5	6	5	5	5	1000	46,45
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	10,45
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11,87
9	8	10	11	21	27	33	32	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20,33
4	3	4	5	6	3	5	6	6	10	8	9	9	6	5	1000	38
28	30	29	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	15,45
5	17	4	3	3	4	4	3	5	3	6	5	7	8	6	1000	39,49
25	17	20	27	19	24	10	23	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	21,78
3	5	10	23	28	34	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	18,83
18	22	27	28	34	42	3	5	4	3	2	2	2	4	3	1000	44,45
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	12,3
12	12	8	7	6	18	6	7	6	6	7	12	20	42	1000	31,25	
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	11,08
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	4,84
4	17	3	5	12	13	13	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	20,45
4	3	3	4	5	4	4	6	5	5	5	6	7	6	1000	32,45	
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	5,86

A tabela apresentada pela Figura 16 também foi utilizada para a análise dos dados de nível de água.

#### *4.4.1.2 Análise dos dados de nível de água*

Acerca dos dados de nível de água, os campos em que constavam o valor 1000, ou seja, a informação em relação à profundidade do lençol freático era desconhecida ou quando o ensaio foi paralisado antes de atingir a cota do nível de água, foram utilizados os mapas temáticos para análise de elevação e comparação com os furos próximos aos pontos estudados. Analogamente aos dados de impenetrável, esse procedimento foi realizado para evitar a perda de dados e auxiliar na performance da interpolação.

Perante o exposto, para os furos de sondagem com dados desconhecidos foi necessário consultar o MDT, o mapa de declividade e os furos próximos para compatibilizar as informações, adotando-se a profundidade do furo mais próximo e, de preferência, com a mesma elevação do terreno.

#### **4.4.2 Dados de sondagem SPT – Definição do banco de dados**

Após o ajuste dos dados destoantes, o banco de dados de Christ (2019b) foi organizado por meio da filtragem da tabela de atributos, contemplando apenas as informações fundamentais para o presente estudo, facilitando, assim, a gestão dos dados e a adição de novos campos fundamentais para a produção das cartas de aptidão propostas.

Assim sendo, foram extraídas as cotas topográficas de cada furo a partir do MDE e a declividade da superfície gerada pelo mapa de declividade mediante o cruzamento desses dados com os furos de sondagem. Ademais, em posse das cotas altimétricas de cada um dos pontos de sondagem à percussão, foram determinadas as cotas do impenetrável e do nível de água, subtraindo-se suas respectivas profundidades da cota do terreno. Vale ressaltar que, apesar de os pontos já estarem georreferenciados, as coordenadas geográficas foram adicionadas à tabela para referência em futuros estudos.

Perante o exposto, o Quadro 8 apresenta a tabela de atributos que compõe o referido banco de dados acompanhado de suas respectivas descrições.

Quadro 8 – Descrição da tabela de atributos do banco de dados de sondagem

<b>Atributo</b>	<b>Descrição</b>
FID	Campo obrigatório, é uma identificação gerada automaticamente ao importar um arquivo ou criar um <i>shapefile</i> .
Shape	Campo obrigatório, refere-se à topologia do arquivo vetorial (Ponto, Linha ou Polígono).
Coord_E	Coordenada E dos furos de sondagem, considerando a projeção UTM e o sistema SIRGAS 2000.
Coord_N	Coordenada N dos furos de sondagem, considerando a projeção UTM e o sistema SIRGAS 2000.
NsptX	Número de golpes dos 30 cm finais ( $N_{SPT}$ ) da sondagem SPT para a profundidade X, em que X varia de 1 metro até a profundidade do impenetrável do solo.
Cota	Cota altimétrica em que o furo de sondagem foi realizado, tendo como referência vertical o marégrafo de Imbituba/SC, em metros.
Prof_NA	Profundidade do nível de água encontrado no furo após 24h da realização do ensaio, em metros.
Cota_NA	Cota do lençol freático, baseado no cálculo da cota do furo (Cota) e da profundidade do nível de água (Prof_NA), em metros.
Prof_Imp	Profundidade do impenetrável à percussão, em metros.
Cota_Imp	Cota do impenetrável, baseado no cálculo da cota do furo (Cota) e da profundidade do impenetrável (Prof_Imp).
Data	Data de realização da sondagem cadastrada no formato DD/MM/AAAA.
Declividade	Declividade do terreno, em porcentagem, nos pontos analisados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021) com base nos dados de Christ (2019b)

Salienta-se que cada linha do banco de dados estruturado representa um furo de sondagem, o qual está associado às informações dispostas no Quadro 8.

Enfim, por meio do cruzamento da localização espacial e das informações pertinentes para cada análise, é possível realizar a interpolação e gerar os mapas que representam as características do solo voltadas para a execução de fundações. As análises mais detalhadas, como os mapas gerais de orientação para fundações, o mapa de isovalores de tensão admissível e o mapa de isovalores de  $N_{SPT}$  e comprimento máximo de estacas, precisaram da adição de novos dados de entrada descritos na seção 4.5.

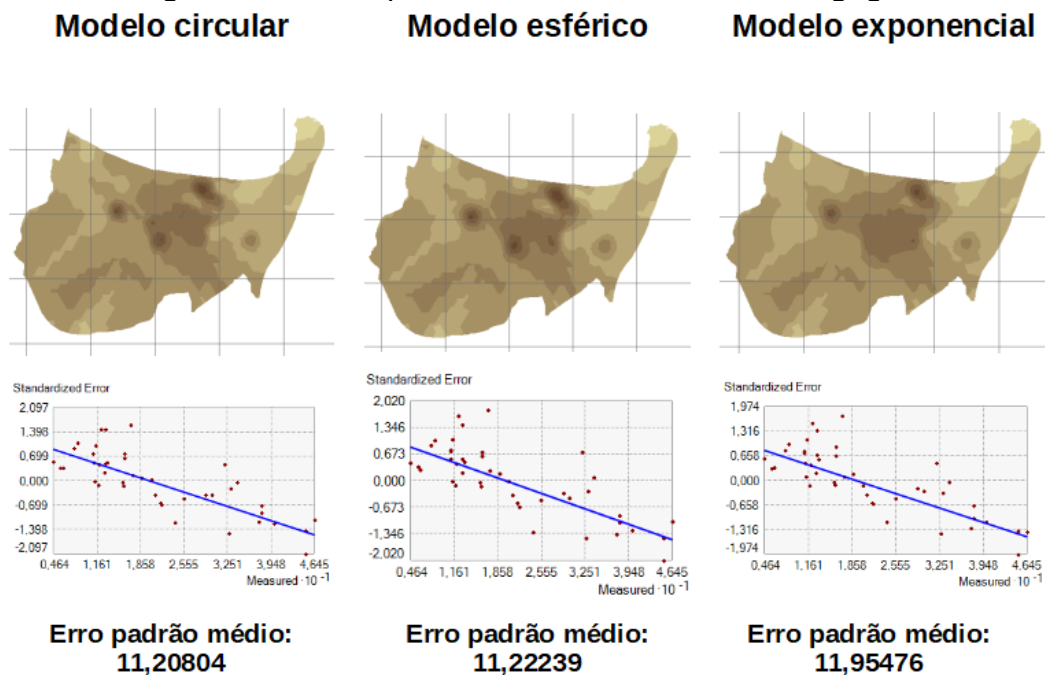
#### 4.5 APLICAÇÃO DE GEOESTATÍSTICA

Com o banco de dados estruturado, foi aplicada a técnica de geoestatística para desenvolver os mapas de aptidão para fundações da área de estudo. Esse processo se difere da estatística tradicional por levar em conta a espacialidade dos dados em análise. Para tal, foi utilizado o método da krigagem para interpolar os valores desconhecidos.

O método da krigagem se baseia na modelagem do semivariograma em função dos dados de entrada, sendo essa uma etapa fundamental para que o modelo resultante da interpolação esteja o mais próximo possível da realidade. Preliminarmente, é analisado o histograma dos dados e se procura realizar uma filtragem para fazer com que o histograma se aproxime de uma curva gaussiana. Além disso, deve-se tomar cuidado com os dados que destoam dos demais ao seu redor, evitando o chamado efeito pepita, levando-se em consideração o conteúdo abordado na seção 2.4.5.

Com a modelagem do semivariograma concluída, realiza-se a interpolação pelos modelos de krigagem circular, esférico e exponencial – estes são os modelos mais verificados na literatura para aplicação em dados do meio físico (SANTOS, 2016) – e, em seguida, por meio da validação cruzada, define-se aquele que melhor se encaixe aos dados. A Figura 17 ilustra a comparação entre os resultados obtidos para a superfície do impenetrável à percussão, em que o critério de escolha para o presente estudo foi o de menor erro médio.

Figura 17 – Exemplo de análise do modelo de krigagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Fica evidenciado pela Figura 17 que a diferença entre os modelos é pequena, porém, ainda assim, todos os processamentos passaram pela análise da validação cruzada.

As próximas seções dedicam-se a fundamentar os critérios escolhidos para o desenvolvimento das cartas de aptidão para fundações representativas da superfície do impenetrável à percussão, da superfície do lençol freático, das cartas de orientação para fundações superficiais e profundas, de isovalores de tensão admissível do solo para fundação superficial, de isovalores de  $N_{SPT}$  para fundação profunda e de indicativo de comprimento máximo de estacas.

#### 4.5.1 Mapas gerais de aptidão para fundações

Os mapas das superfícies do impenetrável e do nível do lençol freático foram elaborados por meio da interpolação da localização espacial dos furos de sondagem e das profundidades do impenetrável (Prof\_Imp) e do nível de água (Prof\_NA). Complementarmente, foram desenvolvidos os mapas das cotas de profundidade com o intuito de contribuir na análise das superfícies do impenetrável e do nível de água. Além disso, para os mapas de profundidade e cota do lençol freático, foram adicionados 20 pontos margeando a borda do oceano para delimitar o nível do mar.

Acerca do mapa de orientação para o tipo de fundação mais indicada, a interpolação seguiu o critério de viabilidade econômica de Rebello (2008) e considerando os limites da Equação (3), expostos na seção 2.2.2, conforme os seguintes fatores:

- $N_{SPT} \geq 8$  na profundidade analisada, bem como na camada seguinte de forma a evitar o assentamento da fundação em solo mole ou fofo.
- Limite máximo de dois metros de profundidade para assentamento da fundação.
- Regiões que se encontram fora dos critérios supracitados foram direcionadas para fundação profunda.

Além disso, foi sobreposta a informação referente à presença do lençol freático, haja vista que esse é um fator importante a ser levado em consideração na escolha do tipo de fundação.

Cabe ressaltar que os dois mapas de orientação para fundações diretas ou profundas são indicados para as condições cuja carga no pila seja inferior a 500 kN, em conformidade com Santos (2016) e Thiesen (2016), em que o cálculo da tensão admissível, realizado com a Equação (3), e o pré-dimensionamento da geometria da sapata, de acordo com a Equação (2), são demonstrados a seguir:

$$N_{SPT} = 8$$

$$\sigma_a = \frac{N_{spt}}{50} + q \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_a = \frac{8}{50} + 0$$

$$\sigma_a = 0,16 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 160 \text{ kN/m}^2$$

Sendo a carga limitante de 500 kN e com base na Equação (2), obtém-se a área da base da sapata:

$$\sigma = \frac{P}{B \cdot L}$$

$$\sigma = \frac{P}{A_b}$$

$$A_b = \frac{500}{160}$$

$$A_b = \frac{500}{160}$$

$$A_b = 3,12 \text{ m}^2$$

Ao considerar uma base quadrada:

$$B^2 = 3,12$$

$$B = \sqrt{3,12}$$

$$B \cong 1,80 \text{ m}$$

Finalmente, foram gerados os mapas de orientação para os dois primeiros metros de profundidade seguindo o método de interpolação utilizado por Santos (2016), em que para cada furo de sondagem foi atribuído um número referente à propensão ao tipo de fundação indicado. Portanto, atribuiu-se o número 0 para a fundação direta e o número 1 para a fundação profunda e, após a aplicação da krigagem, dividiram-se os resultados em regiões com valores variando entre 0 e 0,5 (aptidão para fundação superficial) e regiões variando entre 0,5 e 1 (aptidão para fundação profunda). Ademais, em virtude da estrutura do banco de dados de SPT, é possível gerar novos tipos de mapas com configurações de carga e geometria diferentes.

#### **4.5.2 Fundação superficial – Mapa de isovalores de tensão admissível**

A produção dos mapas de isovalores de tensão admissível do solo foi realizada a partir do cálculo da tensão admissível pela Equação (3) para cada camada de solo analisada. Visto que essa equação é exclusiva para fundações diretas, esses mapas são indicados na orientação da execução de fundações superficiais.

Também, em virtude de a equação estar limitada ao intervalo  $5 \leq N_{\text{SPT}} \leq 20$ , foram estabelecidos os valores de 0,1 MPa (100 kN/m<sup>2</sup>) e 0,4 MPa (400 kN/m<sup>2</sup>) como limites inferior e superior, respectivamente, para as tensões admissíveis do solo. Ademais, as cartas foram geradas até quatro metros de profundidade para contemplarem, além das camadas de assentamento da fundação, o bulbo de tensões.

Seguindo essa lógica, conforme explanado na seção 2.2.2, a profundidade do bulbo de tensões está relacionada com a geometria da sapata e, por conseguinte, optou-se por não definir uma geometria padrão para o presente estudo. Portanto, utilizou-se o  $N_{\text{SPT}}$  da camada de apoio da fundação para o cálculo da tensão

admissível, visto que, dessa forma, o valor médio do  $N_{SPT}$  no bulbo de tensões pode ser calculado por meio da média das tensões admissíveis das profundidades abrangidas pelo bulbo em questão.

#### **4.5.3 Fundação profunda – Mapa de isovalores de $N_{SPT}$**

Analogamente, também foram desenvolvidos mapas de orientação para as fundações profundas por meio da interpolação do  $N_{SPT}$  para cada metro de profundidade, gerando faixas de abrangência de mesmo valor, denominadas isovalores de  $N_{SPT}$ .

Os dados foram agrupados a cada 5 golpes, sendo que para cada intervalo foi atribuído uma cor diferenciada para facilitar a identificação das regiões. Nesse contexto, a apresentação dos mapas foi feita para os primeiros quatro metros de profundidade, para comparação com os mapas de tensão admissível do solo para fundações superficiais, e, devido à maior profundidade do impenetrável estar a 45 metros, o restante foi apresentado a cada 4 metros. Ressalta-se que foram geradas cartas de isovalores de  $N_{SPT}$  compreendendo todas as profundidades até o impenetrável e essas podem ser consultadas no Apêndice – Mapas de isovalores de  $N_{SPT}$  para as profundidades de 1 a 45 metros.

#### **4.5.4 Mapa de comprimento máximo de estacas**

As cartas de comprimento máximo de estacas foram produzidas pela interpolação da profundidade de apoio da fundação profunda, tendo como base as recomendações de Cintra e Aoki (2010), apresentadas no Quadro 3, as quais relacionam o critério de parada com o  $N_{SPT}$  de diferentes tipos de estacas.

Para o presente estudo, foram escolhidos os três tipos de estacas mais comumente executadas, cujos intervalos estão elencados a seguir:

- Hélice contínua: parada entre o intervalo  $20 < N_{SPT} \leq 45$ .
- Pré-moldada com diâmetro menor que 30 cm: parada entre o intervalo de  $15 < N_{SPT} < 25$ .
- Pré-moldada com diâmetro maior que 30 cm: parada entre o intervalo de  $25 < N_{SPT} \leq 35$ .

Por fim, foi considerado o limite superior de parada, resultando no comprimento máximo para cada furo de sondagem.

#### 4.6 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Uma vez que a espacialidade dos dados consiste no fundamento da geoestatística e que todos os mapas de aptidão para fundações foram elaborados a partir dessa técnica, torna-se essencial verificar a confiabilidade dos resultados com base na distribuição espacial dos dados. Para tanto, foi aplicada a proposição de Zuquette (1993) na análise do nível de detalhamento e a distância de espaçamento dos pontos de sondagem e recobrimento da área de estudo.

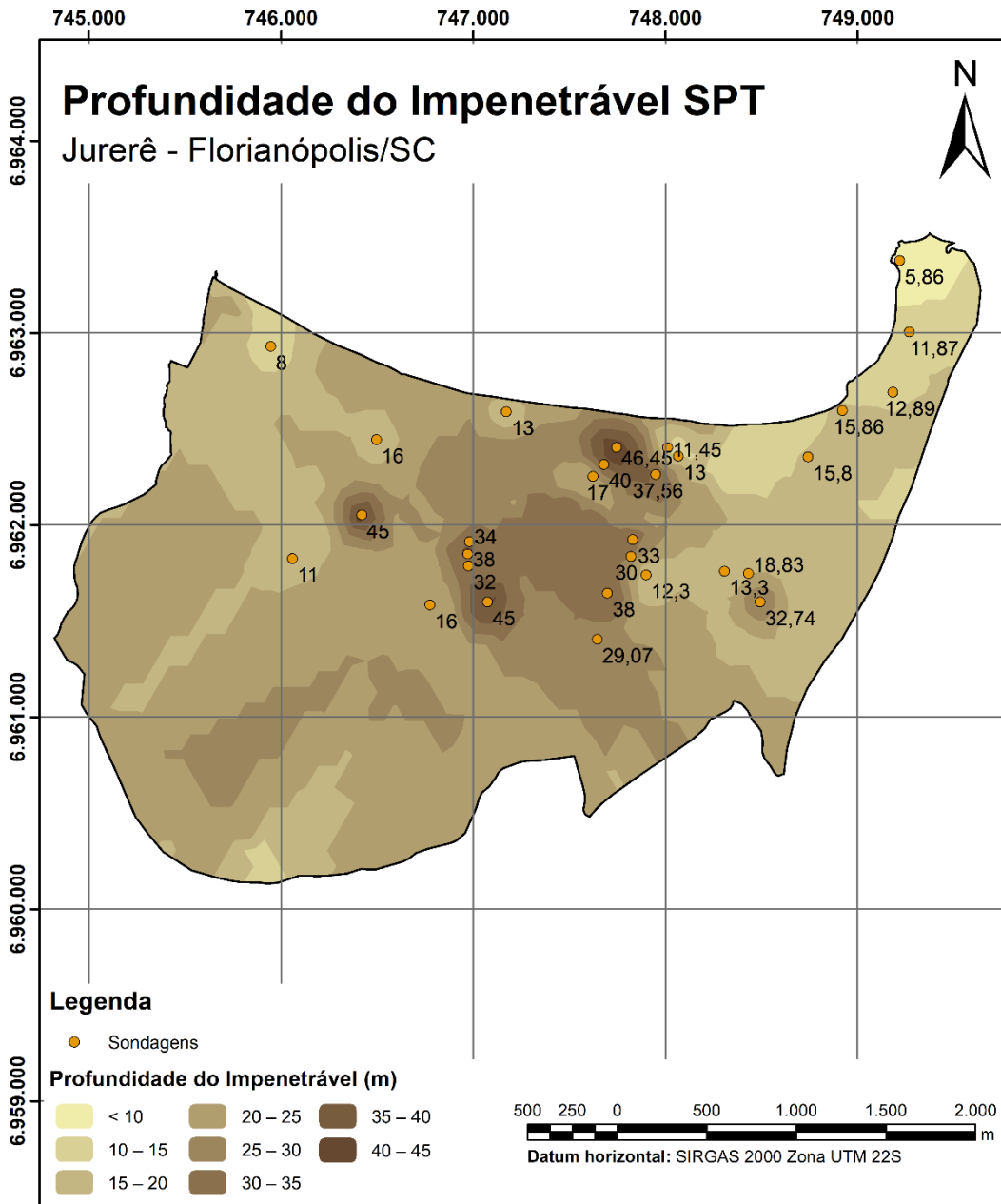
## 5 RESULTADOS

O presente capítulo tem o propósito de apresentar os mapas desenvolvidos a partir do banco de dados organizado em ambiente SIG. As próximas seções são dedicadas à análise do impenetrável à percussão, da superfície freática, dos mapas de orientação para fundação superficial e profunda, de isovalores de tensão admissível, de isovalores de  $N_{SPT}$  e de indicação do comprimento máximo de estacas.

### 5.1 CARTAS DE SUPERFÍCIE DO IMPENETRÁVEL À PERCUSSÃO

A superfície do impenetrável à percussão foi criada utilizando os 43 pontos de sondagens selecionados e resultou no Mapa 5, o qual apresenta a profundidade do impenetrável no bairro de Jurerê.

Mapa 5 – Superfície do impenetrável à percussão



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

De acordo com o Mapa 5, observa-se que as regiões com tonalidades mais claras correspondem ao impenetrável mais superficial e à medida que o mesmo se aprofunda as cores ficam mais escuras. Nesse sentido, as maiores profundidades do impenetrável estão localizadas na região central e com maior densidade de sondagens, entre as coordenadas 747.000W e 748.000W, registrando variações de profundidades na faixa de 25 a 45 metros. Em especial, a porção nordeste é onde se encontram as menores profundidades do impenetrável, registrando medidas de 10 metros. Ademais, os locais menos densos em questão de furos de sondagem e

próximos aos limites da área estudada contém contornos das faixas de profundidade mais suavizados que as demais e com o impenetrável variando de 15 a 25 metros.

A Tabela 1 evidencia, numericamente, que 85,7% do impenetrável está em profundidades de 15 até 30 metros, sendo predominante a faixa de profundidades de 20 a 25 metros, dispondo cerca de 45% da área. Profundidades menores que 10 metros são referentes a 1,2% do território, ao passo que a maior profundidade registrada do impenetrável representa apenas 0,2% da área.

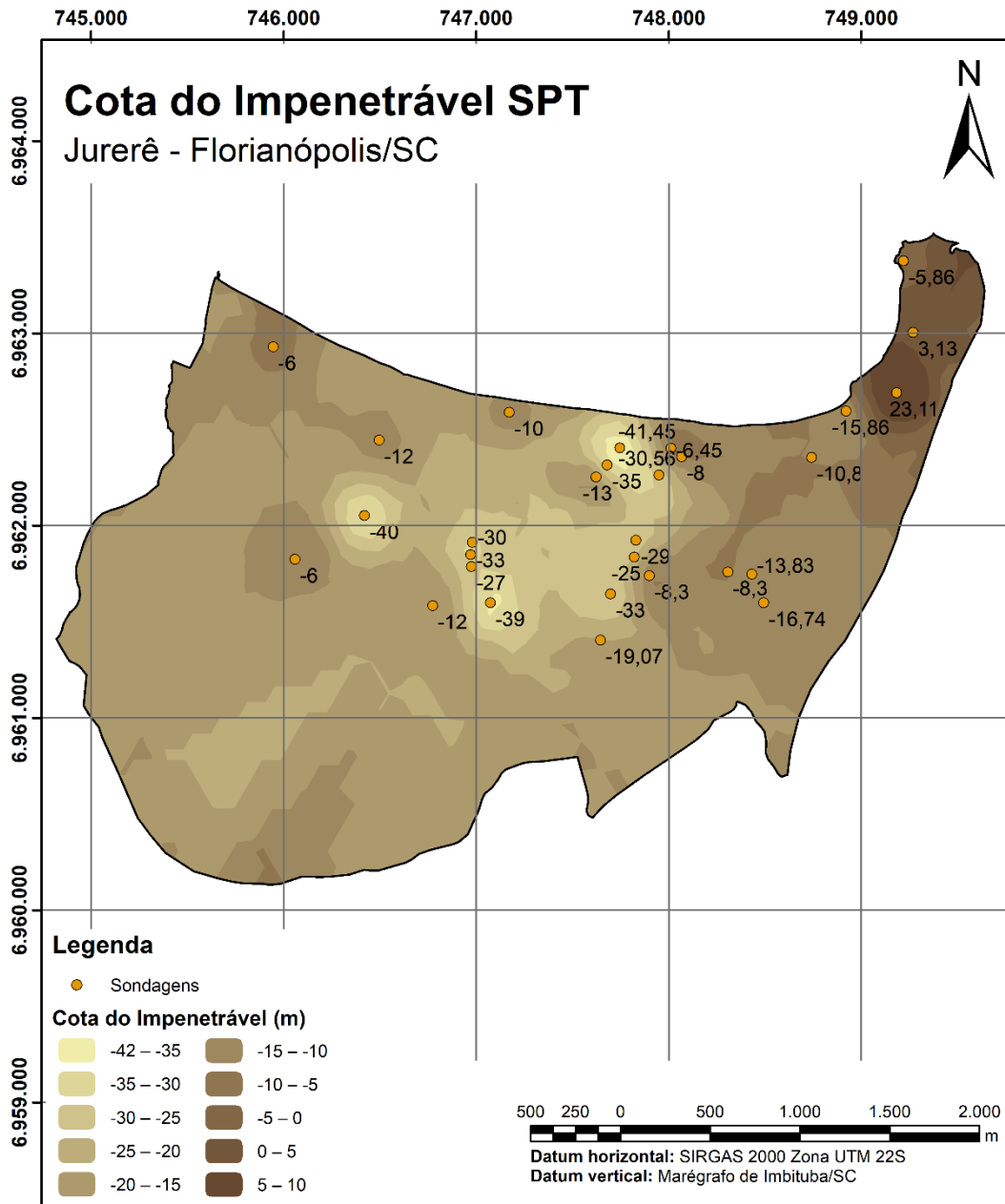
Tabela 1 – Frequência de área da profundidade do impenetrável

<b>Prof. do impenetrável (m)</b>	<b>% da área</b>
< 10	1,2%
10 – 15	6,2%
15 – 20	25,4%
20 – 25	44,9%
25 – 30	15,4%
30 – 35	5,7%
35 – 40	1%
40 – 45	0,2%
<b>Total</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 5</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para contribuir com a interpretação visual da superfície do impenetrável, elaborou-se o Mapa 6 com as cotas do mesmo, considerando o marégrafo de Imbituba/SC como o referencial vertical.

Mapa 6 – Cota do impenetrável à percussão



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

A região em torno das coordenadas 749.000W e 6.963.000S possuem a cota do impenetrável acima do nível do mar, em que se atingem cotas de 10 metros, haja vista o encontro de maiores elevações nessa região (Mapa 2) em associação com as menores profundidades de impenetrável. Similarmente, a combinação entre maiores profundidades do impenetrável e elevações menores tornam a região central aquela que apresenta cotas mais profundas, variando de 20 a 42 metros abaixo do nível do oceano. Já a região menos densa e as porções próximas aos limites da área de estudo possuem cota do impenetrável entre o nível do mar até 20 metros abaixo dele.

**Tabela 2 – Frequência de área da cota do impenetrável**

<b>Cota do impenetrável (m)</b>	<b>% da área</b>
5 – 10	0,8%
0 – 5	2,7%
- 5 – 0	1,2%
- 10 – - 5	4,3%
- 15 – - 10	22,6%
- 20 – - 15	48,6%
- 25 – - 20	11,4%
- 30 – - 25	6,6%
- 35 – - 30	1,6%
- 42 – - 35	0,2%
<b>Total</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 6</b>

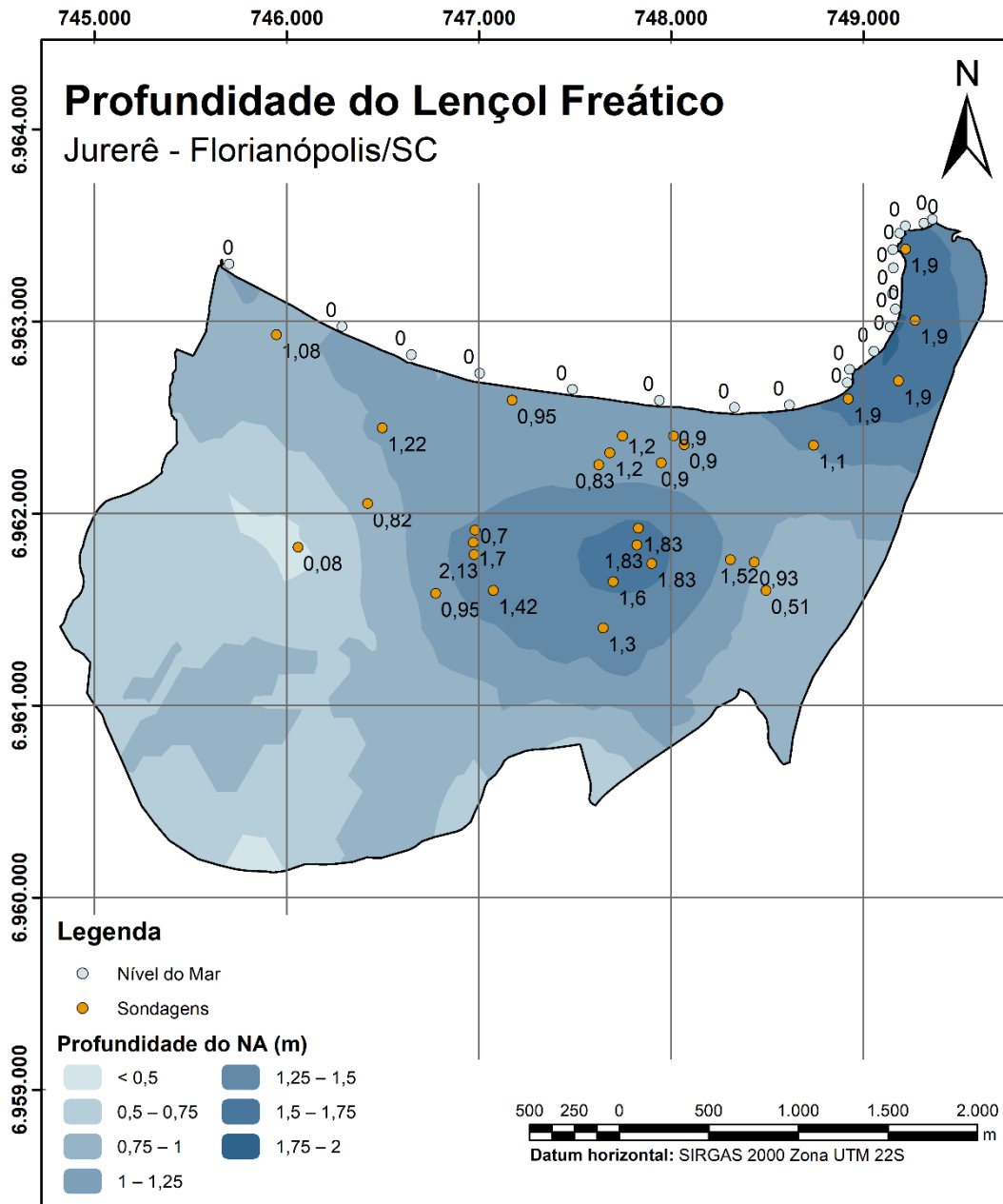
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Ademais, a Tabela 2 exibe a frequência de área para as cotas do impenetrável e, por meio de sua análise numérica, conclui-se que 82,6% do impenetrável situa-se entre 10 a 25 metros abaixo do nível do mar. Além disso, apenas 3,5% do mesmo está acima do nível do oceano, resultando em uma cota máxima de 10 metros.

## 5.2 CARTAS DE SUPERFÍCIE FREÁTICA

Em relação à superfície do lençol freático, esta é apresentada pelo Mapa 7, o qual foi obtido exclusivamente a partir dos dados provenientes dos ensaios de sondagem selecionados para a área de estudo. Concomitantemente, o Mapa 8 foi elaborado com as cotas dos furos de sondagem de forma a complementar a análise da superfície freática.

Mapa 7 – Superfície do lençol freático



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Durante a análise visual do Mapa 6, observa-se que as cores mais claras representam profundidades do nível de água de até 1 metro, sendo regiões menos densas de pontos de sondagem e com contornos menos suavizados. Por sua vez, as cores mais escuras formam bolsões nas regiões central e nordeste do mapa, nas quais o lençol freático atinge profundidades de até 2 metros.

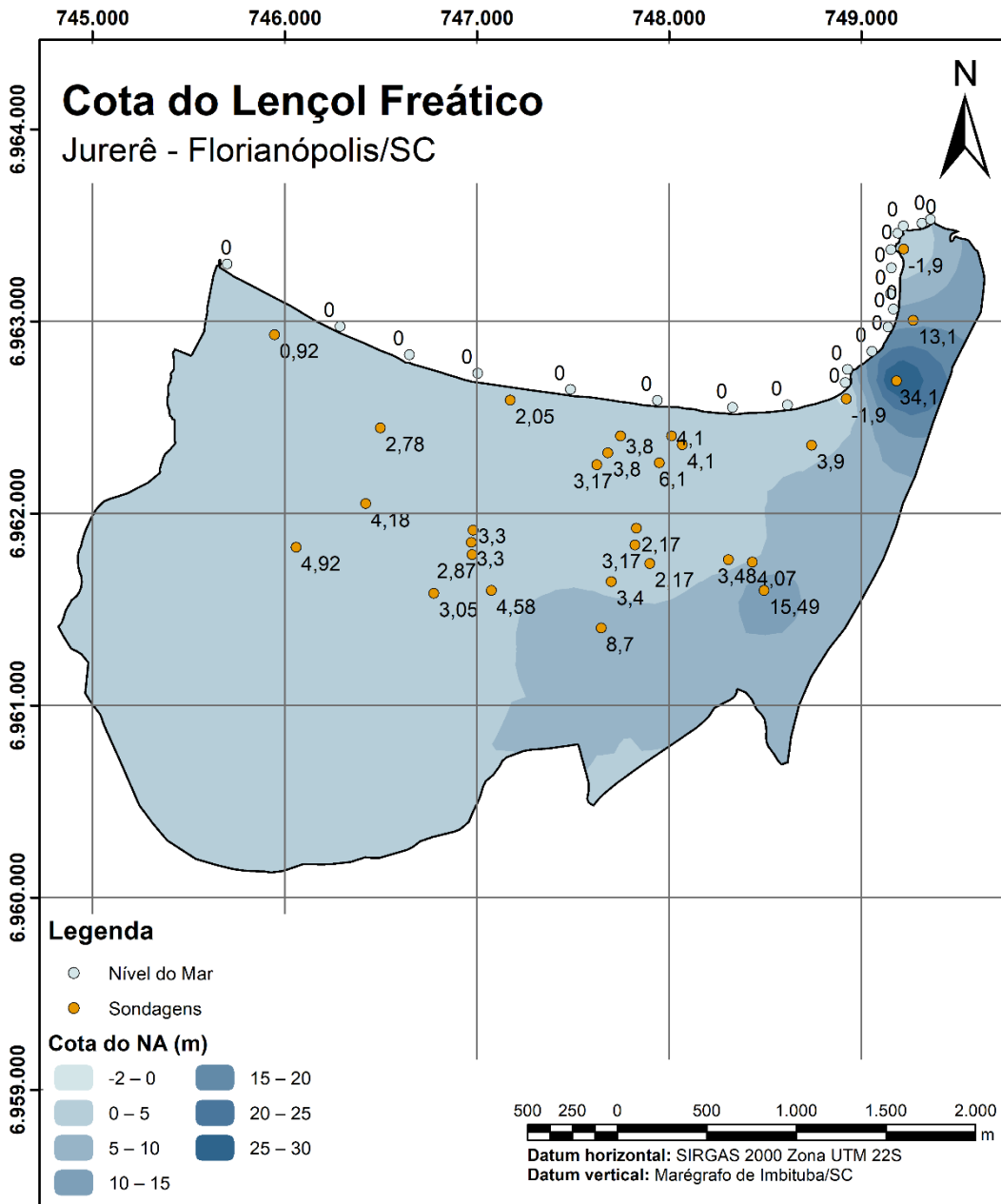
Tabela 3 – Frequência de área da profundidade do lençol freático

<b>Profundidade NA (m)</b>	<b>% da área</b>
< 0,5	1,3%
0,5 – 0,75	25,2%
0,75 – 1	30,8%
1 – 1,25	24,3%
1,25 – 1,5	12,8%
1,5 – 1,75	5,5%
1,75 – 2	0,1%
<b>Total</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 7</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Quantitativamente, a Tabela 3 aponta para a predominância da faixa de profundidade de 0,5 a 1,25 metro da superfície freática, o que corresponde a aproximadamente 80% de áreas cujo o relevo pode atingir elevações de 25 metros, *vide* Mapa 2. Além disso, vale ressaltar que toda a área de estudo possui o lençol freático próximo a superfície, tornando necessário avaliar as estratégias de execução de fundações diretas, em conjunção com os resultados da seção 5.3.

Mapa 8 – Cota freática



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Acerca das cotas do lençol freático, nota-se que ocorre uma predominância de cotas acima do nível do mar devido à proximidade do lençol da superfície do terreno. Além do mais, constata-se que prevalecem as cotas na faixa do nível do mar até 5 metros de altitude. Ademais, a porção leste, as quais se encontram as maiores elevações do terreno (Mapa 2) são, também, as que possuem o lençol freático em cotas maiores que 5 metros, culminando em 30 metros na parte nordeste.

Tabela 4 – Frequência de área da cota freática

<b>Cota do NA (m)</b>	<b>% da área</b>
- 2 – 0	0,1%
0 – 5	76%
5 – 10	18,8%
10 – 15	2,9%
15 – 20	1,1%
20 – 25	0,8%
25 – 30	0,3%
<b>Total</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 8</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

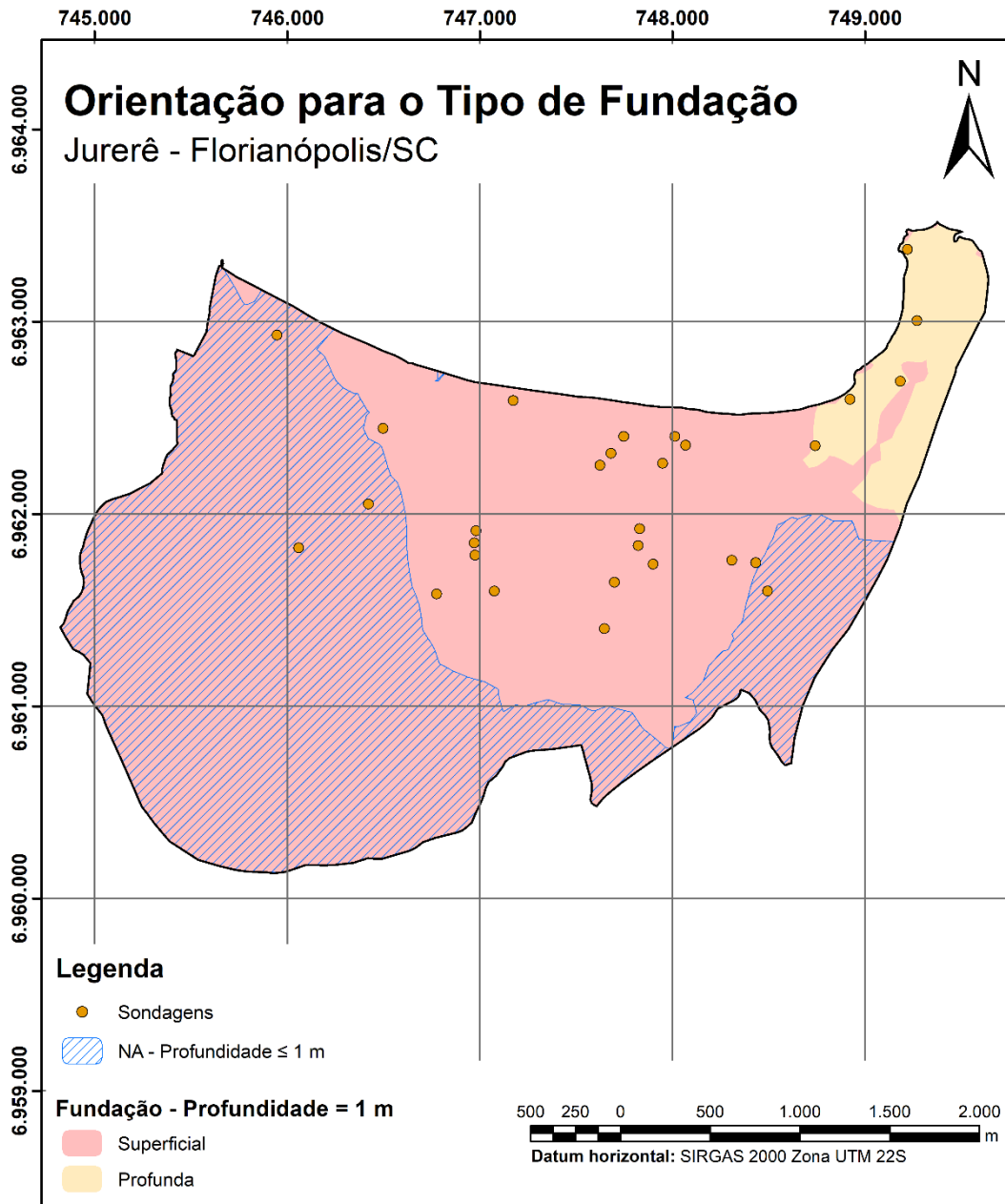
Ao analisar a Tabela 4, corrobora-se a análise visual em relação ao predomínio das cotas até 5 metros de altitude, equivalentes a 76% da área. Perante o exposto, ao associarmos os mapas temáticos de MDT (Mapa 2), de declividade (Mapa 3) e de hidrografia (Mapa 4) às cartas de profundidade (Mapa 7) e cota (Mapa 8) do lençol freático, é possível inferir a existência de uma tendência do lençol freático em se deslocar das regiões mais elevadas e de maiores declividades em direção aos locais mais planos, próximos ao mar, e, portanto, causando um afloramento do lençol freático.

Destaca-se que os mapas da superfície freática são sazonais. Contudo, a quantidade de sondagens utilizada não permite filtrar os dados de acordo com as datas. Apesar disso, o SIG possibilita a atualização do banco de dados geotécnico do presente trabalho, permitindo realizar a seleção das sondagens de acordo com as estações do ano ou pelos períodos secos ou chuvosos.

### 5.3 CARTAS DE ORIENTAÇÃO PARA O TIPO DE FUNDAÇÃO

Os mapas de orientação para o tipo de fundação foram desenvolvidos para 1 metro (Mapa 9) e 2 metros (Mapa 10) de profundidade, conforme o critério de viabilidade econômica de Rebello (2008), além do qual são recomendadas fundações profundas. Além disso, foi adicionado o indicativo da presença de lençol freático em ambos os mapas, uma vez que essa informação é um fator fundamental na escolha do tipo de fundação a ser executada. Ressalta-se que os mapas apresentados são válidos para as demonstrações realizadas na seção 4.5.1. Ao final da presente seção é apresentada a Tabela 5 que detalha a frequência de áreas para cada tipo de fundação nas camadas analisadas.

Mapa 9 – Orientação para fundação: 1 metro de profundidade



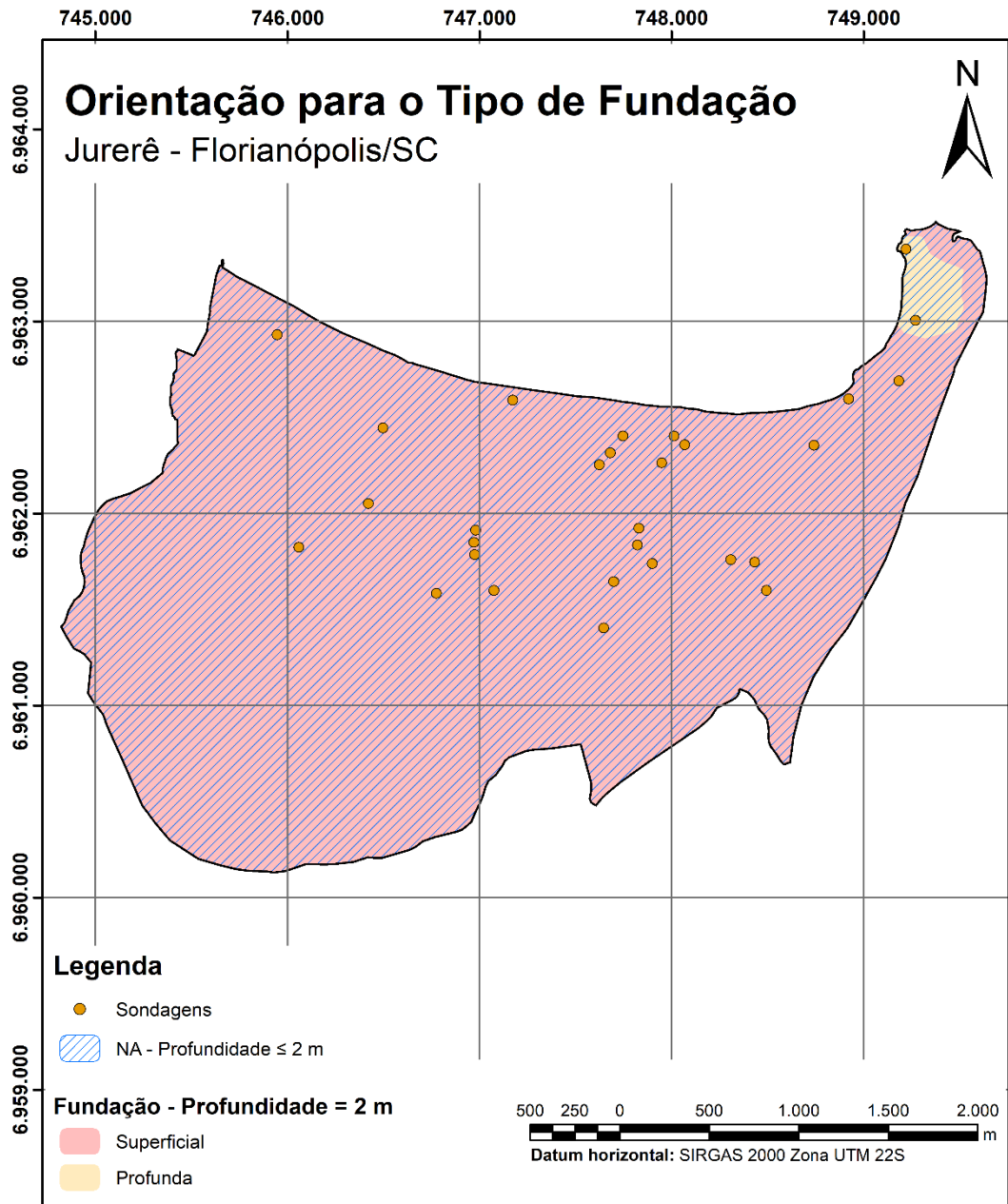
Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

O Mapa 9 indica os tipos de fundação para o primeiro metro e divide a área de estudo em duas regiões bastante distintas, a região em tom rosa, indicativo de fundação superficial e a região em tom amarelo na porção nordeste, a qual representa aptidão para fundação profunda.

Mediante a Tabela 5, verifica-se que 93,3% da área demonstra propensão para fundações superficiais, sendo que 57,3% dessa conta com a presença do lençol freático na camada analisada.

Mapa 10 – Orientação para fundação: 2 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Para a análise da camada seguinte, o Mapa 10 demonstra que a aptidão para fundação superficial aumentou de forma a praticamente contemplar toda a área de estudo (98,5%) e, conseqüentemente, desfavorecendo a indicação por fundações profundas. Em relação ao nível de água, houve um aumento expressivo, tendo este ocupado toda a área de estudo para a camada em análise.

Tabela 5 – Frequência de área para o tipo de fundação

Orientação para fundação	% da área	
	Profundidade = 1 m	Profundidade = 2 m
Superficial	93,3%	98,5%
Profunda	6,7%	1,5%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 9</b>	<b>Mapa 10</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 5, conforme discutido anteriormente, demonstra quantitativamente a predileção de fundações superficiais com o aumento da profundidade analisada. Contudo, existem alguns fatores que são de importante consideração ao examinar os mapas apresentados. Um deles é de que a orientação foi baseada no valor de  $N_{SPT}$  da camada de assentamento da fundação e da camada imediatamente inferior, seguindo o critério de economicidade de Rebello (2008), o qual recomenda para fundações superficiais valores de  $N_{SPT}$  maiores ou iguais a 8. Além disso, a presença do lençol freático próximo a superfície não é um impeditivo para a execução de fundações diretas, uma vez que existe a possibilidade de rebaixar o mesmo, ou haver variações favoráveis do nível de água em virtude da sazonalidade.

Apesar da especificidade dos mapas supracitados, é importante destacar que devido à versatilidade do banco de dados desenvolvido, é possível elaborar mapas com critérios diferentes de forma a adaptar o mapeamento para cenários diferentes.

#### 5.4 CARTAS DE ISOVALORES DE TENSÃO ADMISSÍVEL

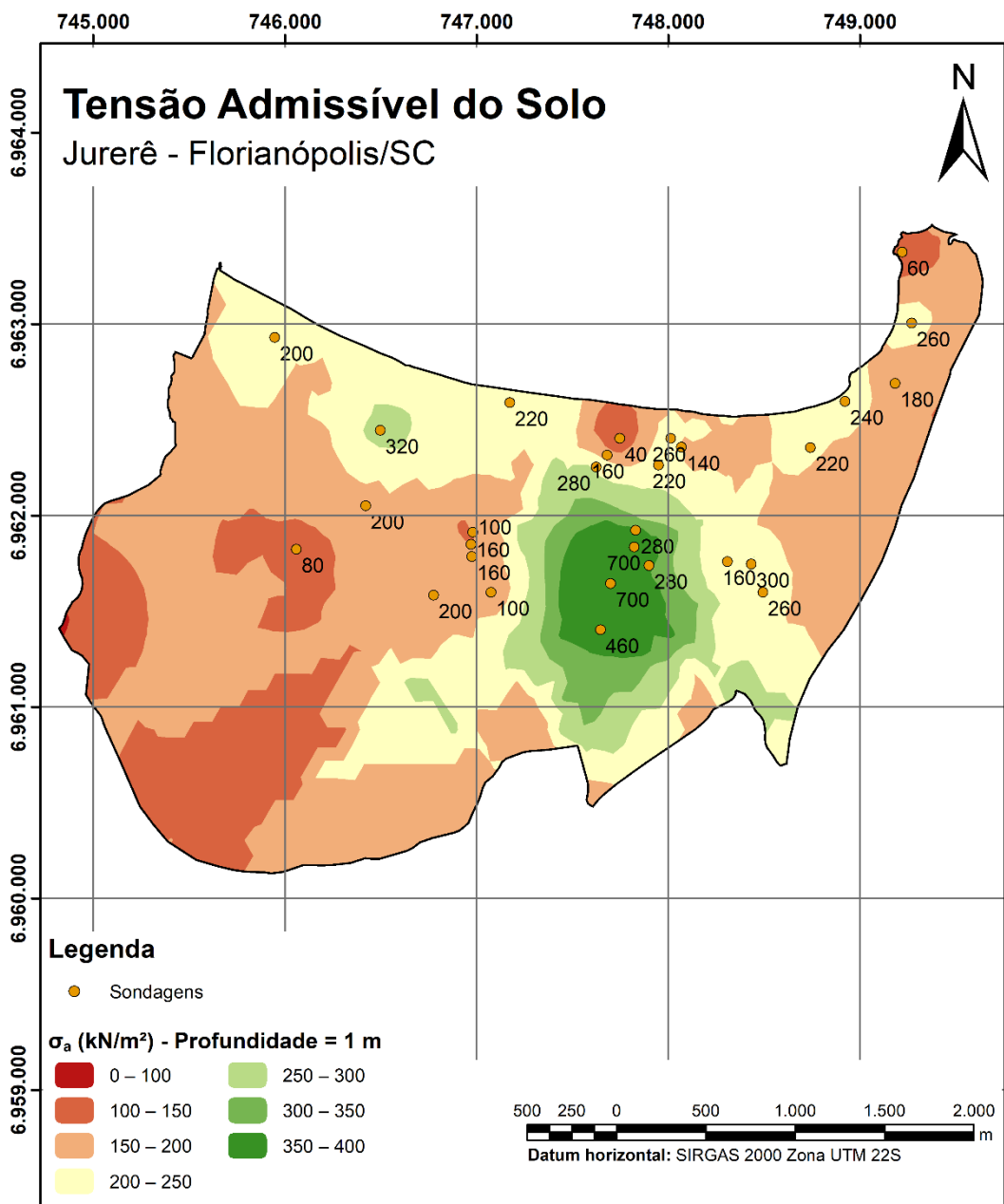
As cartas de isovalores de tensão admissível para fundações superficiais foram desenvolvidas seguindo os critérios expostos na seção 4.5.2 e respeitando o domínio para o qual é válida a Equação (3). Nesse sentido, o Mapa 11 e o Mapa 12 representam as tensões admissíveis para 1 metro e 2 metros de profundidade – relativo às camadas de assentamento da fundação conforme as considerações de Rebello (2008) – e, visando contemplar o bulbo de tensões, foram desenvolvidos o Mapa 13 e o Mapa 14 para as profundidades de 3 metros e 4 metros, respectivamente.

Diante disso, a região em vermelho para a qual a tensão admissível é menor que  $100 \text{ kN/m}^2$  devem ser desconsideradas, uma vez que não pertencem ao domínio de validade da Equação (3) por apresentarem valores de  $N_{SPT}$  menores que 5. Similarmente, os valores acima do limite superior ao  $N_{SPT}$  de 20 foram incorporados à faixa de contorno de  $350$  a  $400 \text{ kN/m}^2$ , privilegiando a segurança.

Ademais, para não restringir a geometria da sapata e manter a flexibilidade da utilização dos mapas gerados, as tensões admissíveis foram calculadas para cada profundidade analisada, a partir dos respectivos  $N_{SPT}$ , e não considerando a média destes no bulbo de tensões. Dessa maneira, é possível obter a média do  $N_{SPT}$  pelo cálculo da média das tensões no bulbo.

Similarmente as análises anteriores, a Tabela 6 apresenta a frequência de áreas para as faixas de tensões admissíveis ao final da análise dos mapas.

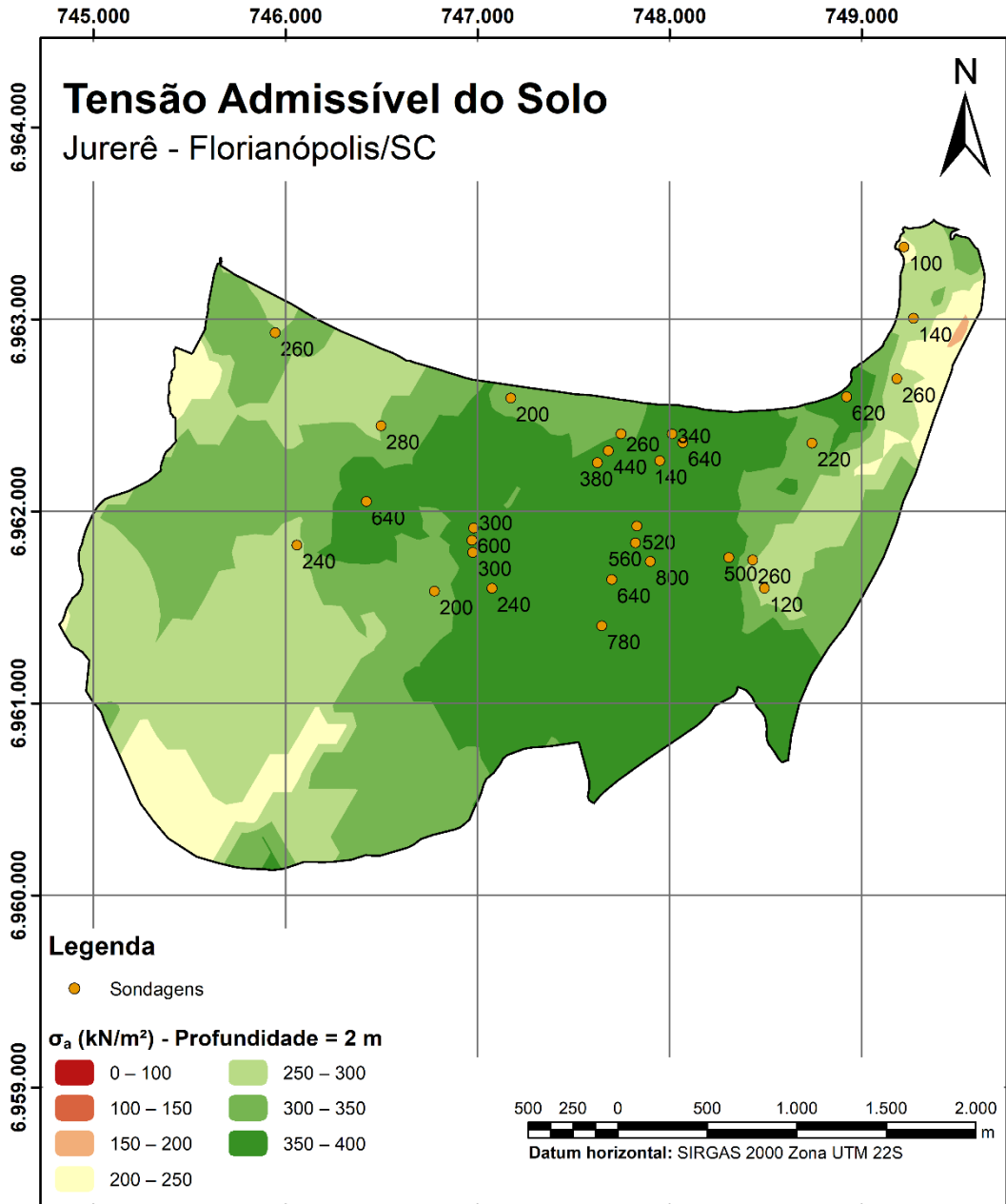
Mapa 11 – Tensão admissível para fundação superficial: 1 metro de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Por meio do Mapa 11, verifica-se que, para 1 metro de profundidade, o comportamento das faixas de tensão admissível aumenta dos limites da área de estudo em direção a porção central, em que conforme analisado anteriormente se encontram as maiores profundidades de impenetrável. A faixa de valores em que a tensão admissível está abaixo de  $100 \text{ kN/m}^2$ , ou seja, fora do limite de aplicação da Equação (3), representa 0,1% da área. Predominantemente, valores intermediários na faixa de  $100 \text{ kN/m}^2$  a  $250 \text{ kN/m}^2$  correspondem a 86% da área total, sendo que destes, 45,4 % está entre  $150 \text{ kN/m}^2$  e  $200 \text{ kN/m}^2$ . Os valores mais elevados da região central, representados pelas cores em tons de verde, acima de  $300 \text{ kN/m}^2$  compõem 7% da região de estudo.

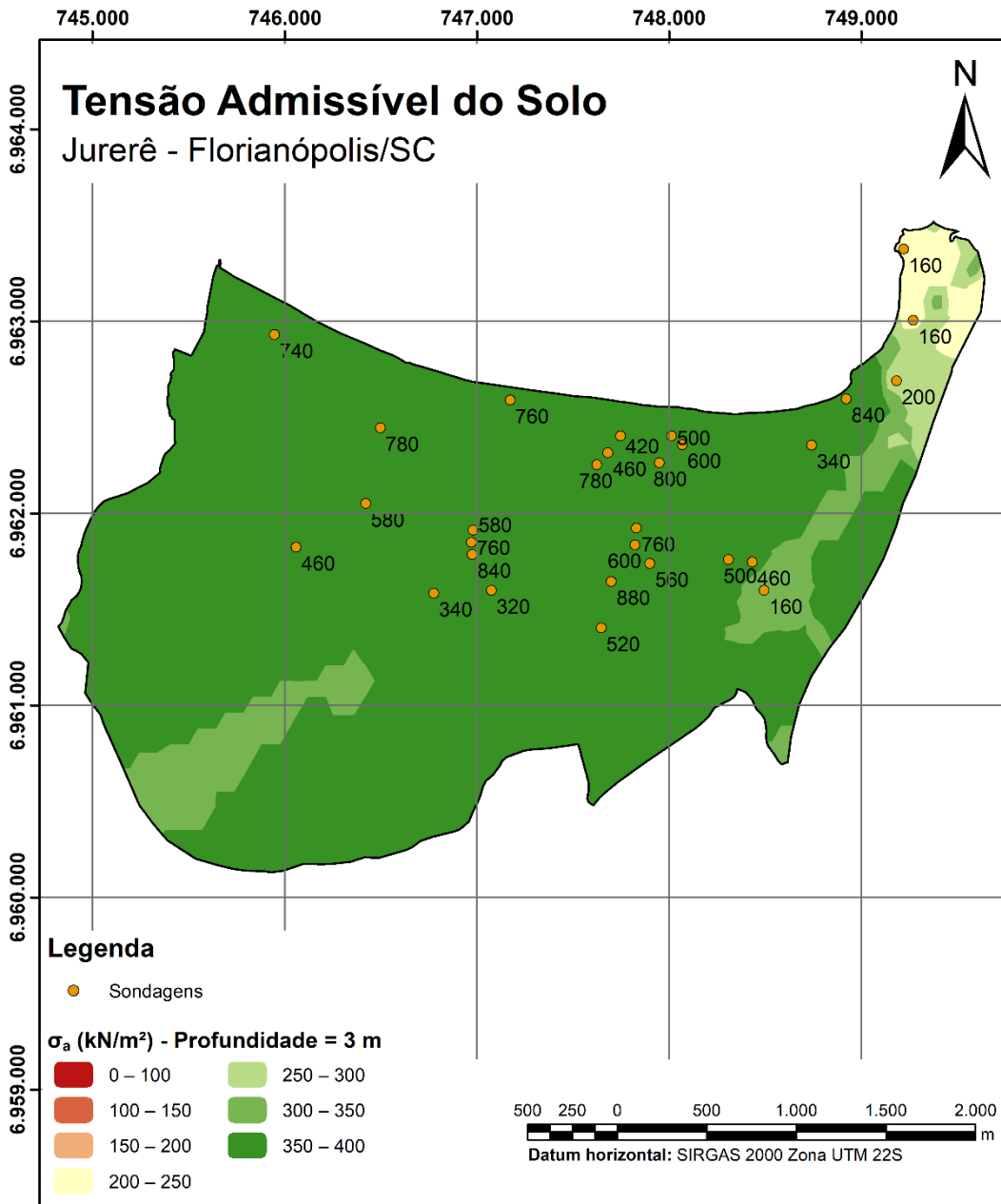
Mapa 12 – Tensão admissível para fundação superficial: 2 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Para 2 metros de profundidade, o Mapa 12 exhibe o aumento das regiões com tensões admissíveis maiores que 250 kN/m<sup>2</sup> e da praticamente inexistência de porções abaixo dos 200 kN/m<sup>2</sup>. A Tabela 6 demonstra a redução para 6,3% da área, que anteriormente dispunha de 86%, na faixa de 100 kN/m<sup>2</sup> a 250 kN/m<sup>2</sup>. Nessa profundidade, 93,7% da região revelam valores acima de 250 kN/m<sup>2</sup>, o que, comparativamente, representa um aumento de 574% em relação aos valores na camada de 1 metro.

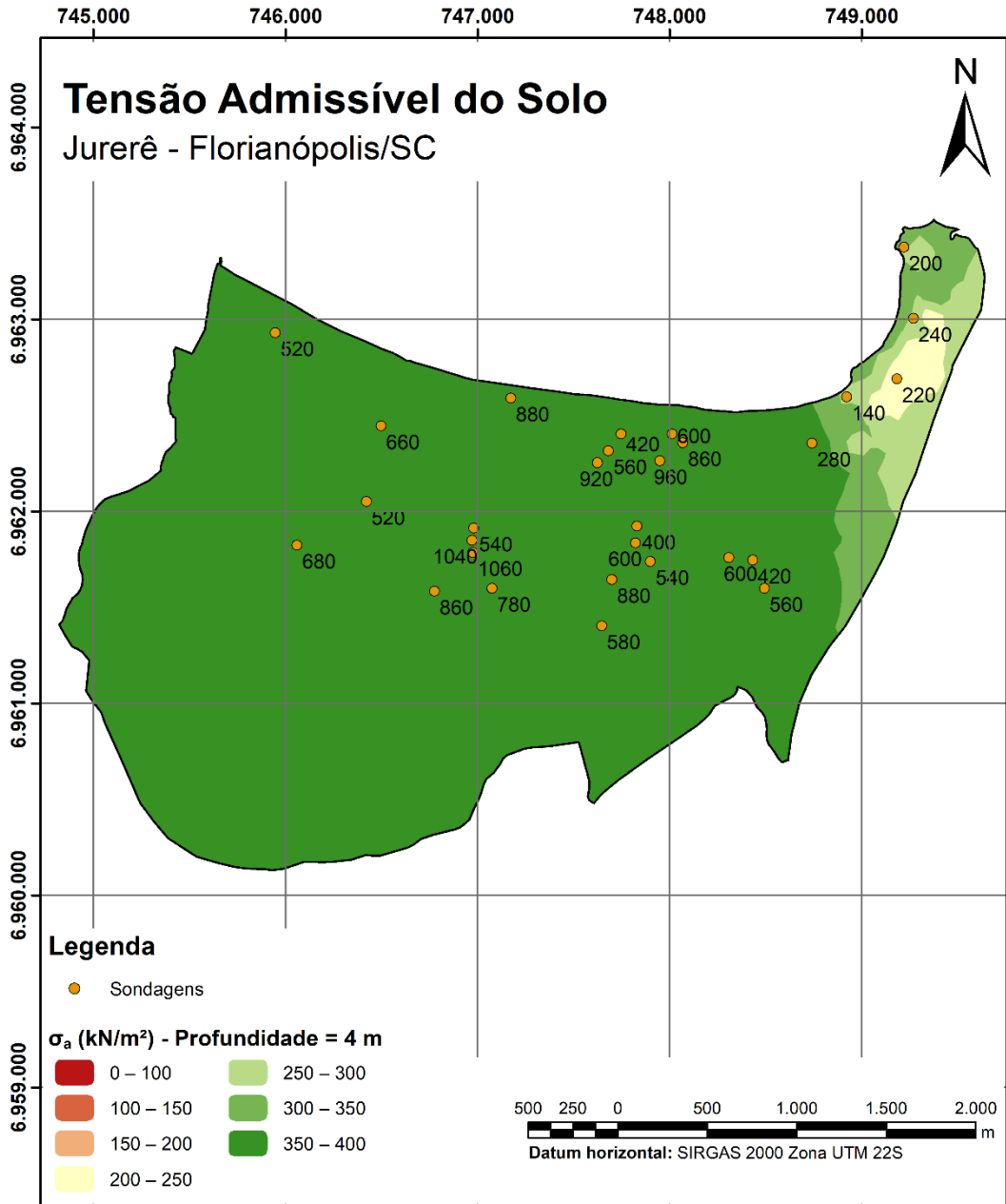
Mapa 13 – Tensão admissível para fundação superficial: 3 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Ao analisar o mapa referente aos 3 metros de profundidade, a faixa com valores de tensão admissível acima de 350 kN/m<sup>2</sup> passa a englobar 87,6% da área de estudo, tendo avançado em direção às regiões com maiores elevações (Mapa 2) nos extremos leste e oeste. De forma idêntica ao Mapa 12, a prevalência das regiões com tensões inferiores a 250 kN/m<sup>2</sup> têm uma expressiva redução e dispõem de apenas 1,9% da área. Nota-se, ainda, que o comportamento do mapa para essa profundidade passa a se assemelhar à carta de orientação para aptidão a fundação superficial para 2 metros (Mapa 10).

Mapa 14 – Tensão admissível para fundação superficial: 4 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Para a profundidade de 4 metros, a propagação da região com tensões admissíveis mais elevadas continua a incorporar toda a parte centro-oeste do bairro de Jurerê. Conforme a Tabela 6, houve um expressivo aumento das tensões em relação às camadas anteriores, em que passou a predominar as tensões acima de 350 kN/m<sup>2</sup> e a redução dos valores inferiores a 250 kN/m<sup>2</sup>.

Tabela 6 – Frequência de área para as faixas de tensão admissível

$\sigma_a$ (kN/m)	% da área			
	Prof. = 1 m	Prof. = 2 m	Prof. = 3 m	Prof. = 4 m
0 – 100	0,1%	-	-	-
100 – 150	14,0%	-	-	-
150 – 200	45,4%	0,1%	-	-
200 – 250	26,6%	6,2%	1,9%	1,2%
250 – 300	6,9%	26,7%	2,2%	3,3%
300 – 350	3,4%	31,0%	8,3%	4,2%
350 – 400	3,6%	36,0%	87,6%	91,3%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 11</b>	<b>Mapa 12</b>	<b>Mapa 13</b>	<b>Mapa 14</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Perante o exposto, foi possível perceber o avanço dos valores mais elevados de tensão da porção central em direção à região centro-oeste. Esse aumento de acordo com o acréscimo de profundidade nas camadas analisadas ocorreu de forma bastante expressiva e as regiões com valores inferiores de tensão deixaram de existir. Vale ressaltar a importância de associar os mapas apresentados com os demais, de forma a obter uma visão completa do perfil geotécnico do solo.

Nesse sentido, os mapas de isovalores de  $N_{SPT}$  apresentados na seção 5.5 contribuem para a análise nas profundidades inferiores às camadas de assentamento das fundações diretas e, também, servem para auxiliar nos anteprojetos de estacas.

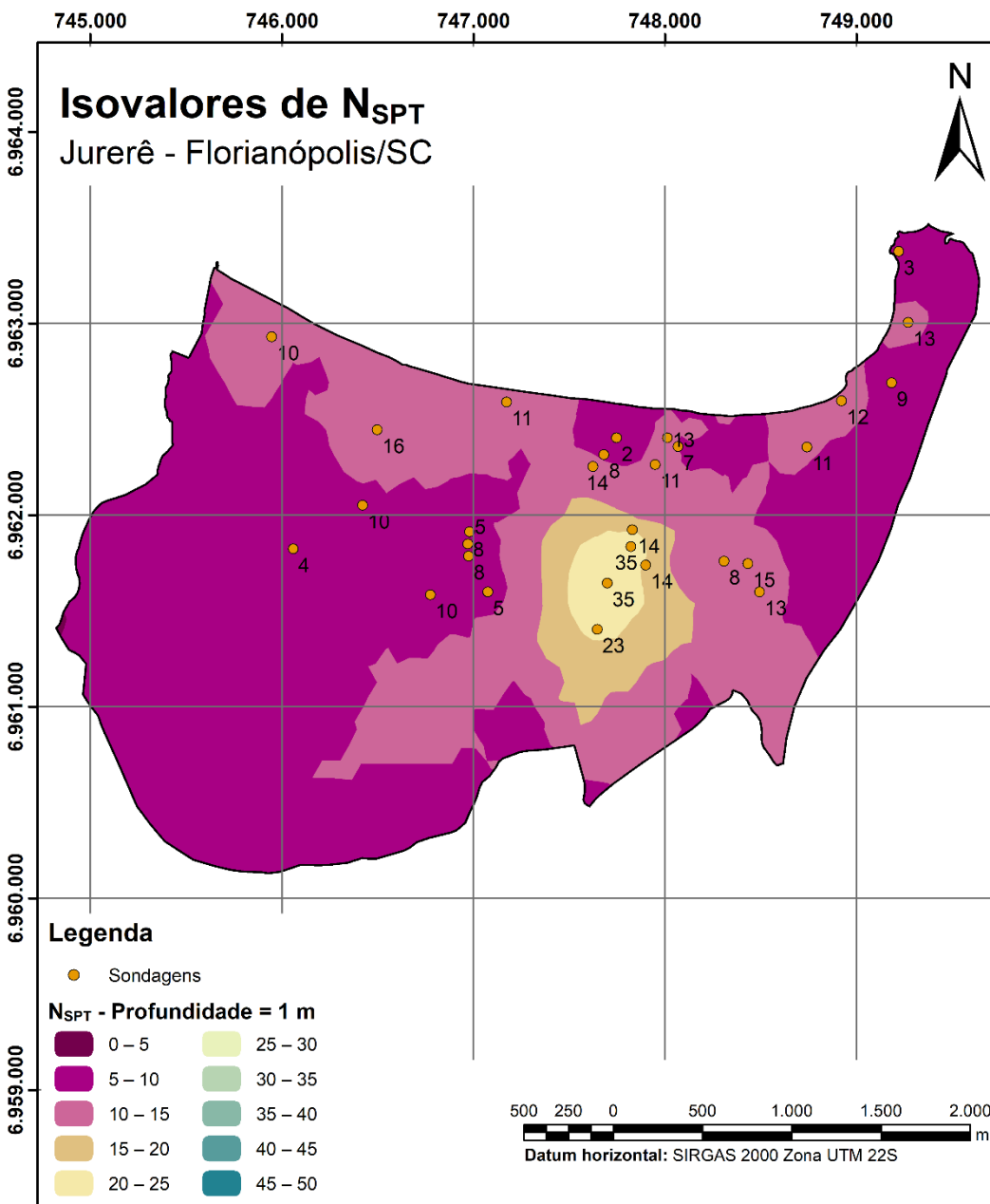
### 5.5 CARTAS DE ISOVALORES DE $N_{SPT}$

Os mapas de isovalores de  $N_{SPT}$  foram desenvolvidos iniciando em 1 metro (Mapa 15) até a profundidade de 45 metros, na qual não se encontrou mais pontos penetráveis à percussão. Entretanto, com o objetivo de reduzir a quantidade de mapas apresentados, optou-se por exibir os mapas para os primeiros quatro metros de profundidade, para contrastar com os mapas de tensão admissível, e a cada 4 metros para as camadas subsequentes em função da profundidade do impenetrável, contudo, todos os mapas desenvolvidos podem ser consultados no Apêndice – Mapas de isovalores de  $N_{SPT}$  para as profundidades de 1 a 45 metros.

Em consonância com as análises anteriores, ao final da seção é apresentada a Tabela 7, a qual complementa quantitativamente as análises qualitativas para a frequência das faixas de valores de  $N_{SPT}$ .

Ademais, os mapas apresentados nesta seção avaliam apenas a resistência do solo e servem como auxílio para o planejamento do uso e ocupação do solo, haja vista que para projetos de engenharia a deformação exerce um papel fundamental, ressaltando-se que os mapas não substituem uma investigação geotécnica de qualidade.

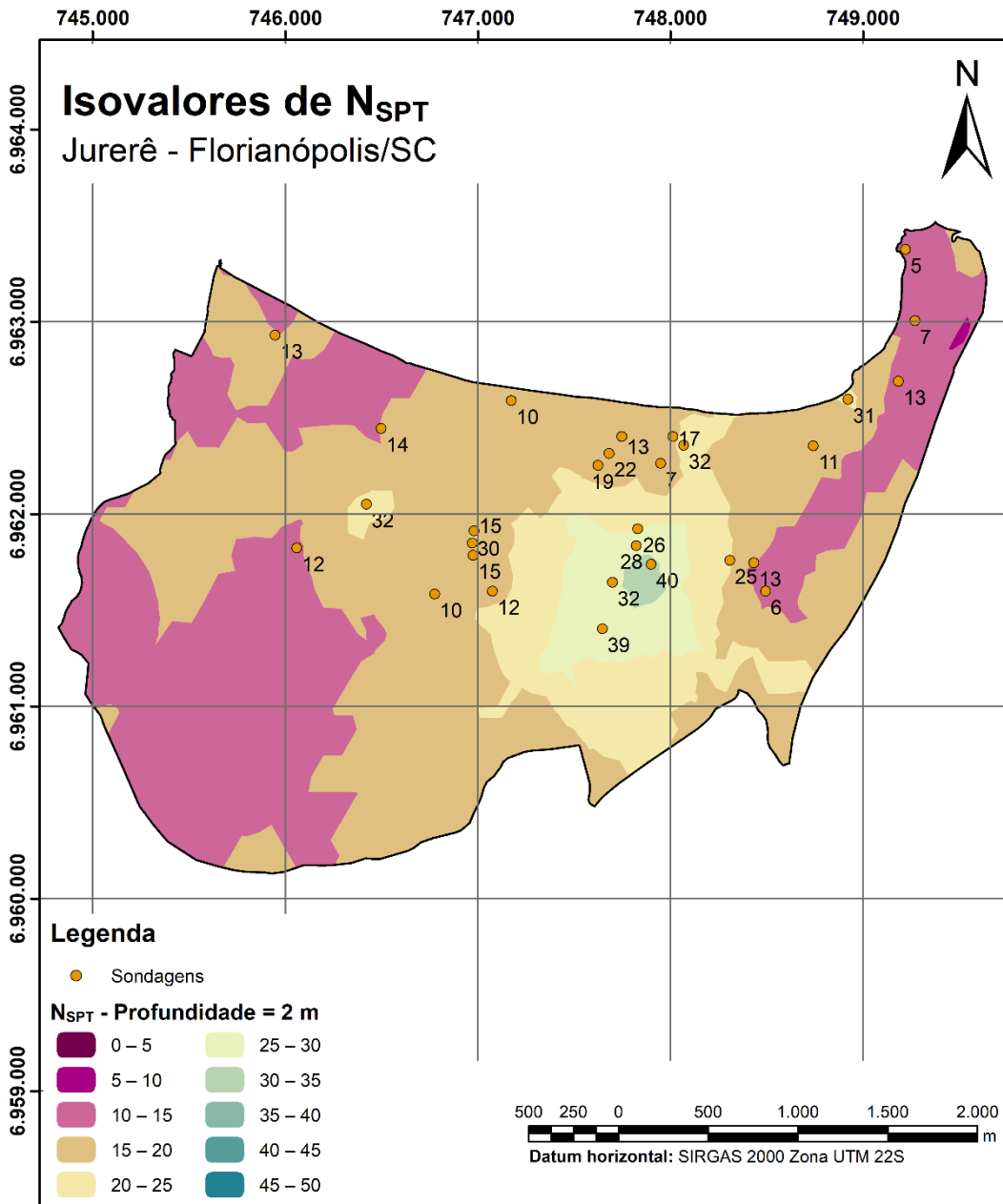
Mapa 15 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 1 metro de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 16 – Isovalores de N<sub>SPT</sub>: 2 metros de profundidade



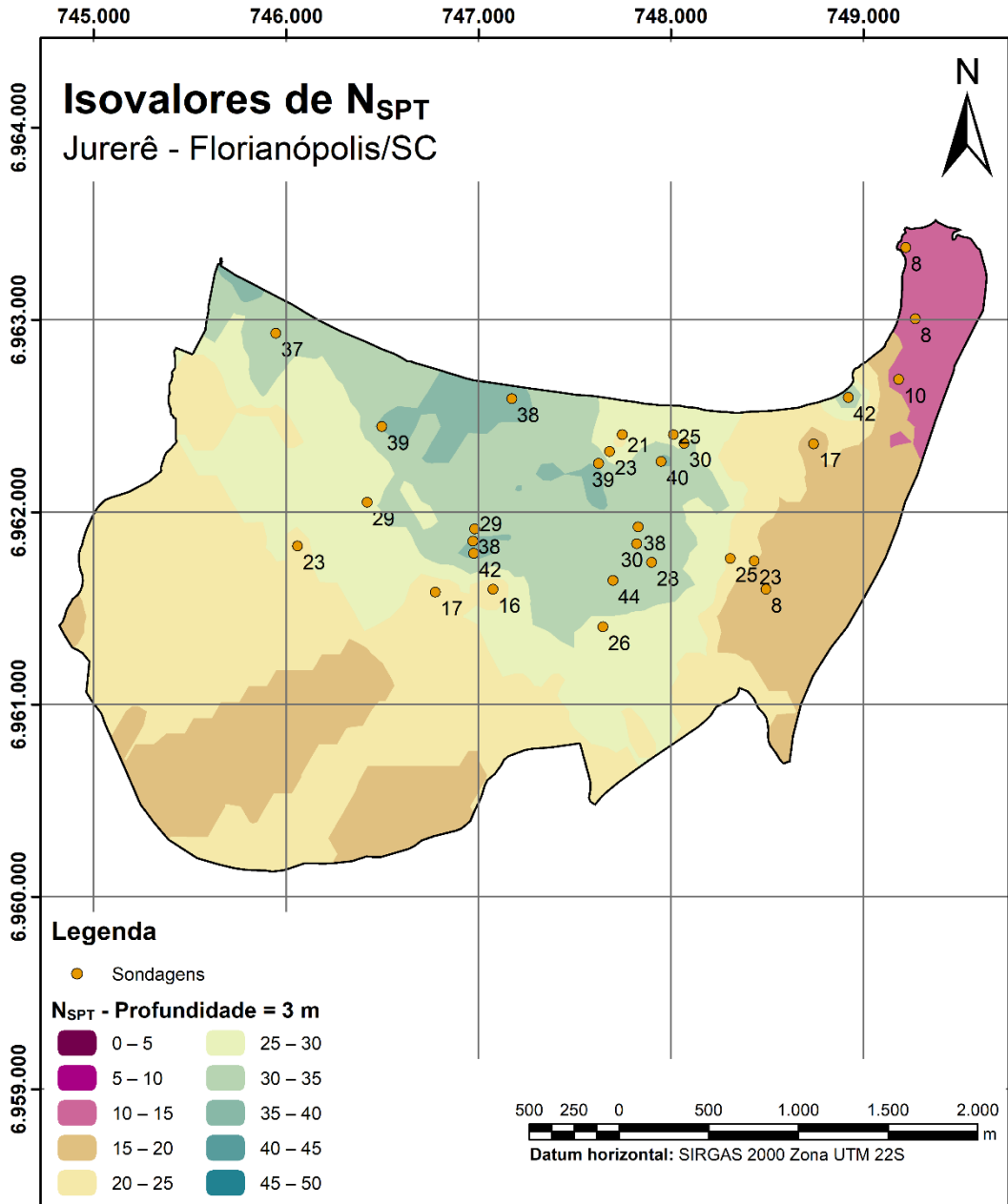
Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Ao analisar os valores de N<sub>SPT</sub> para 1 metro de profundidade, *vide* Mapa 15, é observada a predominância de valores baixos de N<sub>SPT</sub> denotados pelas colorações roxas, as quais, conforme a Tabela 7, indicam 59,5% da área com N<sub>SPT</sub> inferiores a 10 golpes. Já a região central, onde o impenetrável é mais profundo (Mapa 5) e os valores de tensão admissível são elevados (Mapa 11), encontra-se tons amarelados indicativos de valores intermediários de N<sub>SPT</sub>.

Prosseguindo para a camada inferior de 2 metros (Mapa 16), verifica-se o aumento dos tons amarelados na porção central do solo de Jurerê nas direções leste

e oeste, bem como a redução drástica dos valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 10 golpes. Consultando a Tabela 7, confirma-se a análise visual, haja vista que essa faixa de valores, anteriormente prevalente, agora consta com apenas 0,1% da área. Também, a faixa de 10 a 15 golpes manteve-se praticamente inalterada, havendo um crescimento para 66,5% das áreas nas faixas intermediárias de 15 a 30 golpes.

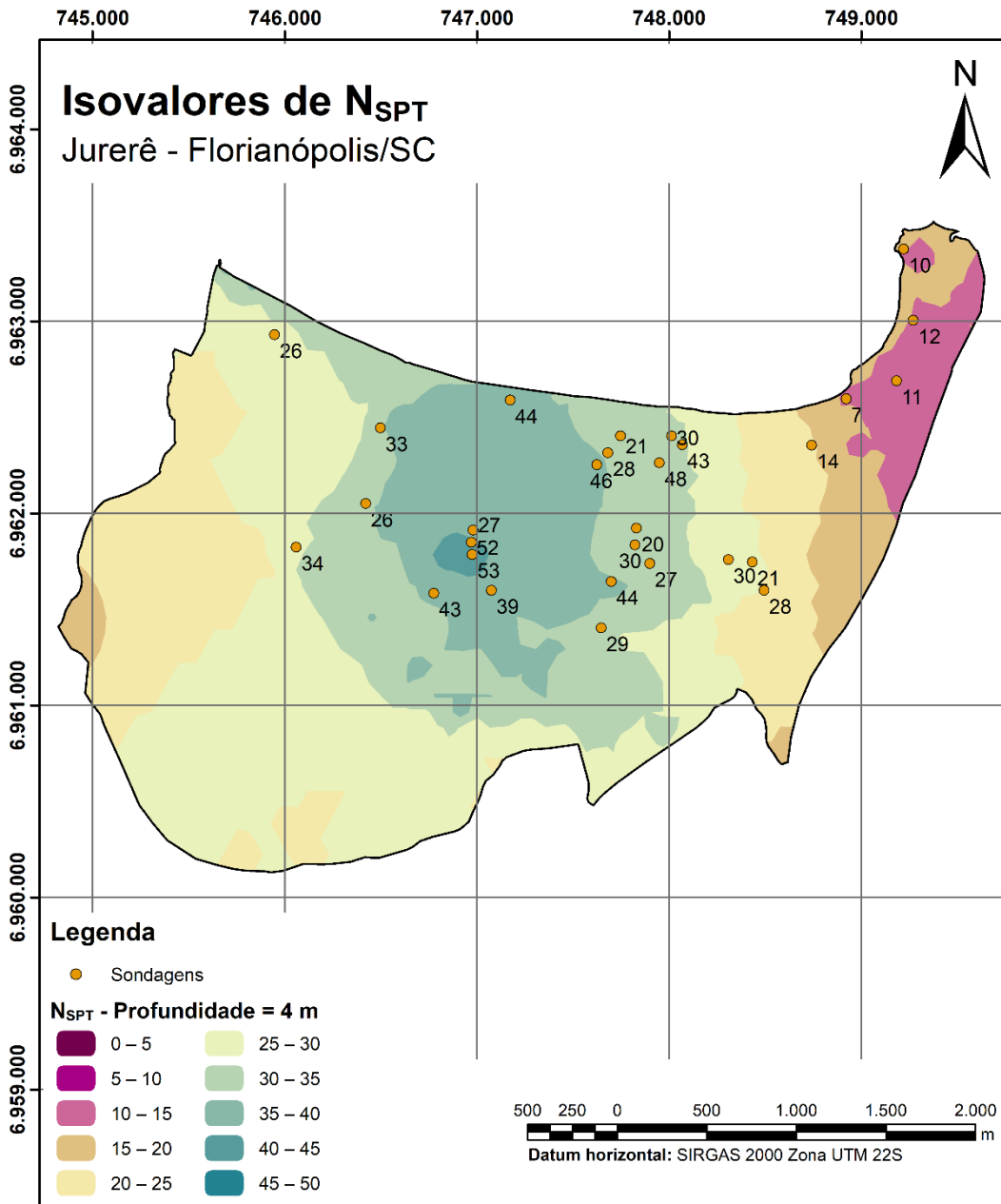
Mapa 17 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 3 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 18 – Isovalores de N<sub>SPT</sub>: 4 metros de profundidade

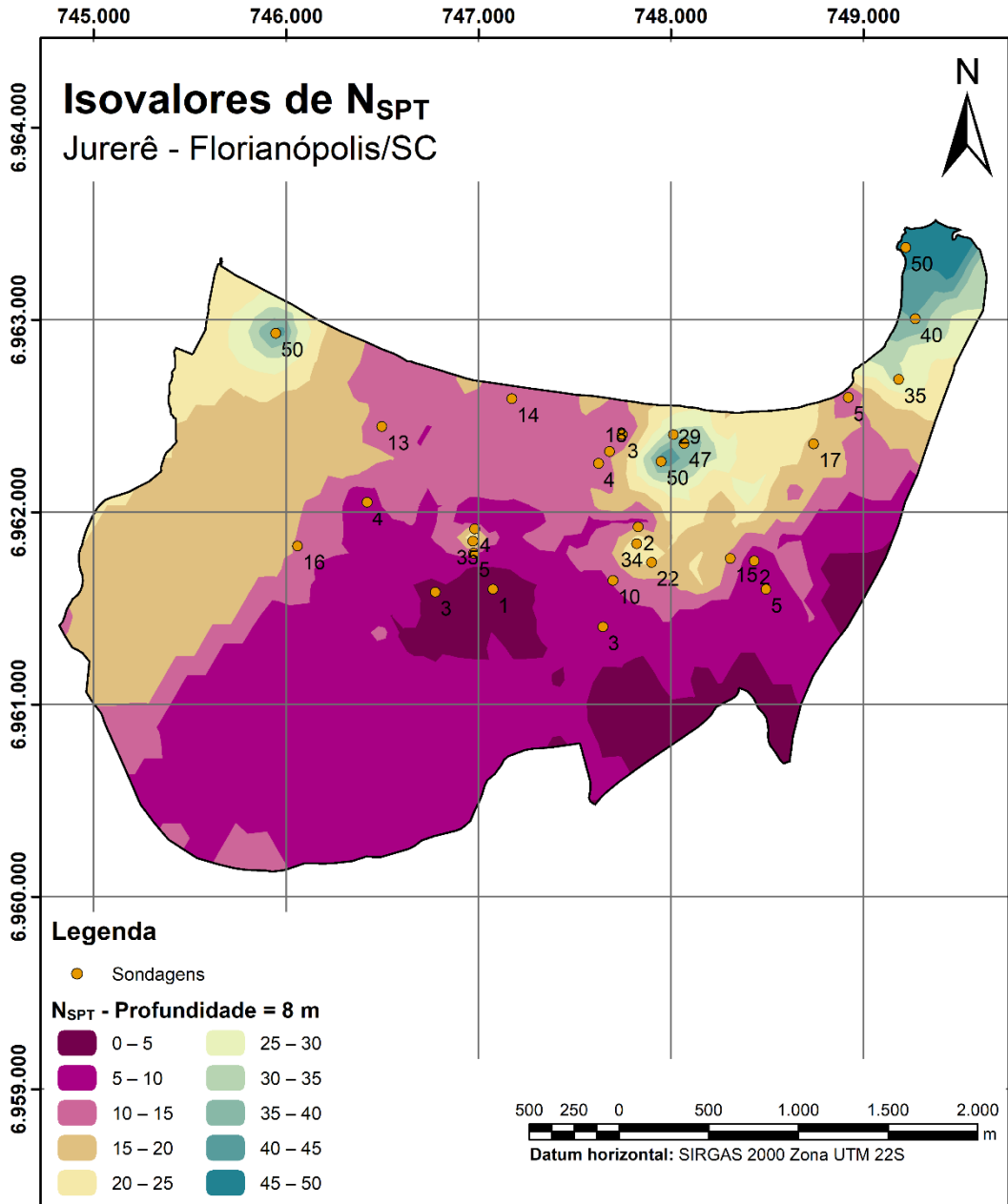


Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Por meio da análise visual do Mapa 17 e do Mapa 18 para 3 e 4 metros de profundidade, respectivamente, ocorre o surgimento de cores em tom verde, indicando o aumento da resistência do solo na faixa de N<sub>SPT</sub> dos 30 a 35 golpes. Essas pequenas porções ao norte do mapa passam a formar bolsões na região central com valores iniciais de 35 a 45 golpes. Além disso, percebe-se que as zonas leste e oeste, as quais previamente eram formadas exclusivamente por valores reduzidos de N<sub>SPT</sub>, continuam a ganhar resistência e adentrar a faixa intermediária de 15 a 30 golpes.

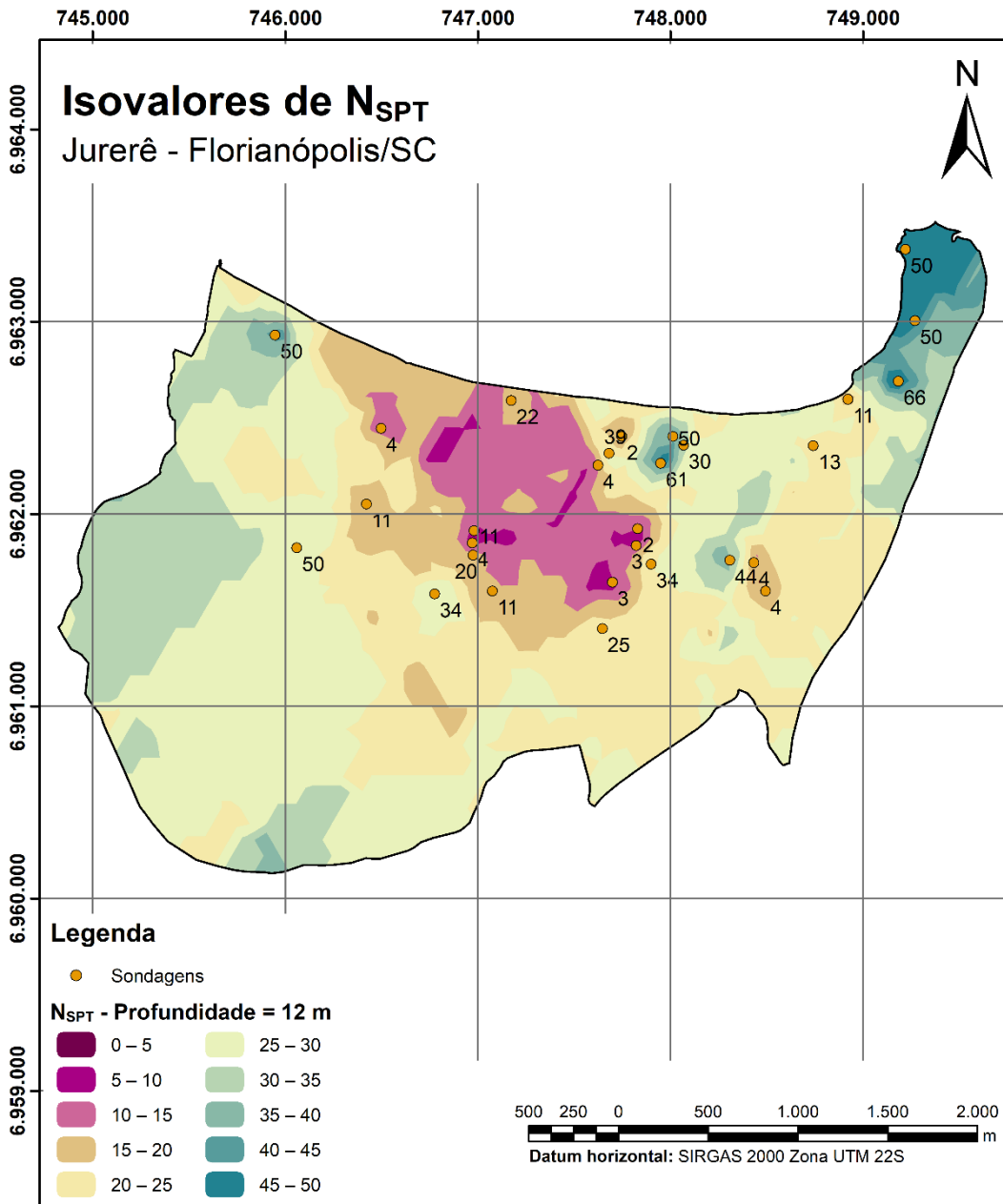
A Tabela 7 corrobora o levantamento visual das faixas de  $N_{SPT}$ , tendo em vista a redução para 4,5% em área dos valores inferiores a 15 golpes. O surgimento das áreas de  $N_{SPT}$  superiores a 30 golpes (35,7%) indicam o aumento da resistência conforme se aprofunda no solo. Ademais, a faixa intermediária ainda é dominante, tomando mais da metade do mapa com aproximadamente 60% da área.

Mapa 19 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 8 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 20 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 12 metros de profundidade

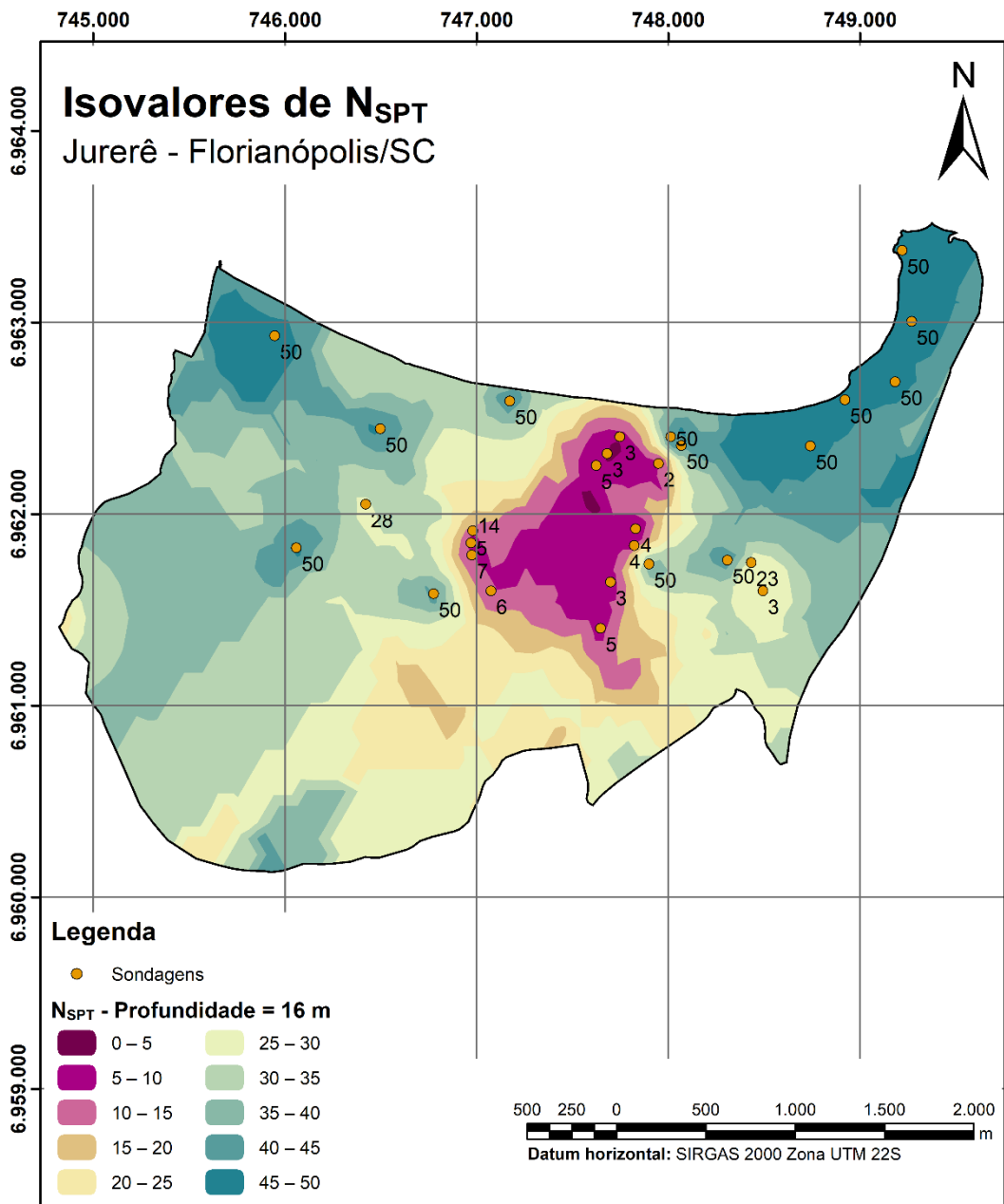


Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Os mapas para 8 metros (Mapa 19) e 12 metros (Mapa 20) de profundidade são representativos para as fundações profundas, visto que nessas profundezas as fundações superficiais se tornam economicamente inviáveis. O primeiro, ao se comparar com o Mapa 18 para 4 metros de profundidade, registra o retorno das faixas de valores inferiores de  $N_{SPT}$ , além da formação de bolsões em locais pontuais de alta resistência do solo, enquanto a região nordeste passa a consolidar porções acima de 35 golpes e, inclusive, inicia-se o alcance do impenetrável pelas sondagens. De acordo com a Tabela 8, em termos numéricos, as regiões com valores inferiores a 15

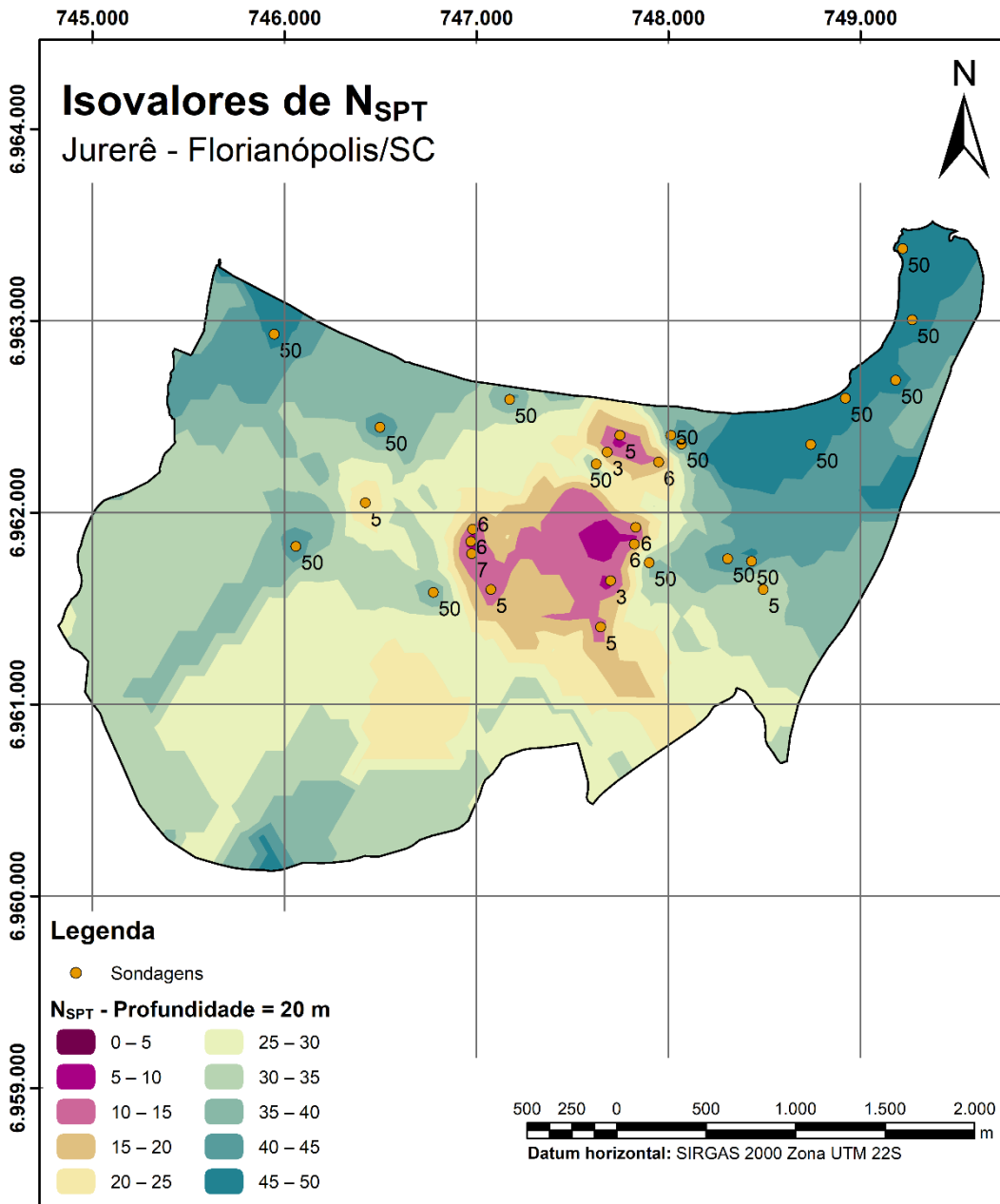
golpes decaem de 65% a 8,6% para 8 e 12 metros, respectivamente. Já as faixas intermediárias passam a formar 71,6% da área. Por fim, as áreas que dispõem de valores acentuados, superiores a 30 golpes, ocupam um percentual de 19,8%. Essa transição pode ser constatada pela inspeção visual do Mapa 20, o qual passa a formar uma região central, em que o impenetrável está mais profundo, cercado pela faixa intermediária de  $N_{SPT}$ .

Mapa 21 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 16 metros de profundidade



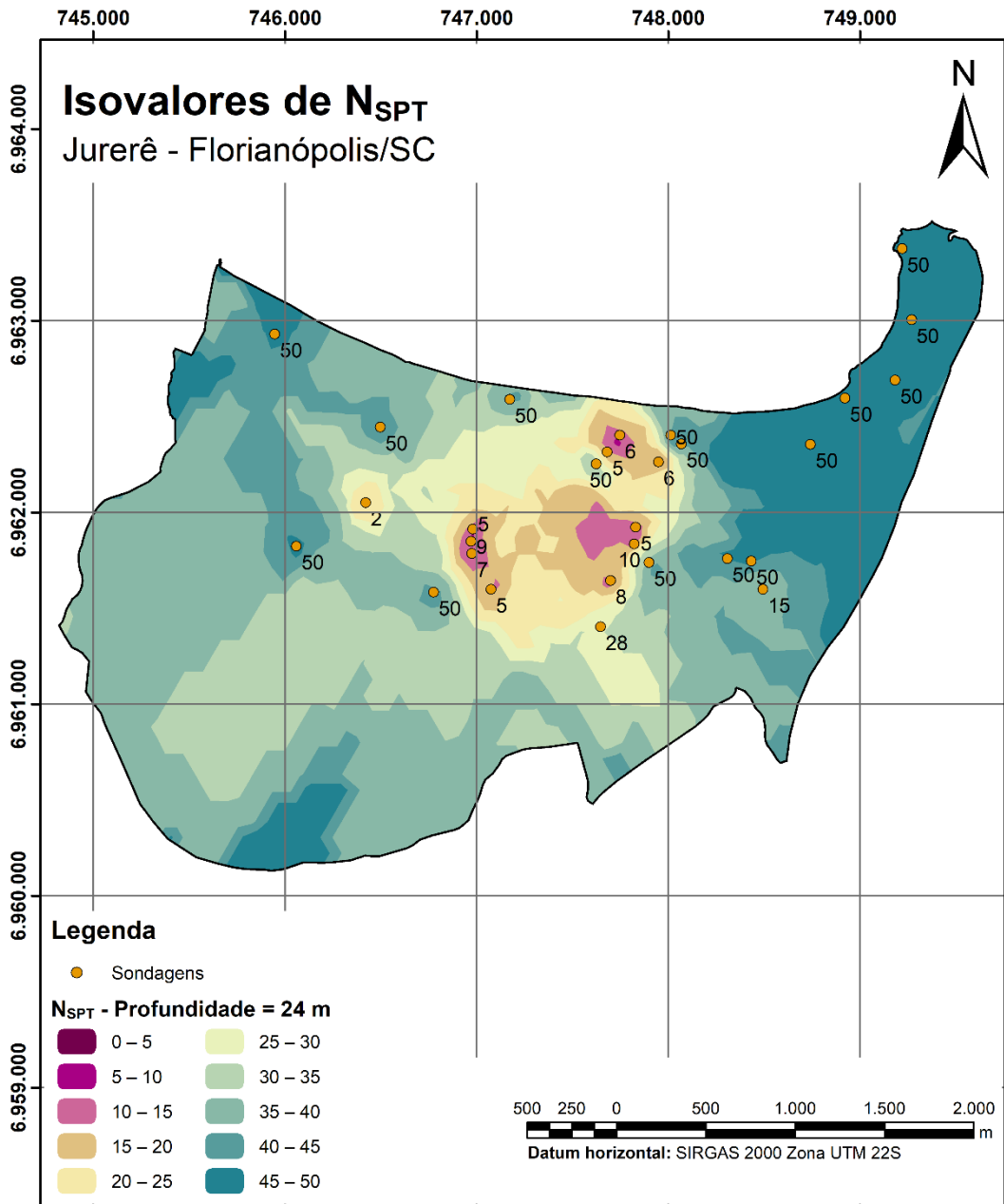
Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 22 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 20 metros de profundidade



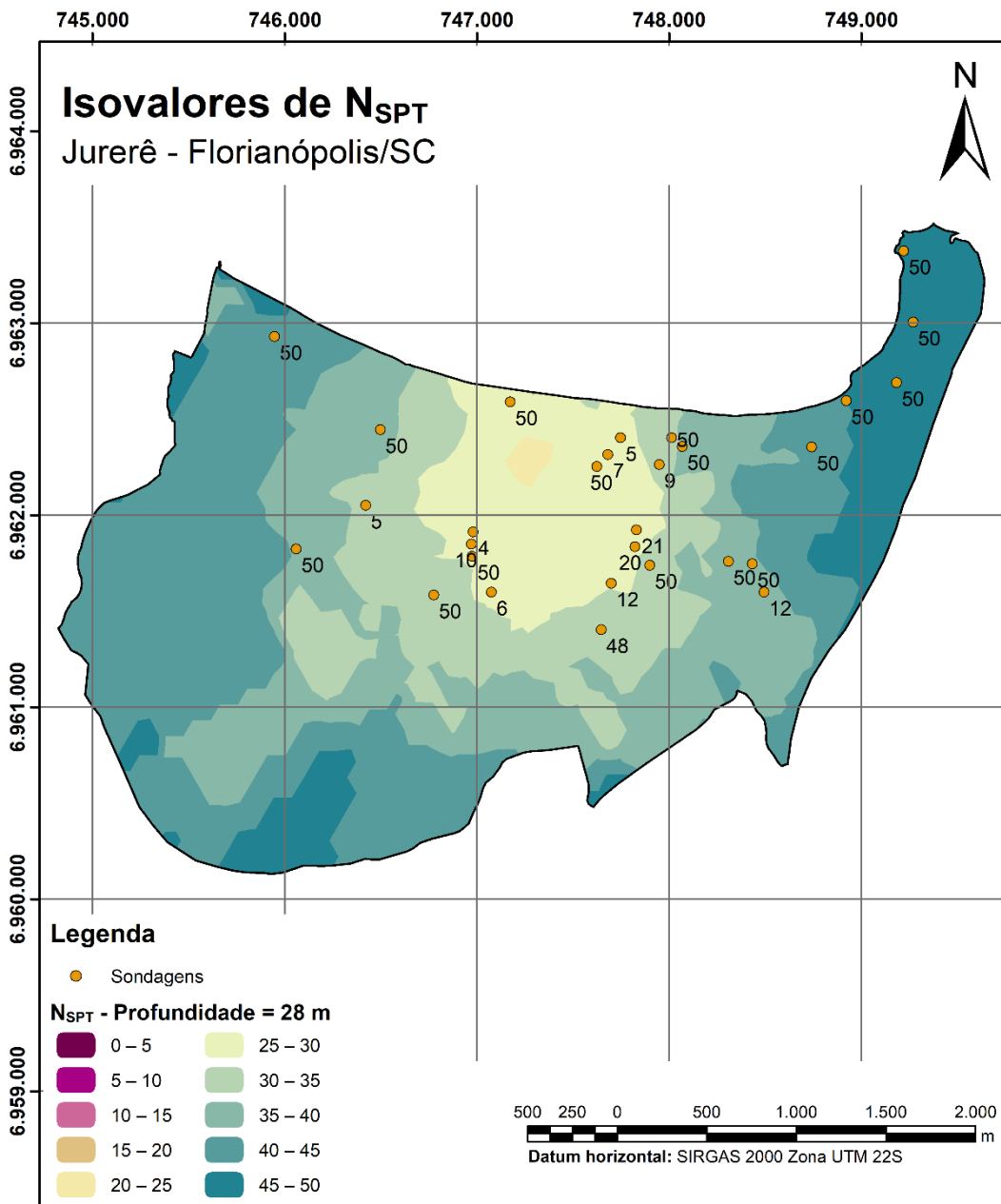
Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 23 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 24 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

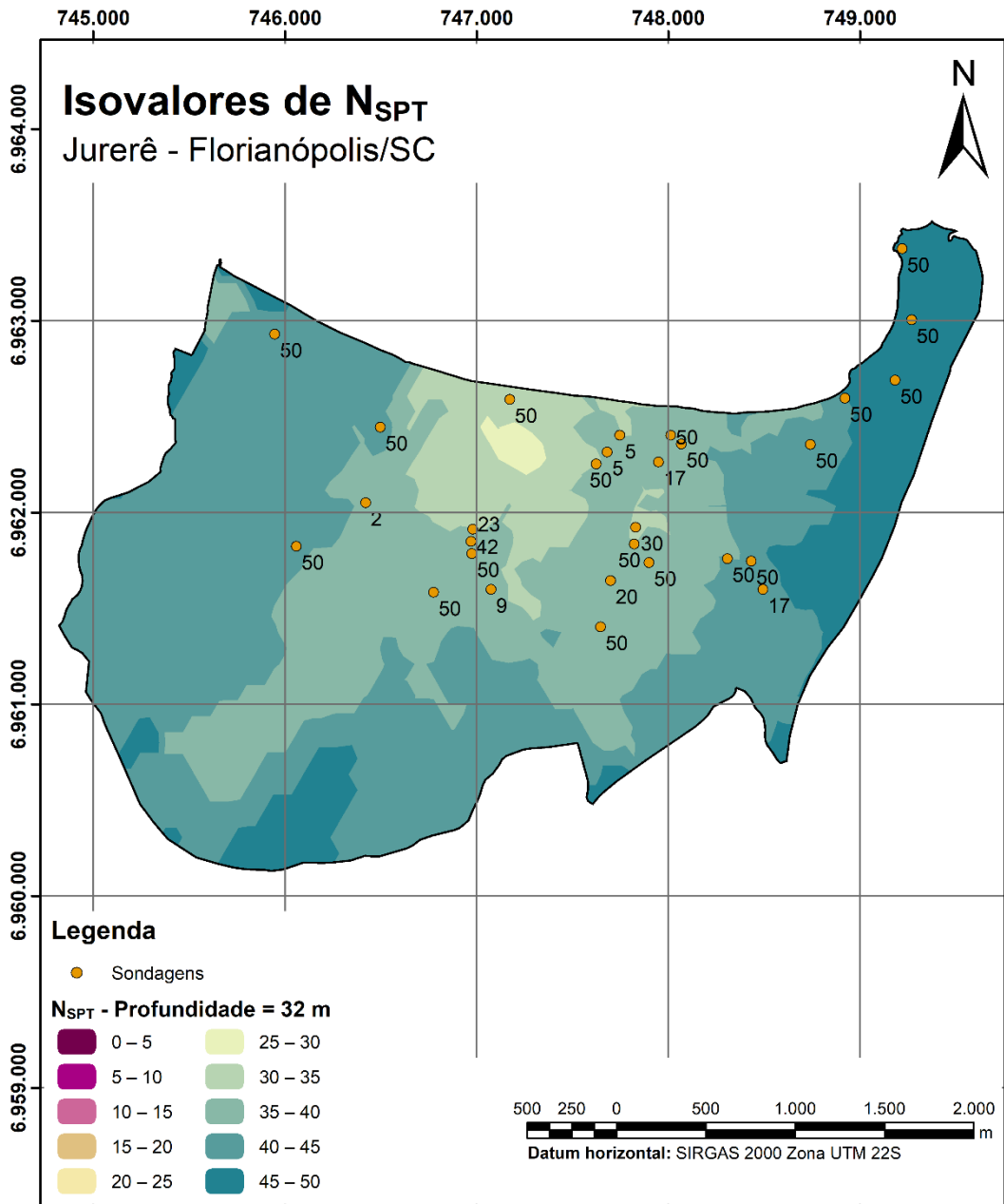
Mapa 24 – Isovalores de N<sub>SPT</sub>: 28 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

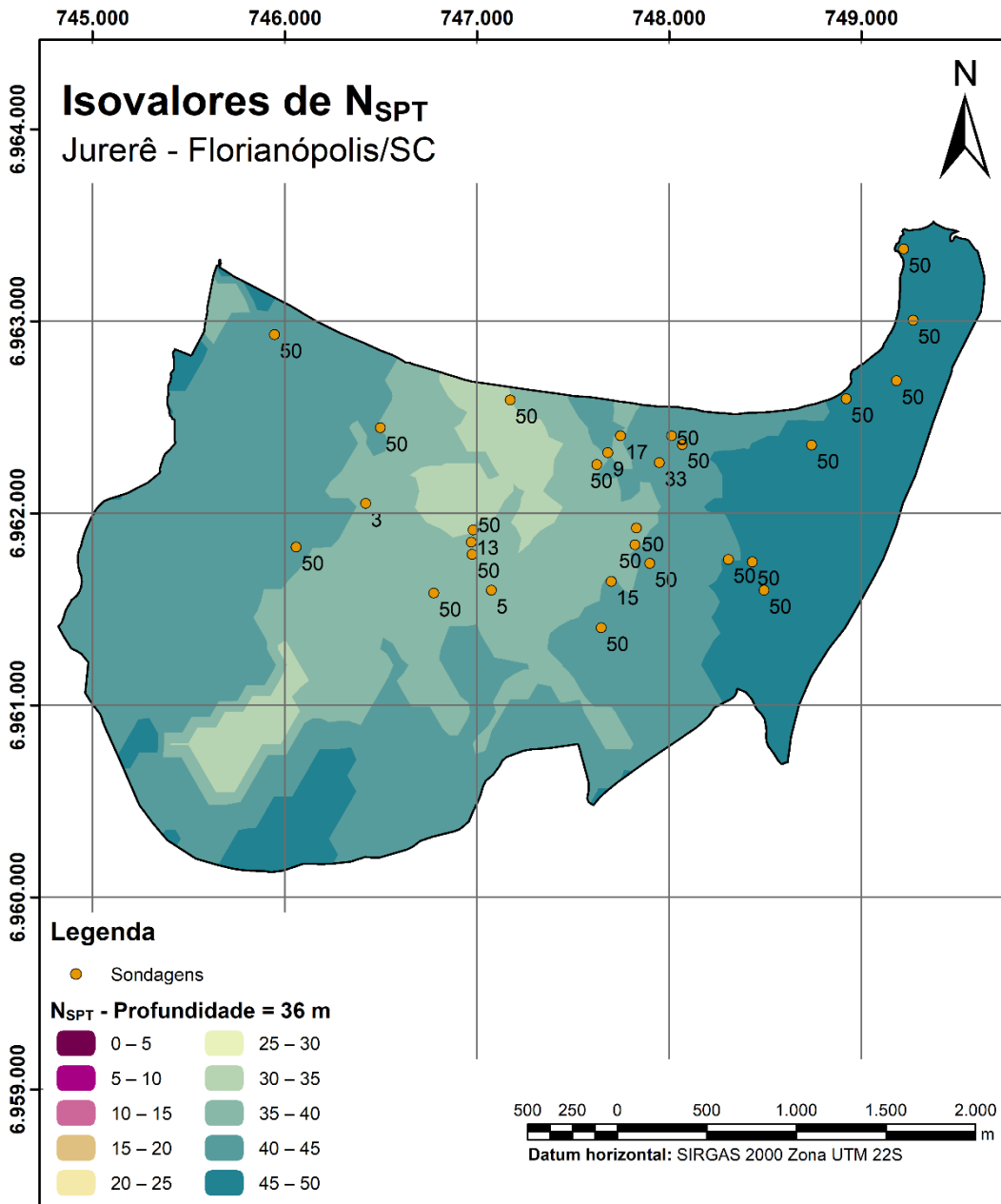
Ao avaliar os mapas para 16 metros (Mapa 21), 20 metros (Mapa 22), 24 metros (Mapa 23) e 28 metros (Mapa 24), fica evidente o contínuo avanço, a partir das regiões noroeste e nordeste em direção à região sul, e consolidação de solos com melhores resistências. Nas camadas de 16 metros e 20 metros, essas áreas com valores de N<sub>SPT</sub> acentuados, o percentual manteve-se constante. Contudo, quantitativamente pela Tabela 8, verifica-se o acréscimo das regiões com N<sub>SPT</sub> acima de 30 golpes referentes a 83,8% e, em seguida, para 87,4% da área nas profundidades de 24 e 28 metros, respectivamente.

Mapa 25 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 32 metros de profundidade



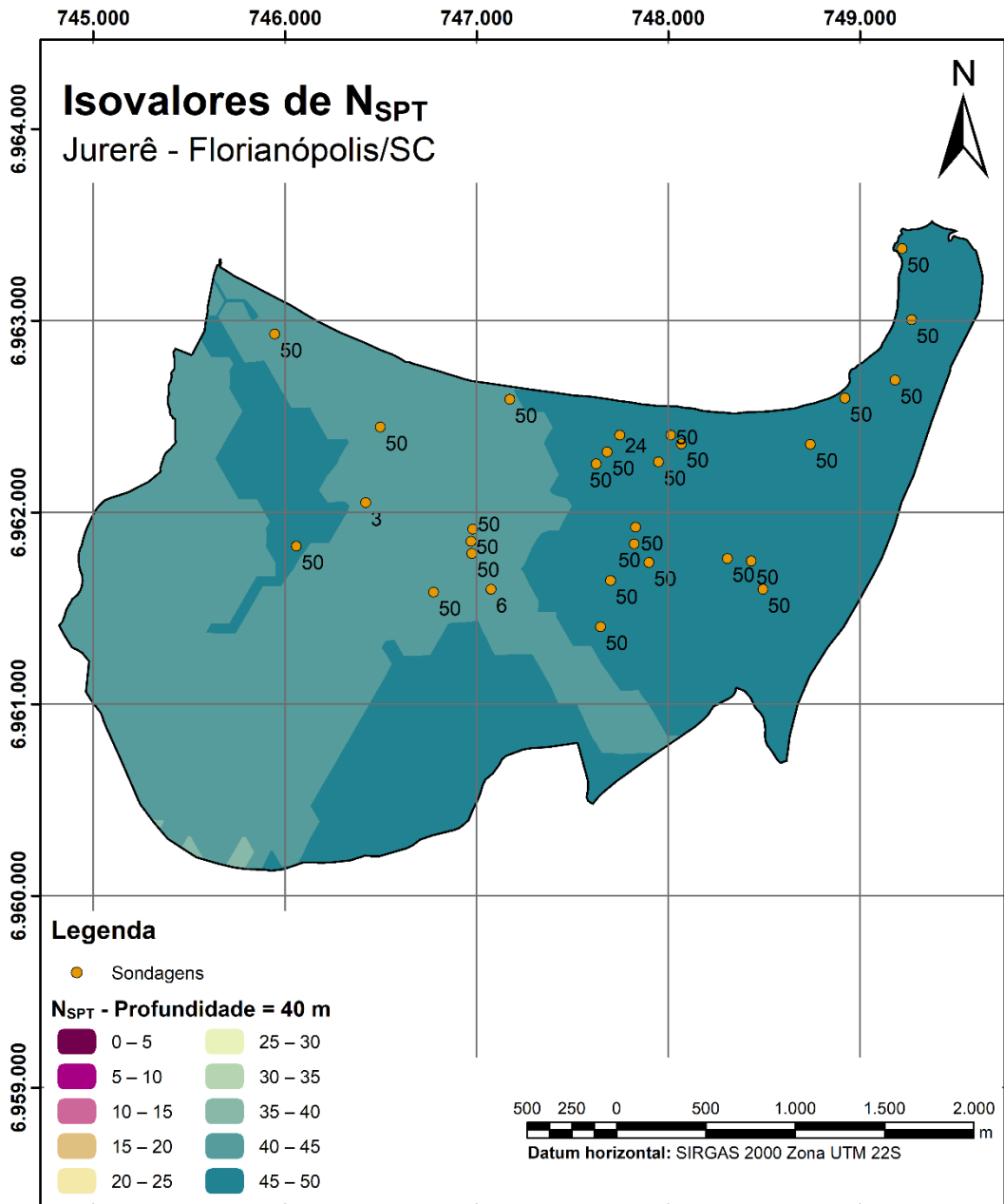
Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 26 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 36 metros de profundidade



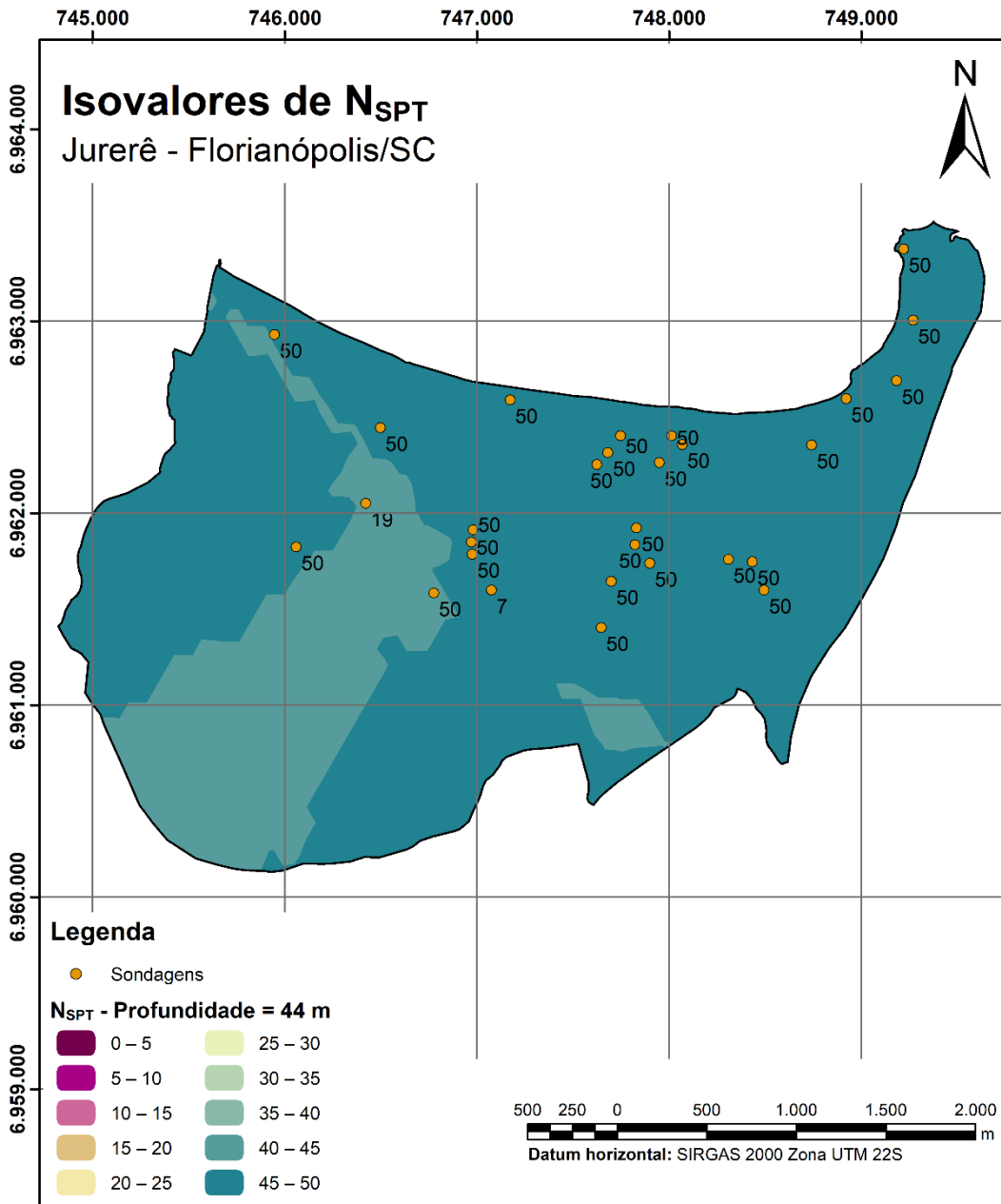
Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 27 – Isovalores de  $N_{SPT}$ : 40 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Mapa 28 – Isovalores de N<sub>SPT</sub>: 44 metros de profundidade



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

A inspeção dos mapas desenvolvidos para as profundidades de 32 metros (Mapa 25), 36 metros (Mapa 26), 40 metros (Mapa 27) e 44 metros (Mapa 28) comprovam o padrão do comportamento de consolidação das faixas de N<sub>SPT</sub> mais elevadas, uma vez que a Tabela 8 expressa o acréscimo de resistência das faixas compostas por valores entre 35 e 50 golpes de 91,7% e 93,8% para 32 e 36 metros e das faixas de 40 a 50 golpes com 99,8%, finalizando com o alcance do impenetrável.

De forma geral, a partir da análise dos mapas supracitados, é possível verificar a tendência de redução das regiões em tons roxos – indicativo de índices de N<sub>SPT</sub>

baixos – em função do aumento de profundidade. Conseqüentemente, aumenta-se a frequência das áreas representantes de valores de  $N_{SPT}$  mais elevados (em tons de verde). A Tabela 7 exemplifica esse padrão de comportamento para os primeiros 4 metros.

Tabela 7 – Frequência de áreas de  $N_{SPT}$  para 4 metros

$N_{SPT}$	% da área			
	1 m	2 m	3 m	4 m
0 – 5	0,1%	-	-	-
5 – 10	59,4%	0,1%	-	-
10 – 15	33,5%	33,0%	4,2%	4,5%
15 – 20	5,0%	49,5%	20,8%	6,7%
20 – 25	2,0%	12,2%	34,4%	19,2%
25 – 30	-	4,8%	19,8%	33,9%
30 – 35	-	0,4%	17,9%	20,6%
35 – 40	-	-	2,9%	14,6%
40 – 45	-	-	-	0,5%
45 – 50	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 15</b>	<b>Mapa 16</b>	<b>Mapa 17</b>	<b>Mapa 18</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Por sua vez, a Tabela 8 detalhada numericamente o comportamento para grandes profundidades até alcançar o impenetrável.

Tabela 8 – Frequência de áreas para as faixas de  $N_{SPT}$ 

$N_{SPT}$	% da área				
	8 m	12 m	16 m	20 m	24 m
0 – 5	7,9%	-	0,1%	-	-
5 – 10	38,0%	0,8%	4,5%	0,5%	0,1%
10 – 15	19,1%	7,8%	4,0%	3,4%	1,1%
15 – 20	21,1%	9,9%	3,9%	4,4%	3,6%
20 – 25	6,9%	27,5%	10,1%	8,3%	4,9%
25 – 30	2,9%	34,2%	16,0%	22,5%	6,5%
30 – 35	1,7%	14,9%	23,3%	28,3%	19,5%
35 – 40	0,9%	2,2%	20,6%	15,8%	36,4%
40 – 45	0,7%	1,0%	9,4%	10,1%	11,3%
45 – 50	0,8%	1,7%	8,1%	6,7%	16,6%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 19</b>	<b>Mapa 20</b>	<b>Mapa 21</b>	<b>Mapa 22</b>	<b>Mapa 23</b>

$N_{SPT}$	% da área				
	28 m	32 m	36 m	40 m	44 m
0 – 5	-	-	-	-	-
5 – 10	-	-	-	-	-
10 – 15	-	-	-	-	-
15 – 20	-	-	-	-	-
20 – 25	0,4%	-	-	-	-
25 – 30	12,2%	0,6%	-	-	-
30 – 35	17,0%	7,7%	6,2%	-	-
35 – 40	24,2%	29,7%	23,8%	0,2%	-
40 – 45	33,9%	47,8%	48,2%	49,3%	21,6%
45 – 50	12,3%	14,2%	21,8%	50,5%	78,4%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 24</b>	<b>Mapa 25</b>	<b>Mapa 26</b>	<b>Mapa 27</b>	<b>Mapa 28</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

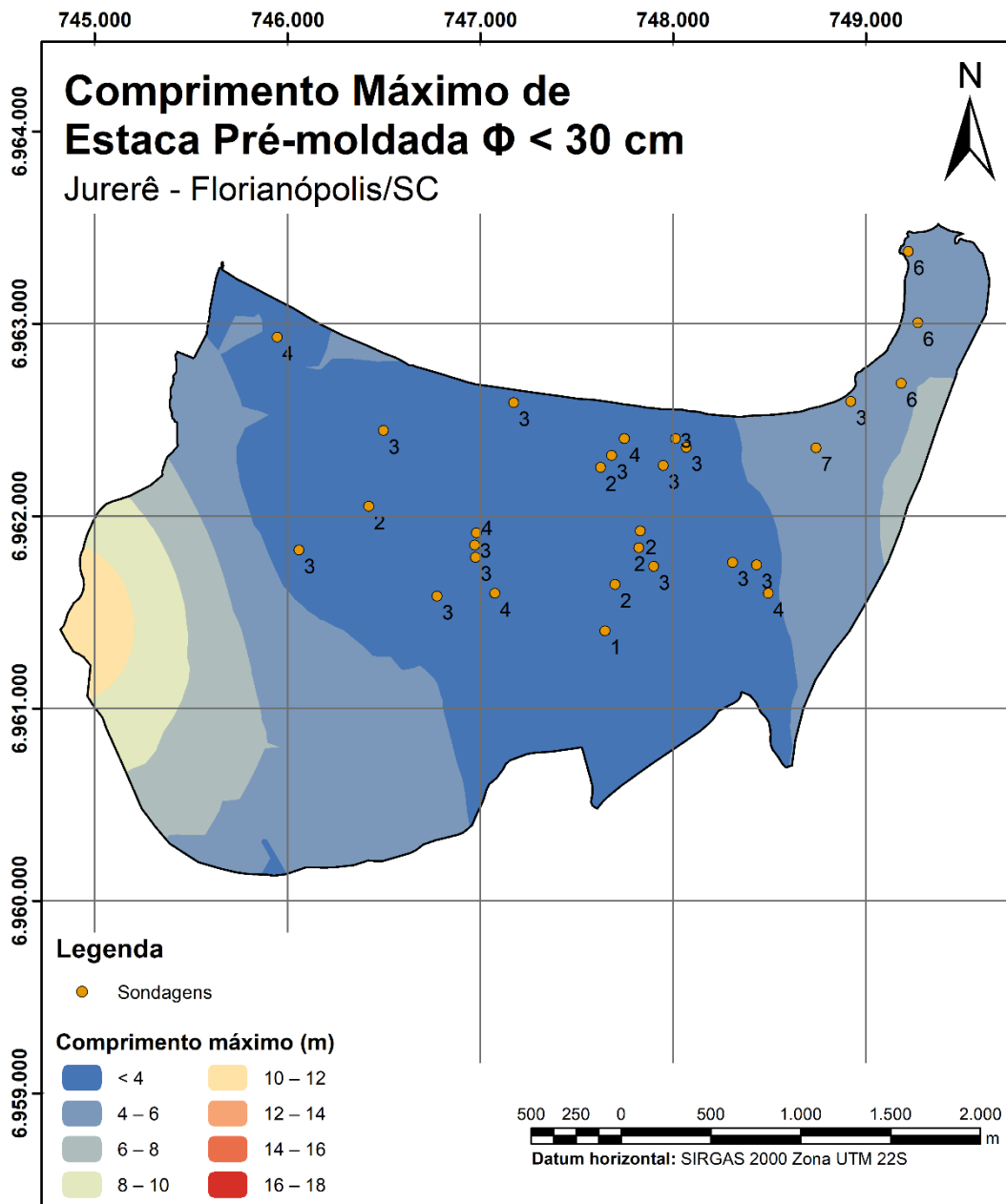
Perante o exposto e mediante a análise dos mapas no Apêndice – Mapas de isovalores de  $N_{SPT}$  para as profundidades de 1 a 45 metros, verifica-se que o comportamento do solo da camada iniciada a 4 metros até 8 metros de profundidade varia bastante em termos de número de golpes, característico de solos sedimentares encontrados em regiões mais planas. Em seguida, percebe-se o retorno do padrão anteriormente identificado até atingir os 12 metros de profundidade, no qual a resistência do solo continua a aumentar, apresentando o retorno das regiões com valores superiores a 35 golpes. A partir de então, o perfil do solo da área de estudo passa a apresentar o padrão dos mapas exibidos no decorrer desta seção, ou seja, as regiões próximas as maiores elevações do terreno comportam-se como o esperado de solos residuais, incrementando a resistência conforme o aumento de profundidade,

enquanto a região central apresenta um comportamento de solo sedimentar, com os índices de resistência variando nas faixas intermediárias até a aproximação do impenetrável.

## 5.6 COMPRIMENTO MÁXIMO DE ESTACAS

Os mapas de comprimento máximo de estacas foram elaborados considerando os três tipos de estacas mais comumente executados, sendo elas as pré-moldadas e hélice contínua. Foi levado em consideração o limite superior dos critérios de parada, descritos no Quadro 3, em função do  $N_{SPT}$  para cada profundidade.

No decorrer da presente seção, são apresentados os mapas para estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30 cm (Mapa 29), para estacas pré-moldadas com diâmetro igual ou superior a 30 cm (Mapa 30) e para estacas de hélice contínua (Mapa 31). Seguindo as faixas de comprimento, colorações azuladas indicam estacas curtas de até 8 metros e as regiões com colorações alaranjadas e avermelhadas exibem estacas mais longas, variando de 12 metros até 18 metros.

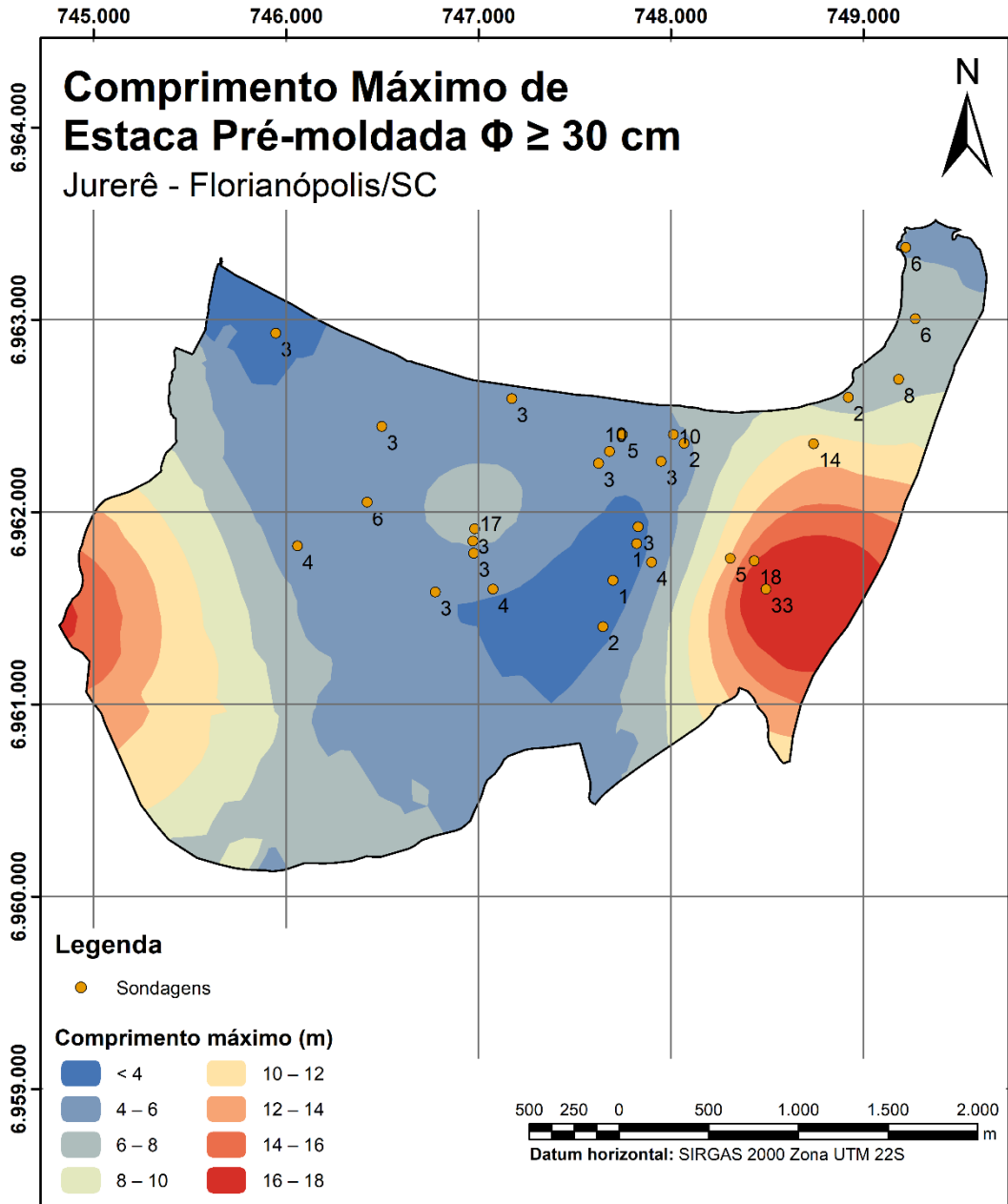
Mapa 29 – Comprimento máximo de estaca pré-moldada ( $\Phi < 30$  cm)

Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.

Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Verifica-se, por inspeção visual do Mapa 29, que as estacas tendem a ser mais curtas devido ao critério de parada ocorrer para uma faixa de  $N_{SPT}$  menor que os outros tipos de estacas apresentados. Quantitativamente, a Tabela 9 demonstra a predominância de 93,3% da área para estacas de até 8 metros de comprimento. Ademais, são inexistentes os comprimentos de estaca acima dos 12 metros.

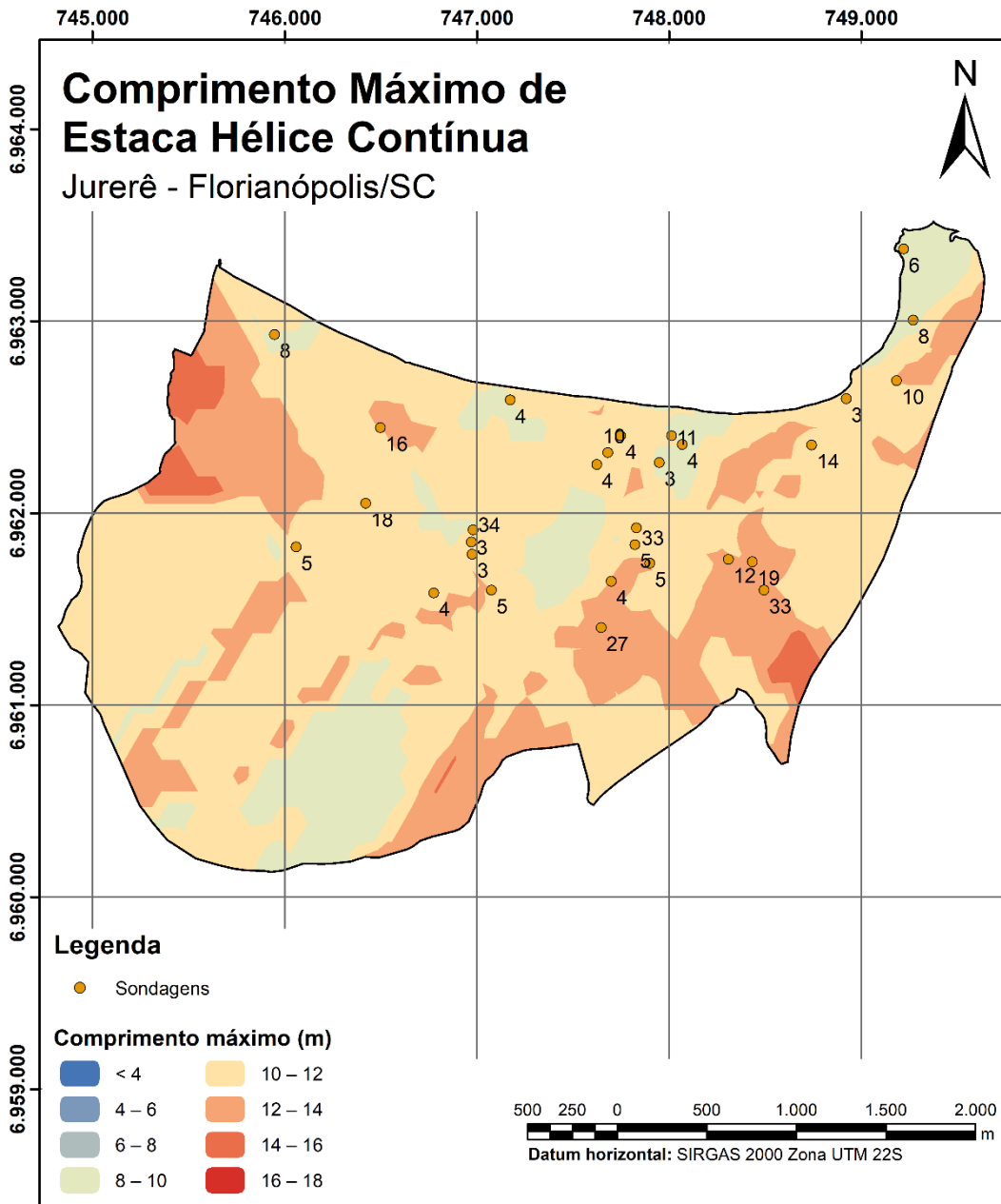
Mapa 30 – Comprimento máximo de estaca pré-moldada ( $\varnothing \geq 30$  cm)



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

Em contrapartida, o Mapa 30 destaca o surgimento de estacas mais longas indicadas pelas cores em laranja e vermelho nas zonas leste, mais notavelmente, e oeste, surgindo áreas previamente inexistentes na faixa de comprimento de 12 metros até 20 metros. Além disso, a faixa central que divide a área de estudo passa a apresentar estacas um pouco mais profundas e, de acordo com a Tabela 9, houve um aumento de 148% para a faixa de 6 a 12 metros.

Mapa 31 – Comprimento máximo de estaca hélice contínua



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

O Mapa 32 evidencia comprimentos maiores que os tipos de estacas supracitados devido ao critério de parada estar no limite de  $N_{SPT}$  de 45 golpes, dispondo de 87,4% da área para estacas de comprimento acima de 10 metros. Ademais, verifica-se que os contornos das faixas de comprimento estão mais dispersos em relação aos outros mapas.

Perante o exposto, nota-se que as regiões mantiveram basicamente o mesmo comportamento para os três mapeamentos, em que houve o aumento do comprimento das estacas em função de o critério limitante estar associado ao  $N_{SPT}$  mais elevado

para estacas de maiores diâmetros e, em seguida, para estacas hélice contínua. Nesse sentido, a Tabela 9 discrimina esse acréscimo de comprimento em relação aos diferentes tipos de estaca.

Tabela 9 – Frequência de área para os comprimentos máximos das estacas

Comprimento máximo da estaca (m)	% da área		
	Pré-moldada ( $\varnothing < 30$ )	Pré-moldada ( $\varnothing \geq 30$ )	Hélice Contínua
< 4	52,2%	7,9%	-
4 – 6	32,2%	39,7%	-
6 – 8	8,9%	19,9%	-
8 – 10	4,7%	10,3%	12,6%
10 – 12	2,0%	8,5%	63,5%
12 – 14	-	5,8%	21,7%
14 – 16	-	3,8%	2,2%
16 – 18	-	4,1%	-
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Mapa</b>	<b>Mapa 29</b>	<b>Mapa 30</b>	<b>Mapa 31</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Uma vez analisados os três mapas, é possível fazer algumas ponderações. De modo geral, estacas mais curtas foram encontradas na porção central da área de estudo, enquanto as porções leste e oeste apresentaram comprimentos maiores. Conforme o exposto pela Tabela 9, estacas pré-moldadas com diâmetro menor a 30 cm são predominantemente encontradas nas faixas inferiores aos 4 metros de comprimento em 52,2% das áreas. Já as estacas pré-moldadas com diâmetro igual ou superior a 30 cm tem maior incidência na faixa de 4 a 6 metros com 39,7% e, por fim, as estacas hélice contínua tem uma frequência de 63,5% na faixa de 10 a 12 metros.

Finalmente, é importante destacar que apesar dos mapas apresentados oferecerem apenas uma previsão do comprimento das estacas, a validade do mesmo ainda é relevante, visto que podem auxiliar na estimativa da profundidade dos furos de sondagem em anteprojetos de fundações.

## 5.7 LIMITAÇÕES E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

O mapeamento desenvolvido no decorrer do presente trabalho visou fornecer as informações essenciais para um conhecimento prévio do solo de Jurerê em relação ao impenetrável, ao lençol freático, aos tipos de fundações, das tensões admissíveis

para fundações superficiais, bem como os isovalores de  $N_{SPT}$  e comprimento máximo de estacas para fundações profundas. Nesse sentido, torna-se necessário elencar as limitações do mapeamento que podem influenciar na precisão do modelo:

- Em consequência de o banco de dados obtido não ter sido desenvolvido originalmente para o propósito deste estudo, não foi possível realizar o planejamento da localização e coleta de dados. Consequentemente, adaptações adotadas como o  $N_{SPT}$  do impenetrável e as profundidades do lençol freático foram necessárias para possibilitar uma interpolação sem distorções, as quais, contudo, podem não refletir a realidade.
- Devido a quantidade de dados, não foi viável realizar análises adicionais como a variação do nível de água em função da sazonalidade.
- Uma vez que as coordenadas verticais dos furos de sondagem não constavam no banco de dados original, as mesmas foram extraídas a partir do MDE, o qual em função do tempo de sua instituição pode conter disparidades com o relevo atual.

Perante o exposto, tendo em vista a importância da consolidação do banco de dados geotécnico desenvolvido e do papel da distribuição espacial no desenvolvimento do modelo utilizado para a análise geoestatística, a qual possibilitou o desenvolvimento dos mapas de aptidão supracitados, de acordo com Thiesen (2016), sua qualidade está associada à distribuição e heterogeneidade dos elementos usados no estudo. Assim sendo, Silva (2011) afirma que se deve verificar as seguintes limitações durante a interpolação: distância e homogeneidade, tipificação e seleção de atributos, objetividade e escala. Portanto, foi feita uma análise adicional baseada na representatividade espacial fundamentada nas publicações de Zuquette (1993), seguindo o exemplo dos trabalhos de Santos (2016) e Thiesen (2016), a qual relaciona a resolução espacial, conforme Equação (6), com a distância entre os pontos observados, apresentada pelo Quadro 9.

Quadro 9 – Número mínimo de observações e distância entre os pontos

Finalidade do mapeamento geotécnico	Escala	Atributos					
		Qualitativos				Quantitativos	
		Metamórficas e Ígneas		Sedimentares		Geral	
		Observações/km <sup>2</sup>	Distância entre os pontos observados (m)	Observações/km <sup>2</sup>	Distância entre os pontos observados (m)	Observações/km <sup>2</sup>	Distância entre os pontos observados (m)
Básico	1:250.000	1/10	3.162	1/10	3.162	1/10	3.162
Regional	1:100.000	4/10	1.581	3/10	1.826	2/10	2.236
	1:50.000	6/5	913	1/1	1.000	3/10	1.826
	1:25.000	3/1	577	2/1	707	1/1	1.000
Detalhe	1:25.000	5/1	447	4/1	500	4/1	500
	1:10.000	15/1	258	15/1	258	10/1	316
	1:5.000	25/1	200	20/1	224	15/1	258
	1:2.000	40/1	158	35/1	169	25/1	200

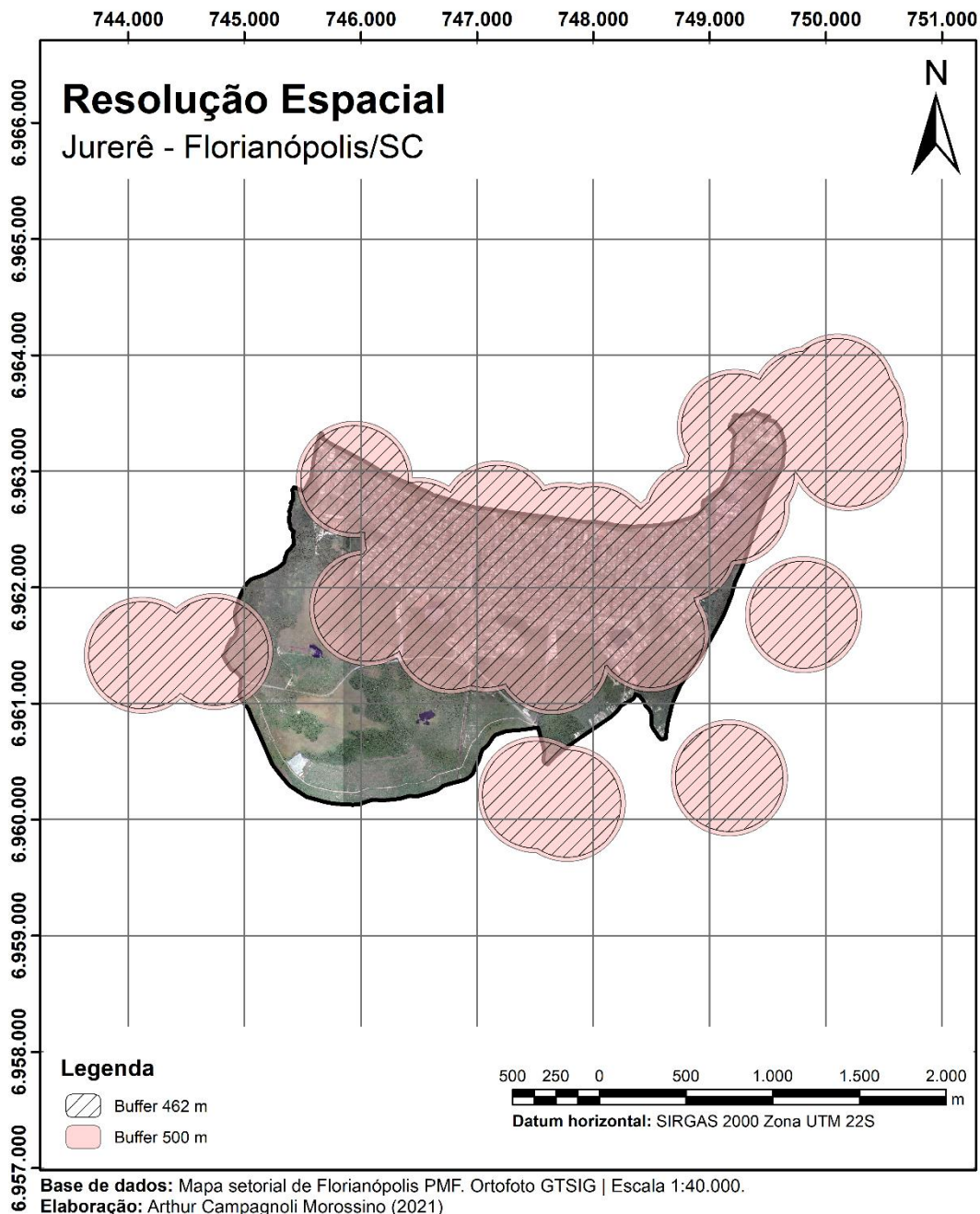
Fonte: Zuquette (1993) *apud* Thiesen (2016)

Considerando a área de 9,2 km<sup>2</sup> e os 43 pontos de sondagem, por meio da Equação (6), obtém-se:

$$R = \sqrt{\frac{9,2 \text{ km}^2}{43}} = 0,462 \text{ km} = 462 \text{ m}$$

Ao compararmos a resolução espacial obtida com o Quadro 9, verifica-se que obtemos a escala de 1:25.000, a qual Zuquette (1993) recomenda uma distância entre pontos observados de 500 metros. Nesse sentido, o presente estudo possui uma distância menor do que a esperada pelo método apresentado, porém, Thiesen (2016) afirma que, além da distância mínima, deve-se levar em conta também a distribuição dos levantamentos, visto que dados agrupados em pequenas áreas, bem como muito espaçados entre si, pioram a resolução espacial e, por vezes, uma grande quantidade de dados pode camuflar a resolução real das interpolações realizadas. Dessa forma, as análises das distâncias foram representadas pelos *buffers* ilustrados pelo Mapa 32.

Mapa 32 – Resolução espacial das sondagens à percussão – Jurerê/SC



Ao analisar o Mapa 32, observa-se que o *buffer* de 462 metros ocupa 63,4% da área de estudo e, por sua vez, o de 500 metros abrange 66,7% desta. Além disso, percebe-se que existem regiões do mapa em que não ocorre o recobrimento pelos dados de sondagem, ou seja, os pontos observados possuem uma resolução menor do que o ideal e, portanto, seria recomendada a adição de novas sondagens a fim de obter uma resolução espacial mínima.

Por fim, conforme o Quadro 9, o mapeamento resultante está em uma escala de detalhamento entre 1:10.000 e 1:25.000, tendo o Mapa 32 demonstrado que a área

coberta pelos dados de sondagem, respeitando a resolução espacial recomendada por Zuquette (1993), é a região em que se encontra a zona urbanizada de Jurerê, o que aliado ao caráter localizado e orientativo do mapeamento demonstra que o modelo se mostrou adequado.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

O presente capítulo visa a reflexão dos objetivos alcançados durante o desenvolvimento dos mapas de aptidão propostos, a partir do banco de dados geotécnico elaborado, bem como fazer recomendações para o aprimoramento do modelo utilizado em trabalhos futuros.

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O constante crescimento populacional, e conseqüente ocupação do território, fomentou a necessidade de implantação de ferramentas que auxiliem na gestão territorial, o que por sua vez, alavancou o desenvolvimento de projetos de engenharia, especialmente os de estruturas de fundações. Além disso, a evolução tecnológica proporcionou o surgimento de plataformas voltadas para o gerenciamento e processamento de dados como os Sistemas de Informações Geográficas. Nesse sentido, o SIG se apresenta como um ambiente viável para lidar com análises complexas compatíveis com a variabilidade e complexidade do solo.

Nesse contexto, este trabalho teve o objetivo de desenvolver cartas de aptidão para fundações superficiais e profundas para o bairro de Jurerê. Para tal, foi instituído um banco de dados geotécnico com informações provenientes de laudos de sondagens à percussão adaptados da tese de doutorado de Christ (2019), utilizado para o mapeamento geotécnico e análise de suscetibilidade a deslizamentos na ilha de Santa Catarina, por meio da manipulação de informações em ambiente SIG. Para isso, realizou-se o levantamento de mapeamentos relativos às características fundamentais do bairro de Jurerê como seus limites territoriais, sua hidrografia e seu relevo, bem como uma ortofoto utilizada de forma complementar às análises do método de trabalho seguintes. Esta foi uma etapa crucial do trabalho e que demandou bastante cuidado na escolha das fontes desses arquivos digitais, haja vista a importância da confiabilidade dos dados na precisão dos resultados pretendidos e a necessidade de cruzamento entre os mesmos. Além do exposto, foram abordados detalhadamente os métodos empregados no georreferenciamento e tratamento dos dados gráficos, em especial a elaboração dos mapas temáticos do terreno, e dos dados de SPT, visando a aplicação da geoestatística para a elaboração dos mapas de aptidão para fundações. Acerca dos mapas temáticos, estes foram fundamentais

no ajuste do banco de dados de sondagens à percussão, norteando, em conjunto com as normas e literatura pertinentes, as decisões tomadas no que se refere à profundidade do impenetrável e do nível do lençol freático da base de dados geotécnica criada. Cabe ressaltar nesse processo a dificuldade advinda de ajustar os dados, uma vez que o banco de dados original não foi criado para os fins deste trabalho e, portanto, recomenda-se o enriquecimento da quantidade de laudos de sondagem para o aprimoramento do modelo geoestatístico. Ademais, foram desenvolvidos os mapas de aptidão para fundações utilizando os parâmetros de  $N_{SPT}$  e de nível de água associados às correlações de métodos semiempíricos e considerações práticas encontradas na literatura de ciências dos solos. Esse processo evidenciou a versatilidade e o poderio de uma plataforma SIG, ao possibilitar a inclusão, a manipulação, o gerenciamento e o processamento de dados de forma eficaz e prática. Além disso, a capacidade de realizar o cruzamento de dados auxiliou na elaboração visual mais adequada e, conseqüentemente, na facilidade de interpretação dos resultados.

Perante o exposto, observa-se que os objetivos propostos para este trabalho foram atendidos e, por isso, foi possível inferir diversas características do perfil geotécnico do subsolo de Jurerê. Em relação à superfície do impenetrável, verificou-se que 85,7% da área de estudo possui o impenetrável na faixa dos 15 a 30 metros, sendo que o mesmo é atingido na profundidade de 45 metros e que aproximadamente 82,6% do território apresenta o impenetrável de 10 a 25 metros abaixo do nível do oceano. Por sua vez, o lençol freático se mostrou estar próximo a superfície, atingindo 2 metros, em que 81,6% fica até 1,25 metro de profundidade com a predominância de 76% da área no nível do mar até a elevação de 5 metros.

Também, os mapas de orientação para o tipo de fundação mais adequado, considerando o cenário especificado para este trabalho, demonstraram que existe uma predominância pela fundação superficial para ambas as análises realizadas, sendo que o nível de água tem um impacto considerável, o qual passou de 57,3% da área estudada para uma cobertura total. Ainda em relação às fundações superficiais, foi observado, durante a análise complementar das tensões admissíveis, que o ganho de resistência do solo ocorre conforme o aumento de profundidade, irradiando da região central para os limites da área de estudo, excetuando-se a porção nordeste, as quais foram encontradas tensões na faixa intermediária.

Similarmente, foram desenvolvidos mapas de orientação para execução de fundações profundas. Especialmente para o mapa de isovalores de  $N_{SPT}$ , foi possível verificar o acréscimo da resistência compatível com o mapa de isovalores de tensão admissível para fundações superficiais nos primeiros 4 metros e uma variação nos valores até chegar na camada a 8 metros de profundidade, a partir da qual, o solo retoma o aumento da resistência com as maiores profundidades na direção da região central, na qual o impenetrável é mais profundo, até alcançá-lo. Outrossim, os mapas indicativos de comprimentos máximos de estacas apontaram a faixa central da área de estudo com uma maior probabilidade de estacas curtas, enquanto as estacas com maiores comprimentos foram previstas para as áreas próximas às elevações leste e oeste.

Uma vez elaborados os mapas de aptidão para fundações, a validação dos resultados foi realizada a partir da resolução espacial dos dados observados. Verificou-se ainda que a representatividade espacial dos pontos está próxima da escala em detalhe de 1:25.000, na qual a distância dos pontos estudados deve ser de 500 metros. De acordo com a disposição dos dados de sondagens que compõem o banco de dados geotécnico, notou-se que a distância mínima recomendada por Zuquette (1993) foi respeitada, em especial, nas regiões de alta urbanização, validando, assim, o mapeamento realizado no presente estudo. Porém, destaca-se que futuramente o ideal é preencher a região sudeste da área de estudo com mais pontos de sondagem à percussão, de forma a contemplar a área que ainda permanece intocada. Diante disso, o mapeamento apresentado forneceu informações essenciais sobre as características e parâmetros geotécnicos necessários para o desenvolvimento de projetos de estruturas de fundações e gestão territorial. Contudo, é crucial reforçar o caráter orientativo das cartas desenvolvidas e que os mapas supramencionados não substituem a necessidade da investigação geotécnica local para o dimensionamento adequado de estruturas de fundações.

Na prática, essas informações podem ser utilizadas na análise de custos prévios, em compras de terrenos, na estimativa da quantidade e profundidade de sondagens e na redução do tempo e dos gastos durante a análise de viabilidade, de custos e de anteprojetos. Ademais, o estudo evidenciou o potencial da ferramenta SIG no gerenciamento de uma grande variedade de dados com potencial de atualização constante e cruzamento dessas informações para geração de análises multivariadas.

## 6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Ainda que a aplicação e validade do mapeamento geotécnico realizado seja abrangente para a área de estudo, dadas as limitações de recursos, a seguir são feitas recomendações para o aprimoramento do estudo em trabalhos futuros:

- Incrementar os dados de sondagem SPT, a partir de laudos obtidos por meio de contato direto com empresas de sondagem, construtoras, órgãos públicos para o aperfeiçoamento da modelagem do semivariograma.
- Considerar o efeito da sazonalidade na profundidade do lençol freático, analisando a variação do nível de água em períodos secos e chuvosos.
- Realizar a análise do perfil geológico do terreno, por meio de cartas de tipos de solo.

Finalmente, recomenda-se que a base de dados geotécnica elaborada seja continuamente aprimorada e alimentada com dados atuais e de qualidade, uma vez que a precisão e a validade das análises obtidas por meio deste estão diretamente associadas à sua robustez.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, S. F. **Estudo de estratégias bioclimáticas no clima de Florianópolis**. 1996. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996. Disponível em: [https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO\\_Su eli\\_Ferraz\\_de\\_Andrade.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO_Su eli_Ferraz_de_Andrade.pdf). Acesso em: 2 abr. 2021.
- ANDRIOTTI, J. L. S. Notas de Geoestatística. **Acta Geologica Leopoldensia**, [s. l.], p. 3-14, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- BITAR, O. Y. **Guia Cartas geotécnicas: orientações básicas aos municípios**. São Paulo: IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), 2015. 26 p. Disponível em: [http://www.ipt.br/guia\\_cartas\\_geotecnicas.pdf](http://www.ipt.br/guia_cartas_geotecnicas.pdf). Acesso em: 20 abr. 2021.
- BOLSTAD, P. **GIS Fundamentals: a first text on geographic information systems**. 5. ed. Minnesota: Eider Press, 2016. 769 p.
- Burrough, P. & McDonnell, R. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, 1998. 20 p.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. **Principles of Geographical Information Systems**. 3ª ed. Glasgow: Bell & Bain Ltd., 2015.
- CALIJURI, M. L.; LOURES, S. S. P. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. [S. L.]: X, 2006. 27 slides, color. Disponível em: [http://files.fabriziabenda.webnode.pt/200000061-21c97220fd/Fundamentos\\_de\\_SIG.pdf](http://files.fabriziabenda.webnode.pt/200000061-21c97220fd/Fundamentos_de_SIG.pdf). Acesso em: 21 abr. 2021.
- CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CAMARGO, E.C.G. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2. ed. São Paulo: Inpe, 1998. Cap. 5. p. 1-36.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 234 p.
- CARAMEZ, M. L. **Mapeamento geotécnico da microbacia do Itacorubi - Florianópolis/SC**: aplicação do modelo Shalstab para a confecção de mapa de

suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas. 2017. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CARAMEZ, M.; HIGASHI, R.R. Utilização de técnicas de geoprocessamento através de um SIG para a estimativa de características mecânicas dos solos do município de Florianópolis. In: **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), INPE, p.8849.** Curitiba, 2011. Disponível em <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.20.17.46/doc/p1257.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2020.

CHANG, Kang-Tsung. **Introduction to Geographic Information Systems.** 9. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 444 p.

CHRIST, C. E. **Mapeamento geotécnico e análise da suscetibilidade a deslizamento na ilha de Santa Catarina.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2019a. 191p.

CHRIST, C. E. **Base de Dados Geográficos: Banco de dados geotécnico.** Tese (doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019b.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. Fundações por estacas: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 96 p.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. Fundações diretas: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 140 p.

COVELLO, C. *et al.* A Geodiversidade do Município de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil: Valores e Ameaças. **Revista do Departamento de Geografia USP,** São Paulo, jun. 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317963199\\_A\\_Geodiversidade\\_do\\_Municipio\\_de\\_Florianopolis\\_Santa\\_Catarina\\_Brasil\\_Valores\\_e\\_Ameacas/fulltext/5953eaf4a6fdcc1697893923/A-Geodiversidade-do-Municipio-de-Florianopolis-Santa-Catarina-Brasil-Valores-e-Ameacas.pdf](https://www.researchgate.net/publication/317963199_A_Geodiversidade_do_Municipio_de_Florianopolis_Santa_Catarina_Brasil_Valores_e_Ameacas/fulltext/5953eaf4a6fdcc1697893923/A-Geodiversidade-do-Municipio-de-Florianopolis-Santa-Catarina-Brasil-Valores-e-Ameacas.pdf). Acesso em: 28 mar. 2021.

DAVISON DIAS, R. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico,** São Paulo, v. especial, p. 51-55. 1995. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8845>. Acesso em: 15 mar. 2021.

DIAS, M. J. **Distribuição espacial das características físicas e químicas do solo de cerrado utilizando krigagem indicativa.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Goiás (UEG), Anápolis, 2013. 80 p.

DIAS, F, P.; HERRMANN, M. L. P. Susceptibilidade a deslizamentos: Estudo de caso no Bairro Saco Grande, Florianópolis - SC. In: **Revista Caminhos de Geografia, 3(6), p.57-73.** Uberlândia, 2002. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15295/8594>>. Acesso em: 15 abr. 2021. ISSN: 1678-6343.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª edição. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. EPAGRI. **Mapa Digital: Modelo Digital de Elevação**. 2005. Disponível em: [https://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/pre\\_download\\_elevacao.jsp](https://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/pre_download_elevacao.jsp). Acesso em: 10 de mar. 2021.

FELGUEIRAS, C. A. **Análises sobre Modelos Digitais de Terreno em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas**. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), 1999. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/47445961\\_Analise\\_sobre\\_modelos\\_digitais\\_de\\_terreno\\_em\\_ambiente\\_de\\_sistemas\\_de\\_informacoes\\_geograficas](https://www.researchgate.net/publication/47445961_Analise_sobre_modelos_digitais_de_terreno_em_ambiente_de_sistemas_de_informacoes_geograficas)>. Acesso em: 22 mar. 2021.

FONTES, S. B. **Mapeamento geotécnico com ênfase em erosões no município de Ouro Preto-MG, escala 1:5.000**. 1999. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

GRUPO DE TRABALHO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS. GTSIG. **Mapa Digital: Ortofoto do município de Florianópolis**. Disponibilizado diretamente com o grupo. 2016.

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. O.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. **Fundações: Teoria e Prática**. 2ª ed., São Paulo: Editora PINI, 1998. ISBN: 85-7266-098-4. 751p.

HERRMANN, M. L. P. **Aspectos ambientais da porção central da Ilha de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 1989. 254p. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/111815>>. Acesso em: 5 ago. 2016.

HIGASHI, R.R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2006. 486p.

HIGASHI, R. A. R. **Notas de aulas**. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2016. 161p.

HUISMAN, O.; BY, R. A. **Principles of Geographic Information Systems: an introductory textbook**. Enschede: ITC, 2009. 540 slides, color. Disponível em: [https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers\\_2009/general/principlesgis.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesgis.pdf). Acesso em: 22 mar. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Ferramenta Cidades@**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/panorama>>. Acesso em: 21 mar. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. **Cartografia para Geoprocessamento**. Julio Cesar Lima D'Alge. INPE, São José dos Campos, 2001.

Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.14.47/doc/cap6-cartografia.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Lab. Geomatématica, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 02, 20 p. 2000.

Landim P.M.B. 2006. Sobre Geoestatística e mapas. *Terra Didática*, 2(1):19-33. [https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v2/pdf-v2/t\\_didatica\\_2006\\_v02n01\\_p019-033\\_landim.pdf](https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v2/pdf-v2/t_didatica_2006_v02n01_p019-033_landim.pdf)

LONGLEY, P. A. *et al.* **Geographic Information Science and Systems**. 4. ed. Wiley, 2015. 496 p.

MARINOSKI, A. K.; GHISI, E. Avaliação de viabilidade ambiental e econômica de sistemas de aproveitamento de água pluvial em habitação de baixo padrão: estudo de caso em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 423-443, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000100230>.

MENDONÇA, M.; LOMBARDO, M. A. El clima urbano de ciudades subtropicales costeras atlánticas: El caso de la conurbación de Florianópolis. **Revista de Geografía Norte Grande**, v. 141, n. 44, p. 129–141, 2009.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 256 p.

PESCIM, E. E.; URBANO, M. R.; DEMÉTRIO, C. G. B. Estimação da densidade do solo em uma região da Amazônia para o cálculo de estoques de carbono do solo. **19º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística – SINAPE**. São Pedro/SP, 2010. Disponível em: <[http://www.ime.unicamp.br/sinape/sites/default/files/resumo%20estendido\\_geo.pdf](http://www.ime.unicamp.br/sinape/sites/default/files/resumo%20estendido_geo.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. PMF. **Mapa Digital: Setores de Florianópolis (Censo, 2010)**. 2018. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/entidades/geo/index.php?cms=mapas+para+download&menu=0>. Acesso em: 15 de mar. 2021.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4ª ed. São Paulo: Zigue Editoria, 2008. 240p.

RUPP, R. F. **Conforto térmico humano em edificações de escritórios localizadas no clima subtropical úmido de Florianópolis/SC**. 2018. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SANTOS, G. T. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia**. 1997. 231

f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

SANTOS, J.V. **Aplicação de SIG para análise do perfil geológico-geotécnico do Campus sede da UFSC e elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2016. 200p.

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar. **Ensaio de Campo** e suas aplicações à Engenharia de fundações. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 224 p.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL. SDS. **Mapa Digital: Cursos de água**. 2015. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/download/index.jsp>. Acesso em: 17 de fev. 2021.

SILVA, C. P. L. **Cartografia geotécnica tridimensional do setor noroeste de Brasília**. 2011. 265 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/11772>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SILVA, M.; HORN FILHO, N. O. Roteiro geológico-ambiental ao longo da planície costeira da Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. In: **Revista Discente Expressões Geográficas**, n. 07, ano VII, p.210-231. Florianópolis, 2011.

SOARES, W. C. **Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG. Análise espacial da profundidade do lençol freático e do N<sub>SPT</sub> para obras de fundação em João Pessoa - PB**. 2011. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

STURARO, J. R. **Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens de simples reconhecimento**. 1994. 183 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

TOMAZZOLI, E. R.; PELLERIN, J. M. Unidades do mapa geológico da ilha de Santa Catarina: as rochas. **Geosul**, [S.L.], v. 30, n. 60, p. 225, 23 dez. 2015. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). <http://dx.doi.org/10.5007/2177-5230.2015v30n60p225>.

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**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2016. 173p.

UNESCO. **Geographical Information Systems (GIS) in Underwater Archaeology**. Bangkok, 2012. 23 slides. Disponível em:

<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CLT/images/630X300/UNIT8.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2020.

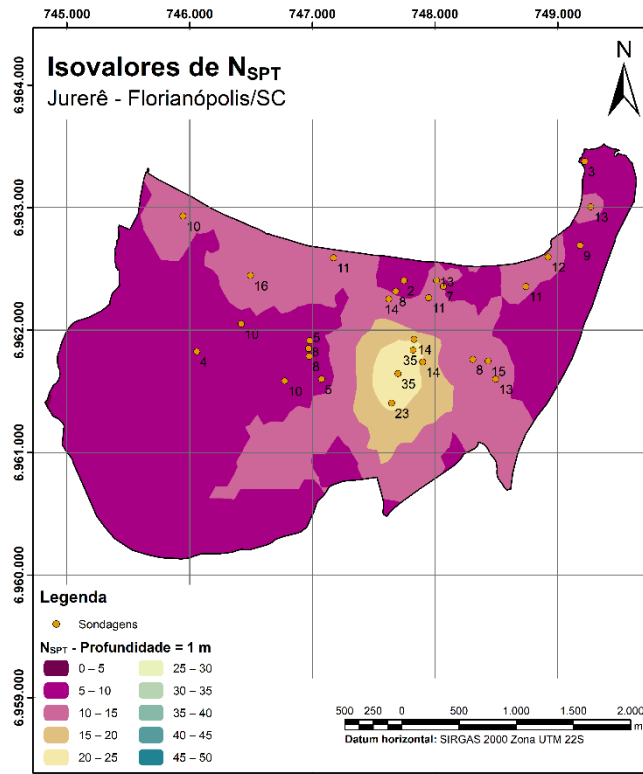
VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1- 54.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

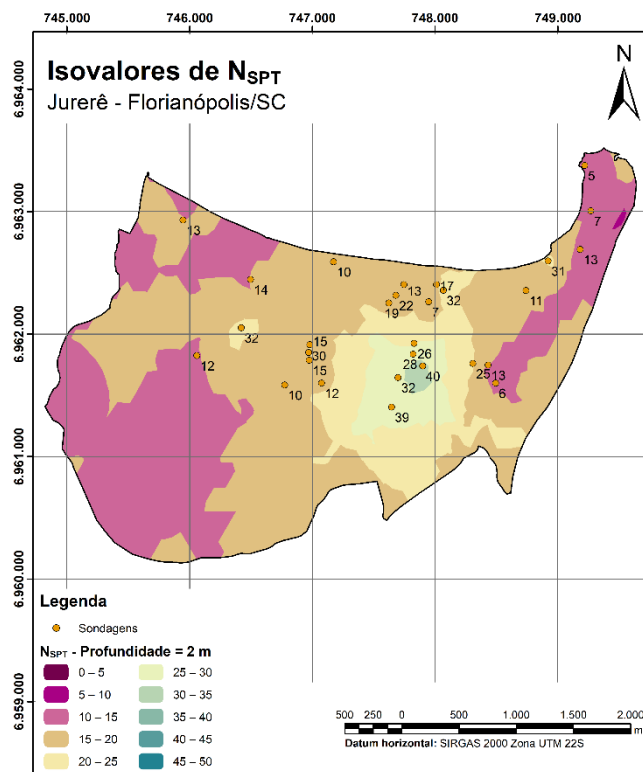
ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1987.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. Tese (Livre Docência). Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). 369p. São Carlos, 1993.

## APÊNDICE – MAPAS DE ISOVALORES DE $N_{SPT}$ PARA AS PROFUNDIDADES DE 1 A 45 METROS



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)



Base de dados: Mapa setorial de Florianópolis PMF. Acervo de sondagens SPT | Escala 1:25.000.  
Elaboração: Arthur Campagnoli Morossino (2021)

