

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –
CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA CIDADE DE RIO VERDE – GO E
DESENVOLVIMENTO DE CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES COM
BASE EM SONDAgens SPT UTILIZANDO QGIS**

GABRIEL CAMPOS ARAÚJO MENDES

ORIENTADOR: CHARLES PEREIRA CHAVES

COORIENTADOR: LUCAS PERES ANGELINI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Rio Verde, GO

SETEMBRO/ 2024

GABRIEL CAMPOS ARAÚJO MENDES

**ANÁLISE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA CIDADE DE RIO VERDE – GO E
DESENVOLVIMENTO DE CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES COM
BASE EM SONDAgens SPT UTILIZANDO QGIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Instituto Federal Goiano – Campus Rio
Verde Goiás, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dsc. Charles Pereira Chaves
Cooorientador: Prof. Dsc. Lucas Peres Angelini

Rio Verde, GO

06 de setembro de 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

M538a Mendes, Gabriel Campos Araújo
Análise geológico-geotécnica da cidade de Rio Verde - GO e desenvolvimento de cartas de aptidão para fundações com base em sondagens SPT utilizando o QGIS / Gabriel Campos Araújo Mendes ; orientador Charles Pereira Chaves. -- Rio Verde, 2024.
104 f.

TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Sondagens SPT. 2. Banco de dados geotécnico. 3. Fundação. 4. Interpolação IDW. 5. QGIS. I. Chaves, Charles Pereira, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL CAMPOS ARAUJO MENDES**
Data: 16/09/2024 14:11:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



Documento assinado digitalmente

CHARLES PEREIRA CHAVES
Data: 16/09/2024 15:06:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 28 dias do mês de agosto de dois mil e vinte e quatro, às 16 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Charles Pereira Chaves (orientador), Prof. Wellington Donizete Guimarães e Prof. Lucas Peres Angelini, para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado “ANÁLISE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA CIDADE DE RIO VERDE – GO E DESENVOLVIMENTO DE CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES COM BASE EM SONDAGENS SPT UTILIZANDO SIG" de Gabriel Campos Araújo Mendes, estudante do curso de ENGENHARIA CIVIL do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2019102200840497. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO COM RESSALVA do(a) estudante desde que seja apresentado o TC na forma escrita com as devidas correções à banca novamente até o dia 30/08/2024, caso não seja enviada as correções será considerado REPROVADO. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

Rio Verde, 28 de agosto de 2024.

DSc. Charles Pereira Chaves

Orientador

DSc. Wellington Donizete Guimarães

Membro da Banca Examinadora

DSc. Lucas Peres Angelini

Membro da Banca Examinadora

Flávio Hiochio Sato

Mediador de TC

Documento assinado eletronicamente por:

- Flavio Hiochio Sato, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/09/2024 15:23:28.
- Wellington Donizete Guimaraes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/09/2024 15:19:55.
- Lucas Peres Angelini, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/09/2024 15:03:09.
- Charles Pereira Chaves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/09/2024 09:57:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/08/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 627605

Código de Autenticação: 64f65f85d4



AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Charles Pereira Chaves, por sua orientação inestimável, paciência e suporte contínuo ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Suas valiosas contribuições foram essenciais para a conclusão deste estudo.

Agradeço ao Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde Goiás, pela oportunidade e pelos recursos fornecidos, que foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim durante toda a minha jornada acadêmica, meu sincero agradecimento. O encorajamento e o suporte de vocês foram fundamentais para superar os desafios e seguir em frente.

Aos meus queridos pais, cuja dedicação e investimento em meu futuro tornaram possível a realização deste sonho. A conclusão desta faculdade é uma vitória compartilhada e reflete o amor e o apoio incondicional que sempre me proporcionaram. Sou imensamente grato por tudo que fizeram por mim.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estruturar um banco de dados geológico-geotécnico para a zona urbana de Rio Verde, Goiás, com base em sondagens SPT (Standard Penetration Test), totalizando 231 laudos de sondagens à percussão. A metodologia utilizada incluiu a coleta de dados das sondagens, georreferenciamento no software QGIS e a aplicação de métodos de interpolação, como o Ponderado pelo Inverso da Distância (IDW), para gerar mapas geotécnicos e cartas de aptidão para fundações. Foram desenvolvidos mapas de isovalores de N_{spt} , de tipos de solo para diferentes profundidades e de comprimento máximo de estacas, considerando os diferentes tipos de fundações. Os principais resultados mostraram que o solo da região apresenta uma predominância de argila nos primeiros metros, seguida por silte e areia em profundidades maiores, até se atingir camadas impenetráveis. As cartas de aptidão destacam áreas específicas para a aplicação de estacas hélice contínua, pré-moldadas e raiz, auxiliando no planejamento de obras civis. Conclui-se que o uso de ferramentas SIG, como o QGIS, e técnicas geoestatísticas são de grande valor para a modelagem geotécnica da região, proporcionando uma base técnica para decisões estratégicas em obras de engenharia, embora novos estudos e sondagens sejam recomendados para cada projeto específico.

Palavras-chave: Sondagens SPT. Banco de dados geotécnico. Fundação. Interpolação IDW. QGIS. Rio Verde Goiás.

ABSTRACT

This study aimed to structure a geological-geotechnical database for the urban area of Rio Verde, Goiás, based on Standard Penetration Tests (SPT), totaling 231 percussion drilling reports. The methodology included data collection from the drilling reports, georeferencing in the QGIS software, and applying interpolation methods such as Inverse Distance Weighting (IDW) to generate geotechnical maps and foundation suitability charts. Maps of N_{spt} isovalues, soil types at different depths, and maximum pile lengths were developed, considering different foundation types. The main results showed that the region's soil is predominantly clay in the upper meters, followed by silt and sand at greater depths, until impenetrable layers are reached. The suitability charts highlight specific areas for the application of continuous flight auger piles, precast piles, and root piles, supporting the planning of civil construction projects. It is concluded that the use of GIS tools, such as QGIS, and geostatistical techniques are of great value for geotechnical modeling of the region, providing a technical basis for strategic decisions in engineering projects, although further studies and on-site drilling are recommended for each specific project.

Keywords: SPT drilling, Geotechnical database, Foundation, IDW interpolation, QGIS, Rio Verde Goiás.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivo Específicos.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT	5
2.1.1 História sobre o ensaio SPT.....	5
2.1.2 Funcionamento do SPT	6
2.1.3 Execução do ensaio SPT.....	9
2.1.4 Laudo <i>NSPT</i>	10
2.1.5 Parâmetros e correlações	11
2.2 Sistemas de Informações Geográficas	13
2.2.1 <i>QGIS</i>	13
2.3 Interpolação	15
2.3.1 Ponderado pelo inverso da distância.....	16
2.4 Análises Estatísticas	16
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	18
4 METODOLOGIA	19
4.1 Aquisição e adequação de dados	21
4.2 Processamento de dados em SIG.....	23
4.2.1 Georreferenciamento dos dados das sondagens	23
4.2.2 Desenvolvimento do banco de dados geológico geotécnico	23
4.2.3 Aplicação de geoestatística.....	24
4.2.3.1 Cartas de superfície do impenetrável à percussão	24
4.2.3.2 Cartas de tipo de solo	25
4.2.3.3 Cartas de isovalores de <i>Nspt</i>	26
4.2.3.4 Cartas de comprimento máximo de estacas	26
4.3 Validação dos Resultados.....	27
5 ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	29
5.1 Análise do Perfil Geológico	29
5.1.1 Cartas de aptidão de tipo de solo	29
5.2 Cartas de Aptidão Para Fundações.....	57

5.2.1 Cartas de superfície do impenetrável a percussão	57
5.2.2 Cartas de isovalores de <i>NSPT</i>	59
5.2.3 Cartas de comprimento máximo de estacas	85
5.3 Limitações e Validações dos Resultados	90
6 CONCLUSÃO	100
REFERÊNCIAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo do aparelho de realização do SPT	6
Figura 2 - Amostrador bipartido e fechado.....	7
Figura 3 - Dimensões em mm do martelo	8
Figura 4 - Boletim de Medição.....	11
Figura 5 - Localização da área de estudo.....	19
Figura 6 - Fluxograma do método de trabalho	20
Figura 7 - Localização dos pontos de sondagem	22
Figura 8 - Localização dos pontos encontrados a partir dos laudos disponibilizados	28
Figura 9 - Carta de tipos de solo: 1 metro de profundidade.....	30
Figura 10 - Carta de tipos de solo: 2 metros de profundidade	31
Figura 11 - Carta de tipos de solo: 3 metros de profundidade	32
Figura 12 - Carta de tipos de solo: 4 metros de profundidade	33
Figura 13 - Carta de tipos de solo: 5 metros de profundidade	35
Figura 14 - Carta de tipos de solo: 6 metros de profundidade	36
Figura 15 - Carta de tipos de solo: 7 metros de profundidade	37
Figura 16 - Carta de tipos de solo: 8 metros de profundidade	38
Figura 17 - Carta de tipos de solo: 9 metros de profundidade	39
Figura 18 - Carta de tipos de solo: 10 metros de profundidade	40
Figura 19 - Carta de tipos de solo: 11 metros de profundidade	41
Figura 20 - Carta de tipos de solo: 12 metros de profundidade	42
Figura 21 - Carta de tipos de solo: 13 metros de profundidade	43
Figura 22 - Carta de tipos de solo: 14 metros de profundidade	44
Figura 23 - Carta de tipos de solo: 15 metros de profundidade	45
Figura 24 - Carta de tipos de solo: 16 metros de profundidade	46
Figura 25 - Carta de tipos de solo: 17 metros de profundidade	47
Figura 26 - Carta de tipos de solo: 18 metros de profundidade	48
Figura 27 - Carta de tipos de solo: 19 metros de profundidade	49
Figura 28 - Carta de tipos de solo: 20 metros de profundidade	50
Figura 29 - Carta de tipos de solo: 21 metros de profundidade	51
Figura 30 - Carta de tipos de solo: 22 metros de profundidade	52
Figura 31 - Carta de tipos de solo: 23 metros de profundidade	53
Figura 32 - Resultado das interpolações dos solos em cada profundidade	56
Figura 33 - Carta de profundidade do impenetrável à percussão	58
Figura 34 - Carta de isovalores de N_{spt} : 1 metro de profundidade.....	60

Figura 35 - Carta de isovalores de Nspt: 2 metros de profundidade	61
Figura 36 - Carta de isovalores de Nspt: 3 metros de profundidade	62
Figura 37 - Carta de isovalores de Nspt: 4 metros de profundidade	63
Figura 38 - Carta de isovalores de Nspt: 5 metros de profundidade	64
Figura 39 - Carta de isovalores de Nspt: 6 metros de profundidade	65
Figura 40 - Carta de isovalores de Nspt: 7 metros de profundidade	66
Figura 41 - Carta de isovalores de Nspt: 8 metros de profundidade	67
Figura 42 - Carta de isovalores de Nspt: 9 metros de profundidade	68
Figura 43 - Carta de isovalores de Nspt: 10 metros de profundidade	69
Figura 44 - Carta de isovalores de Nspt: 11 metros de profundidade	70
Figura 45 - Carta de isovalores de Nspt: 12 metros de profundidade	71
Figura 46 - Carta de isovalores de Nspt: 13 metros de profundidade	72
Figura 47 - Carta de isovalores de Nspt: 14 metros de profundidade	73
Figura 48 - Carta de isovalores de Nspt: 15 metros de profundidade	74
Figura 49 - Carta de isovalores de Nspt: 16 metros de profundidade	75
Figura 50 - Carta de isovalores de Nspt: 17 metros de profundidade	76
Figura 51 - Carta de isovalores de Nspt: 18 metros de profundidade	77
Figura 52 - Carta de isovalores de Nspt: 19 metros de profundidade	78
Figura 53 - Carta de isovalores de Nspt: 20 metros de profundidade	79
Figura 54 - Carta de isovalores de Nspt: 21 metros de profundidade	80
Figura 55 - Carta de isovalores de Nspt: 22 metros de profundidade	81
Figura 56 - Resultado das interpolações dos Nspt em cada profundidade.....	84
Figura 57 - Carta de comprimento máximo de estaca hélice contínua	86
Figura 58 - Carta de comprimento máximo de estaca pré-moldada ($\Phi < 30$ cm)	87
Figura 59 - Carta de comprimento máximo de estaca pré-moldada ($\Phi > 30$ cm)	88
Figura 60 - Carta de comprimento máximo de estaca raiz	89
Figura 61 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN1.....	91
Figura 62 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN2.....	92
Figura 63 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN3.....	92
Figura 64 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN4.....	93
Figura 65 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN5.....	93
Figura 66 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN6.....	94
Figura 67 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN7.....	94
Figura 68 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN8.....	95
Figura 69 – Análises estatísticas PN1.....	96

Figura 70 - Análises estatísticas PN2	96
Figura 71 - Análises estatísticas PN3	97
Figura 72 - Análises estatísticas PN4	97
Figura 73 - Análises estatísticas PN5	98
Figura 74 - Análises estatísticas PN6	98
Figura 75 - Análises estatísticas PN7	99
Figura 76 - Análises estatísticas PN8	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estados de compactidade e consistência	12
Tabela 2 - Valores limites de N_{spt} para a parada das estacas	12
Tabela 3 - Valores atribuídos aos tipos de solos	25
Tabela 4 - Proporção do tipo de solo 1 a 6 metros	54
Tabela 5 - Proporção do tipo de solo 7 a 12 metros	54
Tabela 6 - Proporção do tipo de solo 13 a 18 metros	55
Tabela 7 - Proporção do tipo de solo 19 a 23 metros	55
Tabela 8 - Frequência de área para a profundidade do impenetrável	59
Tabela 9 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 1 a 6 metros	82
Tabela 10 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 7 a 12 metros	82
Tabela 11 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 13 a 18 metros	83
Tabela 12 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 19 a 22 metros	83
Tabela 13 - Frequência de área para os comprimentos máximos das estacas	90

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
GO	Goiás
H	Altura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
Mpa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
QGIS	QGIG
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIG's	Sistemas de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPT	<i>Standart Penetrations Test</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

N_{spt}	Índice de Resistência à Penetração
$\bar{N}$	N_{spt} médio
d_i	Distância euclidiana entre o i-ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado
n	Número de amostras
p	É o expoente utilizado.
z_p	É o atributo interpolado
z_i	Valor do atributo do i-ésimo ponto de amostragem
N	Número total de pontos de dados
Y_i	Valor observado
$\hat{Y}_i$	Valor previsto pelo modelo
$\bar{Y}$	Média dos valores observados

1 INTRODUÇÃO

A utilização de sondagens em obras de engenharia é essencial para o sucesso dos empreendimentos, considerando que, para a construção de edifícios, viadutos, pontes e até mesmo barragens, é necessária uma análise topográfica e geológica do local.

Nesse sentido, o conhecimento do comportamento e das condições do solo em subsuperfície torna-se crucial para a elaboração de projetos seguros e economicamente viáveis em obras civis. Essas informações não apenas auxiliam no planejamento urbano, mas também desempenham um papel fundamental no gerenciamento ambiental, no projeto de estruturas de contenção, na estabilidade de taludes e nas fundações, entre outros aspectos igualmente relevantes (FOLLE, 2002).

Para tanto, existem diversas metodologias para a investigação do subsolo, como trado, sondagens à percussão, sondagem mista, rotopercussão, entre outras, as quais permitem obter informações precisas sobre as características do solo, das rochas presentes no local e até mesmo o nível freático.

Entre essas variadas técnicas, destaca-se o SPT (*Standard Penetration Test*), que é o mais utilizado no Brasil. Isso se deve ao fato de que o SPT consiste na medição de um índice de resistência do solo à penetração de um amostrador padronizado, sendo amplamente aplicado em projetos de fundações de edificações, pontes, barragens e outras obras, devido ao seu caráter econômico, rápido e eficiente.

Segundo Dickran Berberian (2011),

“As chamadas sondagens de terreno estão hoje para a engenharia na mesma proporção que os exames clínicos preliminares apresentam-se para a medicina. Da mesma forma que um médico não opera o paciente sem examiná-lo, não deve haver obra sem sondagem.”

O ensaio SPT, devido à sua simplicidade e robustez, tem demonstrado ser altamente eficaz, estabelecendo-se não apenas como um método comum em seu país de origem, mas também no Brasil, para a obtenção dos parâmetros essenciais em projetos dessa natureza (BELICANTA, 1998).

No Brasil, o SPT, conhecido popularmente como sondagem à percussão, teve seu primeiro equipamento produzido em 1938 pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), baseado em especificações americanas. Desde então, a técnica tem sido amplamente utilizada no país, consolidando-se como uma das principais metodologias para a investigação do subsolo.

Nesse contexto de evolução das metodologias, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) surgem como uma inovação importante, permitindo a coleta, armazenamento, gerenciamento, análise e apresentação de dados espaciais e geográficos de forma mais eficiente. Portanto, com o advento dos SIG, a análise dos dados obtidos através das sondagens SPT foi significativamente aprimorada. Essas ferramentas facilitam a visualização clara e compreensível das informações, apoiando a tomada de decisões em diversos campos. Nesse cenário, o uso de ferramentas de geoprocessamento, como o QGIS (*Quantum Geographic Information System*), torna-se essencial para a visualização dos dados em formato de mapas, proporcionando uma análise detalhada e precisa do perfil geológico-geotécnico da região estudada.

Dessa forma, com o objetivo de evitar o subdimensionamento ou superdimensionamento das fundações, o presente estudo propõe a criação de um banco de dados geológico-geotécnico da cidade de Rio Verde. Esse banco de dados fornecerá informações sobre a resistência do solo, seu tipo e as estacas ideais para cada tipo de solo. Utilizando ferramentas SIG e interpolações estatísticas por meio de *softwares*, será possível obter uma visão preliminar da região estudada, o que, embora não elimine a necessidade de novas sondagens SPT no local, proporciona uma compreensão inicial do tipo de solo que poderá ser encontrado.

1.1 Justificativa

Na engenharia, os principais imprevistos possíveis de ocorrer em obras estão diretamente ou indiretamente ligados aos estudos realizados no solo. Isso ocorre porque manifestações patológicas na estrutura podem surgir devido a recalques diferenciais ou até mesmo à necessidade de troca do tipo de fundação durante a execução da obra.

Essa situação decorre do fato de que, para evitar custos adicionais ou por impossibilidade de realizar mais perfurações, realiza-se apenas o número mínimo de sondagens estipulado pela norma NBR 8036. Em razão disso, os resultados frequentemente extrapolam os pontos amostrados, resultando em um perfil geológico traçado com base na experiência do profissional em campo, e não em dados concretos provenientes de testes sistemáticos.

Além disso, diversos problemas na engenharia estão relacionados a fundações subdimensionadas ou superdimensionadas, que podem gerar recalques, manifestações patológicas nas estruturas e outros problemas. Por exemplo, em construções de estradas, um

dimensionamento inadequado pode levar ao deslizamento de taludes, trincas nos pavimentos e rompimentos das contenções, acarretando problemas para a população.

Nesse contexto, as sondagens são técnicas fundamentais para a obtenção de informações sobre o subsolo, permitindo a realização de projetos mais precisos e seguros. Conforme Belincanta (1998), os dados obtidos por meio de sondagens são essenciais para a tomada de decisões em relação ao projeto, viabilizando uma execução mais eficiente, precisa, segura e econômica, além de indicar o tipo de fundação mais adequado para o solo em questão.

Ademais, diversos *softwares* SIG realizam funções como coleta, armazenamento, análise e tratamento de dados georreferenciados. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) se consolidaram como uma técnica amplamente empregada, permitindo a visualização dos processos computacionais utilizados na elaboração de diversos mapas temáticos. As contínuas mudanças na paisagem e as distintas demandas de informações superficiais por parte de diversos usuários levam à utilização de sistemas computadorizados que otimizam a produção e atualização de mapas (HIGASHI, 2006).

Dessa forma, esses sistemas são empregados para mapear elementos da superfície terrestre e espacializar fenômenos de diversas naturezas. Com essa capacidade, o presente trabalho poderá proporcionar uma visão detalhada da região sudoeste goiana, especificamente de Rio Verde, permitindo uma análise mais abrangente das características geológicas e geotécnicas da área. Além disso, a utilização dessas ferramentas facilita a identificação de padrões espaciais e a previsão de comportamentos do solo, aspectos essenciais para a precisão e a eficiência dos projetos de engenharia. Esses recursos têm se tornado cada vez mais comuns em projetos de Engenharia Civil, facilitando a integração de dados provenientes de diferentes fontes e a elaboração de mapas e modelos do subsolo em 2D e 3D, o que contribui significativamente para a tomada de decisões informadas e para a otimização do planejamento e execução das obras.

1.2 Objetivos

Serão apresentados a seguir os objetivos geral e específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral estruturar um banco de dados geológico-geotécnico para a zona urbana de Rio Verde, Goiás, através da coleta e análise de dados de

sondagens SPT (Standard Penetration Test), fornecidos por terceiros. Este trabalho visa criar cartas geológicas e geotécnicas detalhadas e utilizar Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para modelar e visualizar as condições do subsolo.

1.2.2 Objetivo Específicos

Entre os objetivos específicos pode-se destacar:

- Coletar amostras de sondagem *SPT* na cidade de Rio verde GO;
- Analisar no *QGIS* os pontos coletados, sob a perspectiva geotécnica;
- Produzir mapas geotécnicos com o *software QGIS* e cartas de aptidão que possam auxiliar na elaboração de projetos de Engenharia;
- Desenvolver mapas de isovalores de N_{spt} a cada metro;
- Desenvolver mapas dos tipos solos a cada metro;
- Desenvolver mapas dos comprimentos máximos dos tipos de estacas usados;
- Desenvolver um mapa da superfície impenetrável a percussão;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sondagem de Simples Reconhecimento com *SPT*

Tanto os equipamentos quanto os procedimentos de escavação no ensaio *SPT* ainda não foram totalmente padronizados em nível internacional. As disparidades encontradas podem ser em parte explicadas pelo grau de desenvolvimento e investimento de cada país. Contudo, mais relevante são as adaptações das técnicas de escavação às diversas condições do subsolo (IRELAND, 1970).

2.1.1 História sobre o ensaio *SPT*

No Brasil, o método *SPT* foi introduzido na década de 1930, mais especificamente em 1938, quando o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) produziu o primeiro equipamento para sua realização. Posteriormente, em 1983, foi estabelecida a primeira normatização brasileira, a NBR 8036 – “Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios”, a qual especifica o número, a localização e a profundidade das sondagens a serem realizadas no terreno.

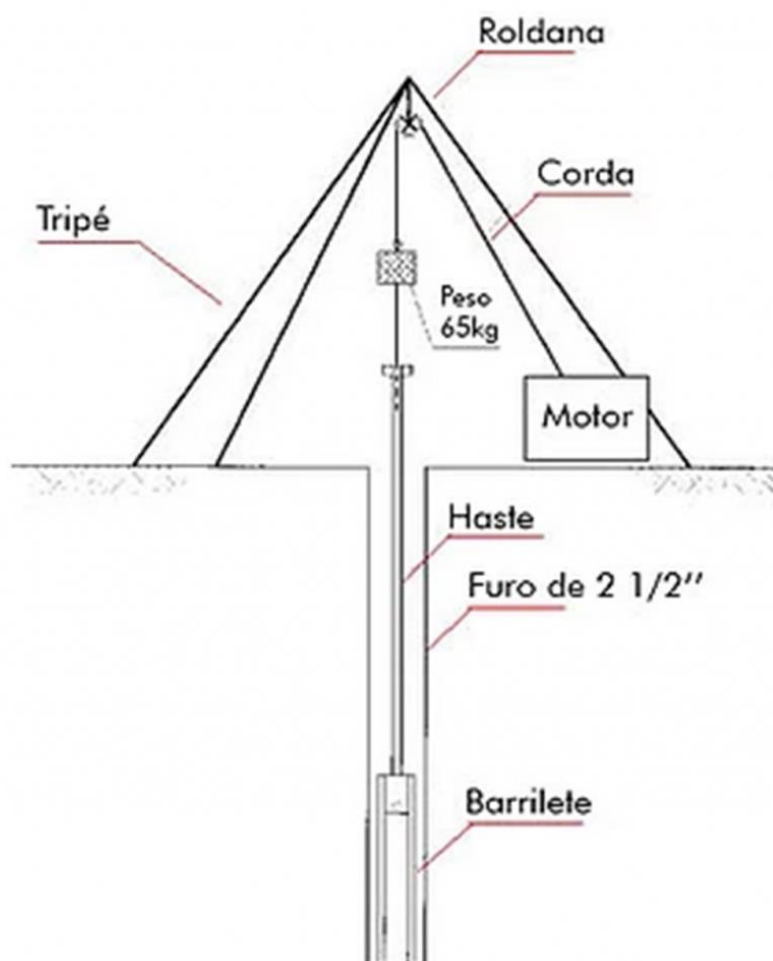
Ademais, a norma adotada atualmente no Brasil é a NBR 6484 – “Sondagens de Simples Reconhecimento com *SPT* – Método de Ensaio”, criada em 1997 e atualizada pela última vez em 2001. Este método, amplamente utilizado para a determinação dos tipos de solo, perfil geológico, consistência dos solos e capacidade de carga das camadas do subsolo, é conhecido como sondagem à percussão ou sondagem de simples reconhecimento com *SPT* (*Standard Penetration Test*), e é regulamentado pela ABNT na NBR 6484.

Além disso, conforme salientado por Quaresma *et al.* (1998), a simplicidade na execução e o baixo custo associado a esse método em relação aos outros métodos, são fatores determinantes para sua ampla utilização pelas empresas de geotecnia no Brasil, bem como em estudos acadêmicos. Este tipo de sondagem permite uma rápida classificação dos solos por meio de exame tátil-visual, a caracterização da compacidade/consistência dos materiais, a delineação do perfil estratigráfico, a determinação da profundidade do lençol freático durante a sondagem e a coleta de amostras para análises subsequentes. Em contraste, como observado por Belicanta (1985), antigamente esses testes eram realizados de maneira bastante rudimentar, e os estudos produzidos na época não eram tão satisfatórios.

2.1.2 Funcionamento do SPT

Com a escolha do terreno, é feito o levantamento do local e, com isso, é elaborada uma planta com a localização dos pontos onde será realizado o ensaio. Logo após a limpeza do terreno, inicia-se o procedimento de sondagem. Conforme Schnaider e Odebrecht (2014), os equipamentos que compõem o sistema de sondagem SPT são divididos em seis partes distintas, (Figura 1): (a) amostrador; (b) hastes; (c) martelo; (d) cabeça de bater; (e) sistema de perfuração; e (f) conjunto de perfuração.

Figura 1 - Esquema ilustrativo do aparelho de realização do SPT



Fonte: Escola engenharia, 2018

a) Amostrador

A Figura 2 ilustra um amostrador empregado na sondagem SPT, que é composto por três partes distintas: a cabeça, o corpo e a sapata.

Figura 2 - Amostrador bipartido e fechado



Fonte: SPT Equipamentos de Sondagem (2024)

A cabeça do amostrador possui uma válvula de esfera e um orifício de drenagem que permite a saída da água de dentro da haste o que faz com que a retenção da amostra de solo fique dentro do amostrador. Já o corpo do amostrador é formado por um tubo bipartido, na qual permite a inspeção tátil e visual das amostras. Quando é coletada a amostra, a mesma deve ser colocada em um recipiente hermético e enviada ao laboratório para a classificação de granulometria, cor, presença de matéria orgânica e origem, tal classificação deve ser efetuada por um geólogo ou engenheiro geotécnico.

b) Hastes

As Hastes são tubos mecânicos providos de roscas em suas extremidades, na qual permite a ligação entre elas por meio do uso de um elemento de conexão (luva ou nípel). De acordo com a NBR 6484/2001, as hastes devem possuir um diâmetro nominal interno igual a $24,3\text{mm} \pm 5\text{mm}$ e o seu peso ser de 32 N/m , que é aproximadamente a $3,25\text{ kg}$ por metro linear.

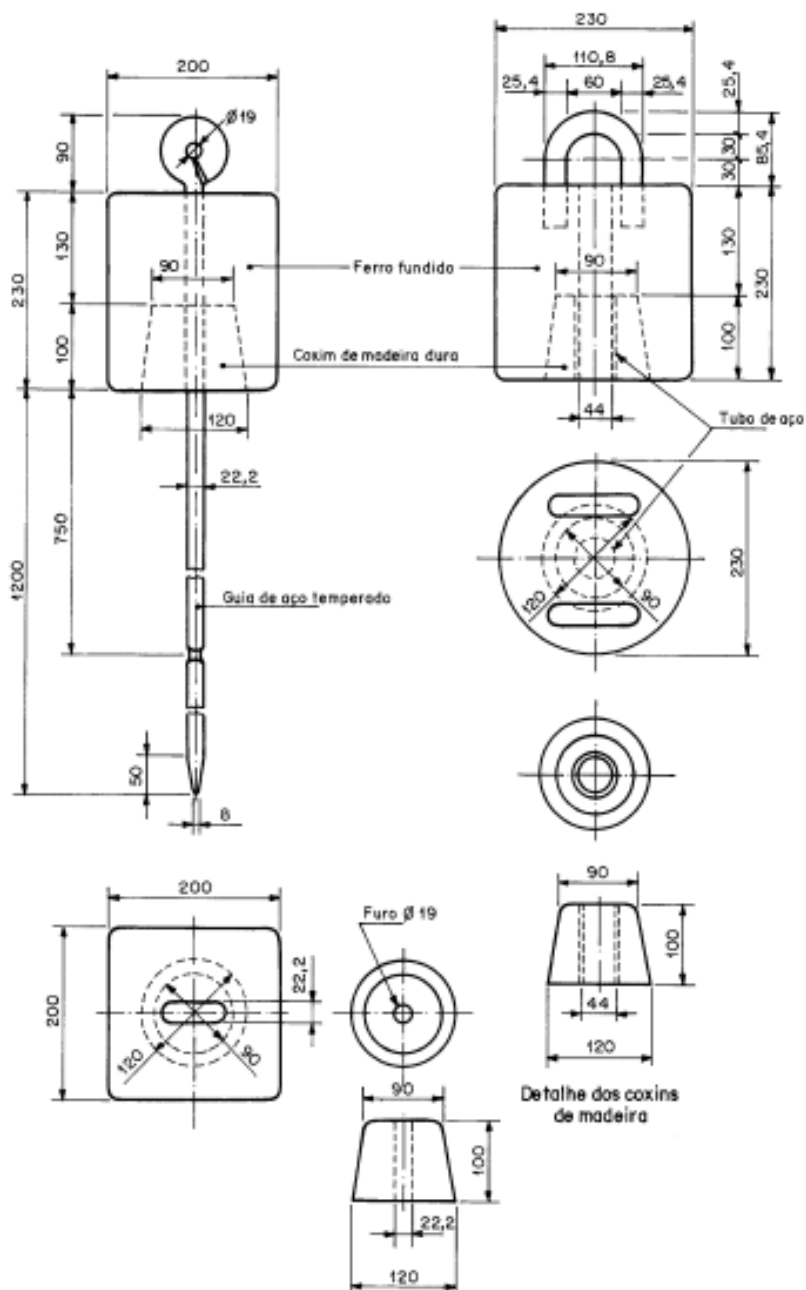
Deve se atentar com as hastes, pois estas empenadas podem transferir parte da energia fornecida pelo golpe do martelo para a parede da perfuração, fazendo com que exija um número maior de golpes para a cravação do amostrador.

c) Martelo

A Figura 3 apresenta o martelo, que deve ser confeccionado em aço e ter uma massa de 65 kg , conforme especificado pela NBR 6484/2001. Este componente é responsável por aplicar o golpe sobre a composição (cabeça de bater, haste e amostrador). O martelo é o elemento que possui a maior diversidade de configurações, tanto no âmbito nacional quanto internacional. A norma NBR 6484/2001 estabelece as dimensões e a geometria do martelo,

bem como a utilização de um coxim de madeira em sua parte inferior, que é o ponto de impacto sobre a cabeça de bater

Figura 3 - Dimensões em mm do martelo



Fonte: NBR 6484 (ABNT,2001)

d) Cabeça de bater

A cabeça de bater é um elemento cilíndrico de aço maciço que tem por finalidade promover a transferência da energia do golpe do martelo para a haste. De acordo com a norma NBR 6484/2001, a sua composição deve ser constituída por um tarugo de aço de (83 ± 5) mm de diâmetro, (90 ± 5) mm de altura e massa nominal entre 3,5kg e 4,5kg.

e) Sistema de perfuração

Os equipamentos normalmente usados para a abertura do furo de sondagem são os trados manuais, com destaque para aqueles de ripo helicoidal e tipo concha, além do trépano ou faca de lavagem. Conforme destaca Schnaid (2014), o procedimento de ensaio, tem-se três partes, (a) a execução do ensaio, (b) o procedimento de perfuração e (c) a forma de elevação e liberação do martelo.

2.1.3 Execução do ensaio SPT

Conforme Schnaider (2014), com o amostrador devidamente posicionado no fundo da perfuração, na profundidade de ensaio, coloca-se cuidadosamente o martelo sobre a cabeça de bater, que está conectada à composição da haste. Em seguida, mede-se a penetração da composição decorrente do peso próprio do martelo. Se esse valor for representativo, é registrado na folha de ensaio. Caso não ocorra penetração, marcam-se sobre a haste três segmentos de 15 cm e inicia-se a cravação, contando-se o número de golpes necessários para a cravação de cada segmento (por exemplo, 3 golpes para os primeiros 15 cm, 5 golpes para os 30 cm e 7 golpes para os 45 cm finais). O número de golpes N_{SPT} utilizado nos projetos de engenharia é a soma dos valores correspondentes aos últimos 30 cm de penetração do amostrador, no exemplo anterior o número do N_{SPT} seria 12, pois somam-se 5 + 7 golpes.

Diferenças significativas no número de golpes entre os primeiros e os últimos 30 cm podem indicar amolgamento do solo ou deficiência na limpeza do fundo do furo de sondagem. Limita-se o número de golpes para evitar danos às roscas e à linearidade das hastes.

a) Perfuração

Não existe um procedimento único de perfuração. Isso depende das condições do subsolo e do sistema de perfuração utilizado, possibilita que diversos equipamentos podem ser utilizados.

Independentemente do procedimento adotado, devem-se tomar cuidados especiais para evitar o amolgamento do solo na cota de ensaio e garantir a remoção do solo escavado no fundo da perfuração. Quanto ao diâmetro da perfuração, a NBR 6484/2001 recomenda 73 cm.

b) Elevação e liberação do martelo

A elevação do martelo pode ser realizada de forma manual ou mecanizada. No primeiro caso, o martelo é içado pelos operadores, auxiliados ou não pelo uso do sarilho. Nos sistemas mecanizados, por sua vez, o martelo é elevado por um guincho autopropelido.

2.1.4 Laudo N_{SPT}

Ao final do procedimento, é imprescindível preencher o boletim de medição, conforme ilustrado na Figura 4. Letras em vermelho foram adicionadas para facilitar a visualização e proporcionar uma explicação detalhada de cada seção.

Letra A: Esta seção apresenta duas lacunas, uma para os golpes necessários nos primeiros 30 cm e outra para os golpes nos últimos 30 cm, sendo que utilizamos os dados dos 30 cm finais, conforme mencionado anteriormente.

Letra B: Aqui estão as classificações do solo, indicando o tipo de solo e suas características específicas.

Letra C: Representa o nível de água na sondagem, que pode ou não estar presente, já que em alguns locais não há nível d'água no solo.

Letra D: Contém todas as observações relevantes, descritas de forma concisa.

Letra E: Indica a quantidade de ensaios SPT realizados na área.

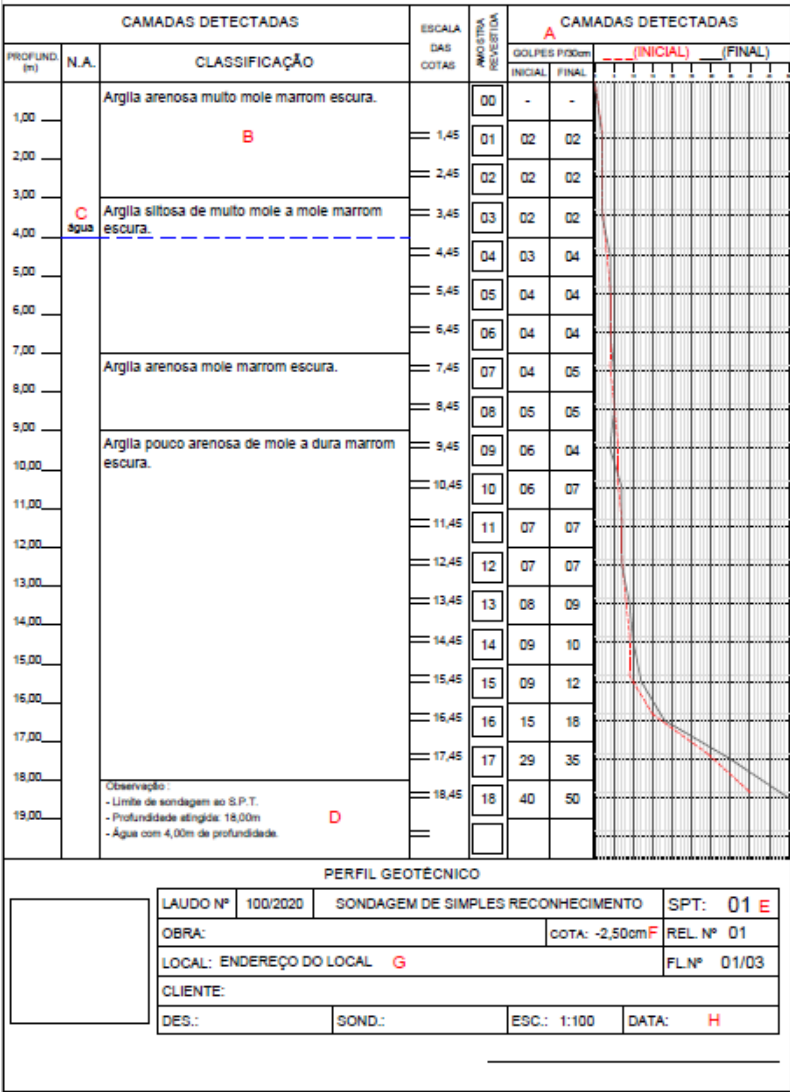
Letra F: Mostra a cota onde a sondagem foi realizada, permitindo identificar o ponto 0,0 na planta de locação.

Letra G: Identifica o local da obra.

Letra H: Registra a data em que a sondagem foi efetuada.

Além disso, na lateral direita do boletim, pode-se observar um gráfico que compara a linha inicial (em vermelho) e a linha final (em preto) do número de golpes necessários para alcançar 30 cm. Sem contar que sempre que é realizado o boletim na qual gera um relatório, o mesmo tem de apresentar uma planta de locação, que é essencial para saber onde aquele furo foi realizado.

Figura 4 - Boletim de Medição



Fonte: Autor próprio (2024)

2.1.5 Parâmetros e correlações

Ademais, os resultados do ensaio SPT são muito utilizados em correlações empíricas e semiempíricas, características de métodos diretos, para estimar parâmetros geotécnicos, como características dos solos e tensões admissíveis e capacidade de carga. Devido a utilização da sondagem a percussão, muitas correlações envolvendo o N_{SPT} podem ser encontrados em bibliografias e normas.

Alguns autores sugerem correlações a partir do N_{spt} , como Décourt e Quaresma (1978), Skempton (1986), Décourt (1989), Teixeira (1996), Teixeira e Godoy (1998) entre outros. Ademais, a NBR 6484/2001 em seu anexo, apresenta, uma tabela na qual relaciona o N_{SPT} à

compacidade dos solos grossos (areia e silte arenoso) e a consistência dos solos finos (argila e silte argiloso), conforme expõe a Tabela 1.

Tabela 1 - Estados de compacidade e consistência

Solo	índice de resistência à penetração N	Designação
Areia e siltes arenosos	≤ 4	Fofa (o)
	5 a 8	Pouco compacta (o)
	9 a 18	Medianamente compacta (o)
	19 a 40	Compacto (o)
	> 40	Muito compacto (o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

Fonte: Autor próprio (2024)

Com o objetivo de elaborar cartas de aptidão, conforme apresenta na Tabela 2, Cintra e Aoki (2010) recomendam que todo projeto geotécnico inclua a previsão da cota de parada das estacas, visando determinar o comprimento máximo adequado para as estacas.

Tabela 2 - Valores limites de Nspt para a parada das estacas

Tipos de estaca		Nlim
pré-moldada de concreto	$\varnothing < 30 \text{ cm}$	$15 < N_{spt} < 25$ $\Sigma N_{spt} = 80$
	$\varnothing \geq 30 \text{ cm}$	$25 < N_{spt} \leq 35$
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	$8 < N_{spt} \leq 25$
	em solos argilosos	$20 < N_{spt} \leq 40$
Estação e diafragma, com lama bentonítica		$30 < N_{spt} \leq 80$
Hélice continua		$20 < N_{spt} \leq 45$
Ômega		$20 < N_{spt} \leq 40$
Raiz		$N_{spt} \geq 60$ (penetra na rocha sã)

Fonte: Autor próprio (2024)

2.2 Sistemas de Informações Geográficas

Câmara define que "Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la" (CÂMARA, 1996). Nesse sentido, constata-se que o SIG é uma ferramenta poderosa para realizar análises inovadoras relacionadas ao meio físico. Assim, os resultados obtidos a partir de investigações geotécnicas, que servem como fontes importantes para modelagens nesse campo, apresentam-se como uma alternativa interessante, pois fornecem valiosos subsídios às análises de caracterização geológico-geotécnica (SANTOS, 2016).

Além disso, nas últimas décadas, diversos projetos voltados ao desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) foram iniciados em função dos avanços tecnológicos e computacionais. Atualmente, os chamados *softwares* livres têm se destacado nessa categoria de aplicativos, demonstrando potencialidades promissoras em variados campos de pesquisa e tarefas científicas no domínio das ciências ambientais (BRUNO, 2017).

Como exemplo desses *softwares*, pode-se citar alguns especializados, tanto independentes quanto integrados, como *OSSIM*, *Orfeo ToolBox*, *Opticks* e *GRASS GIS*. Entre as muitas alternativas livres disponíveis, destaca-se o *software QGIS (Quantum GIS)*, em razão de sua crescente utilização em todo o mundo e do vasto material de apoio disponível para os usuários.

2.2.1 QGIS

O QGIS é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto e gratuito, que oferece uma ampla gama de recursos para a captura, análise e visualização de dados geográficos. Sendo uma ferramenta poderosa e flexível, o QGIS é amplamente utilizado por profissionais de SIG, acadêmicos, pesquisadores e entusiastas de mapeamento em todo o mundo.

De acordo com Almeida (2011), o QGIS é um *software* SIG livre e gratuito, multiplataforma, que se destaca por sua interface gráfica simples e atraente. Desenvolvido em C++ e *Python* e baseado nas bibliotecas Qt, o QGIS é continuamente aprimorado por contribuições de voluntários e profissionais da área de geoprocessamento. Neste contexto, Almeida (2011) observa que "o QGIS recebe constantes contribuições de voluntários e profissionais da área de

geoprocessamento que buscam aprimorar o *software* identificando e divulgando suas falhas, produzindo tutoriais, traduzindo manuais, gerando novas ferramentas e melhorando as ferramentas já existentes."

Consequentemente, o QGIS apresenta melhorias significativas a cada atualização, consolidando-se como um *software* gratuito amplamente utilizado e intuitivo. Essa evolução constante e a facilidade de uso são fatores que fazem do QGIS uma ferramenta essencial e valorizada no campo do geoprocessamento.

Além disso, o QGIS é conhecido por sua interface amigável e intuitiva, que facilita o aprendizado e a utilização do *software*. O programa suporta uma variedade de formatos de dados geográficos, incluindo vetores (pontos, linhas e polígonos) e *rasters* (imagens e dados de grade). Assim, os usuários podem importar e exportar dados de diferentes formatos, como arquivos *shapefile*, *geodatabases*, arquivos *KML*, dados GPS, entre outros.

Uma das principais vantagens do QGIS é sua extensibilidade. O *software* permite a instalação de uma ampla variedade de plugins e complementos, o que possibilita adicionar funcionalidades adicionais conforme as necessidades específicas dos usuários. Esses plugins são úteis para realizar análises avançadas, criar mapas temáticos personalizados ou acessar serviços web de mapas.

Ademais, Almeida (2011) destaca que o QGIS é compatível com diversas bases de dados geográficas, como *PostGIS*, *Spatialite* e *SQL Anywhere*, além de suportar todos os formatos compatíveis com a biblioteca *GDAL* (*Geospatial Data Abstraction Library*).

O QGIS também oferece uma ampla gama de recursos para análise espacial. Entre essas ferramentas, encontram-se operações de consulta, como busca por atributos específicos em um conjunto de dados, e análises espaciais, como *buffer*, interseção e união. Portanto, os usuários podem realizar análises complexas para compreender a relação entre diferentes camadas de dados geográficos e obter insights valiosos sobre padrões espaciais.

Além disso, o *software* permite a criação de mapas temáticos avançados. Os usuários podem personalizar a simbologia, estilos e cores das camadas de dados para criar mapas visualmente atraentes e informativos. Também é possível gerar layouts de impressão profissionais, que facilitam a criação de mapas impressos ou digitais para apresentações e relatórios.

Ainda, o QGIS oferece suporte a recursos avançados, como análise de redes, modelagem de terreno, análise de relevo e análise hidrológica. Dessa forma, o QGIS torna-se uma escolha popular para uma variedade de aplicações, incluindo planejamento urbano, gestão ambiental, agricultura, geologia, transporte, entre outros campos.

Por fim, conforme Hoffmann (2018), os *softwares* livres representam uma alternativa poderosa para democratizar o acesso às ferramentas de tecnologia da informação, especialmente diante dos altos custos de licenças de *softwares* com funções semelhantes. Nesse sentido, a democratização no campo das geotecnologias tem sido facilitada principalmente pela tradução do QGIS para o português brasileiro, o que resultou em um aumento significativo no número de usuários e no empoderamento pela tecnologia de geoprocessamento livre, como também observado em outros *softwares* livres na área.

2.3 Interpolação

A interpolação, também conhecida como estimativa, é a técnica utilizada para prever os valores de uma variável dentro da área delimitada pelos pontos de amostragem. Essa técnica permite representar o comportamento da variável de maneira contínua, ajustando funções matemáticas. Essas funções podem ser locais, envolvendo os pontos mais próximos do ponto não amostrado, ou globais, abrangendo todos os pontos amostrais (SILVA, 2011; YAMAMOTO E LANDIM, 2013).

Além disso, conforme afirmado por Yamamoto e Landim (2013), a interpolação é frequentemente necessária devido às limitações econômicas que podem restringir o número de pontos de amostragem disponíveis. Nesse sentido, Morossino (2021) esclarece que a diferença fundamental entre os diversos métodos estimadores está na forma como os pontos e seus respectivos pesos são calculados e aplicados durante o processo de estimativa.

Dessa forma, interpolar é o processo de estimar valores desconhecidos a partir de pontos de dados conhecidos ou amostras. Essa técnica é amplamente utilizada em diversas áreas, como ciência, matemática, estatística e geoprocessamento, para preencher lacunas em conjuntos de dados ou gerar valores intermediários entre pontos de referência.

Para atender a essas necessidades, existem vários métodos de interpolação, como o *Raster Series Interpolation*, Ponderado Pelo Inverso da Distância (*IDW – Inverse Distance Weighting*), *Krigagem (Krige)*, *Spline Regularizada por Tensão (RST – Regularized Spline Tension)*, *Bilinear and bicubic from vector points* e *Triangulated Irregular Network (TIN)*. Cada um desses métodos possui características específicas e é escolhido com base nas necessidades e particularidades do conjunto de dados em questão.

2.3.1 Ponderado pelo inverso da distância

A técnica de interpolação conhecida como *Inverse Distance Weighting (IDW)*, ou ponderado pelo inverso da distância, realiza estimativas para pontos não amostrados com base nos valores observados em pontos próximos, na qual a distância é elevada a uma potência. Este método é amplamente utilizado entre os métodos de distância ponderada, sendo que a influência de um ponto amostrado diminui à medida que a distância até o nó da malha a ser estimado aumenta (LANDIM, 2000). Dessa forma, quanto mais próximo um ponto observado estiver do nó a ser determinado, maior será seu peso e, consequentemente, sua influência.

Além disso, Santos (2016) explica que o peso atribuído às variáveis amostradas pelo modelo é calculado dividindo-se o inverso das distâncias de cada variável em relação ao ponto de referência pelo somatório dos inversos das distâncias de todo o conjunto analisado, como apresenta a Equação (2.1). Ademais, é importante destacar que pode ser aplicada uma potência às distâncias, a fim de atribuir pesos diferentes na estimativa do valor. Isso implica que, quanto maior for essa potência, maior será a influência do vizinho mais próximo na estimativa.

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (2.1)$$

onde:

z_p é o atributo interpolado,

z_i valor do atributo do i -ésimo ponto de amostragem,

d_i distância euclidiana entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado,

p são o expoente utilizado.

n número de amostras.

2.4 Análises Estatísticas

Para avaliar a precisão das interpolações realizadas e validar a qualidade dos resultados obtidos, foram aplicadas diversas métricas estatísticas amplamente utilizadas na análise de modelos preditivos. Estas métricas ajudam a mensurar a diferença entre os valores observados e os previstos pelos modelos gerados com base nos dados de sondagens SPT.

Em primeiro lugar, o coeficiente de determinação R^2 mede a proporção da variância nos dados observados que pode ser explicada pelo modelo preditivo. Um valor de R^2 próximo de 1 indica que o modelo ajusta bem os dados, enquanto valores mais baixos indicam que o modelo

não captura a variação dos dados de forma adequada. Essa métrica é amplamente utilizada em análises de regressão para determinar a eficácia das previsões e é particularmente relevante em estudos como este, onde se busca avaliar a precisão da modelagem geotécnica (EnjoyAlgorithms, 2022; DataTechNotes, 2019).

Em complemento ao R^2 , o RMSE é outra métrica que oferece uma perspectiva sobre a precisão do modelo, especialmente porque penaliza erros maiores de forma mais intensa. O RMSE é útil para identificar grandes desvios nos dados e medir o impacto desses desvios na qualidade geral das previsões. Quanto menor o valor do RMSE, maior é a precisão do modelo em prever os resultados corretos. Essa métrica é amplamente usada em modelagens preditivas, como neste estudo geotécnico, onde grandes discrepâncias entre valores observados e previstos podem comprometer os resultados (DataTechNotes, 2019; Botchkarev, 2019). Está representado pela Equação 2.2.

Além disso, o MAE complementa a análise oferecendo uma métrica que não amplifica erros maiores, como o RMSE. O MAE mede a magnitude média dos erros de forma mais simples, sendo particularmente útil em situações onde se busca uma avaliação geral da precisão do modelo, sem focar excessivamente em grandes desvios. Sua simplicidade e robustez o tornam uma escolha apropriada para modelos preditivos aplicados a dados geotécnicos, como os analisados neste estudo (Botchkarev, 2019; DataTechNotes, 2019). Este é representado pela Equação 2.3.

De forma similar ao MAE, o MAPE proporciona uma visão percentual da magnitude dos erros, facilitando a comparação entre diferentes conjuntos de dados. O MAPE é especialmente relevante quando a variação percentual é mais significativa do que os valores absolutos, sendo amplamente utilizado em previsões de engenharia e economia. No contexto deste estudo, ele permite avaliar a precisão das previsões em termos relativos, o que é fundamental para a análise de dados de diferentes escalas geotécnicas (EnjoyAlgorithms, 2022). Sua apresentação está descrita na Equação 2.4.

Por fim, o índice de concordância “d”, proposto por Willmott, oferece uma maneira adicional de medir a proximidade entre os valores observados e previstos, fornecendo uma visão abrangente sobre a precisão dos modelos preditivos. Essa métrica é essencial para garantir que as previsões feitas pelo modelo estejam em linha com os dados observados, permitindo uma análise mais detalhada da qualidade das previsões em estudos de geotécnica, como este (Botchkarev, 2019). Apresenta na Equação 2.5.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (2.2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (2.3)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \quad (2.4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Y_i - \bar{Y}| + |\hat{Y}_i - \bar{Y}|)^2} \quad (2.5)$$

onde,

N = Número total de pontos de dados

Y_i = Valor observado

$\hat{Y}_i$ = Valor previsto pelo modelo

$\bar{Y}$ = Média dos valores observados

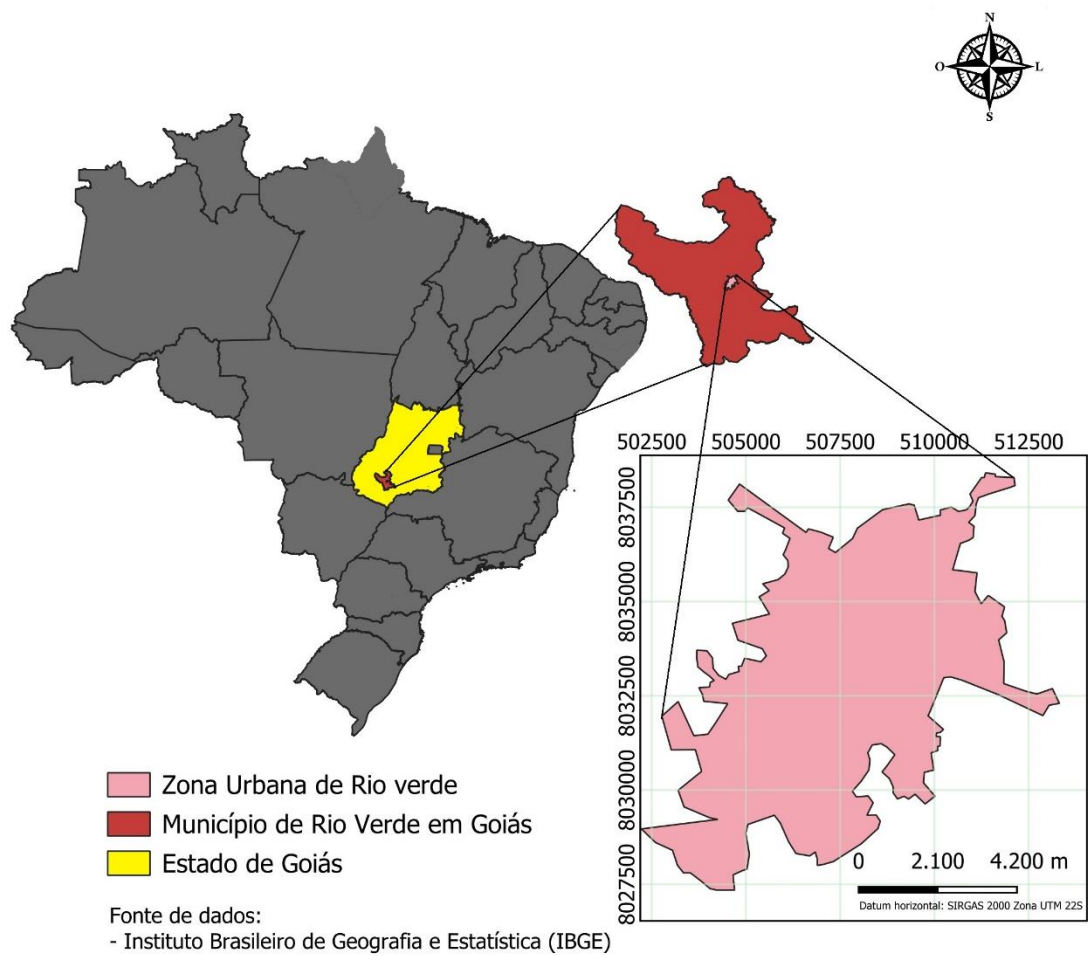
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Rio Verde está localizado na microrregião Sudoeste do Estado de Goiás, no Centro-Oeste brasileiro, uma região que se destaca por sua importância econômica e agrícola no contexto nacional. A cidade situa-se a 220 km de Goiânia, capital do Estado, e a 420 km de Brasília, capital do Brasil, o que favorece sua integração com os principais centros políticos e econômicos do país. Com uma área de 8.415,40 km², Rio Verde é um dos municípios mais extensos de Goiás, proporcionando vastos territórios para atividades agrícolas e pecuárias, conforme informações encontradas no site da Prefeitura Municipal de Rio Verde (2023).

Além disso, Rio Verde apresenta um clima tropical do tipo AW, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por duas estações climáticas bem definidas: uma seca e amena, que se estende de abril a setembro, e outra quente e chuvosa, predominante de outubro a março. Essas condições climáticas, aliadas ao solo fértil da região, tornam o município um dos maiores produtores de grãos do Brasil, com destaque para a soja, o milho e o algodão.

A Figura 5 ilustra a localização geográfica da área em estudo, situada nas coordenadas 17°47'07"S e 50°57'53"O, a uma altitude de 780 metros. Essa altitude, combinada com a localização geográfica estratégica, confere à cidade um microclima que favorece tanto a agricultura quanto a qualidade de vida de seus habitantes.

Figura 5 - Localização da área de estudo

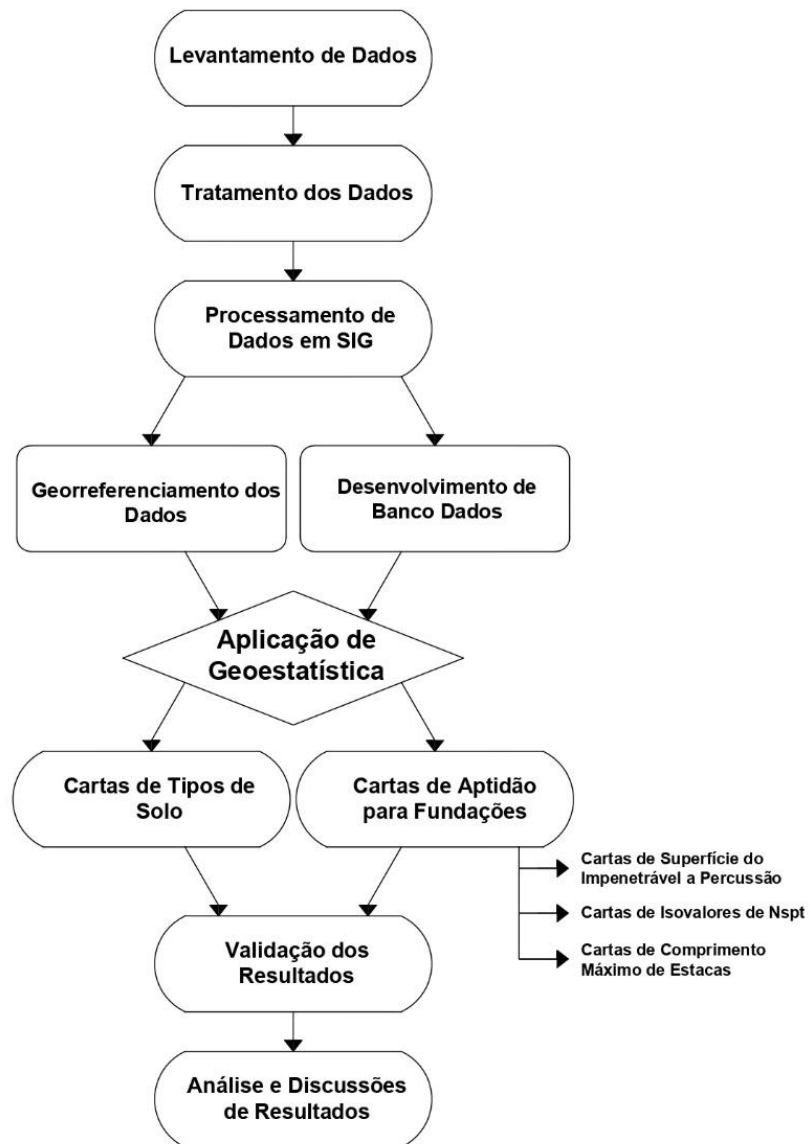


Fonte: Autor próprio (2024)

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a Figura 6, que ilustra os materiais e métodos utilizados para a análise do perfil geotécnico da cidade de Rio Verde, Goiás. A análise foi realizada com base em laudos de sondagens à percussão (SPT) e dados gráficos desenvolvidos em ambiente SIG. Assim, foi elaborado o fluxograma abaixo para detalhar o processo seguido.

Figura 6 - Fluxograma do método de trabalho



Fonte: Autor próprio (2024)

Para a realização deste trabalho, foram conduzidas pesquisas bibliográficas, documentais e simulações em softwares. Inicialmente, foi realizada uma coleta de dados na cidade de Rio Verde, abrangendo diversos pontos de sondagem à percussão (SPT). Com esses pontos, determinou-se suas coordenadas utilizando o *Google Earth*. Com as coordenadas em mãos, utilizou-se o *software QGIS* para gerar mapas que ilustram as variações de profundidade e os diferentes níveis de solo.

Além disso, para a elaboração desses mapas térmicos e a identificação dos tipos de solo, empregou-se o método de interpolação *IDW (Inverse Distance Weighted)*. Este método foi selecionado devido à sua maior compatibilidade com os objetivos do trabalho, em comparação com outras técnicas de interpolação.

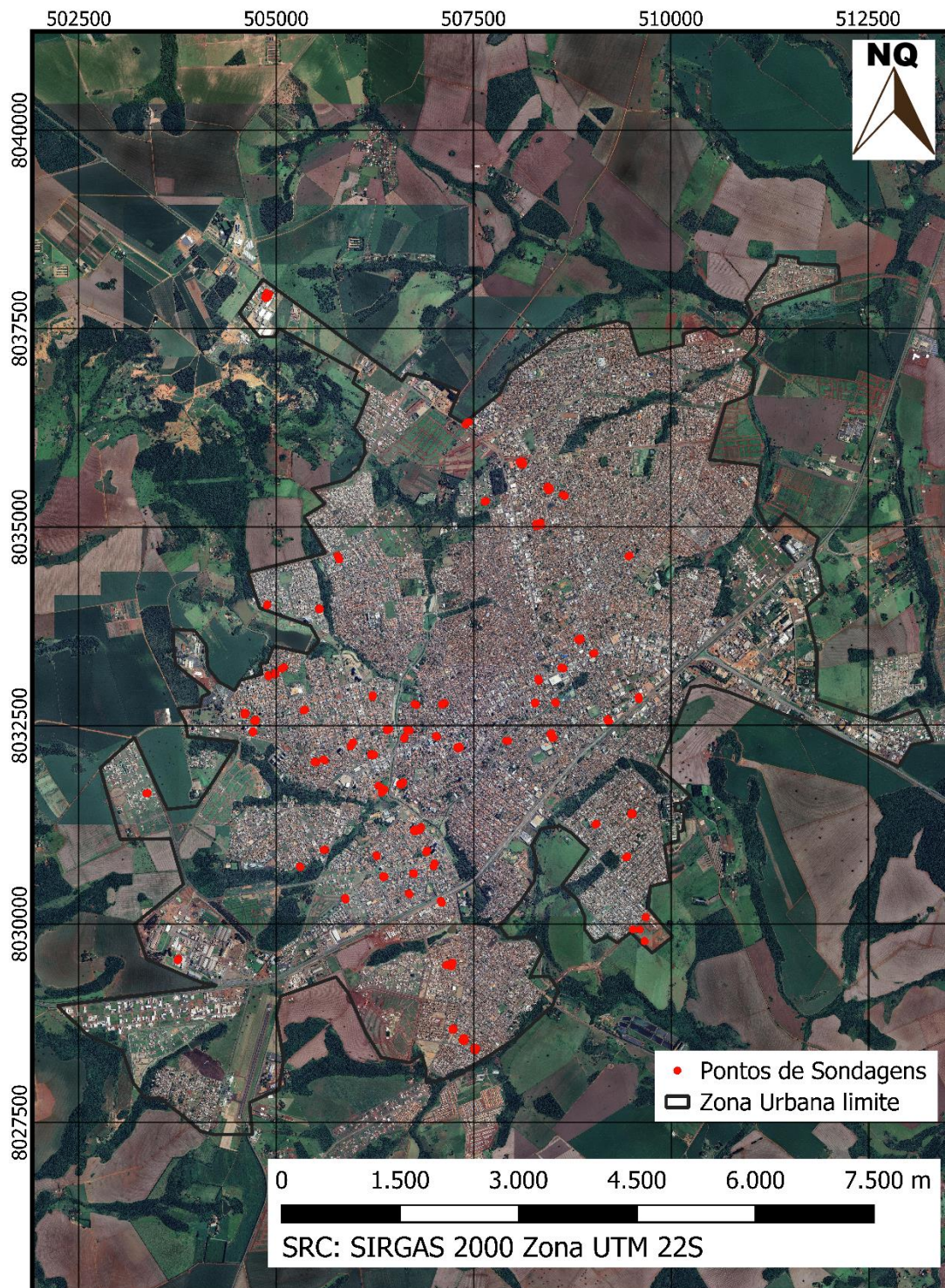
4.1 Aquisição e adequação de dados

Foi realizada a coleta de dados de sondagem à percussão (*SPT - Standard Penetration Test*) na cidade de Rio Verde - GO, conduzida por empresas privadas especializadas no município. É importante destacar que os testes de SPT não foram realizados especificamente para este estudo, mas foram realizados com o objetivo de análise para uma futura obra no local.

Dessa forma, foram obtidos 231 pontos de sondagem, conforme ilustrado na Figura 7, distribuídos pela zona urbana de Rio Verde - GO. A partir desses laudos coletados, foram adquiridas as seguintes informações:

- As coordenadas de cada ponto de sondagem;
- O índice de resistência à penetração do solo (N_{SPT}) de cada metro até chegar ao impenetrável;
- Nível d'água de cada furo;
- Dia, mês e ano de cada sondagem.

Figura 7 - Localização dos pontos de sondagem



Fonte: Autor próprio (2024)

É importante ressaltar que algumas das sondagens foram localizadas usando o *Google Earth*, uma vez que os laudos apenas continham o endereço e a localização, sem as coordenadas específicas. Após a obtenção de todos os pontos de sondagem, suas informações foram

transferidas para o *Excel*. Nesse processo, os dados foram organizados de forma agrupada e de fácil compreensão, com o objetivo de minimizar erros na sua transferência para o *software*.

Para a representação da área de estudo, foi necessário fazer o *download* do arquivo contendo as unidades da federação do Brasil e os distritos de Goiás em formato *shapefile*, disponível no site do IBGE. Por sua vez, a zona urbana de Rio Verde foi desenhada manualmente no *software QGIS*.

4.2 Processamento de dados em SIG

Com os dados tratados, iniciou-se o processo de transferir as informações para o ambiente SIG, utilizando o *software QGIS*. Nesta etapa, houve a consolidação e o georreferenciamento dos dados obtidos, a elaboração de mapas temáticos, e a criação de cartas do perfil geológico-geotécnico do município de Rio Verde - GO.

4.2.1 Georreferenciamento dos dados das sondagens

Foi necessário realizar o georreferenciamento dos dados das sondagens. Para isso, como mencionado anteriormente, utilizou-se o *Google Earth* para coletar as coordenadas geográficas (longitude e latitude). Com essas coordenadas em mãos, empregou-se o *software QGIS* para a análise.

Utilizou-se o aplicativo *QuickMapServices*, acessível através do QGIS, que forneceu diversos mapas do *Google* Satélite. Esses mapas foram então empregados no presente trabalho para assegurar uma visualização precisa da área de estudo. A compatibilização dos dados foi realizada por meio do Sistema de Referência de Coordenadas com o código EPSG:31982 (*SIRGAS 2000 / UTM zona 22S*). Após esse processo de georreferenciamento, geraram-se duas camadas vetoriais no QGIS: uma representando as delimitações da zona urbana de Rio Verde e outra contendo os pontos relativos às 231 sondagens realizadas.

4.2.2 Desenvolvimento do banco de dados geológico geotécnico

O banco de dados geológico-geotécnico foi alimentado por meio de planilhas eletrônicas, onde foram inseridas as informações coletadas nos laudos de sondagem, por meio

de *software Microsoft Excel*, dados estes, que foram convertidos em formato *KML* para *shapefile*.

Com isso, foram criadas 4 planilhas de dados, que correspondem a uma análise específica realizada:

- Superfície do impenetrável;
- Isovalores de N_{SPT} ;
- Tipos de solos;
- Comprimento máximo de estaca;

Após a criação das planilhas, elas foram integradas à tabela de atributos do *shapefile*. As informações nelas contidas foram associadas automaticamente por meio do identificador (ID) de cada furo de sondagem. Esse processo resultou na inserção precisa de cada ponto no espaço geográfico, utilizando a referência de coordenadas *SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S*.

Além disso, as informações presentes nas planilhas estão vinculadas às características de seus respectivos pontos. Assim, a tabela de atributos criada pelo *software QGIS* torna-se editável, permitindo a realização de alterações nos dados diretamente dentro do aplicativo.

4.2.3 Aplicação de geoestatística

Após a construção do banco de dados, foram realizadas análises geoestatísticas para a elaboração das cartas geológicas e geotécnicas da área de estudo. Para isso, utilizou-se a ferramenta de interpolação do QGIS, que permitiu a interpolação de todas as características adicionadas à tabela de atributos. No decorrer do processo, optou-se pelo método de Interpolação por Inverso Ponderado da Distância (*IDW*), uma vez que esse método demonstrou a melhor adequação para os pontos de sondagem no município de Rio Verde - GO.

4.2.3.1 Cartas de superfície do impenetrável à percussão

Conforme abordado na norma NBR 6484/2001, na qual estabelece critérios de paralisação de sondagem *SPT*, segundo a qual tem-se o impenetrável a percussão. Sendo assim, adotou-se um padrão, na qual os valores de $N_{SPT} = 50$ abaixo do impenetrável, puderam ser

incluídos no modelo matemático, independentemente da profundidade analisada nos mapas, o que não se ocasiona em distorções nos resultados das interpolações e o que evita a exclusão de dados.

Dessa forma, considerando a distribuição espacial dos furos onde possui dados do impenetrável, e com os 231 pontos de sondagem colocados em uma planilha, procedeu-se à interpolação dos valores de profundidades obtidas.

4.2.3.2 Cartas de tipo de solo

Com o objetivo de conhecer a classificação granulométrica do solo na zona urbana de Rio Verde, foi elaborado um banco de dados geológico-geotécnico. Esse banco de dados foi estruturado para inserir informações a cada metro de profundidade até atingir a camada impenetrável. De acordo com a Tabela 3, para a inserção dessas informações no software QGIS, que reconhece apenas números, cada tipo de solo foi atribuído a um número específico.

Tabela 3 - Valores atribuídos aos tipos de solos

Tipo de Solo	Número identificador
Argila Arenosa	0
Argila Siltosa	1
Argila	2
Silte Arenoso	3
Silte Argiloso	4
Silte	5
Areia Siltosa	6
Areia Argilosa	7
Areia	8
Impenetrável	9

Fonte: Autor próprio (2024)

Após o preenchimento e análise da planilha com os valores atribuídos, procedeu-se à interpolação dos dados para todos os metros, até que todos os pontos de sondagem atingissem o impenetrável. Dessa forma, foi possível gerar uma representação contínua das características do solo.

Além disso, por meio das cartas resultantes da análise dos solos em cada furo de sondagem, é possível obter um conhecimento detalhado do solo na zona urbana de Rio Verde

– GO. Com essa informação, é viável antecipar as condições do solo e prever o que poderá ser encontrado em futuras sondagens a serem realizadas. Assim, o trabalho realizado não só contribui para o entendimento atual da geologia local, como também fornece uma base sólida para futuras investigações e planejamentos.

4.2.3.3 Cartas de isovalores de N_{spt}

As cartas de isovalores de N_{spt} foram elaboradas com o auxílio de um banco de dados integrado ao *software QGIS*. Nessas cartas geológica-geotécnicas, foram destacados os valores do número de golpes até a profundidade de 22 metros, sendo o vigésimo segundo metro o impenetrável. Esse procedimento permitiu visualizar as variações em cada metro do perímetro urbano de Rio Verde.

Para facilitar a interpretação, as cartas de isovalores de N_{spt} foram agrupadas com intervalos de 5 golpes até alcançar 50 golpes, que correspondem ao impenetrável. Cada grupo de valores foi representado com cores diferentes, possibilitando uma distinção clara a cada 5 metros. Desse modo, foram preparadas cartas geográficas para cada metro de profundidade, desde 1 metro até a profundidade de 23 metros.

4.2.3.4 Cartas de comprimento máximo de estacas

As cartas de comprimento máximo de estacas foram produzidas utilizando as recomendações de Cintra e Aoki (2010), apresentadas na Tabela 2, as quais relacionam o critério de parada com o N_{spt} de diferentes tipos de estacas.

Para o presente estudo, foram escolhidos os quatro 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 $15 < N_{spt} \leq 25$.
- Pré-moldada com diâmetro maior que 30 cm: parada entre o intervalo de $25 < N_{spt} \leq 35$.
- Raiz: parada quando $N_{spt} \geq 60$ (penetra na rocha sã)

Para as três primeiras, as interpolações consideram as profundidades onde o limite superior está localizado. Entretanto, para a estaca raiz, considera-se, em cada ponto, as profundidades em que atingem o impenetrável à percussão. Dessa forma, as cartas resultantes dessas análises que foram feitas, possibilitam a verificação de regiões que tendem a apresentar estacas mais curtas para cada um dos tipos de estacas analisados.

4.3 Validação dos Resultados

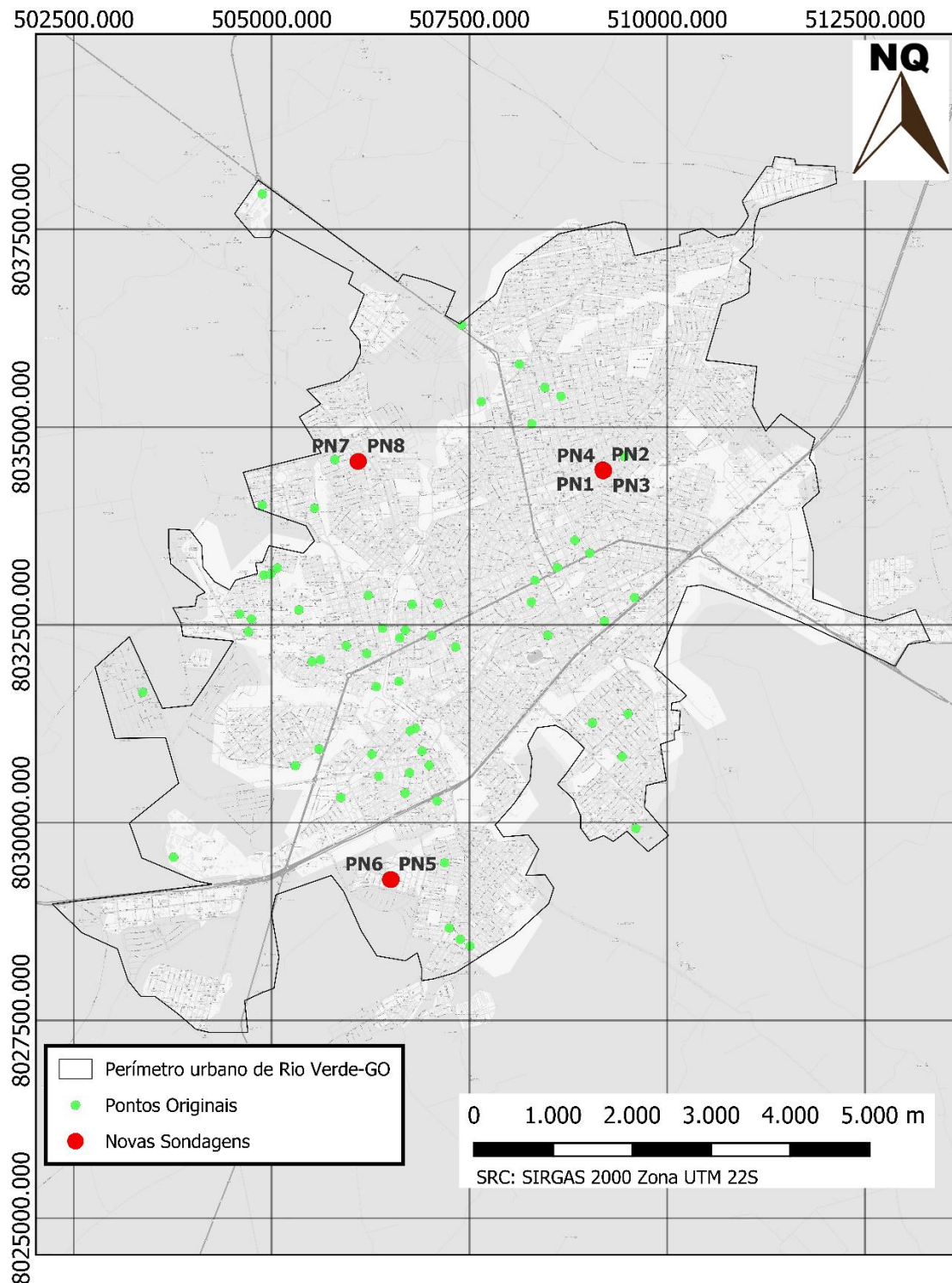
A etapa de validação das estimativas obtidas foi realizada por meio da análise de outras sondagens SPT realizadas a zona urbana de Rio Verde. Essas sondagens foram fornecidas pela empresa Mastersolo Engenharia, localizada em Goiânia. Foram obtidos 8 relatórios que apresentavam pontos distintos dos utilizados no presente trabalho. A Figura 8 ilustra a comparação entre os dados estimados e os dados obtidos através dessas sondagens adicionais, permitindo avaliar a precisão das estimativas realizadas.

Ademais, para validar os resultados das interpolações realizadas neste estudo, foram utilizadas diversas análises estatísticas, tais como o coeficiente de determinação R^2 , o erro absoluto médio (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro percentual absoluto médio (MAPE), e o índice de concordância (d). Essas métricas permitiram uma avaliação abrangente da precisão dos modelos preditivos aplicados.

Além disso, para facilitar a interpretação visual dos resultados, foram gerados oito gráficos que apresentam todas essas análises estimativas. Cada gráfico foi elaborado com base nos dados das sondagens SPT, mostrando comparações entre os valores observados e previstos. Esses gráficos fornecem uma representação clara e objetiva das previsões, destacando o desempenho do modelo em diferentes profundidades e locais no município de Rio Verde.

Os gráficos também permitem identificar possíveis divergências entre os dados observados e os valores interpolados, o que ajuda a refinar as previsões futuras e a ajustar os modelos conforme necessário. Dessa forma, as análises estatísticas, combinadas com a visualização gráfica, fornecem uma base sólida para a validação das interpolações e para garantir a confiabilidade dos resultados apresentados.

Figura 8 - Localização dos pontos encontrados a partir dos laudos disponibilizados



Fonte: Autor próprio (2024)

Com base nas informações dos novos pontos de sondagem, foi possível validar a carta de isovalores de N_{SPT} . Para isso, foram gerados gráficos que compararam os valores novos com aqueles previamente interpolados para os mesmos pontos.

5 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Neste trabalho, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao aplicar a ferramenta SIG para analisar o perfil geológico-geotécnico e, assim, desenvolver cartas de aptidão para fundações na zona urbana de Rio Verde, GO. Para isso, foram utilizadas informações fornecidas por laudos de sondagem SPT.

5.1 Análise do Perfil Geológico

A análise do perfil geológico da zona urbana de Rio Verde, GO, foi realizada com base nos boletins de sondagem fornecidos. Dessa forma, foi desenvolvido um banco de dados em ambiente SIG, o qual possibilitou a elaboração de cartas que detalham os tipos de solo a cada metro de profundidade. Essas cartas serão apresentadas na seção seguinte.

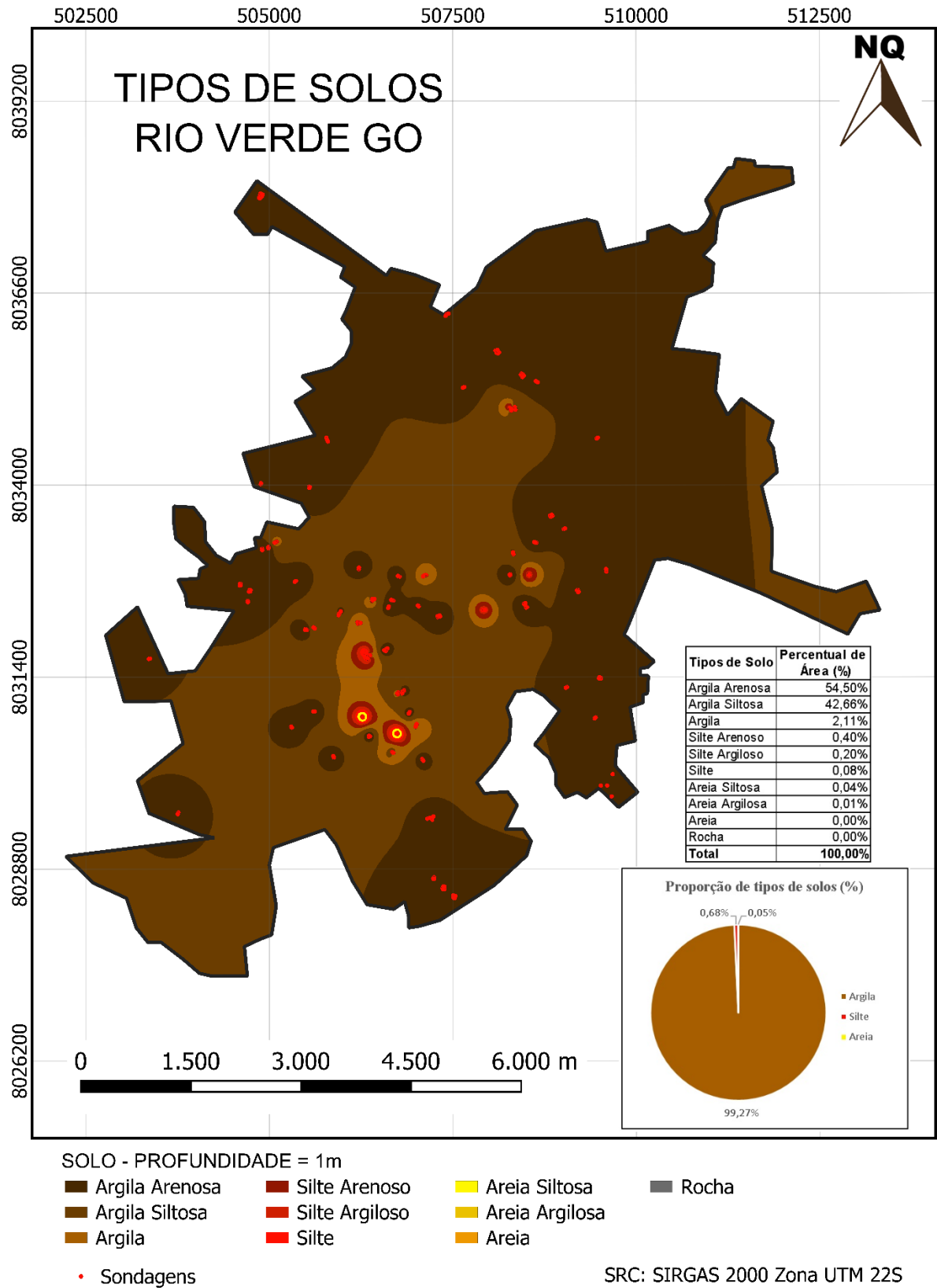
5.1.1 Cartas de aptidão de tipo de solo

As cartas de tipos de solo foram desenvolvidas utilizando o método de interpolação IDW, com base nos dados de 231 pontos de sondagem. O processo iniciou-se a 1 metro de profundidade e estendeu-se até 23 metros, sendo esta a profundidade em que, conforme os laudos de sondagem, se atinge o impenetrável em todos os pontos.

Para complementar as informações de cada carta, foram incluídos gráficos que exibem as porcentagens das áreas correspondentes a cada tipo de solo para a profundidade em questão. Estes gráficos são acompanhados por uma tabela que indica os percentuais de cada tipo de solo em cada metro de profundidade.

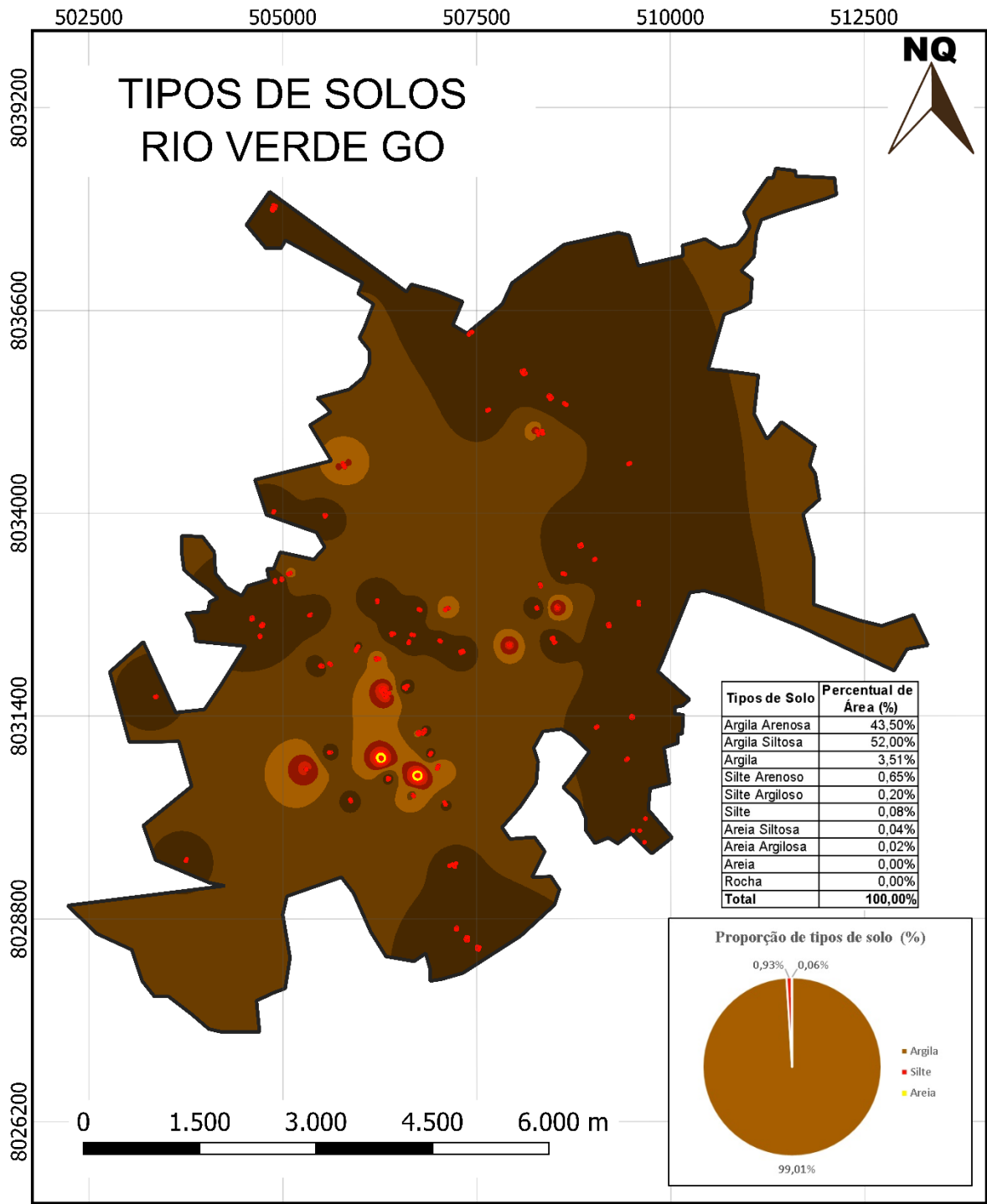
Ao final da seção, a Figura 32 apresenta todas as cartas geradas, com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados e permitir a visualização simultânea dos tipos de solo em todos os metros de profundidade. Além disso, a Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 foram criadas para mostrar as frequências das áreas de cada tipo de solo para as profundidades observadas.

Figura 9 - Carta de tipos de solo: 1 metro de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 10 - Carta de tipos de solo: 2 metros de profundidade



SOLO - PROFUNDIDADE = 2m

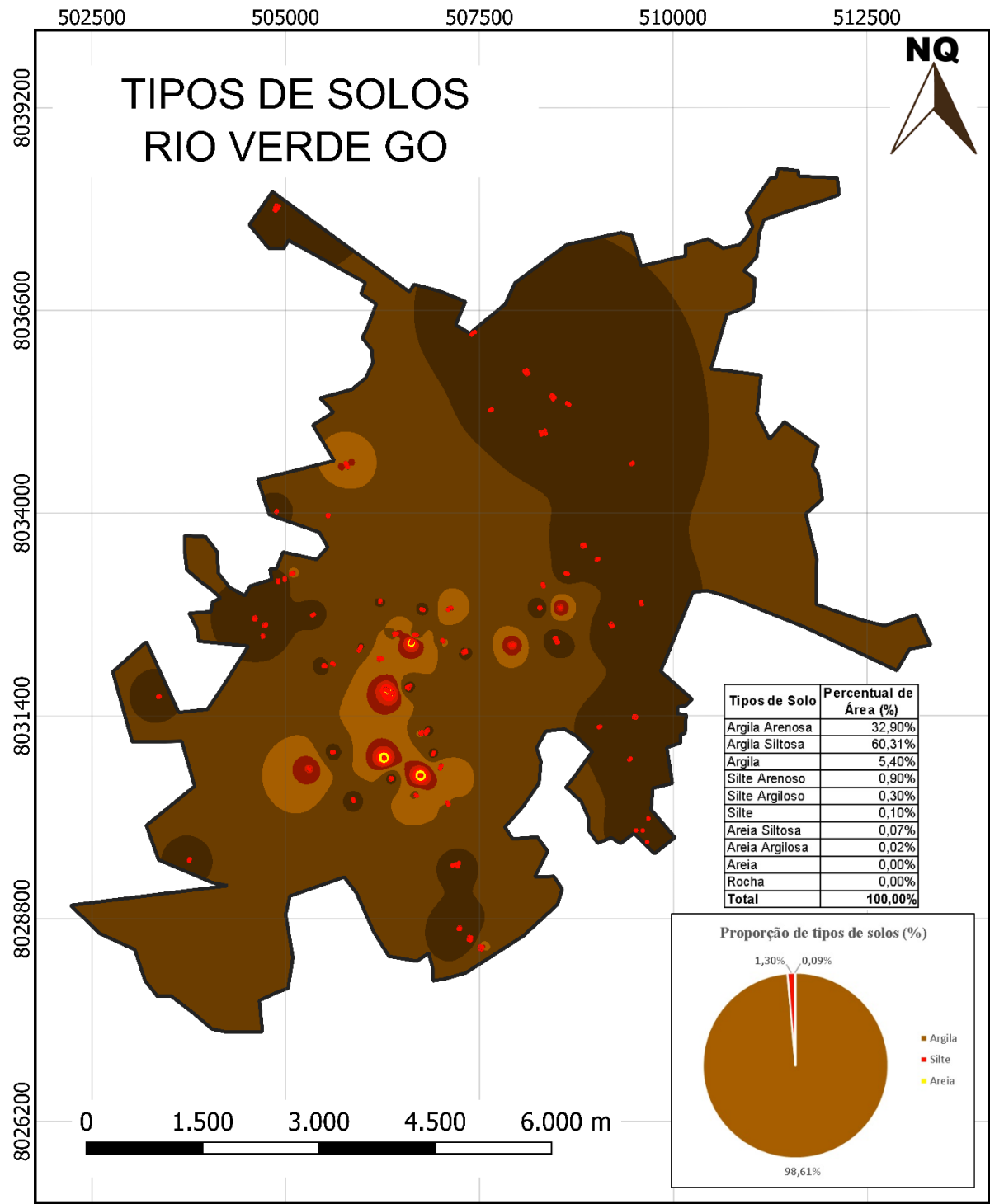
Argila Arenosa	Silte Arenoso	Areia Siltosa	Rocha
Argila Siltosa	Silte Argiloso	Areia Argilosa	
Argila	Silte	Areia	

• Sondagens

SRC: SIRGAS 2000 Zona UTM 22S

Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 11 - Carta de tipos de solo: 3 metros de profundidade



SOLO - PROFUNDIDADE = 3m

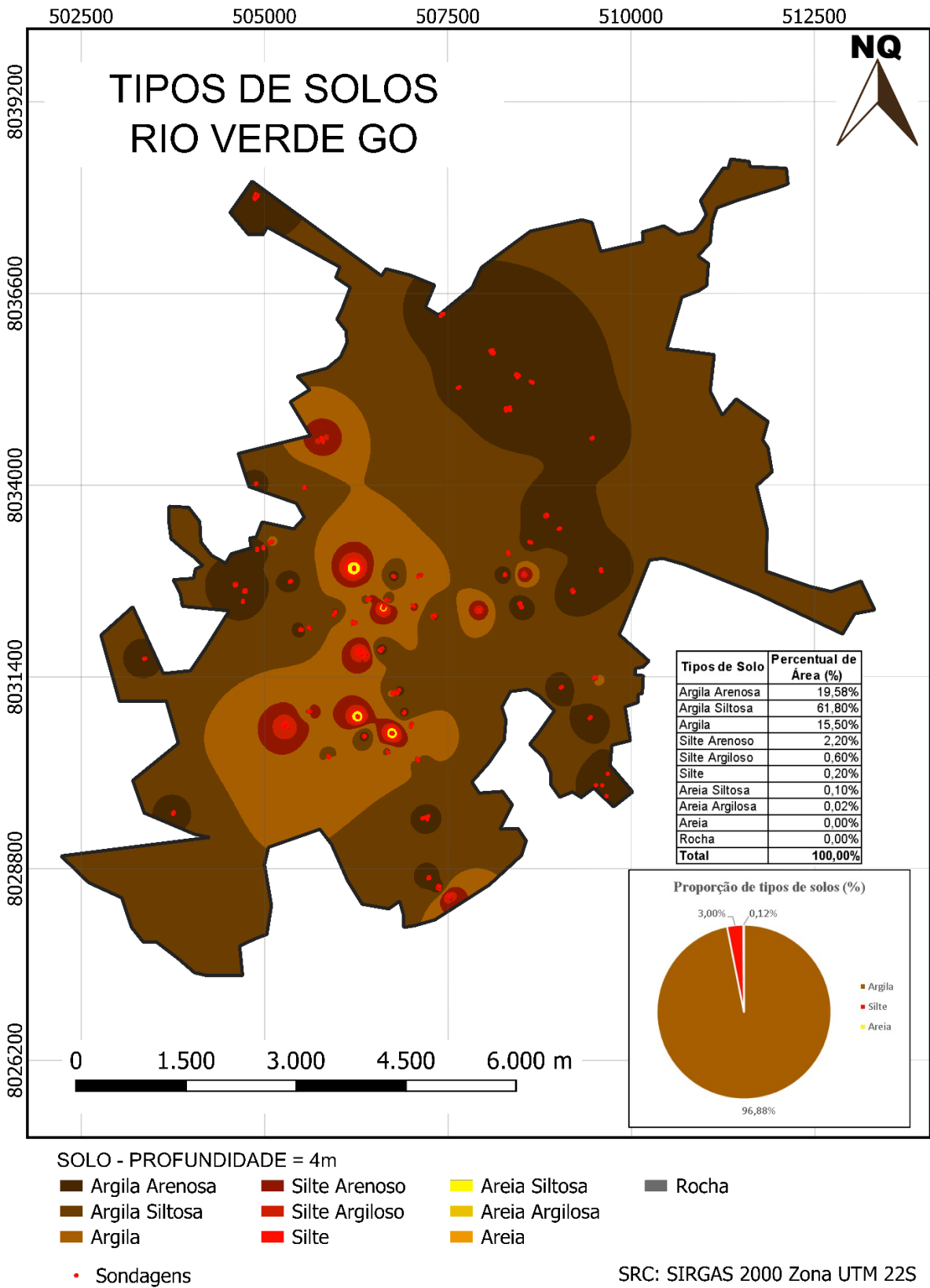
■ Argila Arenosa	■ Silte Arenoso	■ Areia Siltosa	■ Rocha
■ Argila Siltosa	■ Silte Argiloso	■ Areia Argilosa	
■ Argila	■ Silte	■ Areia	

• Sondagens

SRC: SIRGAS 2000 Zona UTM 22S

Fonte: Autor próprio (2024)

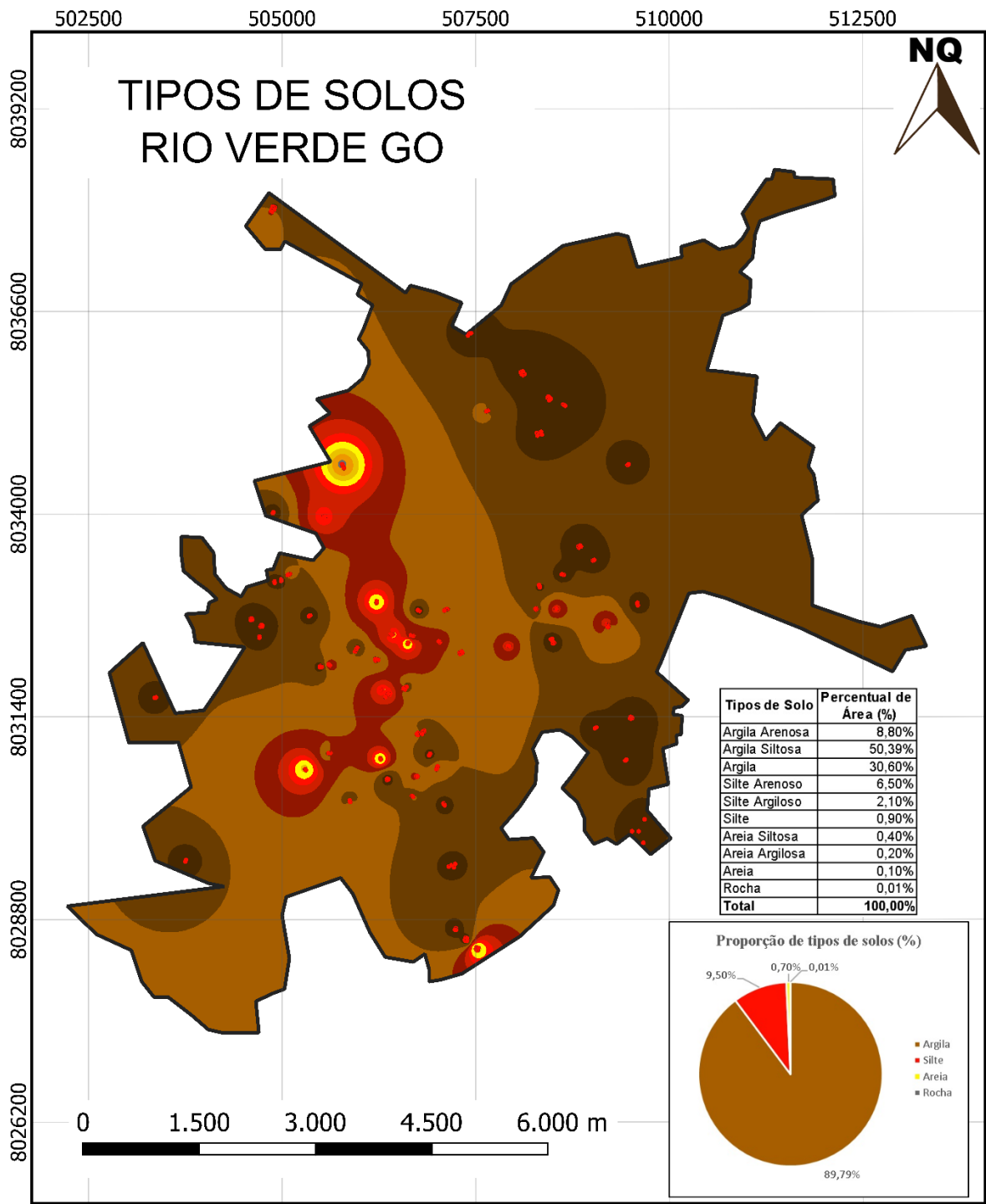
Figura 12 - Carta de tipos de solo: 4 metros de profundidade



Nos primeiros metros, como ilustrado na Figura 9, Figura 10, Figura 11 e Figura 12, observa-se que o solo predominante é a argila, variando de marrom escuro a marrom claro, desde o 1º até o 4º metro. No entanto, o silte começa a se intensificar e a aparecer em alguns pontos com sua coloração avermelhada. Apesar disso, em comparação com a argila, o silte ainda é bastante limitado.

Conforme ilustrado na Figura 13, a partir do 5º metro, o solo siltoso começa a se destacar de forma mais significativa, e os primeiros sinais de solo arenoso também se tornam evidentes. Com base nesses dados, até o 5º metro, foi possível identificar que 89,79% dos solos ainda apresentavam características argilosas, seguidos por 9,5% de solos siltosos e 0,70% de solos arenosos, com um início de 0,1% de solos que alcançaram a camada impenetrável. Observa-se que, a partir do 5º metro, o solo começa a se espalhar do Noroeste ao Sudoeste, abrangendo áreas como o bairro Residencial Canaã, o Setor Morada do Sol, uma parte do centro e chegando ao Parque Laranjeiras.

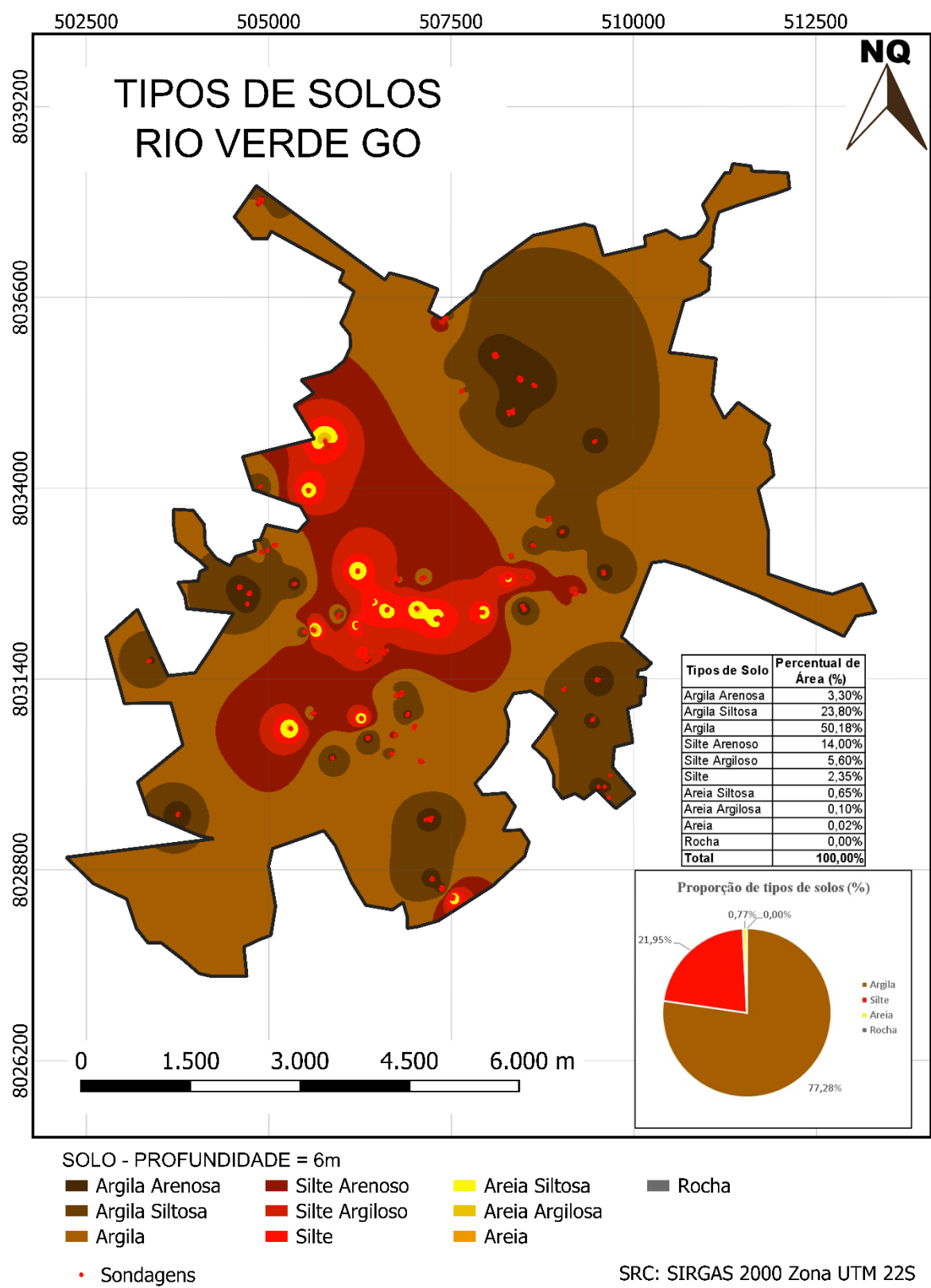
Figura 13 - Carta de tipos de solo: 5 metros de profundidade



SRC: SIRGAS 2000 Zona UTM 22S

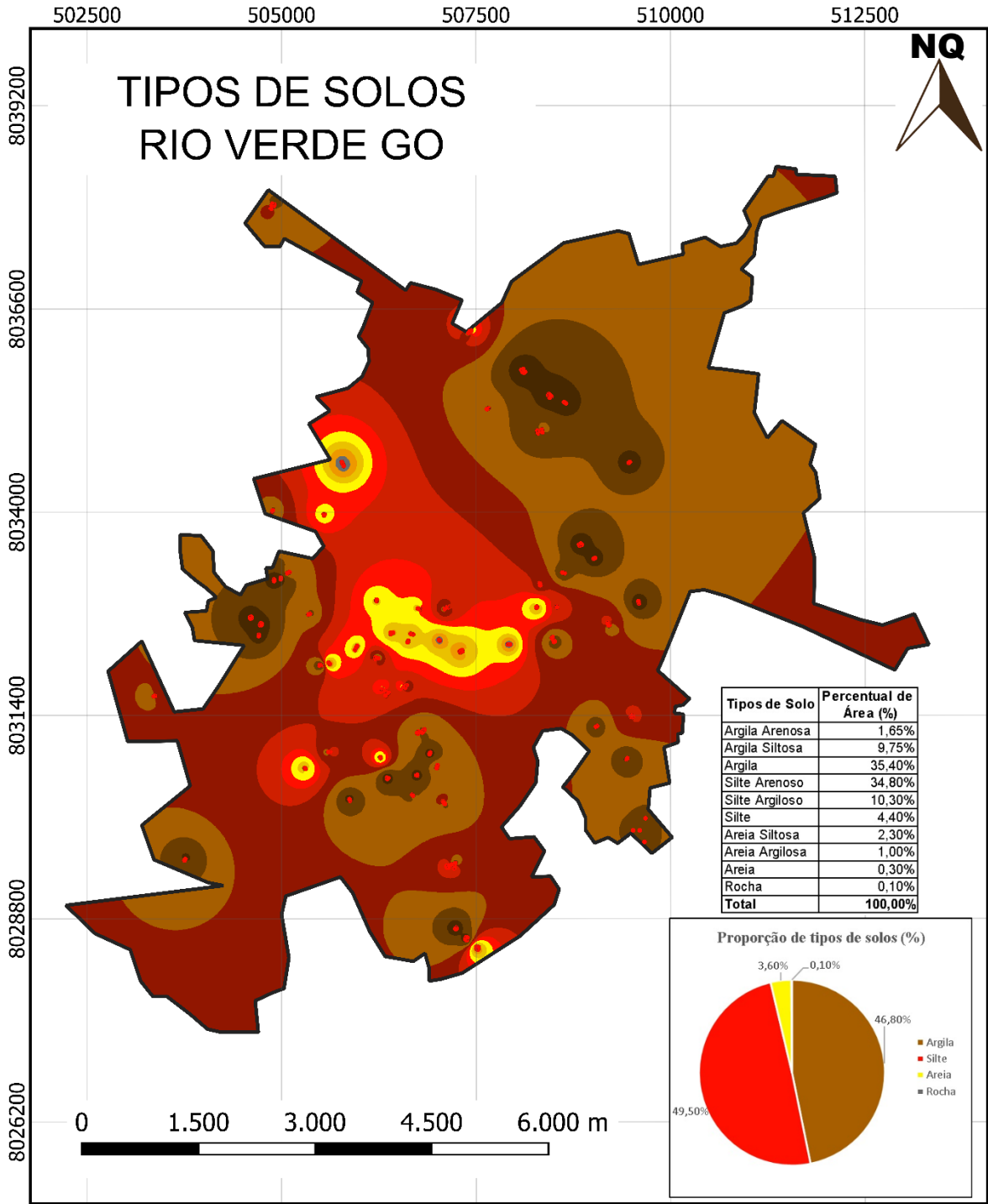
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 14 - Carta de tipos de solo: 6 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 15 - Carta de tipos de solo: 7 metros de profundidade



SOLO - PROFUNDIDADE = 7m

- Argila Arenosa

Argila Siltosa

Argila

Sondagens
- Silte Arenoso

Silte Argiloso

Silte
- Areia Siltosa

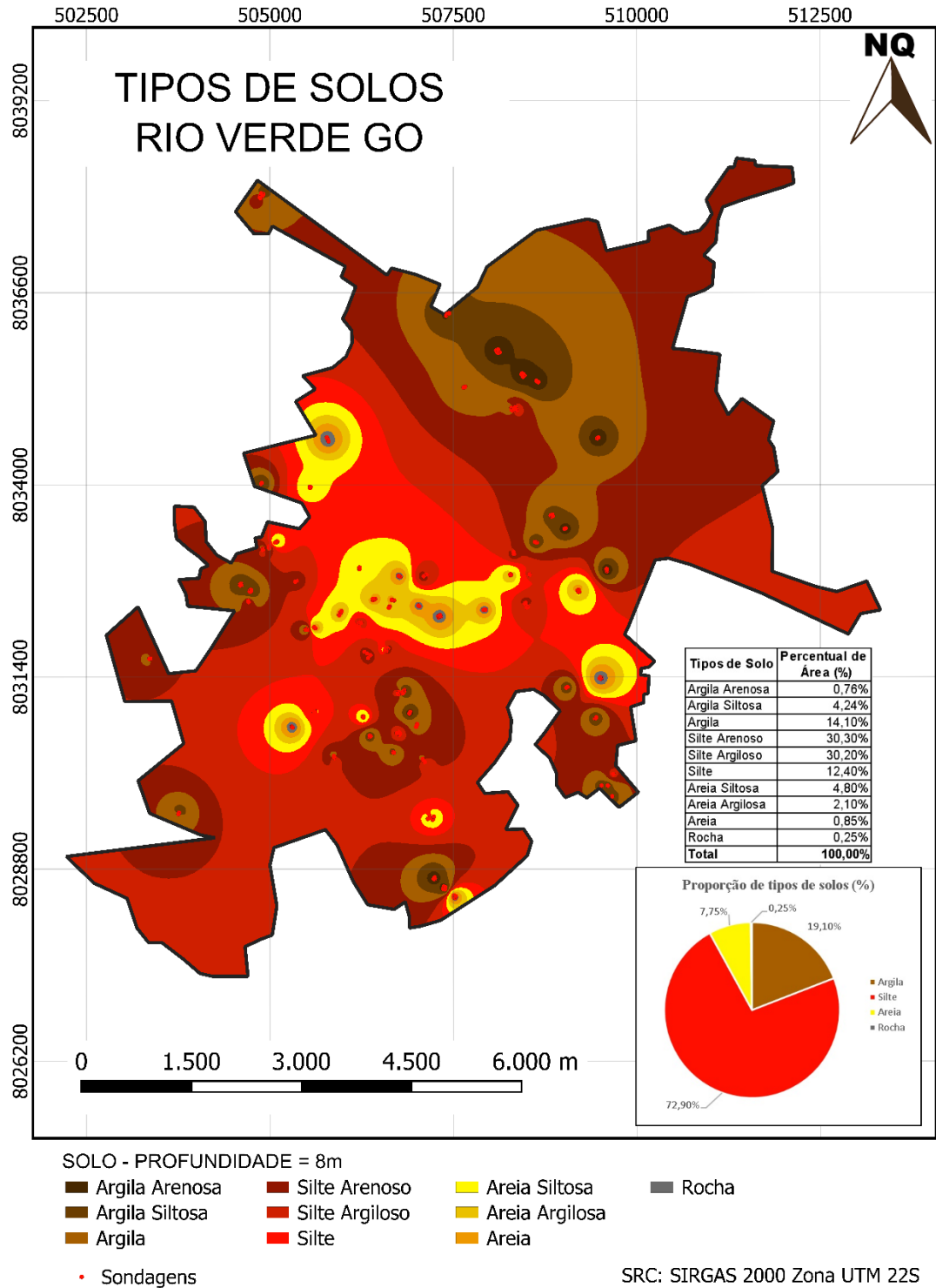
Areia Argilosa

Areia
- Rocha

SRC: SIRGAS 2000 Zona UTM 22S

Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 16 - Carta de tipos de solo: 8 metros de profundidade

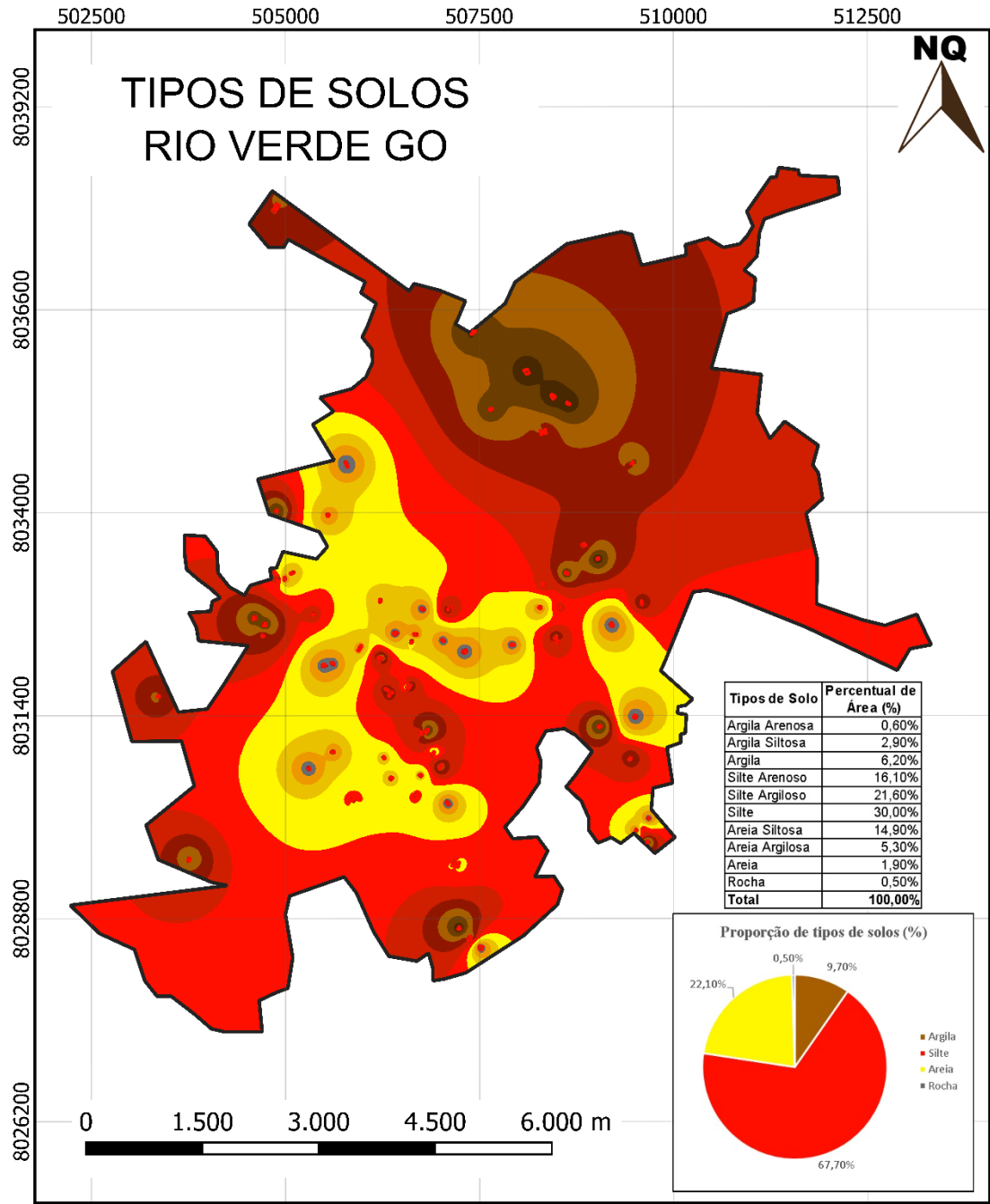


Fonte: Autor próprio (2024)

Na Figura 14 e na Figura 15, que representam respectivamente o sexto e o sétimo metro de profundidade, observa-se uma mudança na predominância dos tipos de solo. Nesses metros, o solo siltoso torna-se o predominante, com 49,5%, enquanto o solo arenoso começa a ganhar espaço. Além disso, ao analisar a Figura 16, que ilustra a profundidade de 8 metros, essa

diferença se acentua significativamente. O solo siltoso chega a constituir 72,90% da área, e a faixa central do município de Rio Verde apresenta áreas de solo arenoso. Por outro lado, a faixa de argila continua predominante na parte norte do município, abrangendo regiões como o Residencial Veneza, o Residencial Arco Íris e o Setor Pauzanes.

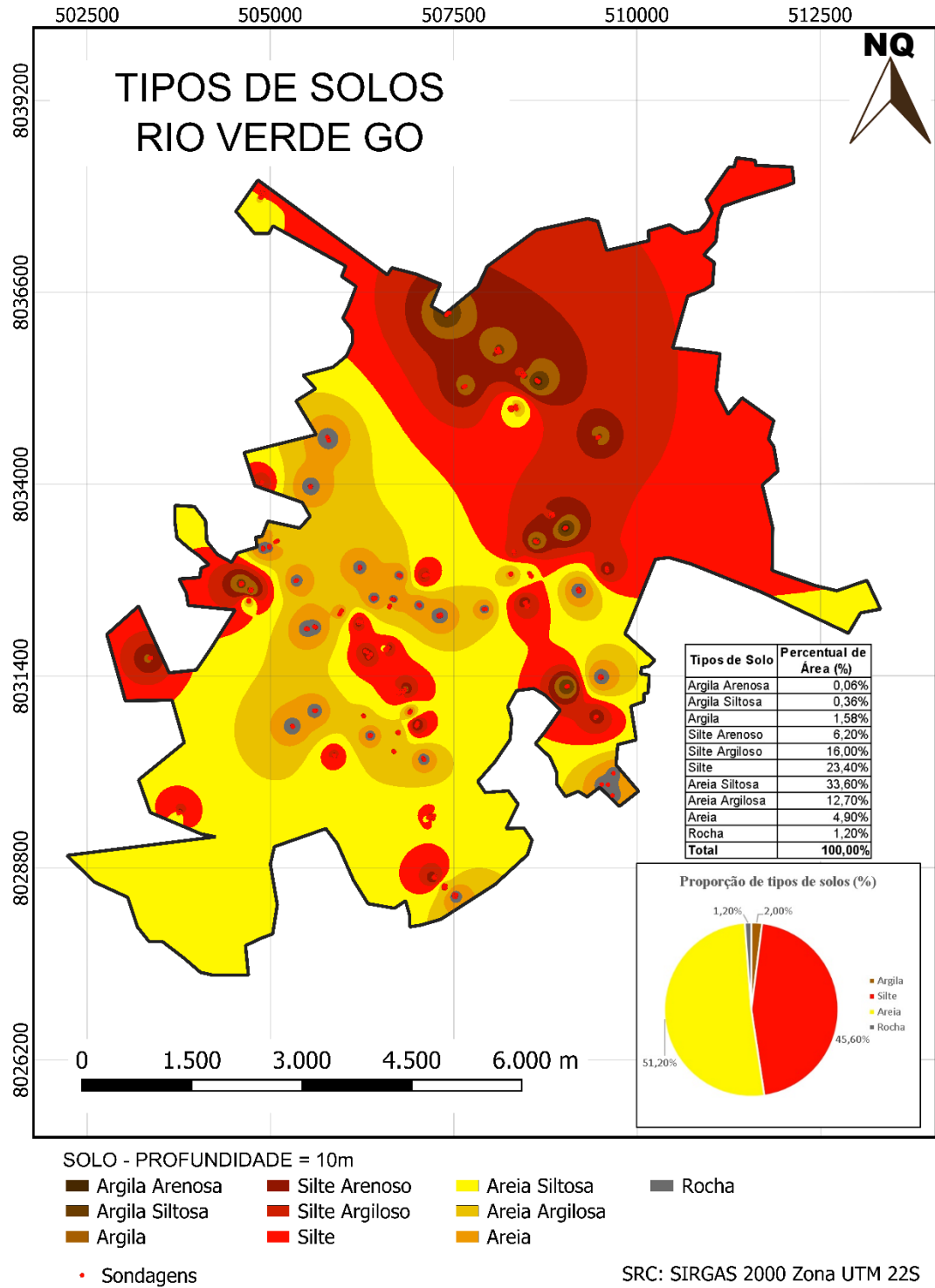
Figura 17 - Carta de tipos de solo: 9 metros de profundidade



SRC: SIRGAS 2000 Zona UTM 22S

Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 18 - Carta de tipos de solo: 10 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Na Figura 17 e na Figura 18, que correspondem a 9 e 10 metros de profundidade, respectivamente, observa-se que o solo arenoso se torna o predominante, constituindo 51,2% da área. Essa mudança é especialmente notável do Noroeste ao Sul do município, onde o solo arenoso se destaca. Além disso, ao comparar com a Figura 9, que representa a profundidade de

1 metro e mostra que o solo argiloso ocupava 99,27% do município, é possível verificar que, na Figura 18, com a profundidade de 10 metros, esse valor reduz drasticamente para apenas 2%.

Figura 19 - Carta de tipos de solo: 11 metros de profundidade

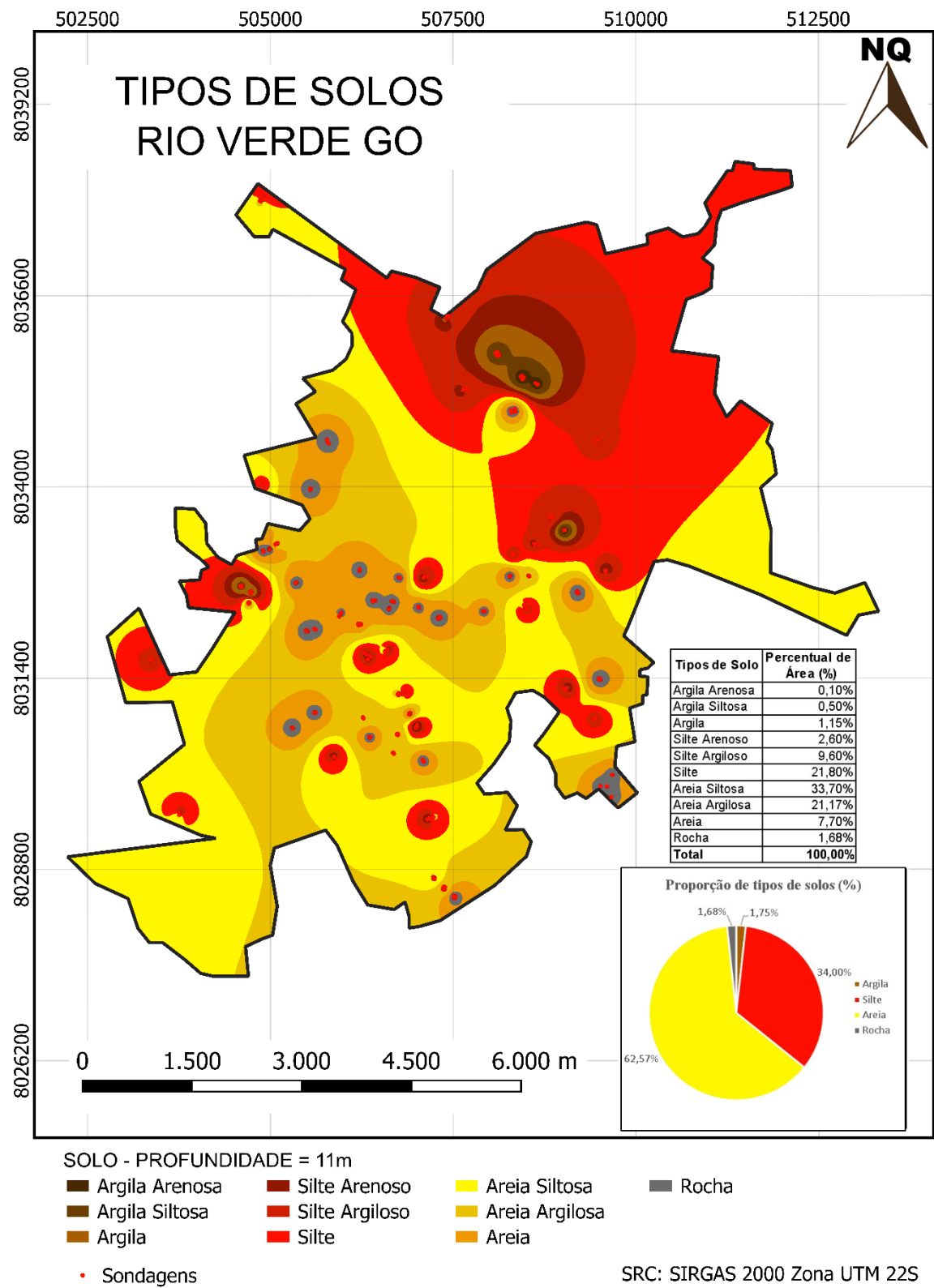
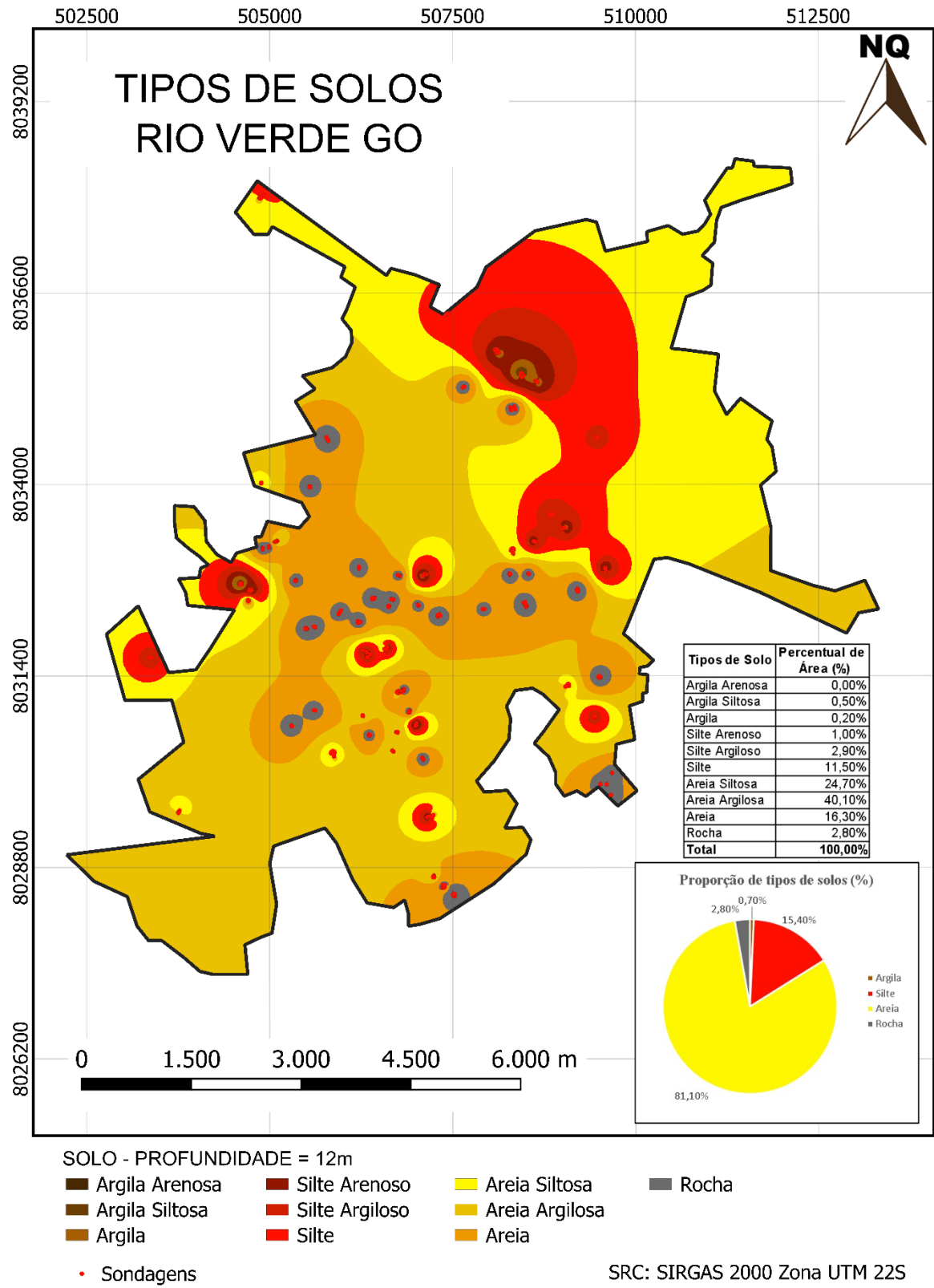


Figura 20 - Carta de tipos de solo: 12 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 21 - Carta de tipos de solo: 13 metros de profundidade

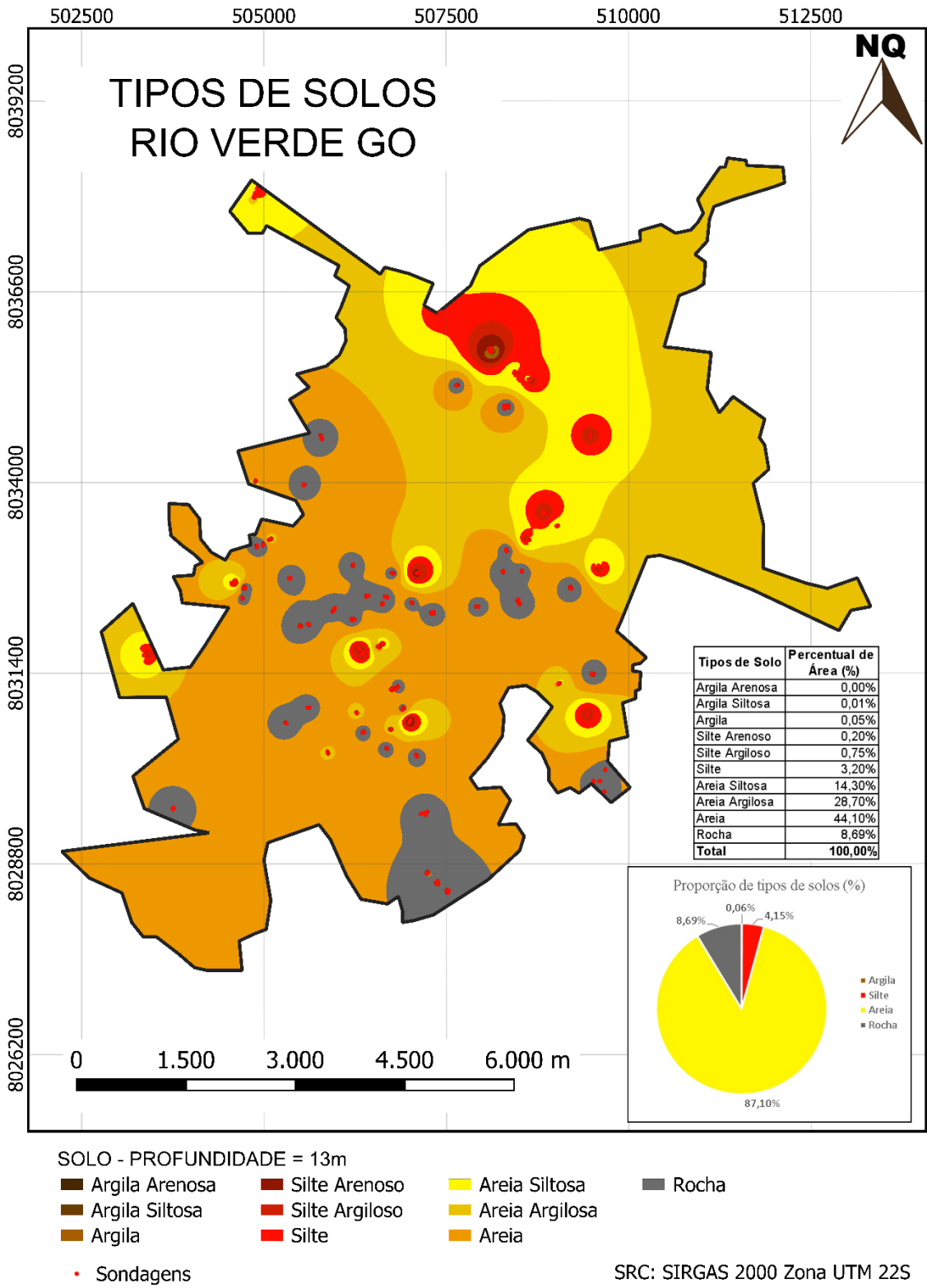
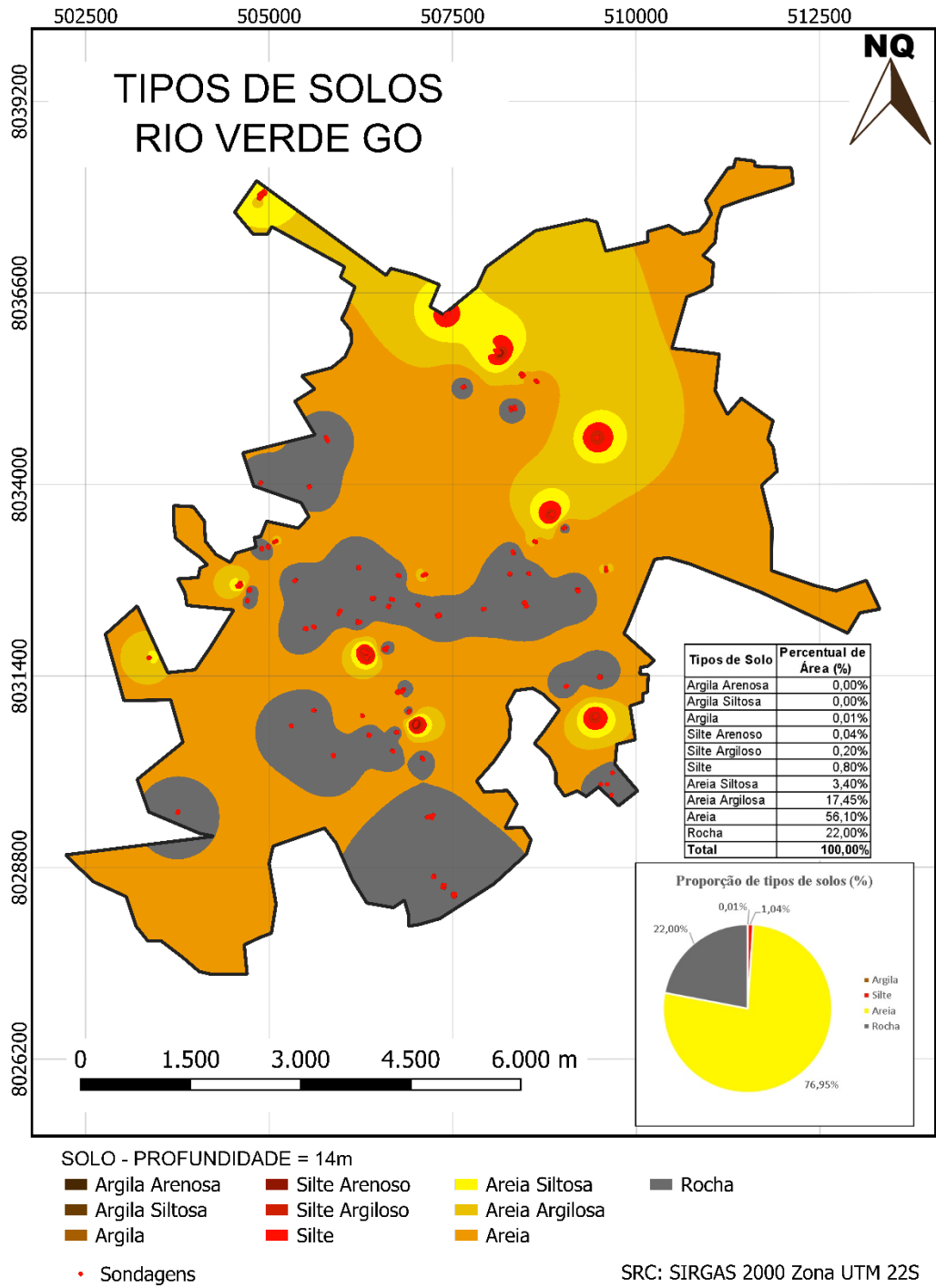


Figura 22 - Carta de tipos de solo: 14 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Na Figura 19, correspondente à carta de 11 metros de profundidade, ao avançar para as Figuras 20 e 21, que correspondem a 12 e 13 metros, respectivamente, nota-se uma redução significativa no solo siltoso. Inicialmente, o silte representava 34% da composição do solo, mas ao analisar a Figura 22, que se refere à profundidade de 14 metros, observa-se que esse valor cai para apenas 1,04%. Além disso, a Figura 22 mostra que a areia já cobre 76,95% da área total

de Rio Verde, enquanto a rocha começa a se apresentar de forma significativa, atingindo 22%. No entanto, ao observar a profundidade de 15 metros, ilustrada na Figura 23, o impenetrável passa a ser mais prevalente que o solo arenoso, representando 53,15% da composição do solo. Apenas a área do Norte ao Leste de Rio Verde, abrangendo os bairros Residencial Nilson Veloso, Residencial Arco Íris, Residencial Veneza e parte do Setor Santo Agostinho, ainda apresenta solo arenoso.

Figura 23 - Carta de tipos de solo: 15 metros de profundidade

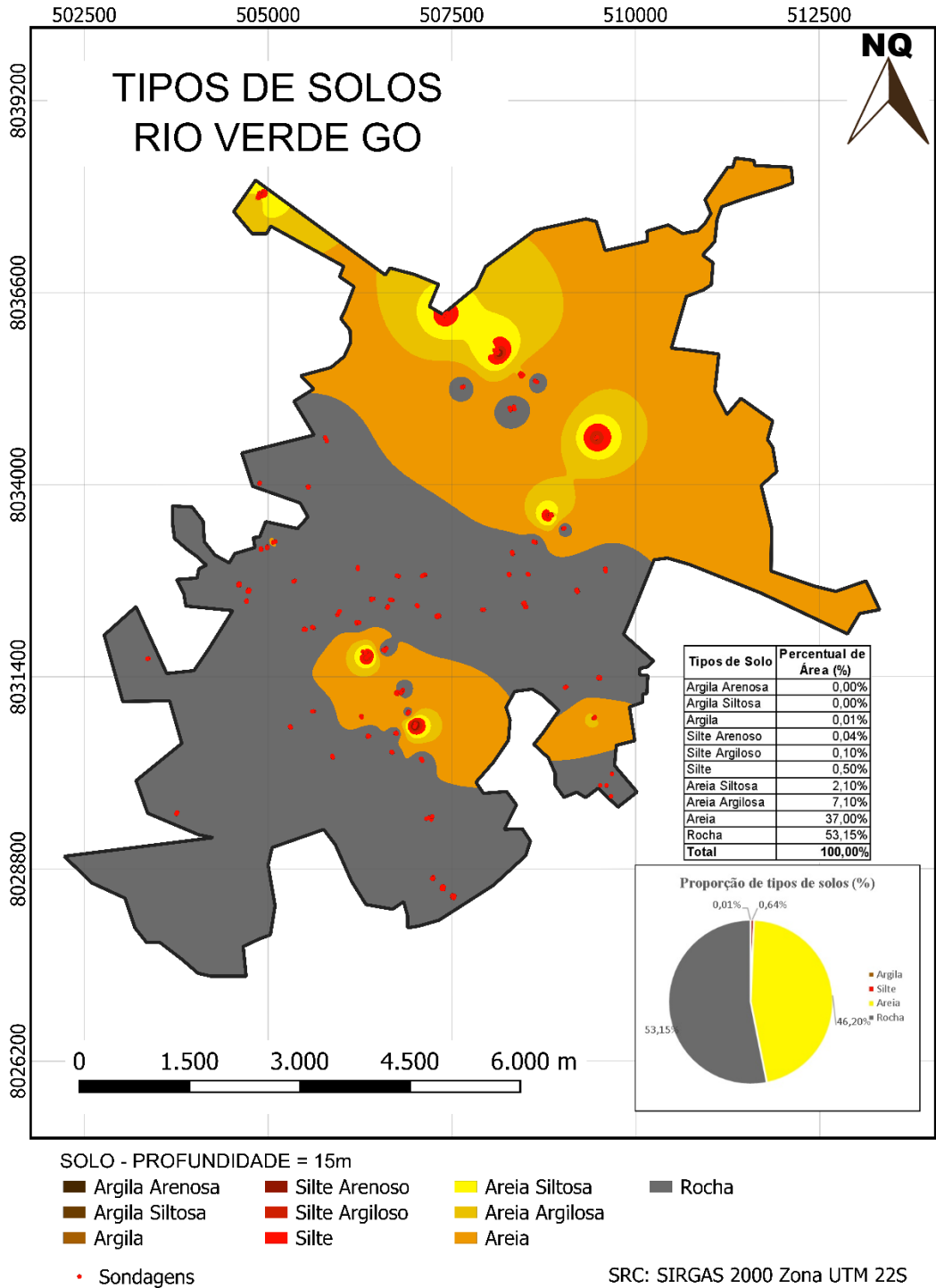


Figura 24 - Carta de tipos de solo: 16 metros de profundidade

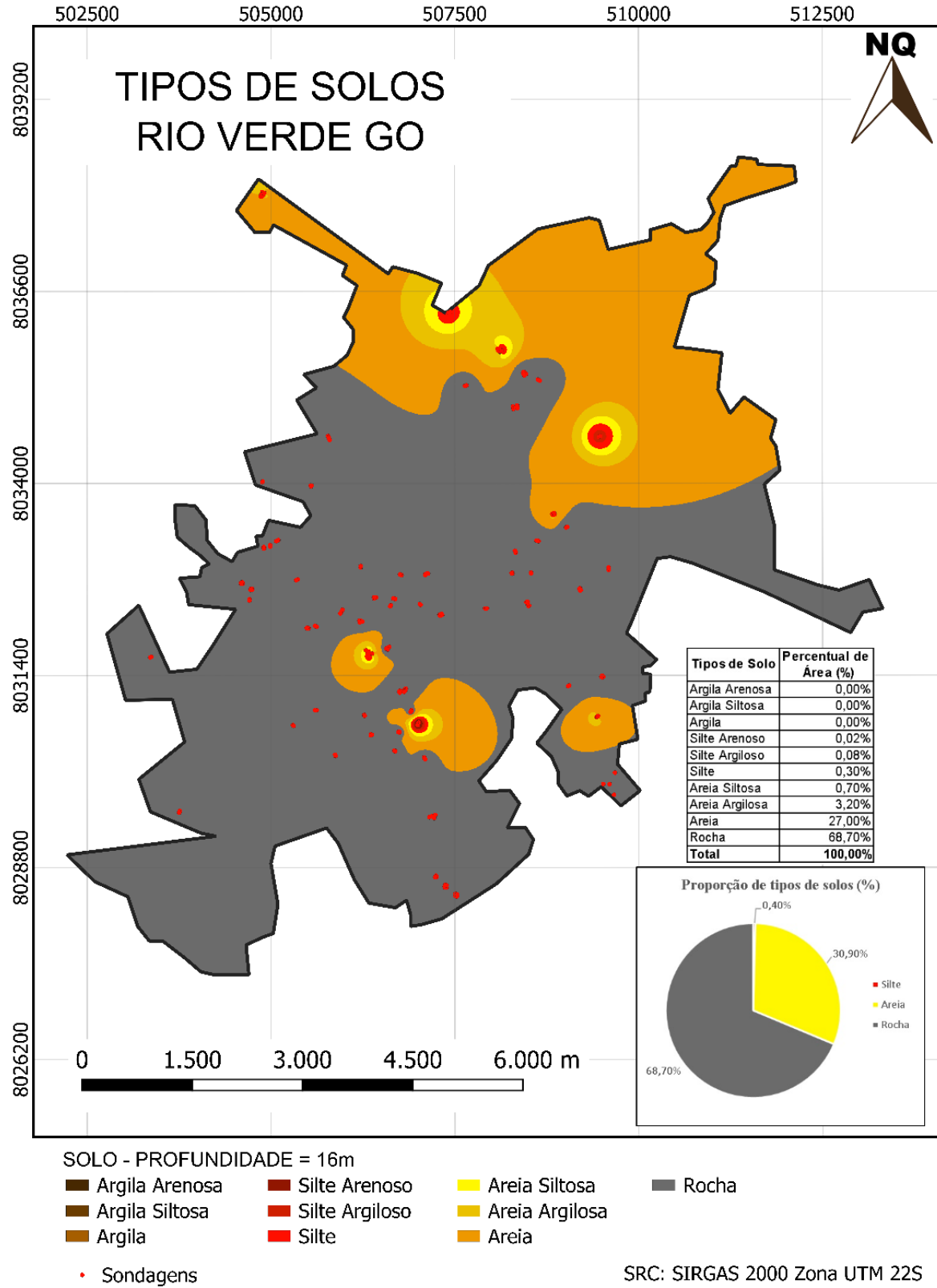
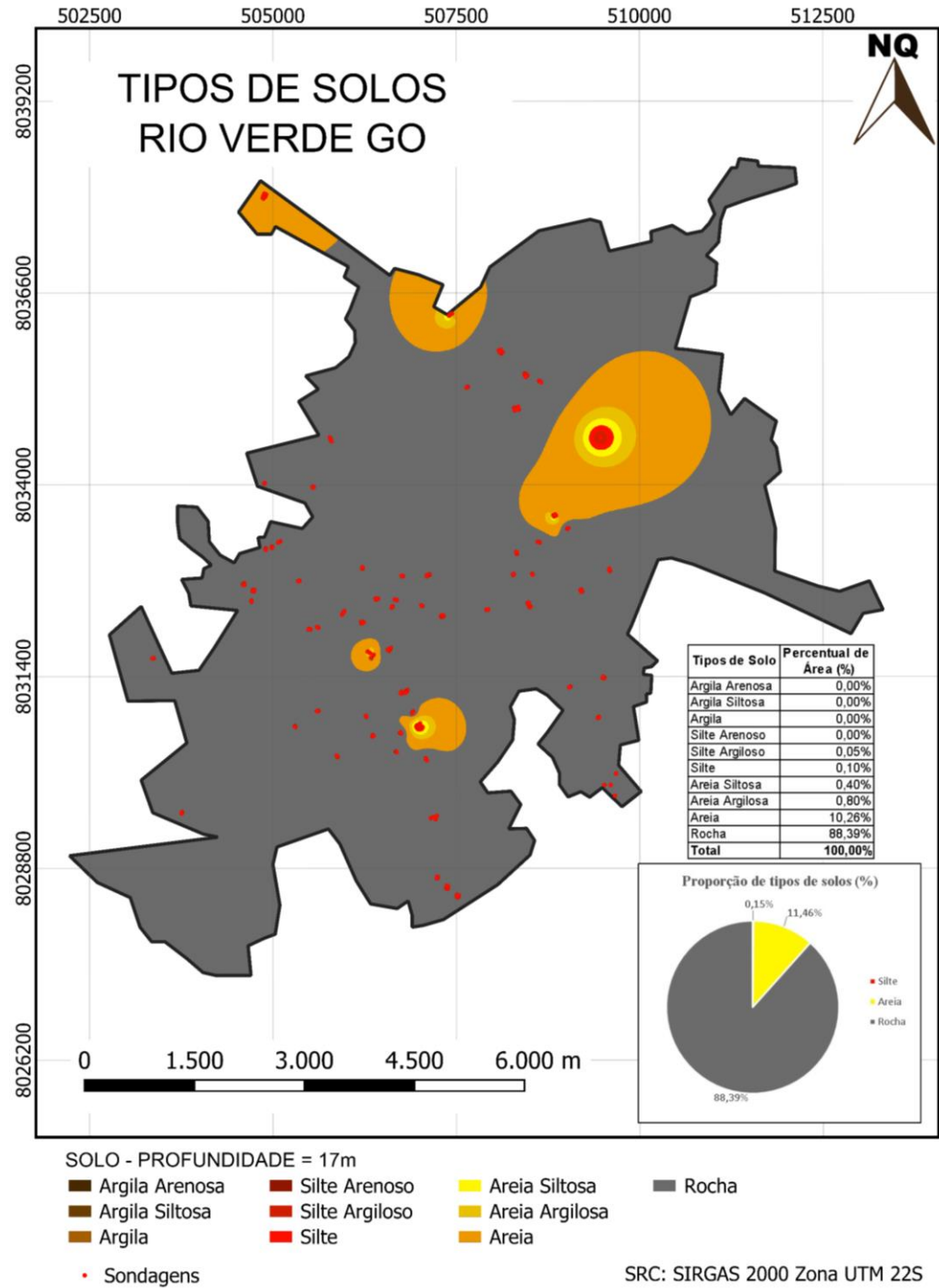


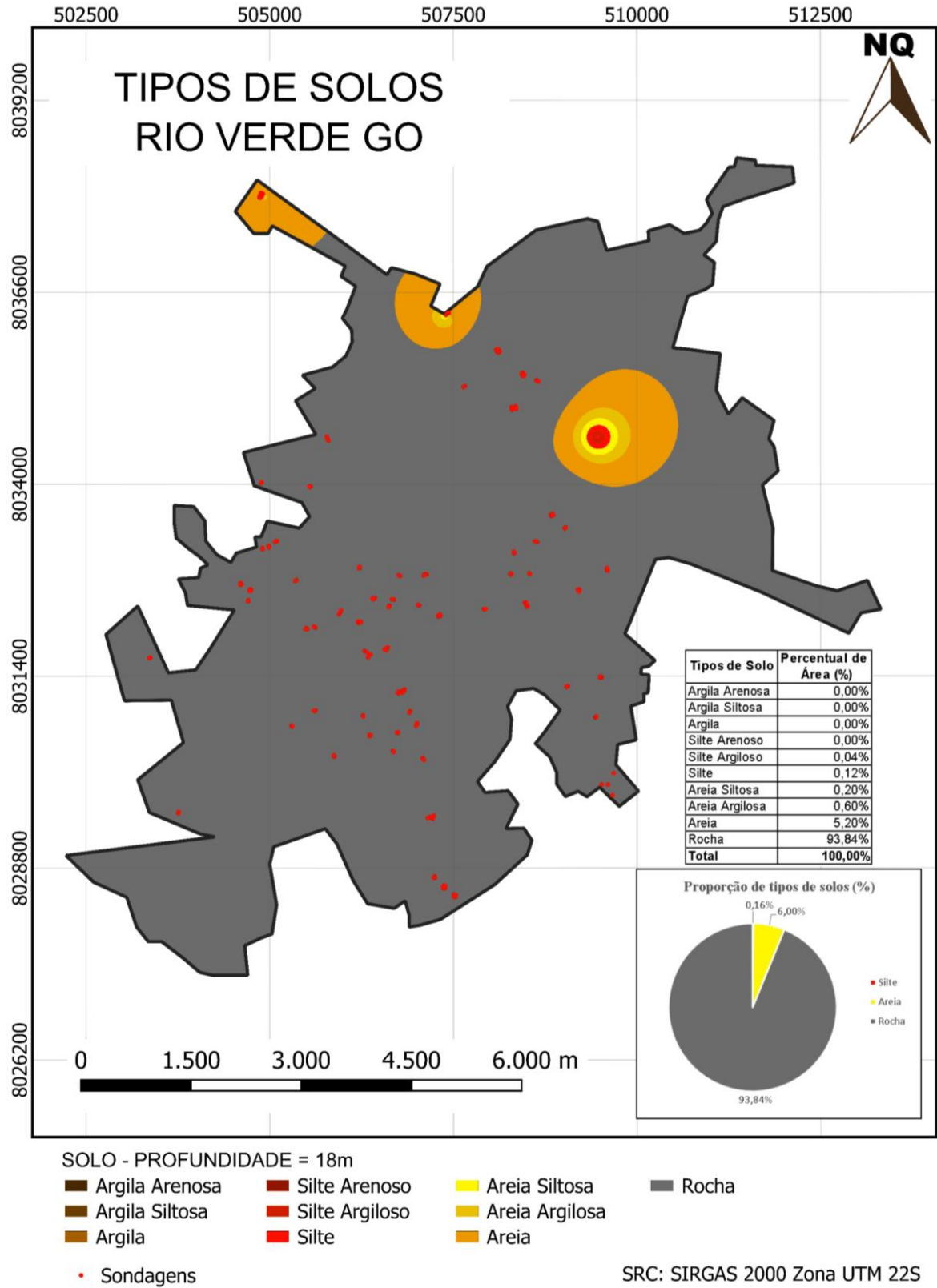
Figura 25 - Carta de tipos de solo: 17 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

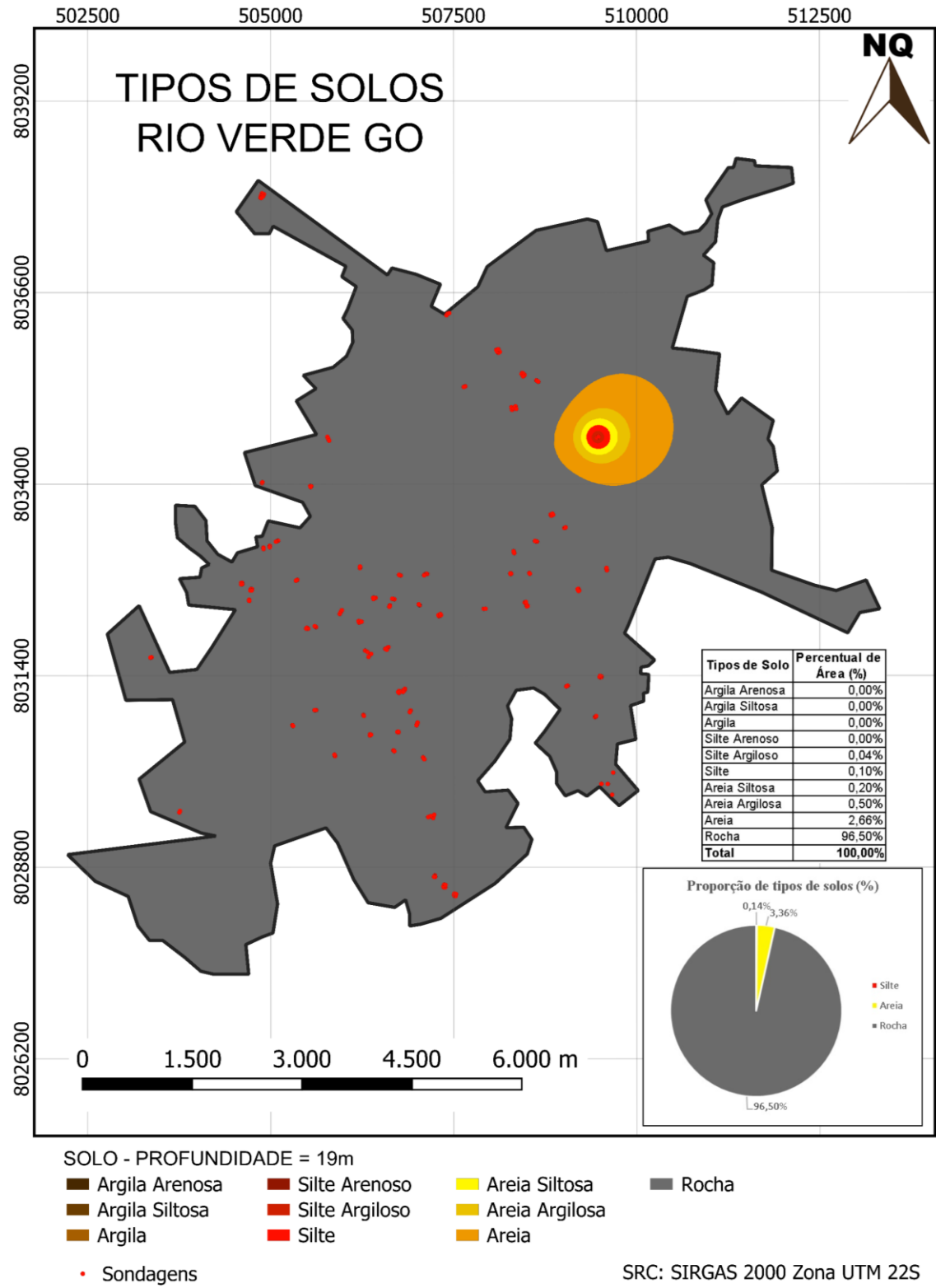
Nas Figuras 24 e 25, observa-se um aumento significativo do solo impenetrável, que passa de 68,7% para 88,39%. Nesse contexto, apenas uma pequena parte dos bairros Popular, Setor Dona Gercina e uma porção do Setor Santo Agostinho ainda apresentam solos arenosos, correspondendo a 11,46%, além de alguns locais isolados. Nessa profundidade, não se encontram mais solos argilosos.

Figura 26 - Carta de tipos de solo: 18 metros de profundidade



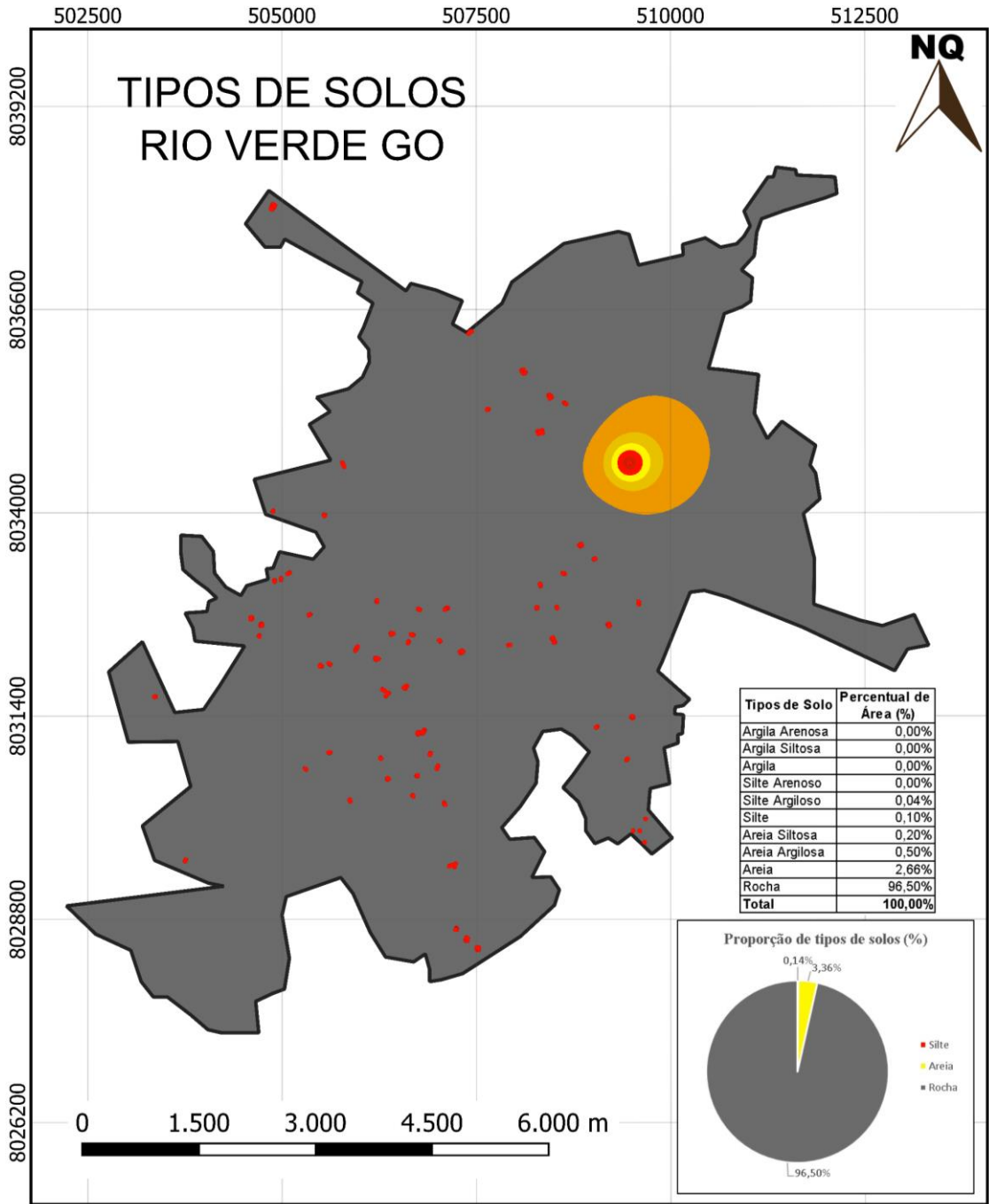
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 27 - Carta de tipos de solo: 19 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 28 - Carta de tipos de solo: 20 metros de profundidade



SOLO - PROFUNDIDADE = 20m

Argila Arenosa	Silte Arenoso	Areia Siltosa	Rocha
Argila Siltosa	Silte Argiloso	Areia Argilosa	
Argila	Silte	Areia	

• Sondagens

SRC: SIRGAS 2000 Zona UTM 22S

Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 29 - Carta de tipos de solo: 21 metros de profundidade

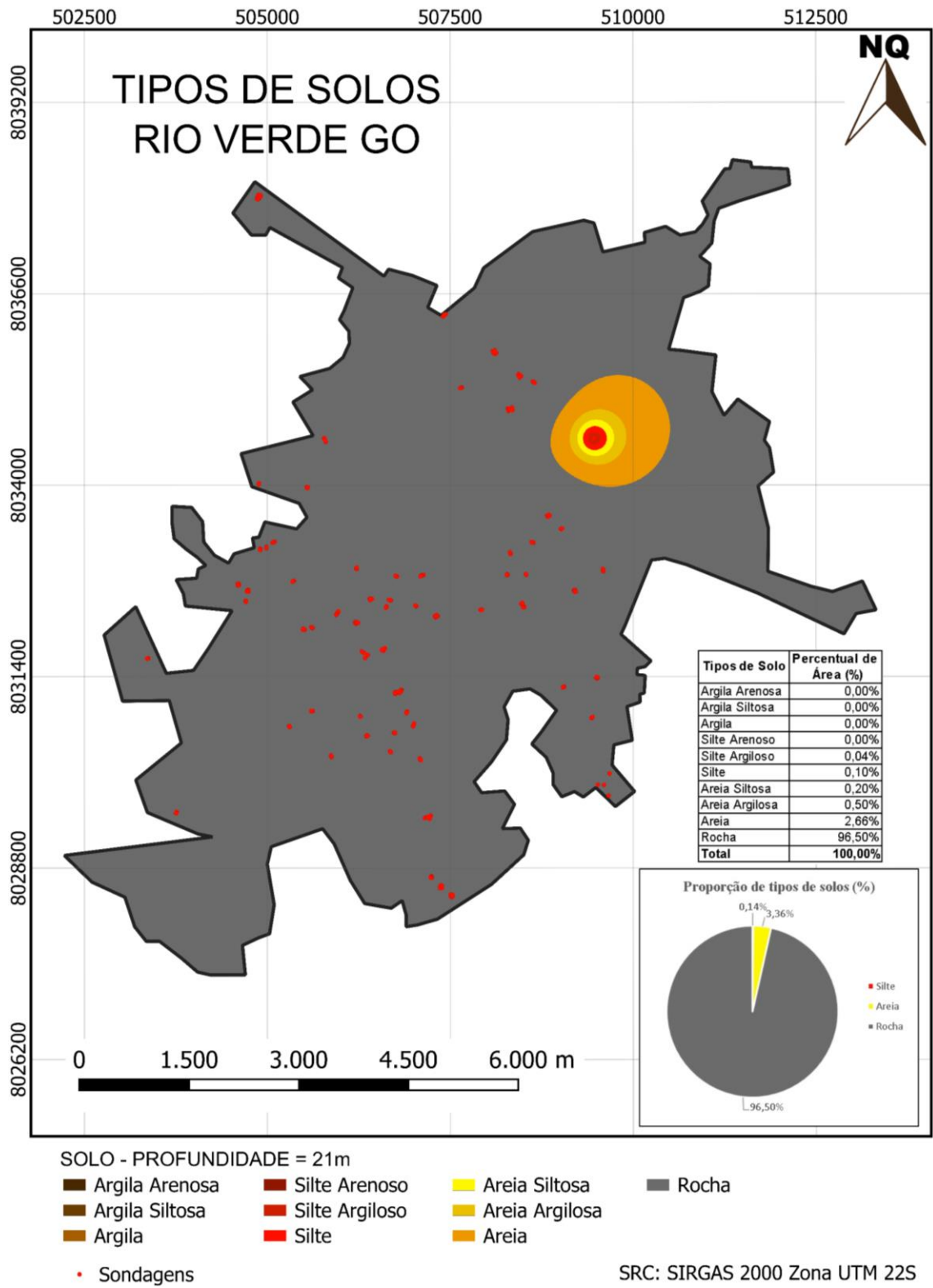
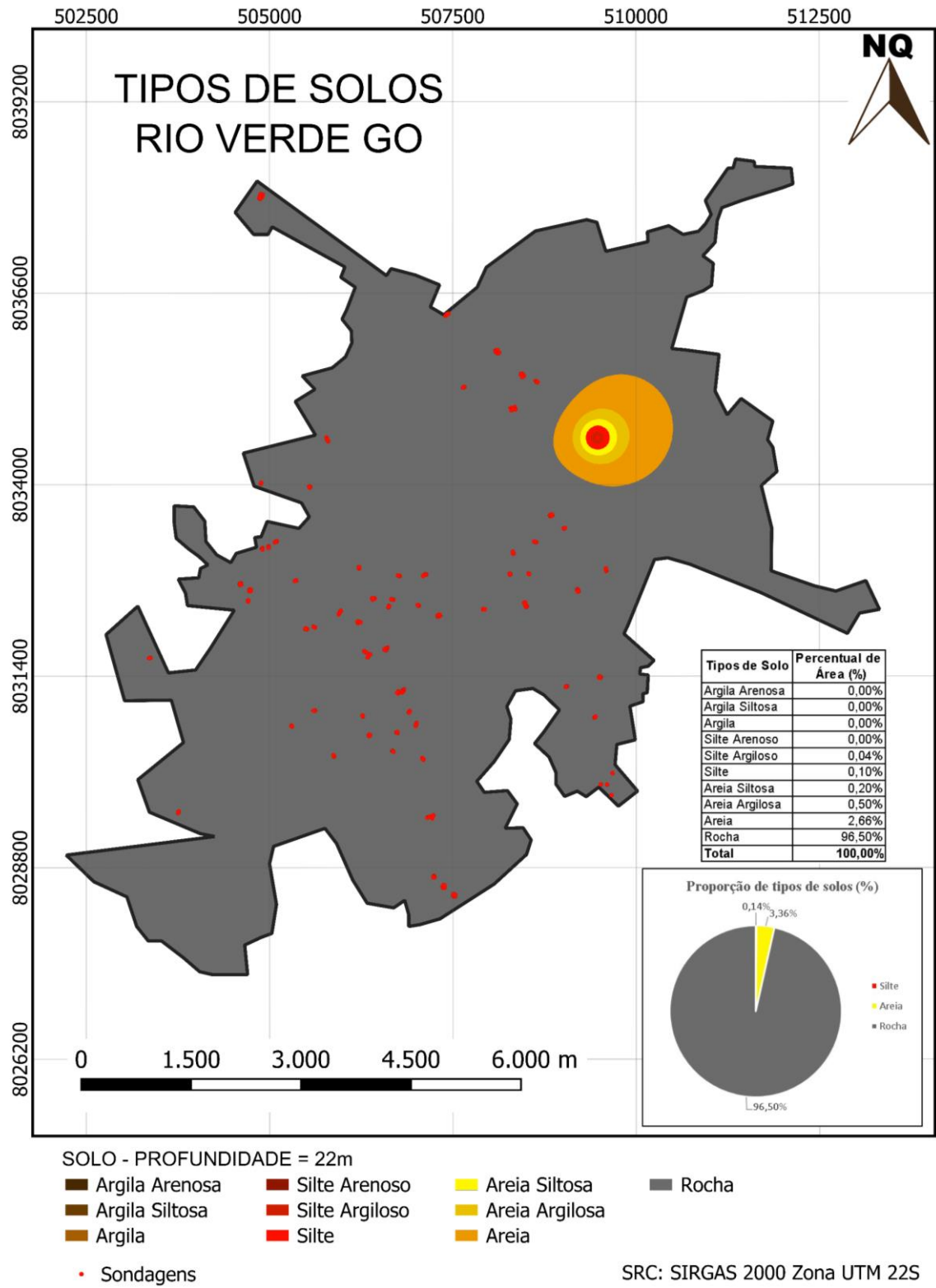
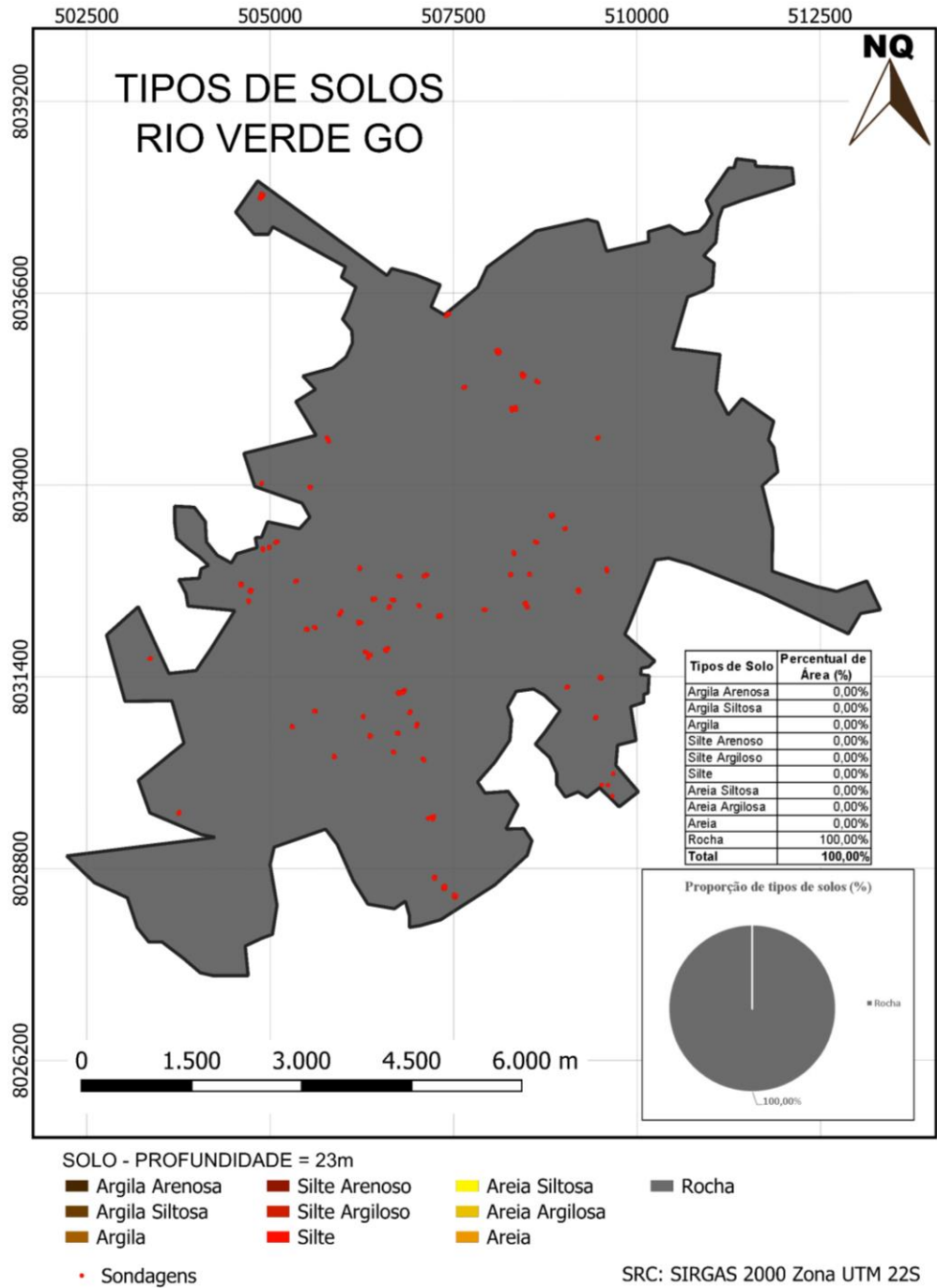


Figura 30 - Carta de tipos de solo: 22 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 31 - Carta de tipos de solo: 23 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Nas Figuras 26, 27, 28, 29 e 30, que correspondem às cartas de profundidade de 18 a 22 metros, observa-se uma uniformidade nos resultados. As sondagens restantes apresentaram valores similares, resultando em 96,5% de solo rochoso, 3,36% de solo arenoso e apenas 0,14% de solo siltoso. Por fim, a Figura 31, correspondente ao vigésimo terceiro metro, revela que o solo é completamente impenetrável, sem a presença de outros tipos de solo detectados pelas sondagens SPT.

De acordo com as Tabelas 4, 5, 6 e 7, observa-se que os solos de granulometria mais fina, como o solo argiloso e o solo siltoso, vão progressivamente reduzindo sua presença nas camadas mais profundas, até que deixam de existir em determinado ponto. Assim, conforme a profundidade aumenta, o percentual de solo rochoso cresce significativamente. Nota-se, por exemplo, na Tabela 6 que, aos 13 metros de profundidade, o solo rochoso corresponde a 8,69%, aumentando para 53,15% aos 15 metros e, antes de atingir 100%, chega a 96,50% na Tabela 7.

Tabela 4 - Proporção do tipo de solo 1 a 6 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)					
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
Argila Arenosa	54,50%	43,50%	32,90%	19,58%	8,80%	3,30%
Argila Siltosa	42,66%	52,00%	60,31%	61,80%	50,39%	23,80%
Argila	2,11%	3,51%	5,40%	15,50%	30,60%	50,18%
Silte Arenoso	0,40%	0,65%	0,90%	2,20%	6,50%	14,00%
Silte Argiloso	0,20%	0,20%	0,30%	0,60%	2,10%	5,60%
Silte	0,08%	0,08%	0,10%	0,20%	0,90%	2,35%
Areia Siltosa	0,04%	0,04%	0,07%	0,10%	0,40%	0,65%
Areia Argilosa	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,20%	0,10%
Areia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,02%
Rocha	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 9	Figura 10	Figura 11	Figura 12	Figura 13	Figura 14

Fonte: Autor próprio (2024)

Tabela 5 - Proporção do tipo de solo 7 a 12 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)					
	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m
Argila Arenosa	1,65%	0,76%	0,60%	0,06%	0,10%	0,00%
Argila Siltosa	9,75%	4,24%	2,90%	0,36%	0,50%	0,50%
Argila	35,40%	14,10%	6,20%	1,58%	1,15%	0,20%
Silte Arenoso	34,80%	30,30%	16,10%	6,20%	2,60%	1,00%
Silte Argiloso	10,30%	30,20%	21,60%	16,00%	9,60%	2,90%
Silte	4,40%	12,40%	30,00%	23,40%	21,80%	11,50%
Areia Siltosa	2,30%	4,80%	14,90%	33,60%	33,70%	24,70%
Areia Argilosa	1,00%	2,10%	5,30%	12,70%	21,17%	40,10%
Areia	0,30%	0,85%	1,90%	4,90%	7,70%	16,30%
Rocha	0,10%	0,25%	0,50%	1,20%	1,68%	2,80%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 15	Figura 16	Figura 17	Figura 18	Figura 19	Figura 20

Fonte: Autor próprio (2024)

Tabela 6 - Proporção do tipo de solo 13 a 18 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)					
	13 m	14 m	15 m	16 m	17 m	18 m
Argila Arenosa	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Argila Siltosa	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Argila	0,05%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
Silte Arenoso	0,20%	0,04%	0,04%	0,02%	0,00%	0,00%
Silte Argiloso	0,75%	0,20%	0,10%	0,08%	0,05%	0,04%
Silte	3,20%	0,80%	0,50%	0,30%	0,10%	0,12%
Areia Siltosa	14,30%	3,40%	2,10%	0,70%	0,40%	0,20%
Areia Argilosa	28,70%	17,45%	7,10%	3,20%	0,80%	0,60%
Areia	44,10%	56,10%	37,00%	27,00%	10,26%	5,20%
Rocha	8,69%	22,00%	53,15%	68,70%	88,39%	93,84%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 21	Figura 22	Figura 23	Figura 24	Figura 25	Figura 26

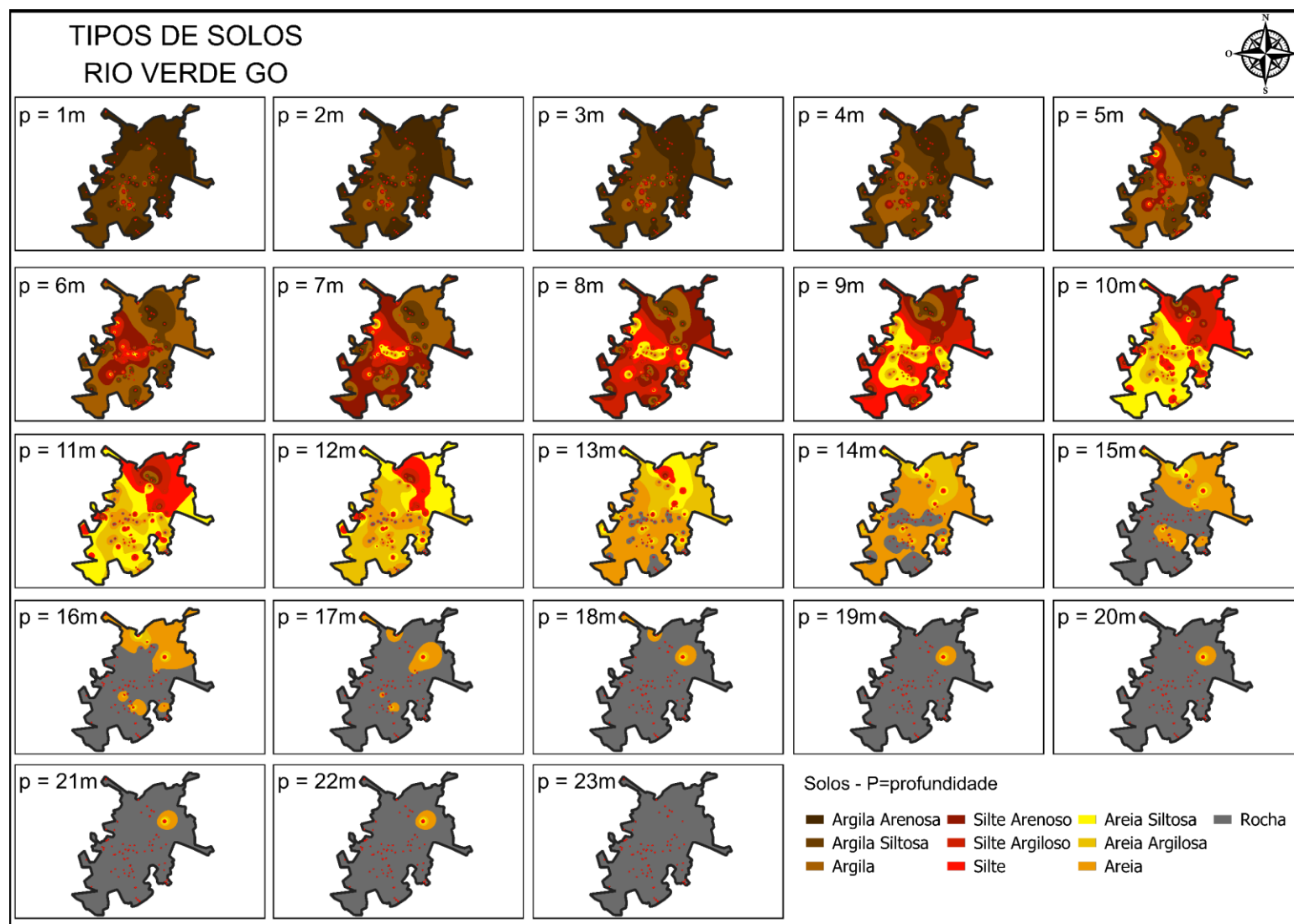
Fonte: Autor próprio (2024)

Tabela 7 - Proporção do tipo de solo 19 a 23 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)				
	19 m	20 m	21 m	22 m	23 m
Argila Arenosa	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Argila Siltosa	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Argila	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Silte Arenoso	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Silte Argiloso	0,04%	0,04%	0,04%	0,04%	0,00%
Silte	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,00%
Areia Siltosa	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,00%
Areia Argilosa	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,00%
Areia	2,66%	2,66%	2,66%	2,66%	0,00%
Rocha	96,50%	96,50%	96,50%	96,50%	100,00%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 27	Figura 28	Figura 29	Figura 30	Figura 31

Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 32 - Resultado das interpolações dos solos em cada profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

De forma geral, a Figura 32 reúne todas as interpolações, tornando evidente cada etapa do processo. A partir da Figura 13, que corresponde à carta de 5 metros de profundidade, observa-se o predomínio do solo argiloso. No entanto, a partir da Figura 14, que representa a carta de 6 metros de profundidade, o solo siltoso começa a se espalhar da parte noroeste, passando pelo centro até o sudoeste do município. Na Figura 17, referente aos 9 metros de profundidade, o solo arenoso começa a se manifestar com maior intensidade. Já na Figura 21, que mostra a carta de 13 metros, o solo arenoso se torna predominante, até que o solo rochoso passa a dominar toda a área do município.

É importante ressaltar que as cartas apresentadas servem como uma orientação para a realização de estimativas preliminares do solo que tende a ser encontrado em determinadas áreas do município de Rio Verde, GO. Contudo, este estudo não substitui a necessidade de novas investigações geotécnicas, mas pode auxiliar nas análises a serem realizadas.

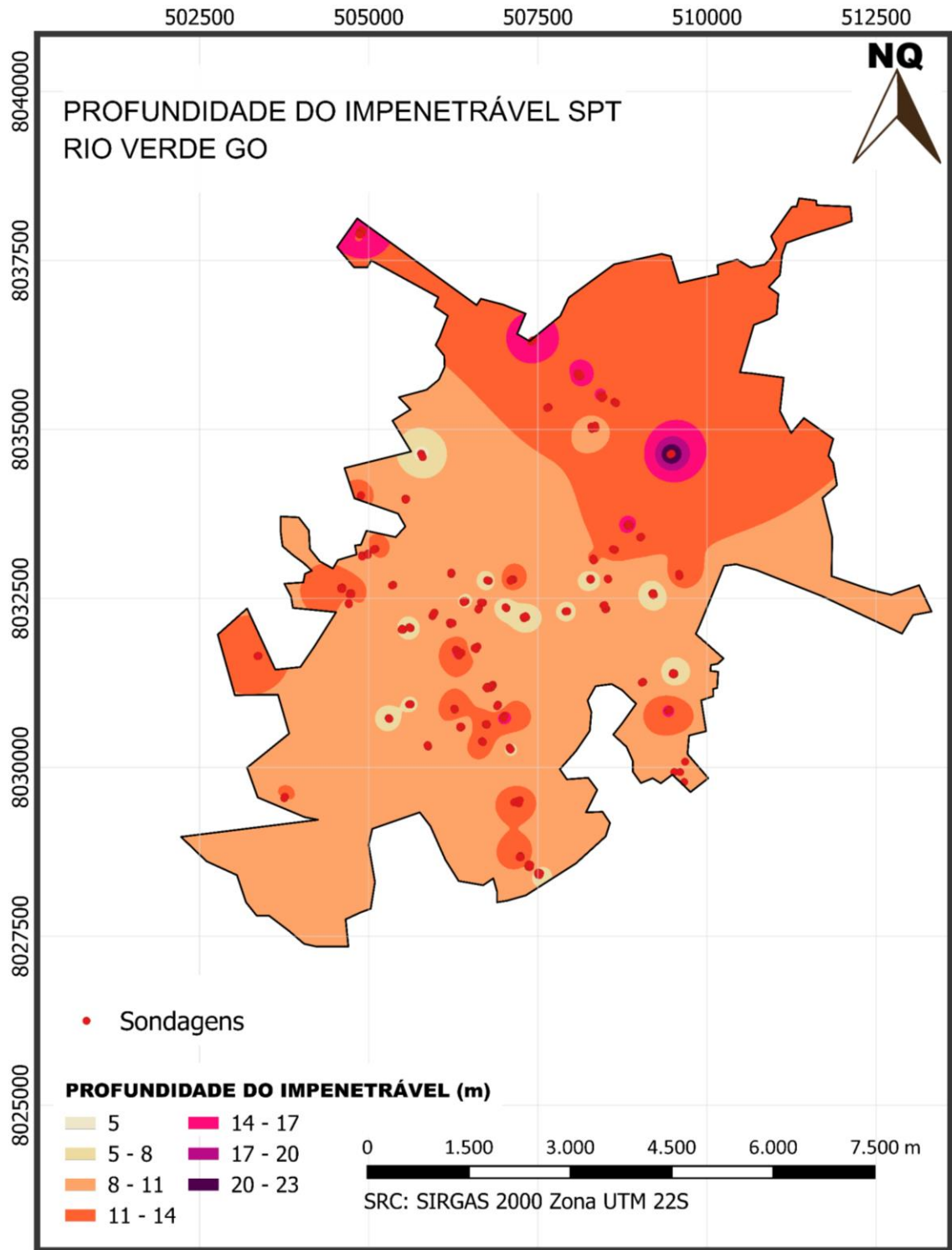
5.2 Cartas de Aptidão Para Fundações

As cartas de aptidão para fundações, desenvolvidas a partir do banco de dados geológico organizado em ambiente SIG, incluem as cartas de superfície do impenetrável, de isovalores de N_{spt} e de indicativo do comprimento máximo de estacas aplicadas ao município de Rio Verde, GO. Nas seções seguintes, são apresentadas essas cartas, acompanhadas de análises que discutem o conhecimento transmitido por meio desses documentos.

5.2.1 Cartas de superfície do impenetrável a percussão

A superfície do impenetrável à percussão foi gerada aplicando-se a técnica de *IDW*, exclusivamente a partir dos dados das 231 sondagens selecionadas. Como um dos resultados, a Figura 33 apresenta a carta de profundidade do impenetrável à percussão para o município de Rio Verde GO.

Figura 33 - Carta de profundidade do impenetrável à percussão



Fonte: Autor próprio (2024)

Observa-se que as regiões com tons mais claros correspondem aos impenetráveis mais superficiais, enquanto as áreas com coloração mais escura, variando do laranja ao roxo intenso, indicam maiores profundidades de impenetrável à percussão. Conforme a Tabela 8, apenas

0,12% da zona urbana de Rio Verde apresenta profundidade superior a 20 metros. Além disso, os resultados revelam que a faixa de profundidade entre 8 e 14 metros abrange 94,3% da área urbana, com as demais profundidades apresentando variações mínimas entre 0,06% e 2,80%.

Tabela 8 - Frequência de área para a profundidade do impenetrável

Profundidade do impenetrável (m)	% de área
<5	0,06%
5 - 8,0	2,80%
8,0 - 11,0	59,13%
11,0 - 14,0	35,18%
14,0 - 17,0	2,45%
17,0 - 20,0	0,26%
20,0 - 23,0	0,12%
Total	100,00%
Carta	Figura 33

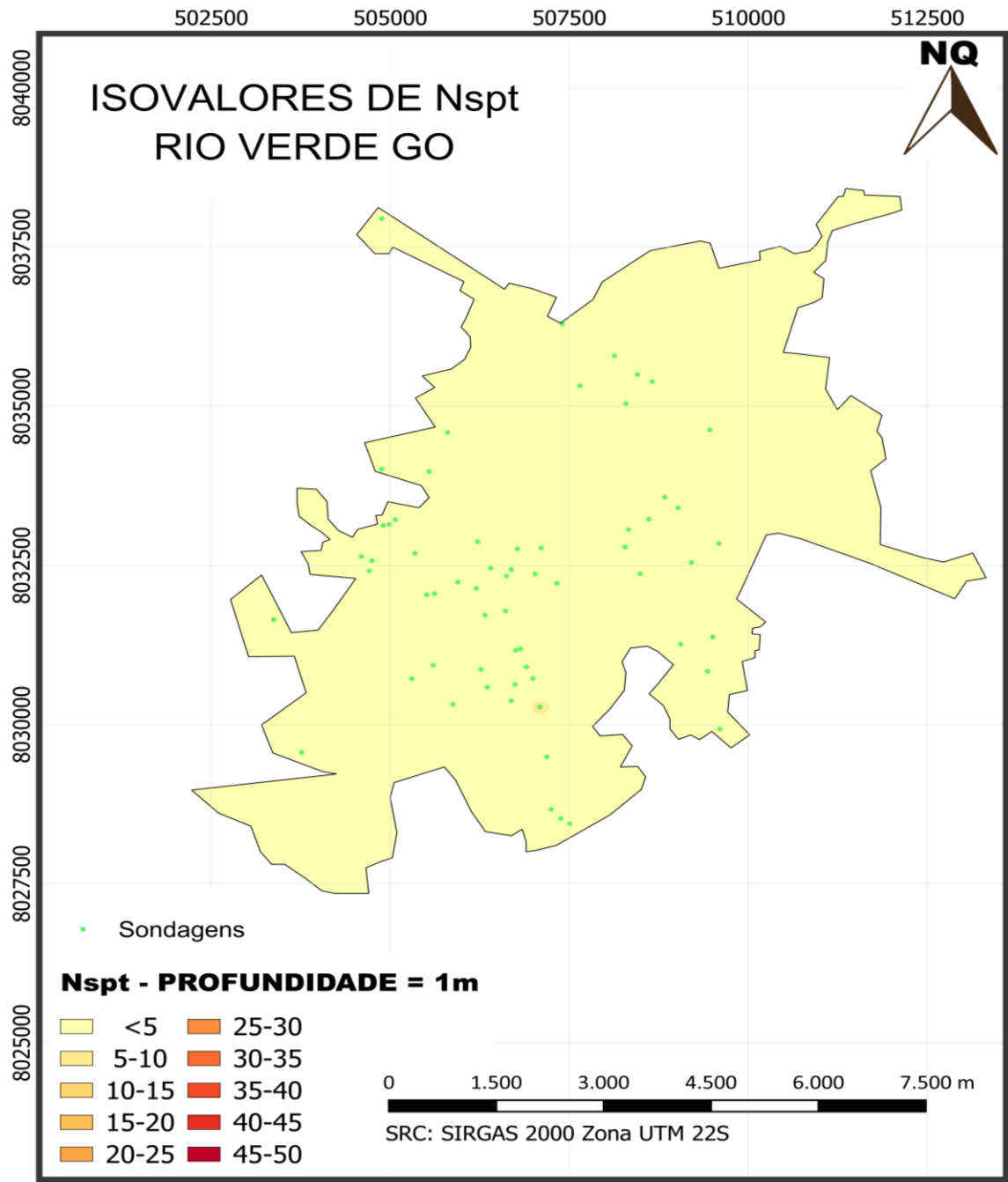
Fonte: Autor próprio (2024)

5.2.2 Cartas de isovalores de N_{SPT}

As cartas de isovalores de N_{SPT} foram desenvolvidas, iniciando pela Figura 34, que representa a carta de 1 metro de profundidade, e concluindo com a Figura 55, correspondente à carta de 22 metros de profundidade. Nesta última camada, conforme os dados coletados e analisados, não restam mais pontos penetráveis à percussão.

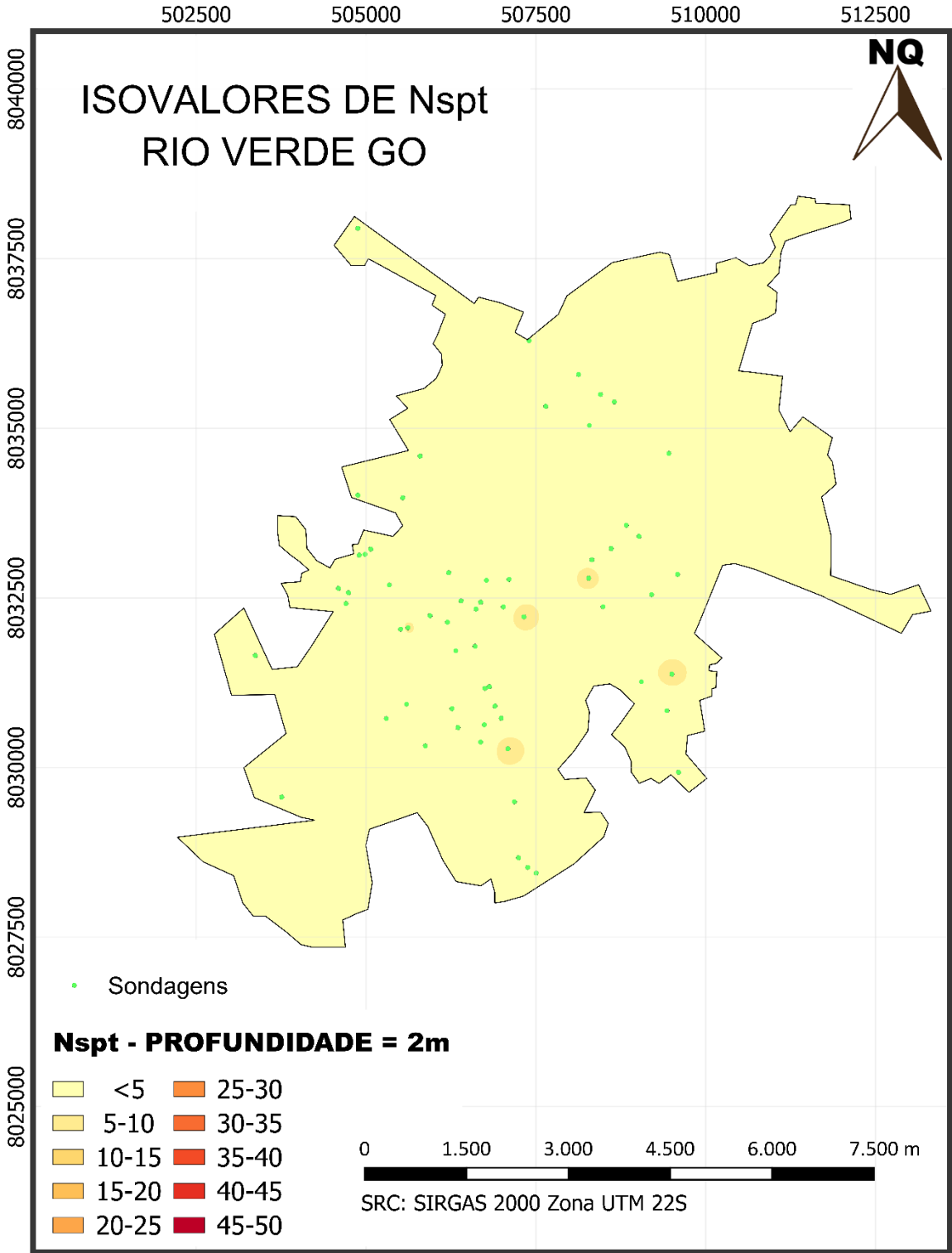
Ao final da seção, a Figura 56 apresenta um compilado de todas as cartas geradas, com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados e permitir a visualização simultânea da variação da resistência do solo em todas as profundidades. Além disso, as Tabelas 9, 10, 11 e 12 foram elaboradas para mostrar as frequências das áreas em cada faixa de N_{SPT} observada, proporcionando um indicativo quantitativo que complementa as análises das cartas.

Figura 34 - Carta de isovalores de Nspt: 1 metro de profundidade

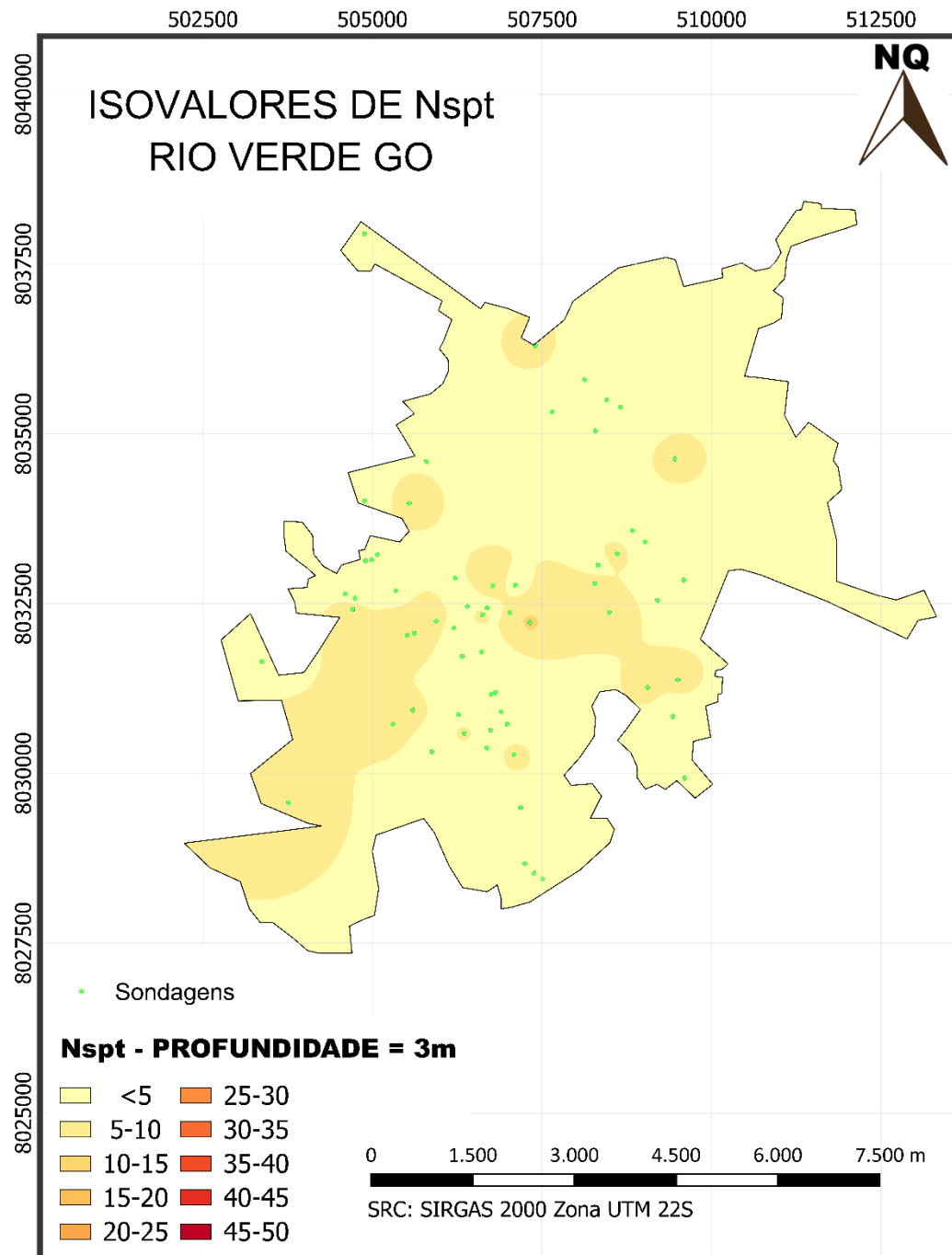


Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 35 - Carta de isovalores de Nspt: 2 metros de profundidade



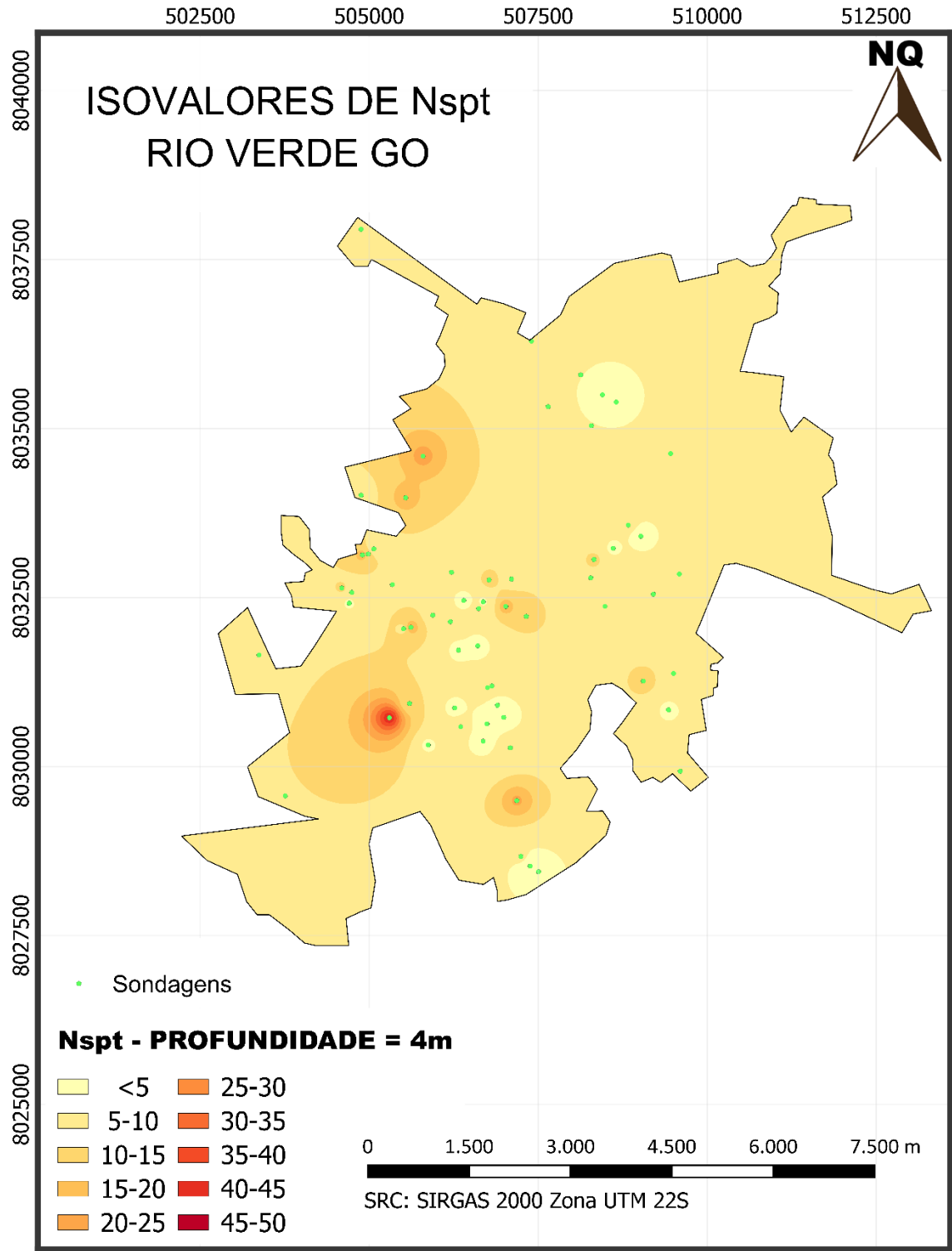
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 36 - Carta de isovalores de N_{spt} : 3 metros de profundidade

Fonte: Autor próprio (2024)

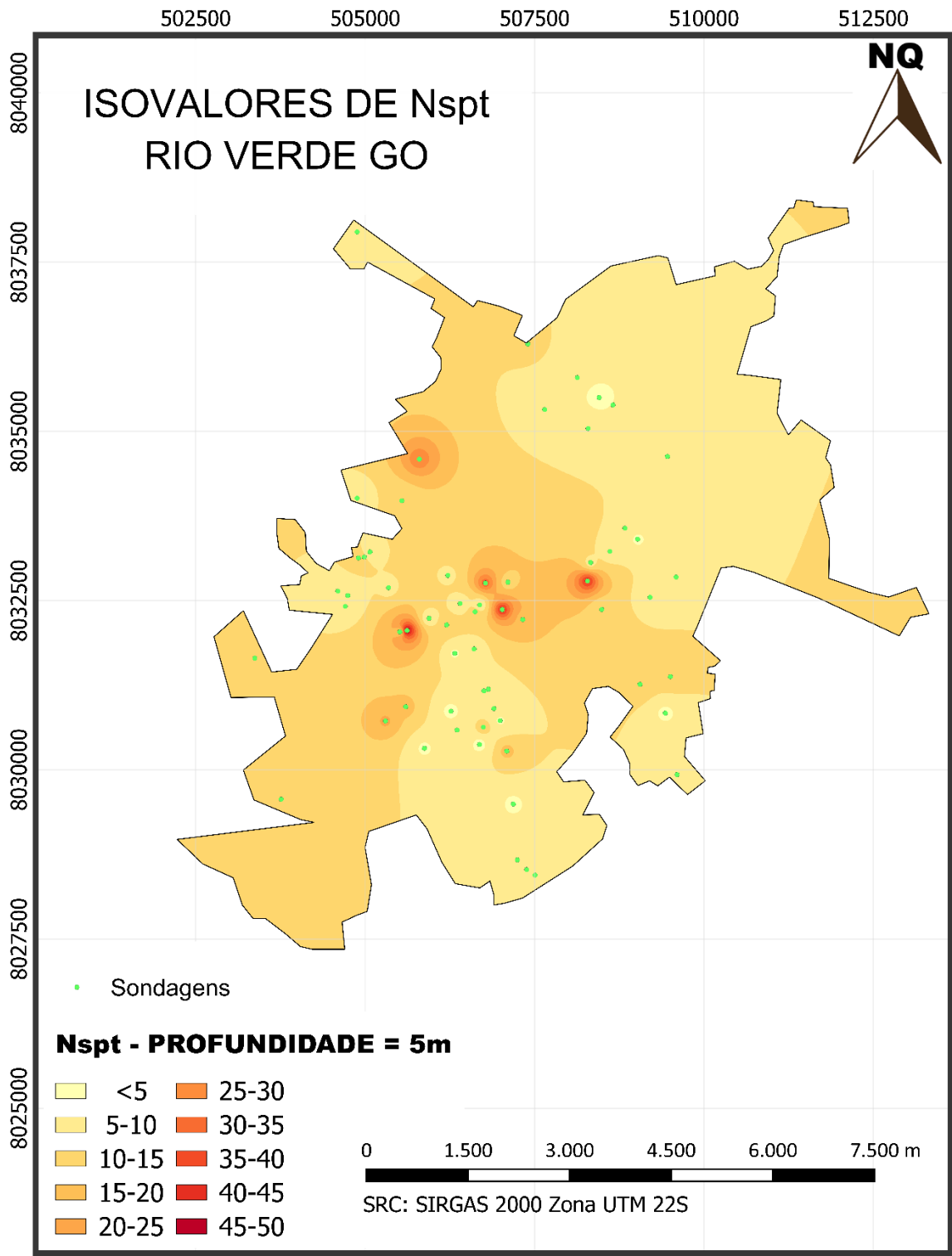
Nas Figuras 34, 35 e 36, correspondentes ao 1º, 2º e 3º metro de profundidade, é possível observar um aumento gradual dos valores de N_{spt} no centro, que se expande em direção ao sudoeste da zona urbana de Rio Verde, GO. No primeiro metro, 99,9% da área da zona urbana apresentava um valor de N_{spt} inferior a 5. Entretanto, ao atingir 3 metros de profundidade, esse percentual reduziu-se para 77,70%, enquanto os 22,20% restantes correspondem a áreas onde os valores de N_{spt} aumentaram até 10.

Figura 37 - Carta de isovalores de Nspt: 4 metros de profundidade



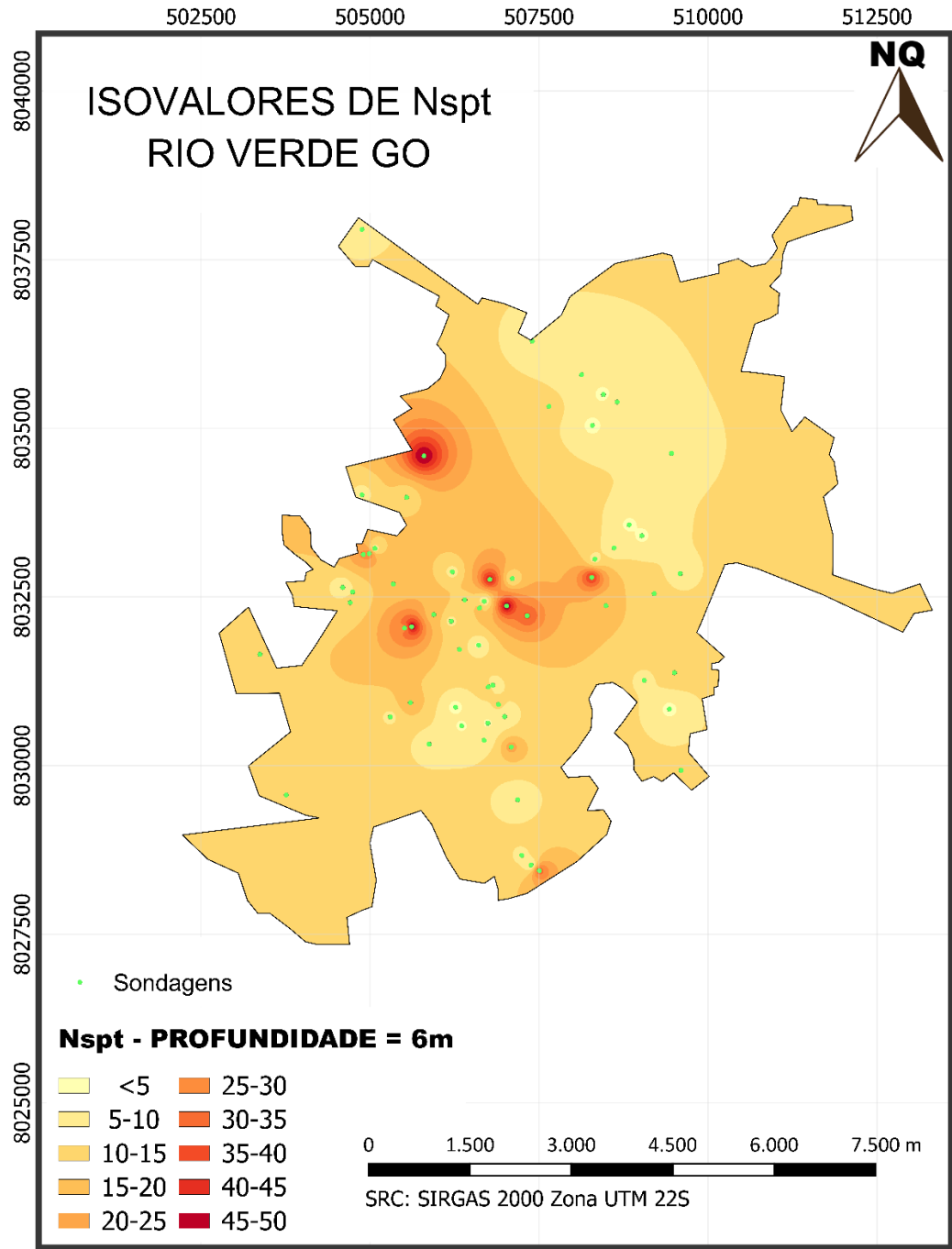
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 38 - Carta de isovalores de Nspt: 5 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

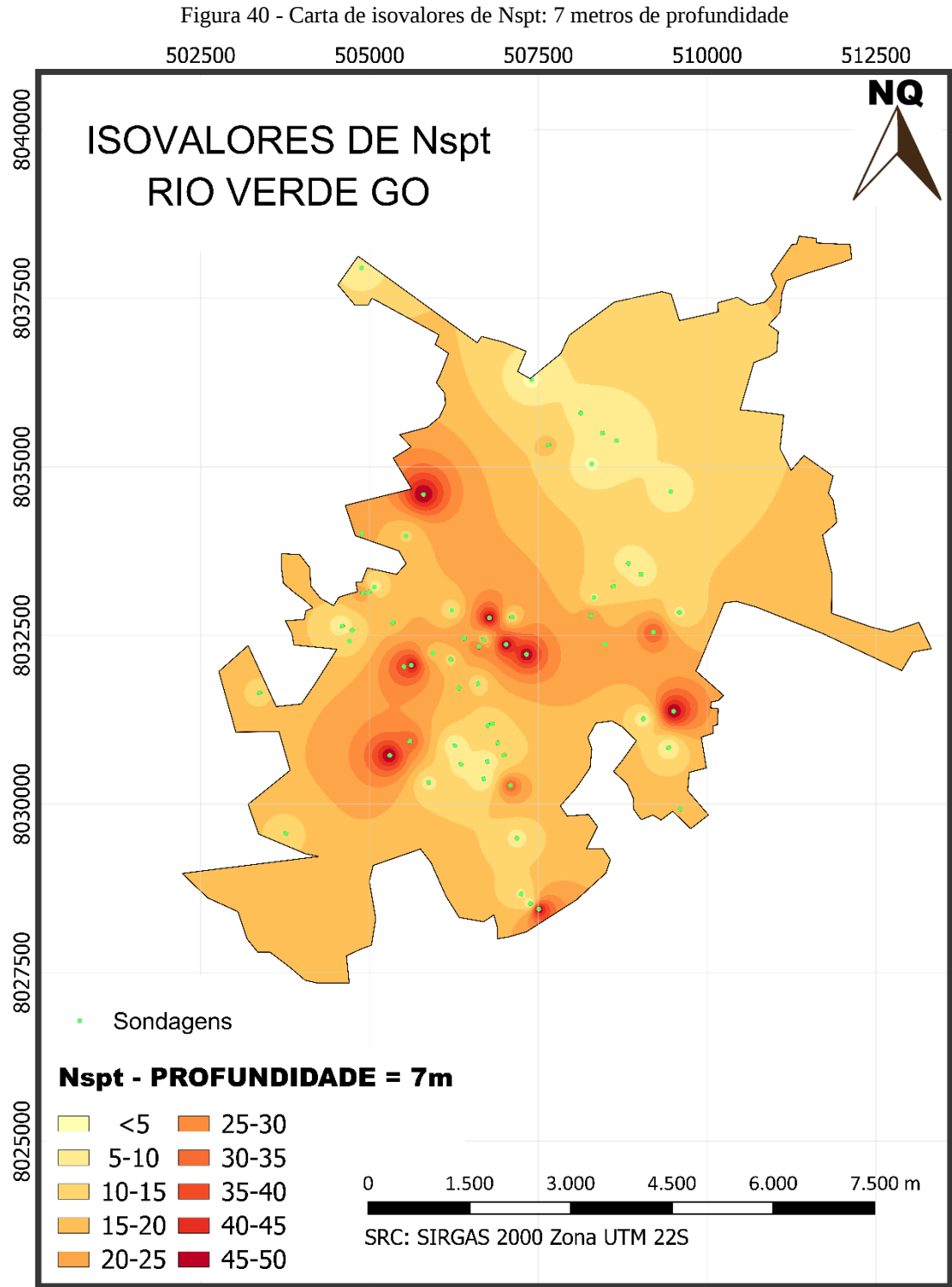
Figura 39 - Carta de isovalores de N_{spt}: 6 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

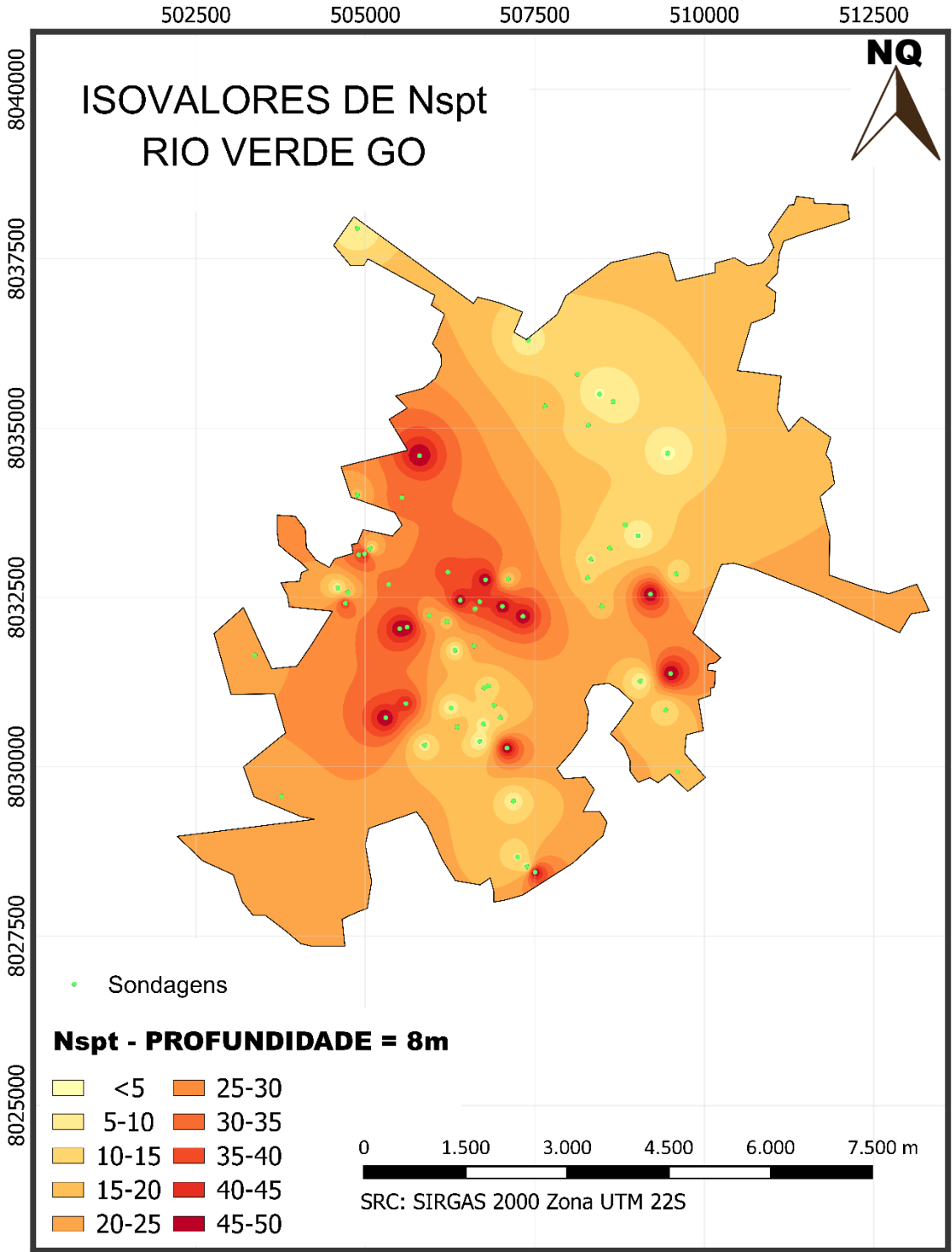
Ao analisar as Figuras 37, 38 e 39, que representam as cartas de 4, 5 e 6 metros de profundidade, é possível perceber que as zonas com maiores valores de N_{spt} avançam da região sudoeste em direção ao centro e noroeste da zona urbana, indicando uma melhora na resistência do solo nas camadas analisadas. A Tabela 9 mostra que, na Figura 39, correspondente ao sexto metro de profundidade, houve um aumento significativo na resistência do N_{spt} , atingindo valores até 15. Na Figura 37, que representa a profundidade de 4 metros, a resistência era de

11,02%, enquanto no sexto metro, representado pela Figura 39, esse valor aumentou para 59,25%.



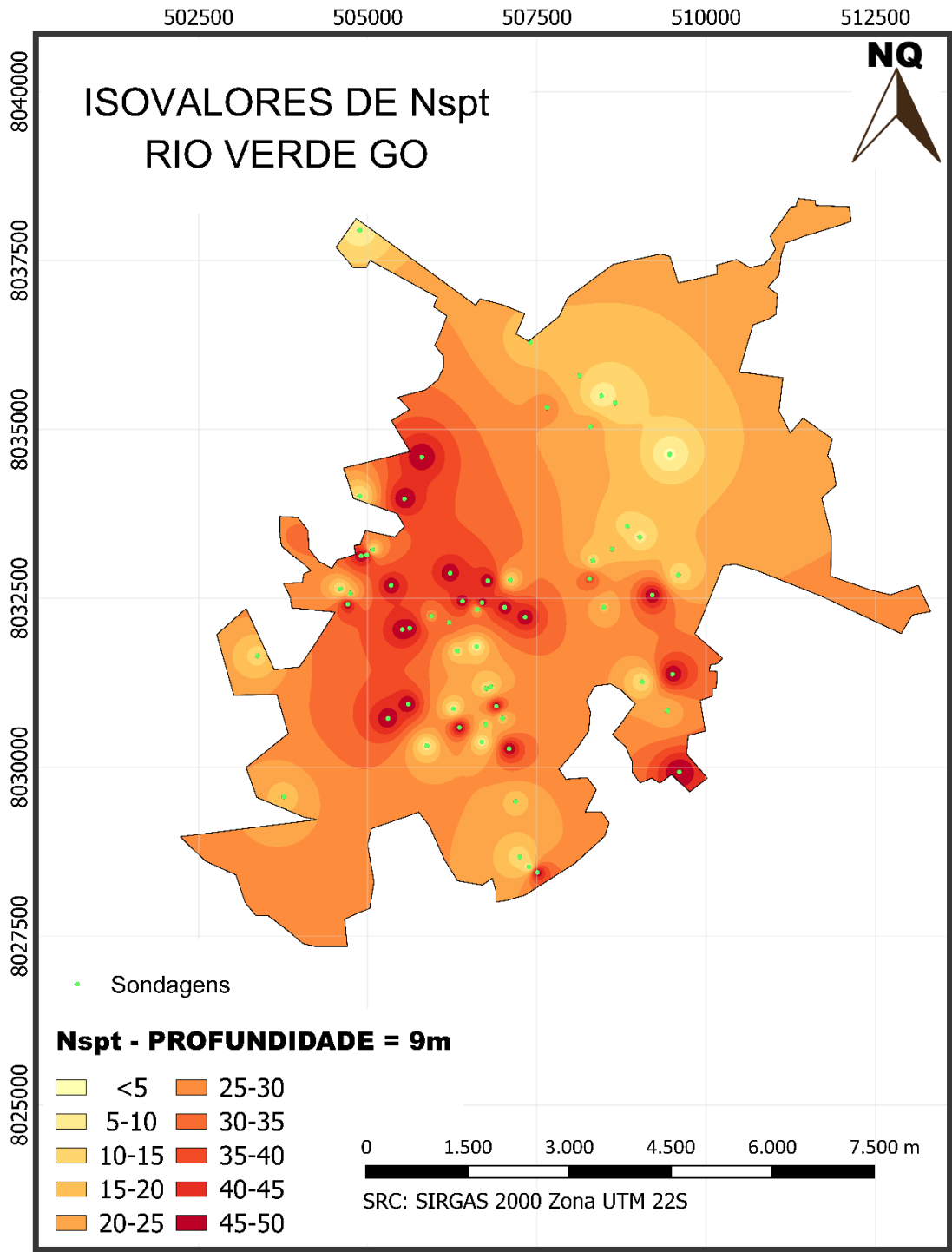
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 41 - Carta de isovalores de Nspt: 8 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 42 - Carta de isovalores de N_{spt} : 9 metros de profundidade

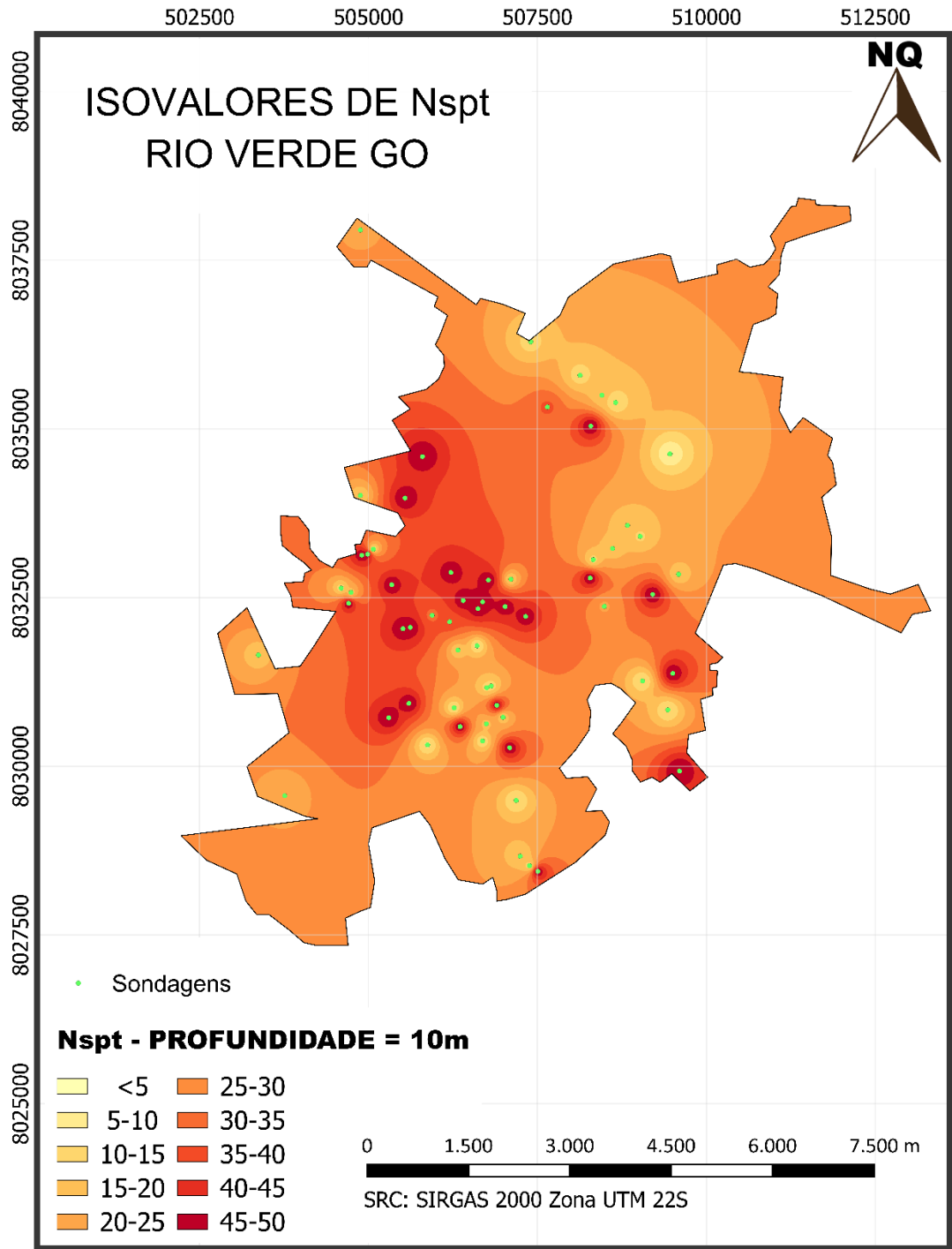


Fonte: Autor próprio (2024)

As Figuras 40, 41 e 42, que apresentam as cartas de isovalores nas profundidades de 7, 8 e 9 metros, respectivamente, evidenciam uma melhoria na resistência do solo a partir do centro da área urbana. Observa-se que, enquanto o centro apresenta valores mais altos de N_{spt} , as áreas sul e norte do município ainda mostram valores inferiores.

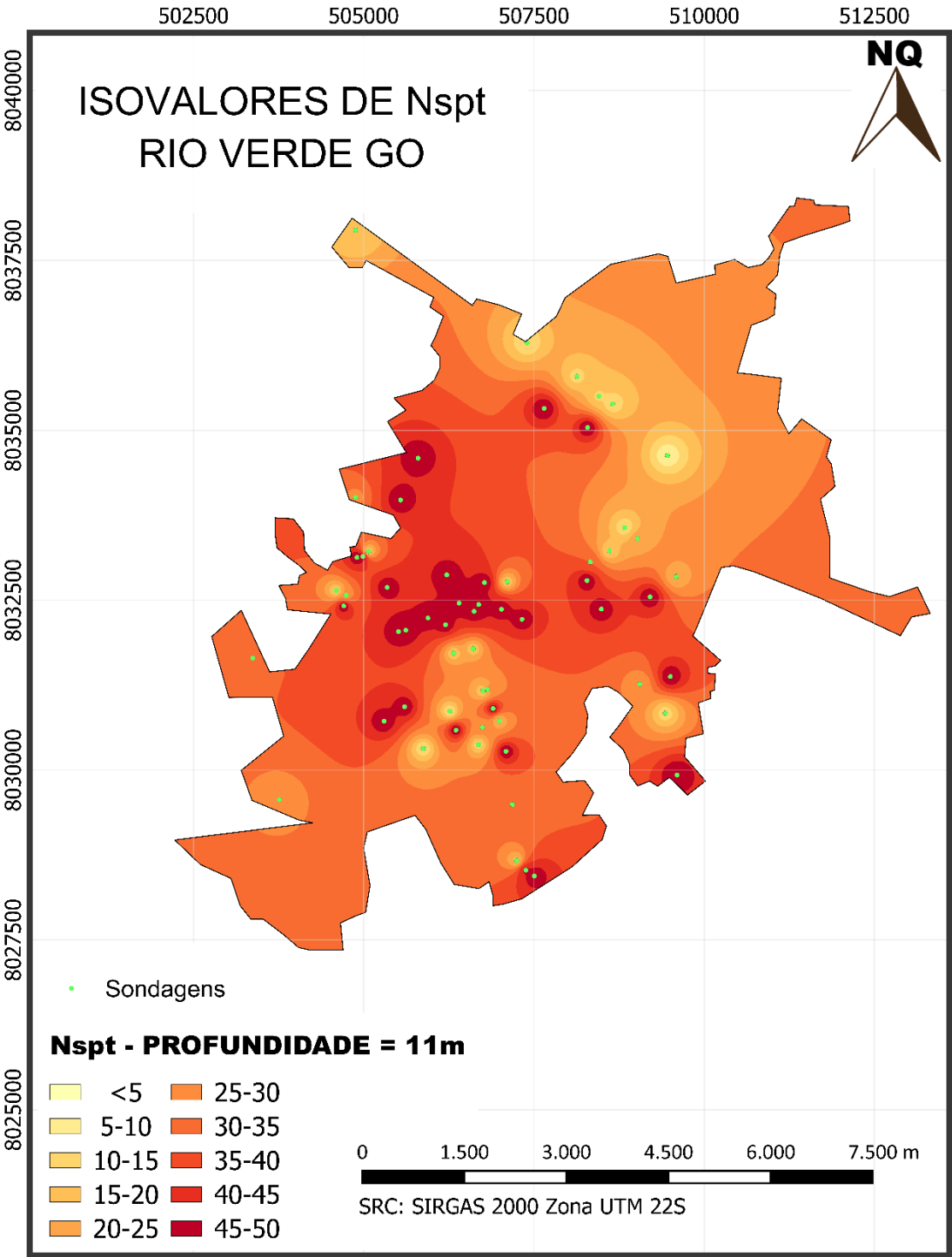
Na Tabela 10, é possível verificar que a Figura 42, referente ao nono metro de profundidade, demonstra um aumento significativo no valor de N_{SPT} , alcançando até 30. Esse aumento é notável quando comparado à Figura 40, que mostra o sétimo metro, onde o valor era de 4,31%. Assim, o percentual de áreas com N_{SPT} até 30 aumentou de 4,31% no sétimo metro para 29% no nono metro.

Figura 43 - Carta de isovalores de N_{spt} : 10 metros de profundidade

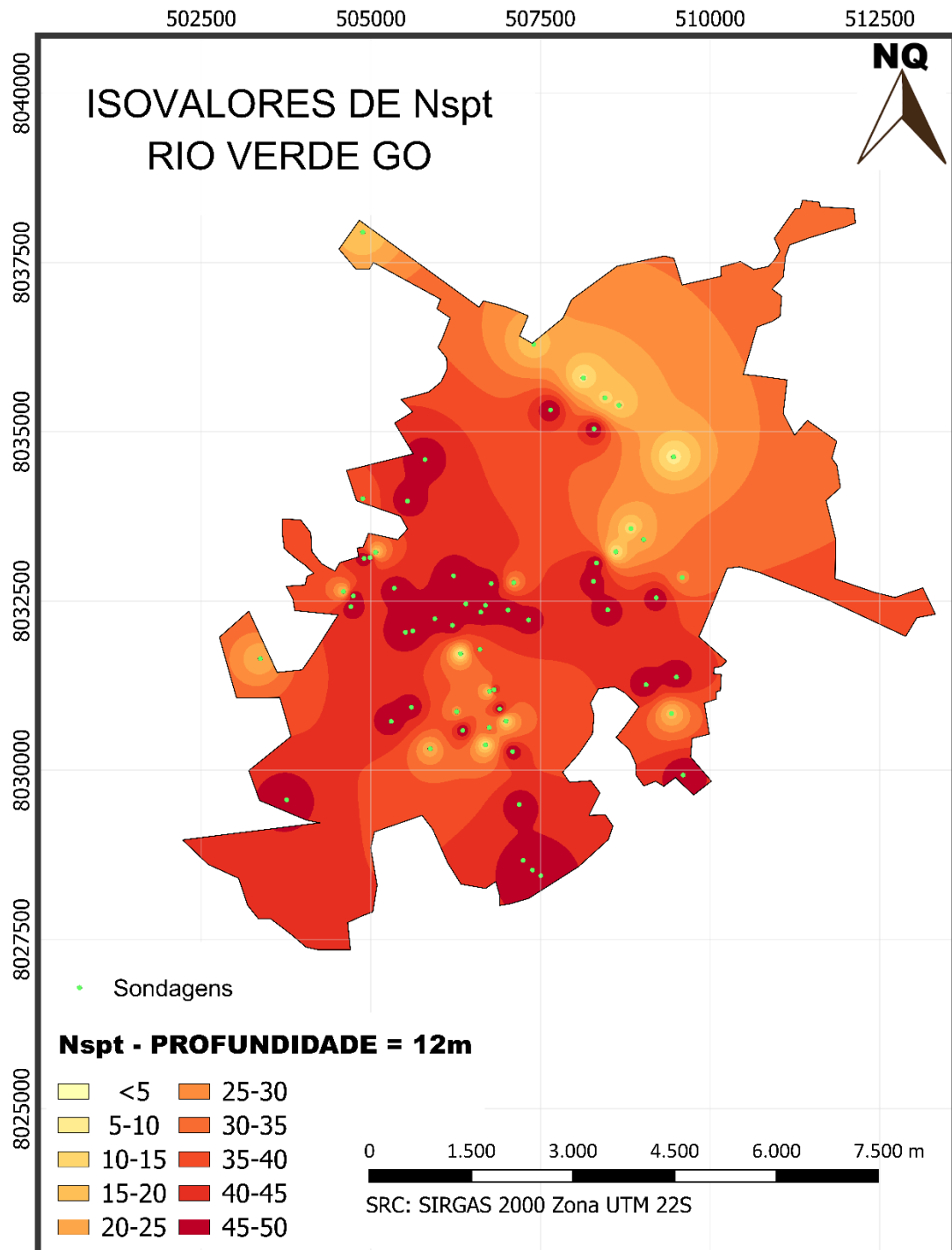


Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 44 - Carta de isovalores de Nspt: 11 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

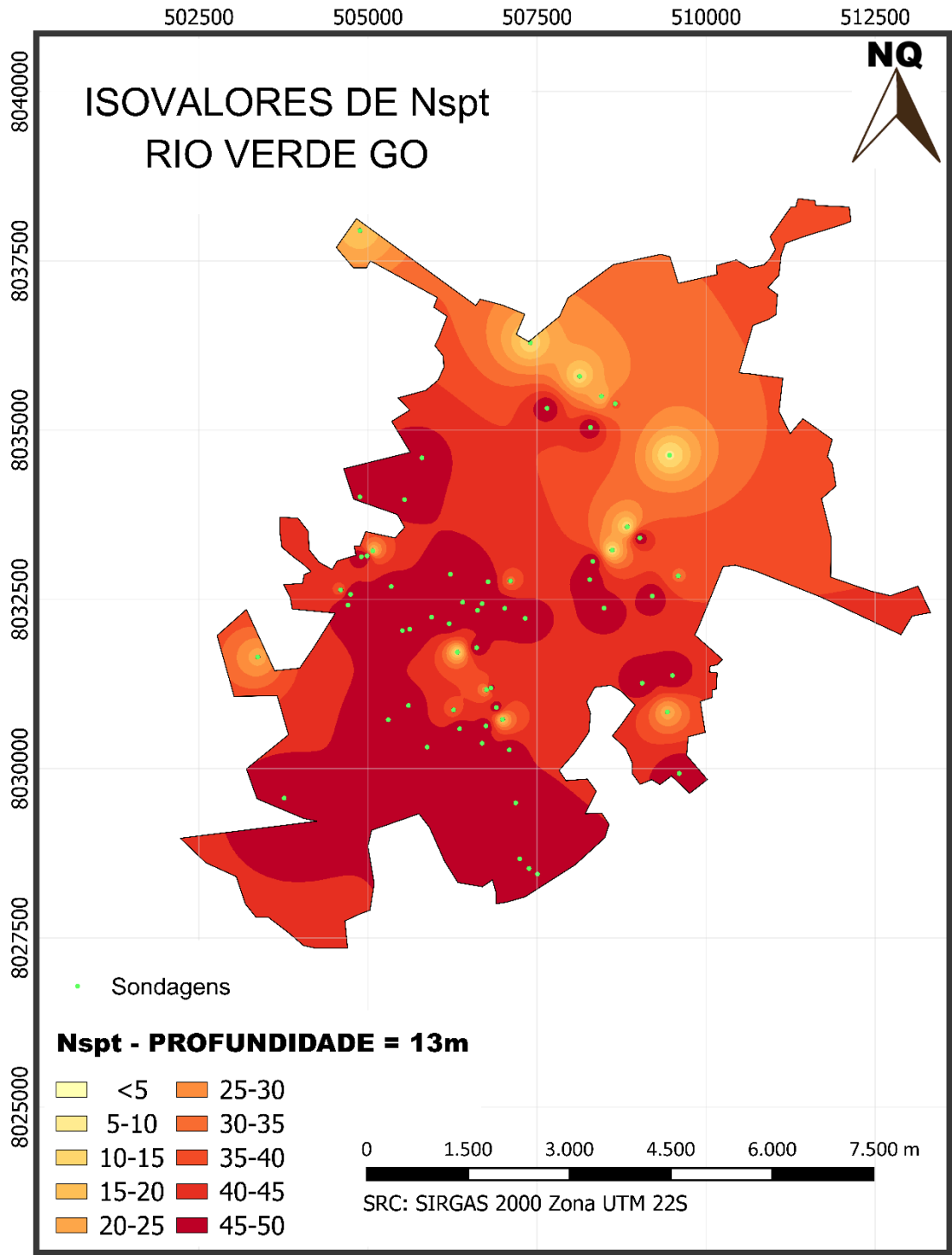
Figura 45 - Carta de isovalores de N_{spt} : 12 metros de profundidade

Fonte: Autor próprio (2024)

As Figuras 43, 44 e 45 mostram as cartas de isovalores de N_{spt} para profundidades de 10, 11 e 12 metros, respectivamente. Nessas figuras, começam a surgir áreas com altos valores de N_{spt} , evidenciados pelas tonalidades em vermelho escuro. Notavelmente, a Figura 45, correspondente à profundidade de 12 metros, revela que os valores de N_{spt} entre 45 e 50 representam 10,18% da área analisada.

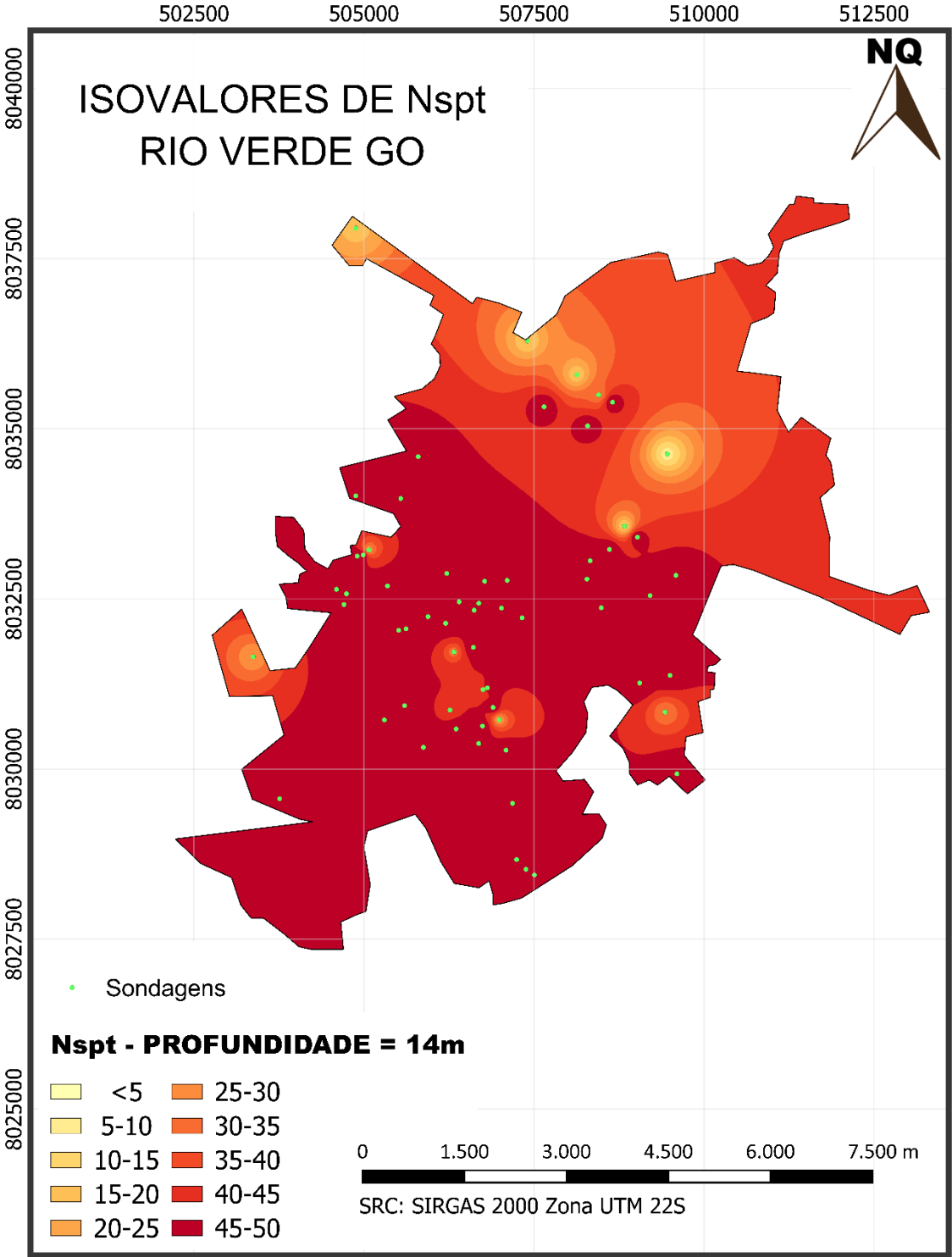
A análise dessas três cartas indica que a região com os menores valores de N_{SPT} continua sendo a área Norte do município. Além disso, a Tabela 10 aponta que, ao comparar as profundidades de 10 metros e 12 metros, houve uma redução de 15,02% no intervalo de N_{SPT} entre 20 e 25.

Figura 46 - Carta de isovalores de Nspt: 13 metros de profundidade

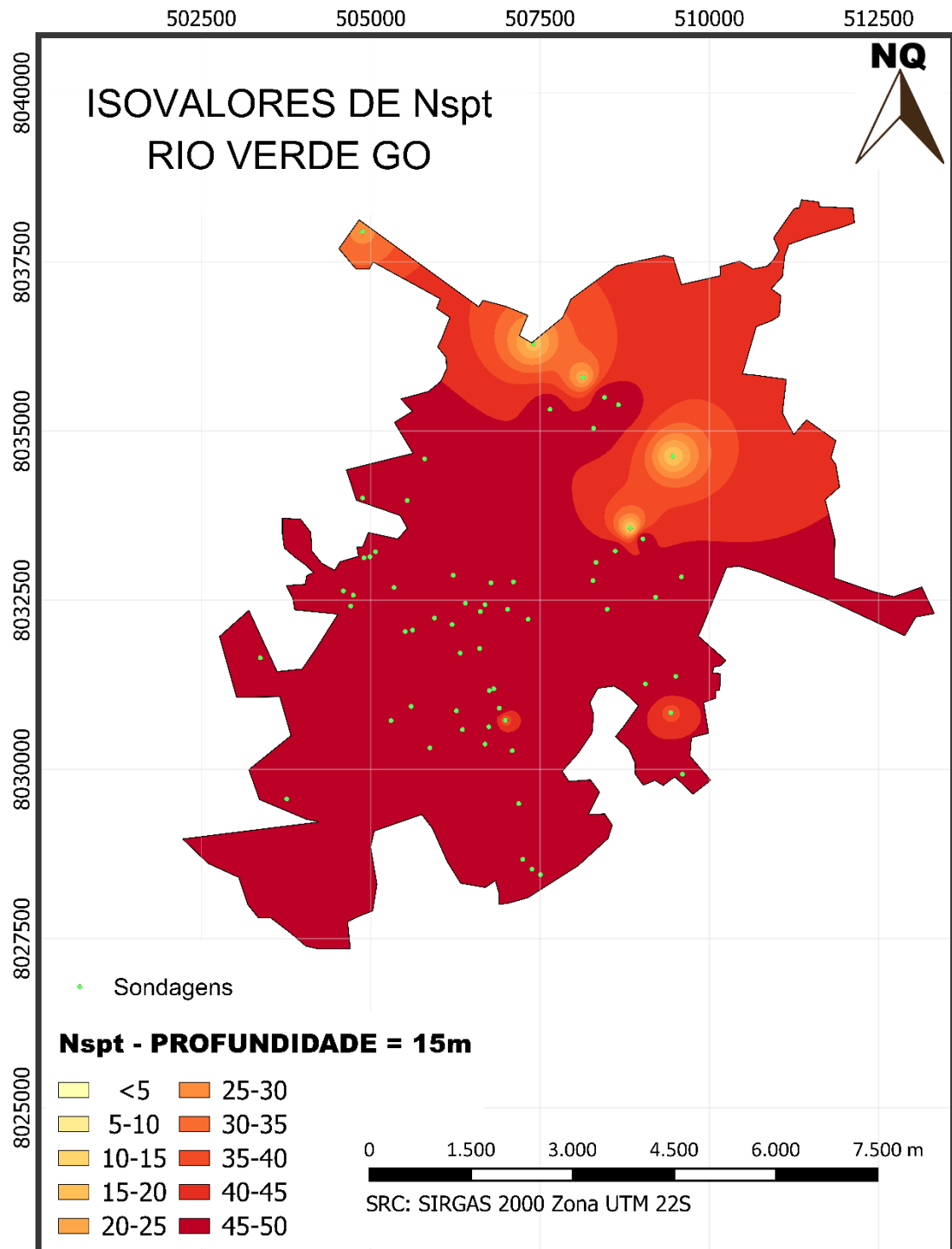


Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 47 - Carta de isovalores de Nspt: 14 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

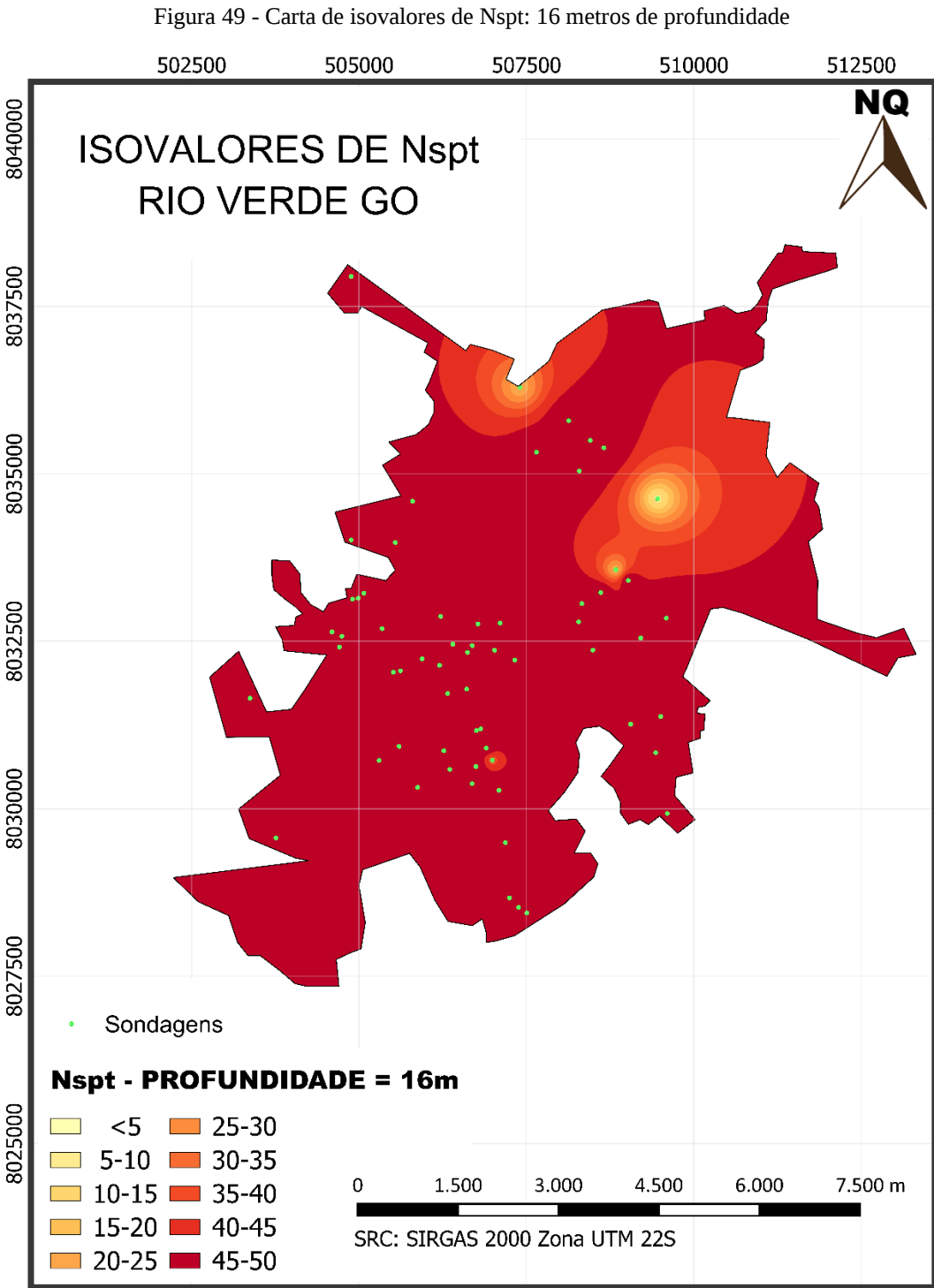
Figura 48 - Carta de isovalores de N_{spt} : 15 metros de profundidade

Fonte: Autor próprio (2024)

Conforme mostrado nas Figuras 46, 47 e 48, que representam as cartas de isovalores para profundidades de 13, 14 e 15 metros, observa-se um aumento significativo nos valores de N_{spt} à medida que a profundidade aumenta. A Figura 46, correspondente a 13 metros de profundidade, revela que 31,83% dos valores de N_{spt} estão na faixa entre 45 e 50. Em contraste,

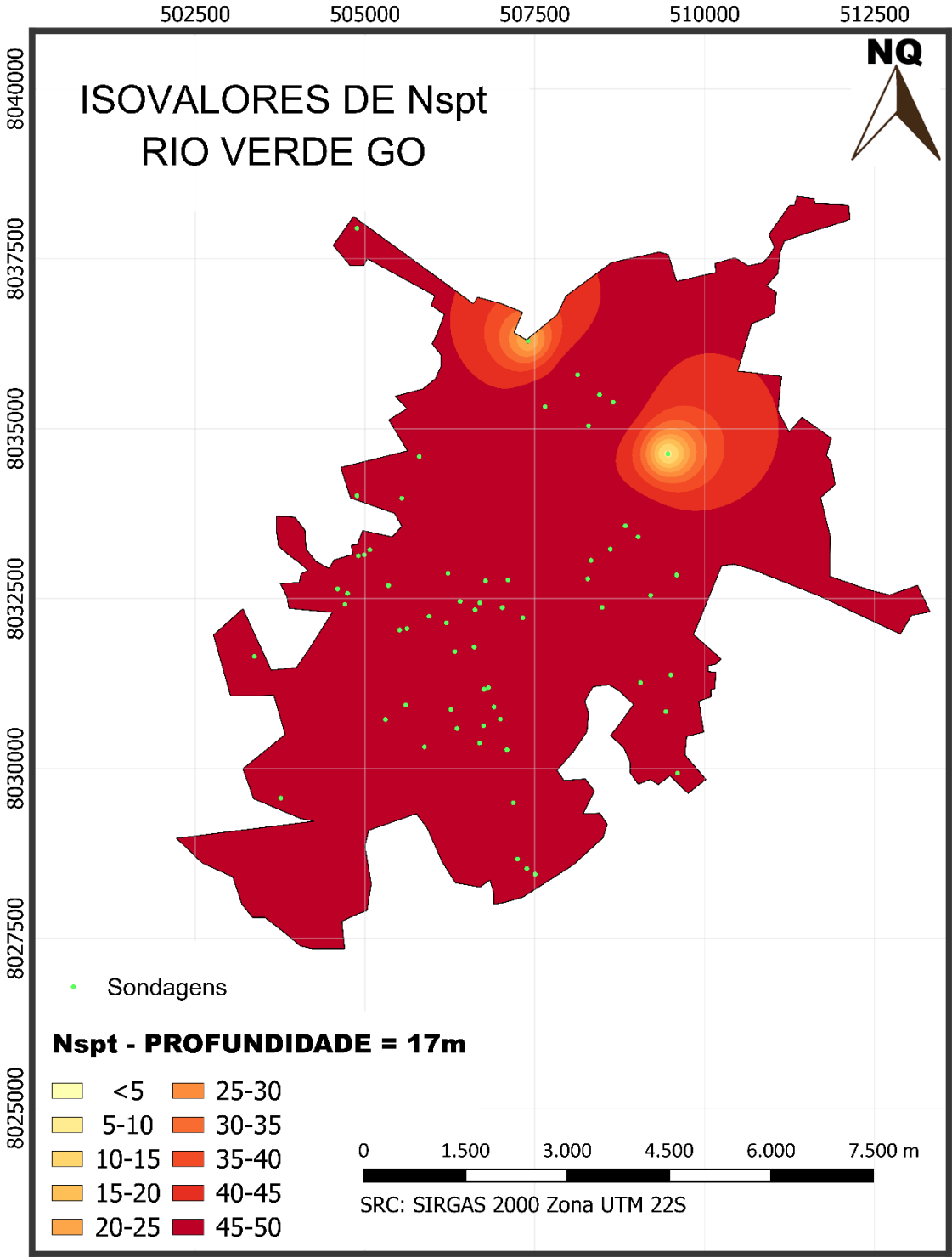
a Figura 48, que ilustra a profundidade de 15 metros, mostra que esse valor aumenta para 69,68%, o que representa um incremento de 37,85%.

Além disso, nota-se que a expansão dos altos valores de N_{SPT} começou na região sul e sudoeste, espalhando-se gradualmente em direção ao norte. Como resultado, apenas a região norte ainda apresenta valores de N_{SPT} na faixa de 15 a 45.



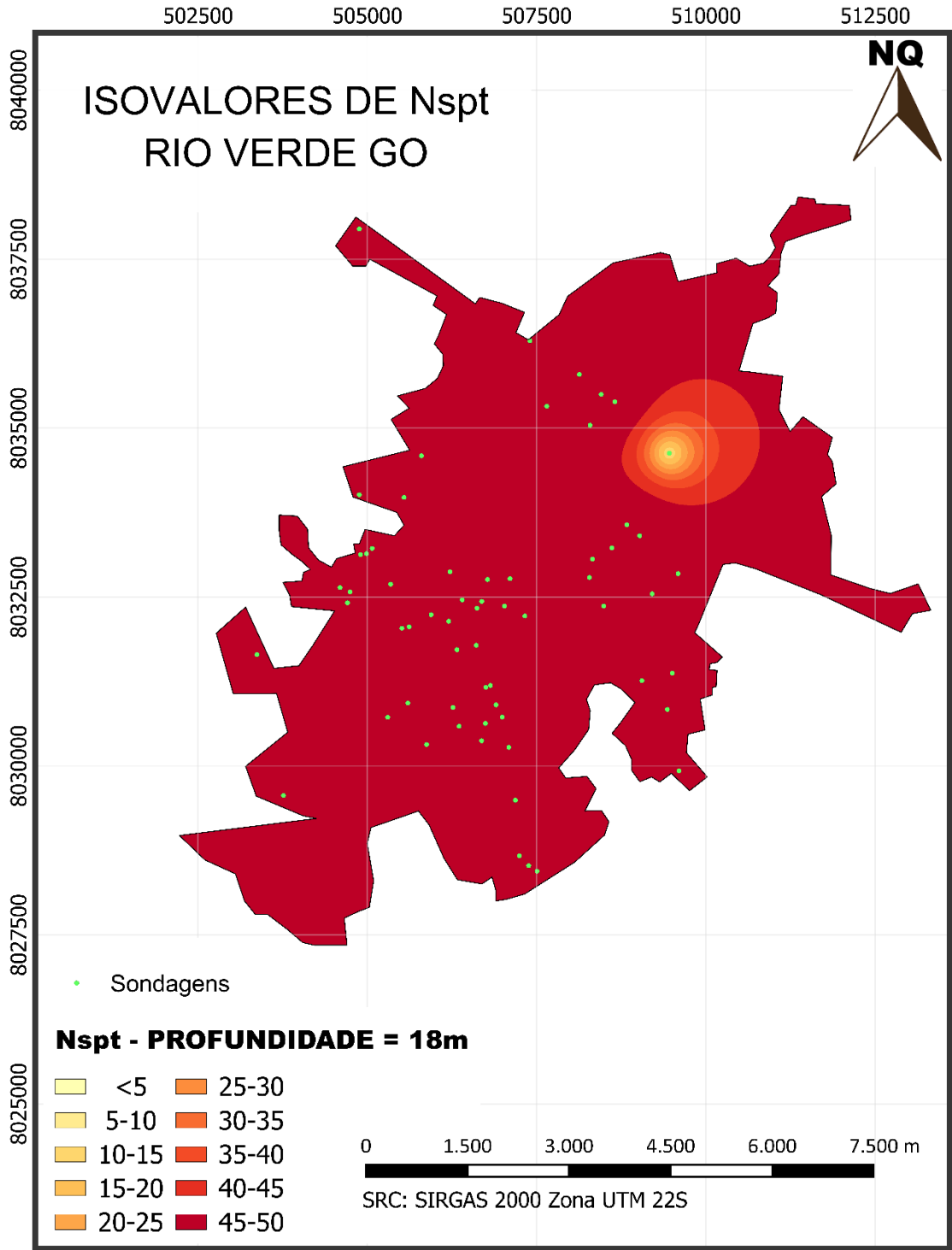
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 50 - Carta de isovalores de Nspt: 17 metros de profundidade



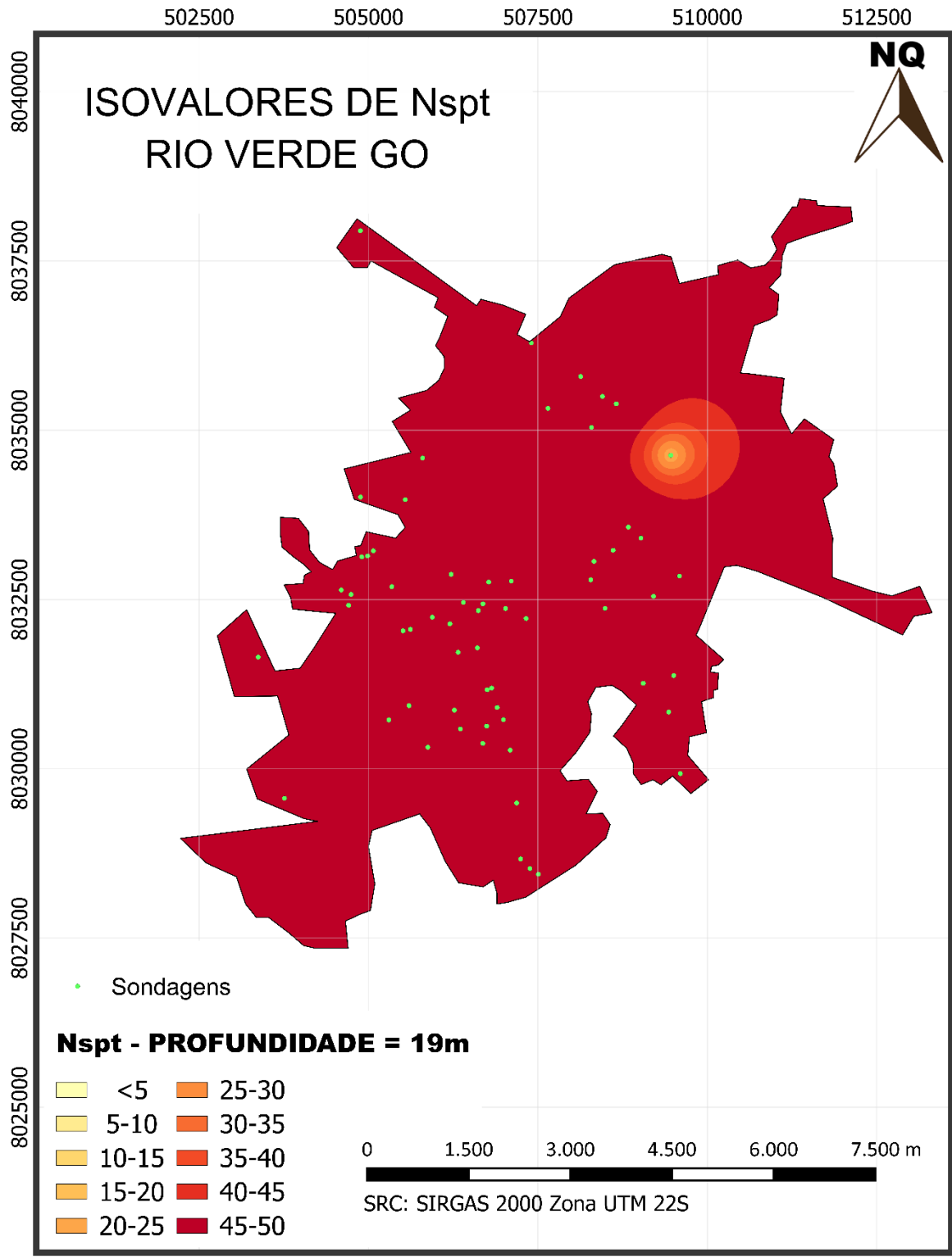
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 51 - Carta de isovalores de Nspt: 18 metros de profundidade



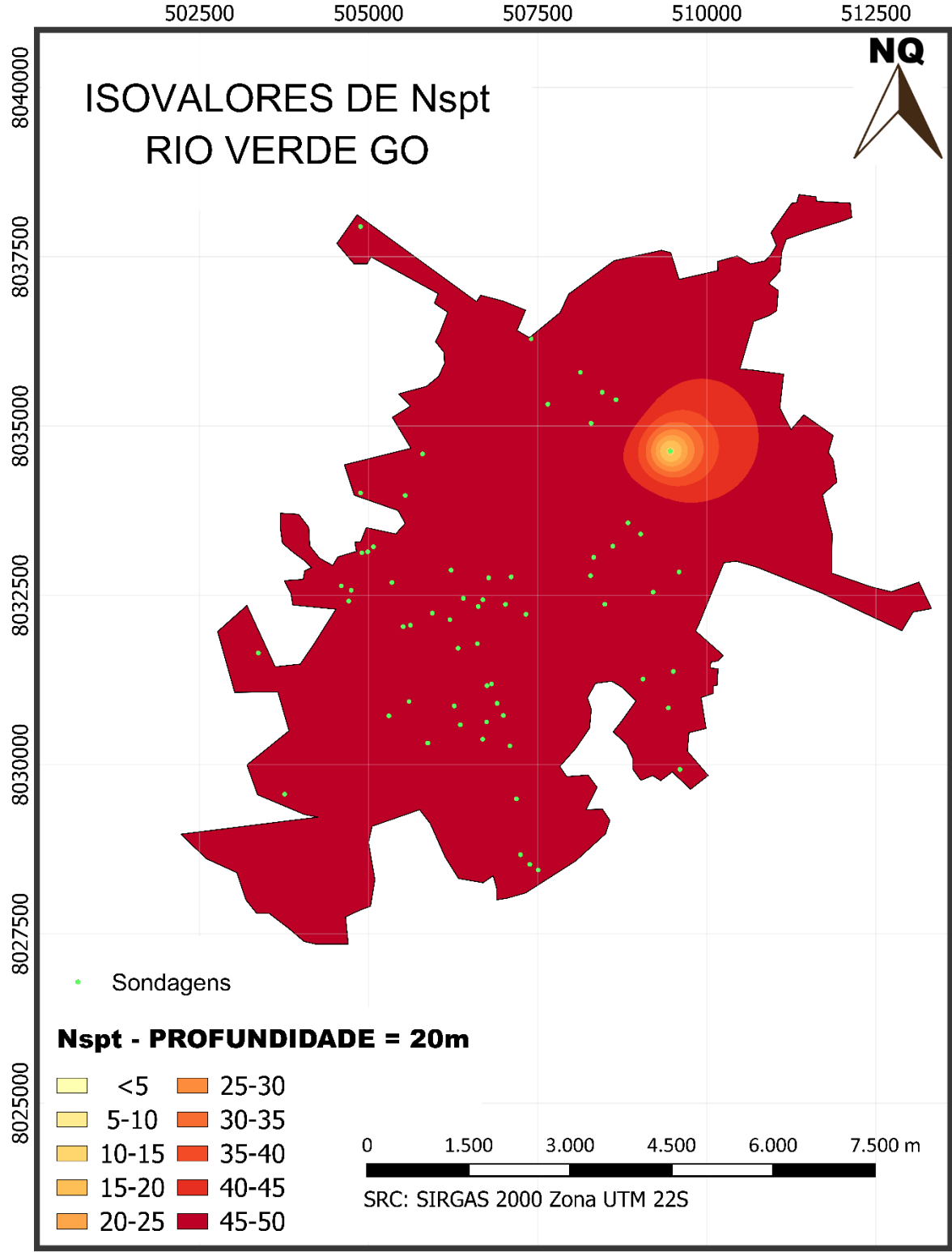
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 52 - Carta de isovalores de Nspt: 19 metros de profundidade



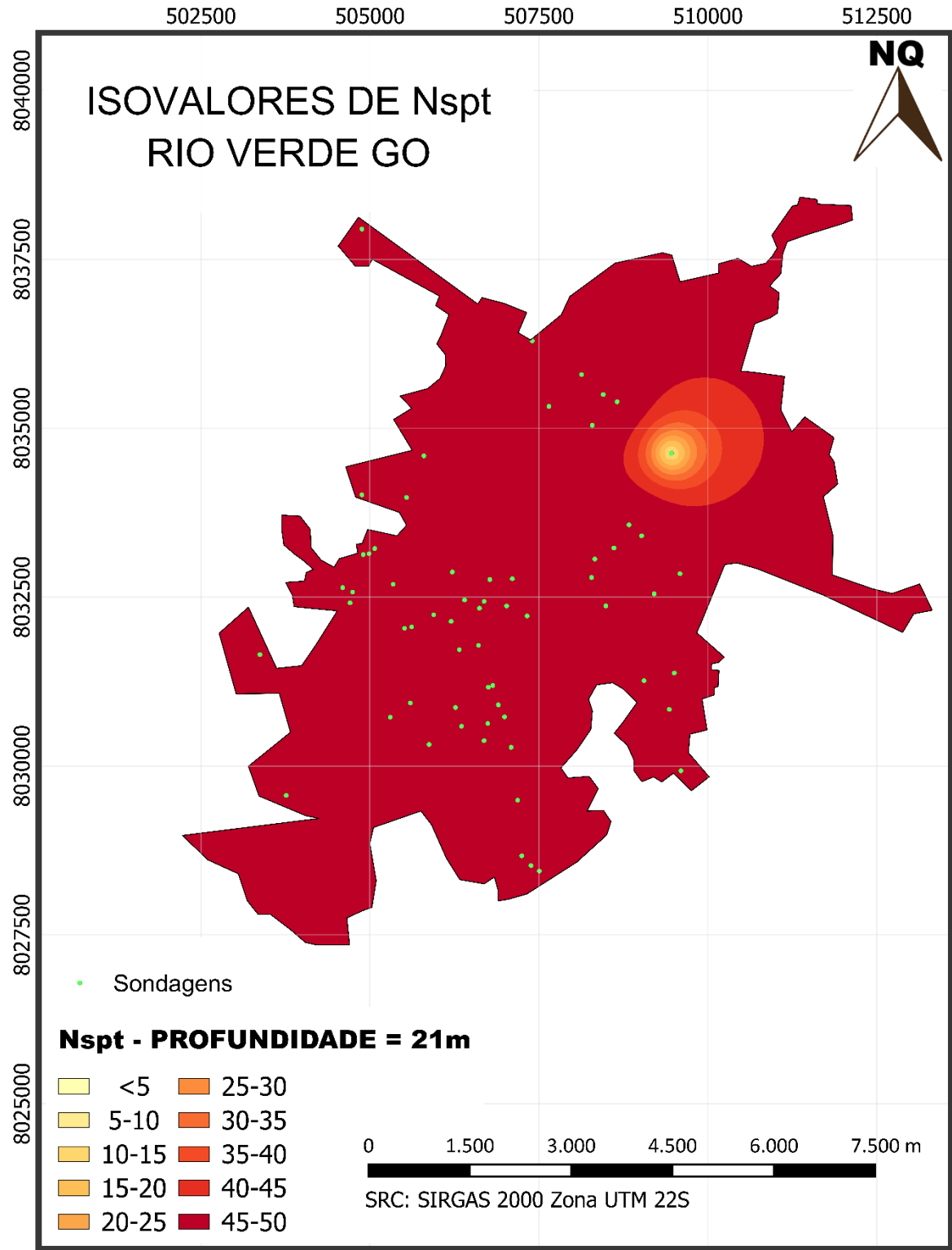
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 53 - Carta de isovalores de Nspt: 20 metros de profundidade

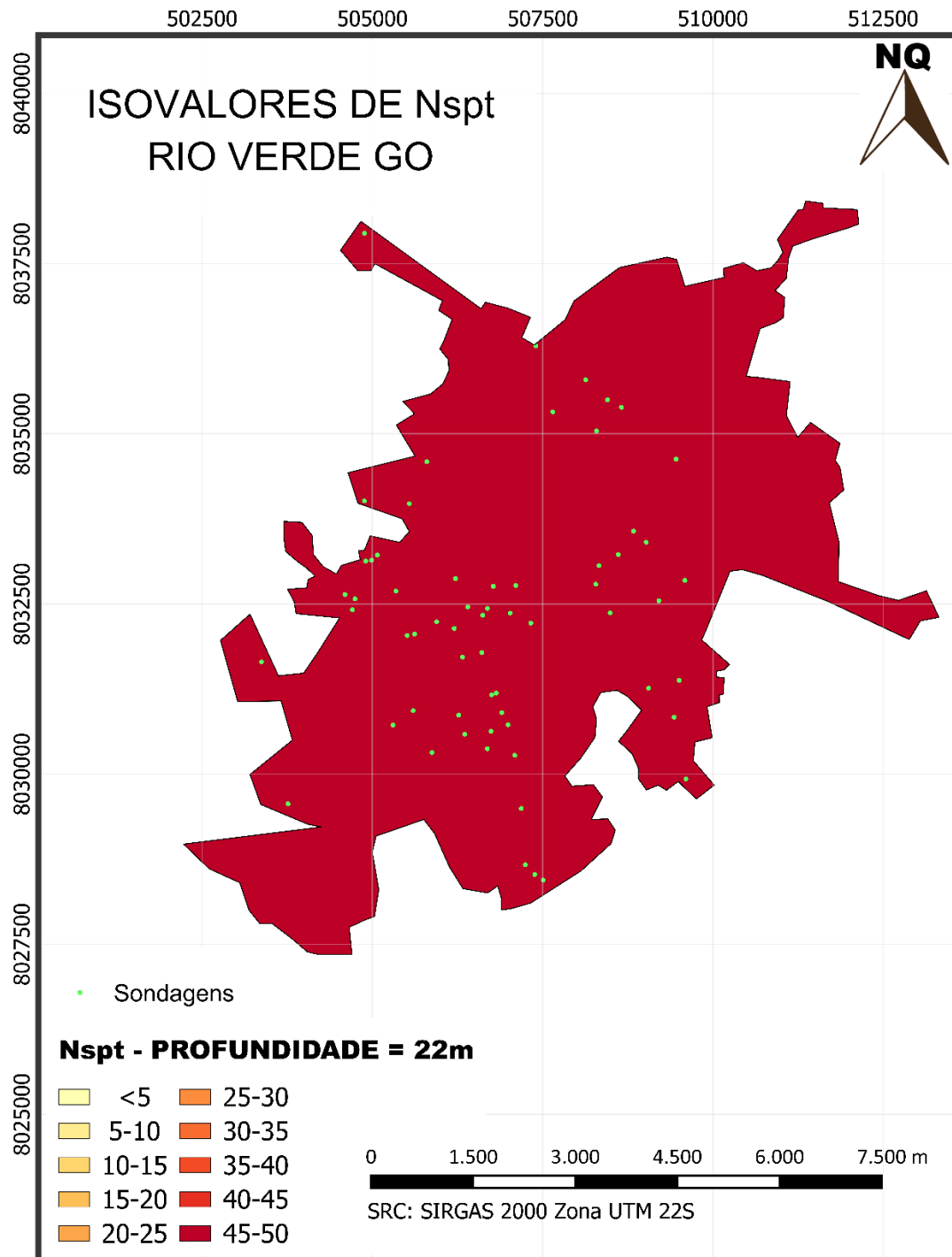


Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 54 - Carta de isovalores de Nspt: 21 metros de profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 55 - Carta de isovalores de N_{spt} : 22 metros de profundidade

Fonte: Autor próprio (2024)

As Figuras 49 e 50 apresentam as cartas de isovalores de N_{spt} para 16 e 17 metros, que foram as últimas a possuir pontos diferenciados. Em contraste, as Figuras 51, 52, 53 e 54, que correspondem às cartas de isovalores de N_{spt} para 18, 19, 20 e 21 metros de profundidade, mostram valores idênticos, até que se chega à Figura 55, que representa a profundidade de 22 metros, onde se atinge o impenetrável.

De acordo com as Tabelas 11 e 12, é possível observar que na Figura 49, correspondente ao 16° metro, 82,64% dos valores de N_{SPT} estão na faixa de 45 a 50. Na Figura 54, que representa o 21° metro, esse percentual sobe para 96,56%, refletindo um aumento contínuo que se repetiu em alguns metros anteriores.

De modo geral, conforme demonstrado nas Tabelas 9, 10, 11 e 12, os solos de menor resistência (representados pela coloração bege claro) diminuem sua participação nas camadas mais profundas até desaparecerem. Assim, à medida que a profundidade aumenta, o percentual de área com altos valores de N_{SPT} também cresce.

Tabela 9 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 1 a 6 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)					
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
<5	99,90%	99,10%	77,70%	4,06%	0,62%	0,44%
5 – 10	0,10%	0,90%	22,20%	82,30%	48,95%	19,96%
10 – 15	-	-	0,10%	11,02%	43,61%	59,25%
15 – 20	-	-	-	1,93%	5,15%	14,23%
20 – 25	-	-	-	0,40%	1,03%	3,40%
25 – 30	-	-	-	0,13%	0,40%	1,36%
30 – 35	-	-	-	0,08%	0,14%	0,70%
35 – 40	-	-	-	0,05%	0,08%	0,34%
40 – 45	-	-	-	0,03%	0,02%	0,20%
45 – 50	-	-	-	-	-	0,12%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 34	Figura 35	Figura 36	Figura 37	Figura 38	Figura 39

Fonte: Autor próprio (2024)

Tabela 10 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 7 a 12 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)					
	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m
<5	0,20%	0,13%	0,06%	-	-	-
5 – 10	7,08%	3,02%	0,92%	0,21%	0,16%	0,11%
10 – 15	28,74%	14,55%	4,03%	1,50%	0,98%	0,65%
15 – 20	40,81%	29,14%	14,43%	6,84%	3,50%	2,33%
20 – 25	15,13%	27,70%	28,08%	20,88%	9,08%	5,86%
25 – 30	4,31%	12,65%	29,00%	36,82%	21,15%	12,12%
30 – 35	1,91%	7,90%	11,18%	16,90%	32,43%	17,68%
35 – 40	0,93%	2,71%	7,17%	9,70%	19,31%	21,33%
40 – 45	0,55%	1,50%	3,51%	4,78%	8,92%	29,74%
45 – 50	0,34%	0,70%	1,62%	2,37%	4,47%	10,18%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 40	Figura 41	Figura 42	Figura 43	Figura 44	Figura 45

Fonte: Autor próprio (2024)

Tabela 11 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 13 a 18 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)					
	13 m	14 m	15 m	16 m	17 m	18 m
<5	-	-	-	-	-	-
5 – 10	0,03%	0,04%	-	0,02%	0,02%	-
10 – 15	0,40%	0,14%	-	0,11%	0,11%	0,04%
15 – 20	1,10%	0,62%	0,20%	0,16%	0,15%	0,13%
20 – 25	2,46%	1,10%	0,50%	0,33%	0,30%	0,18%
25 – 30	4,55%	2,20%	1,08%	0,60%	0,50%	0,27%
30 – 35	14,30%	4,45%	2,48%	1,15%	0,90%	0,45%
35 – 40	17,43%	15,27%	5,43%	2,94%	1,86%	0,94%
40 – 45	27,90%	20,08%	20,63%	12,05%	7,30%	3,30%
45 – 50	31,83%	56,10%	69,68%	82,64%	88,86%	94,69%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 46	Figura 47	Figura 48	Figura 49	Figura 50	Figura 51

Fonte: Autor próprio (2024)

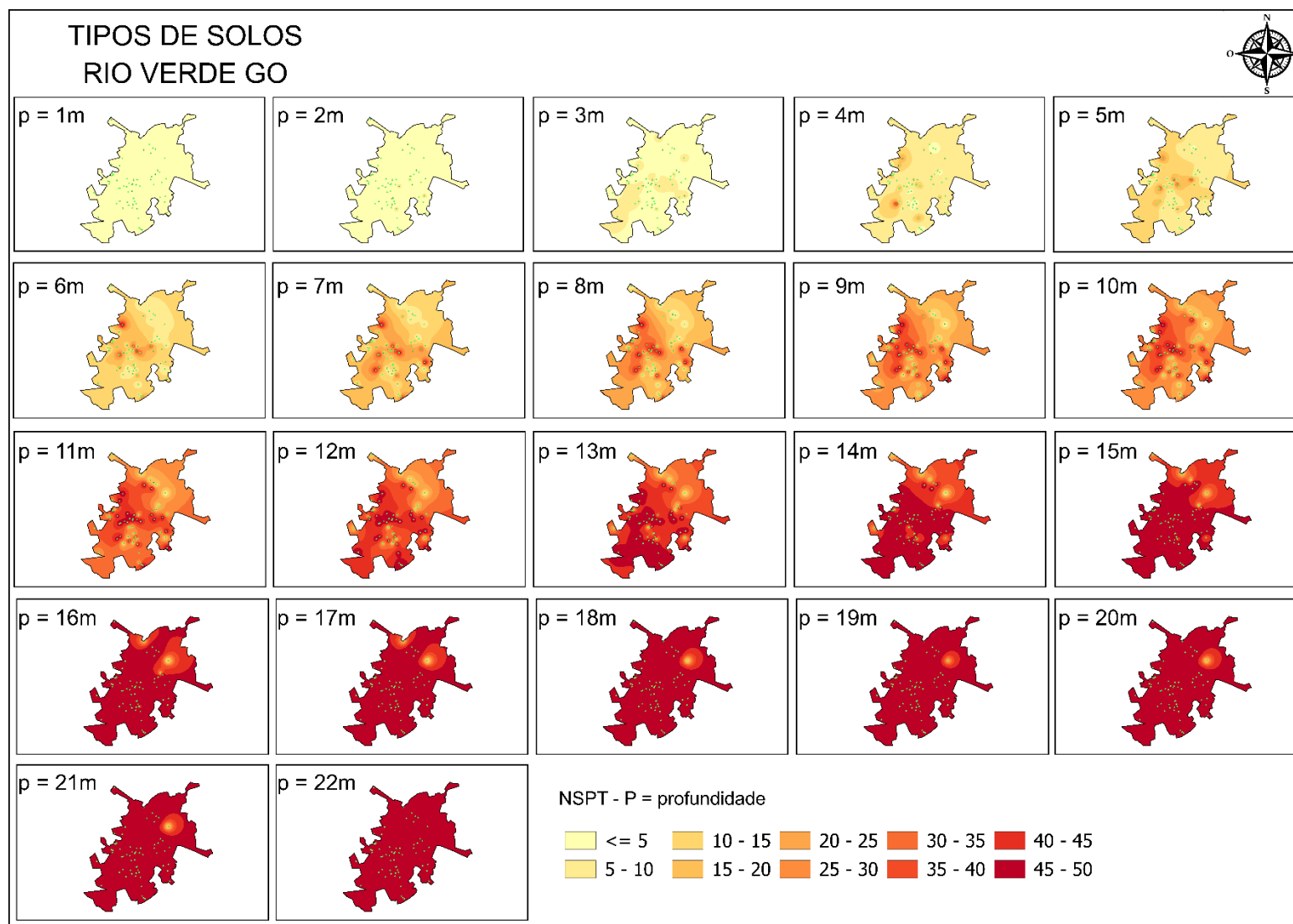
Tabela 12 - Frequência de área para as faixas de N_{spt} 19 a 22 metros

Tipos de Solos	Percentual de área (%)			
	19 m	20 m	21 m	22 m
<5	-	-	-	-
5 – 10	-	-	-	-
10 – 15	-	-	-	-
15 – 20	-	-	-	-
20 – 25	0,06%	0,06%	0,06%	-
25 – 30	0,20%	0,20%	0,20%	-
30 – 35	0,35%	0,35%	0,35%	-
35 – 40	0,66%	0,66%	0,66%	-
40 – 45	2,17%	2,17%	2,17%	-
45 – 50	96,56%	96,56%	96,56%	100,00%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 52	Figura 53	Figura 54	Figura 55

Fonte: Autor próprio (2024)

Diante do exposto, observa-se uma tendência de crescimento das áreas com elevados valores de N_{spt} à medida que a profundidade aumenta. Essa tendência continua até a Figura 55, correspondente à profundidade de 22 metros, onde se atinge o impenetrável à percussão. Isso é claramente evidenciado na Figura 56.

Figura 56 - Resultado das interpolações dos Nspt em cada profundidade



Fonte: Autor próprio (2024)

Desse modo, observa-se que o subsolo do município de Rio Verde apresenta uma diminuição dos valores de N_{SPT} na região norte, que contém solos moles e, conseqüentemente, de menor resistência. Conforme indicado nas Tabelas 9, 10, 11 e 12, nos primeiros metros, os valores de N_{SPT} estão concentrados em até 15 golpes. No entanto, a partir dos 12 metros de profundidade, esses valores tornam-se muito baixos e, eventualmente, deixam de existir.

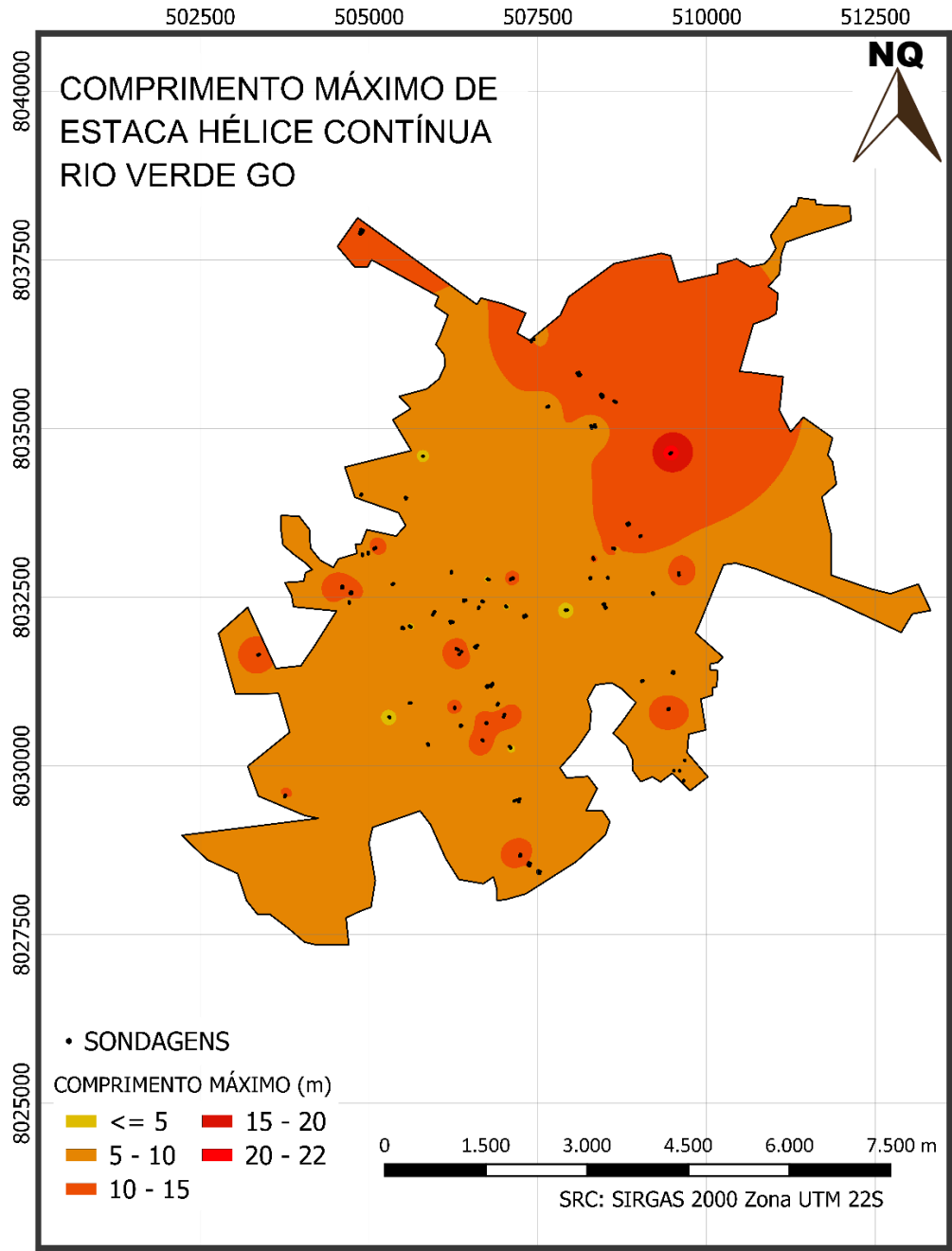
5.2.3 Cartas de comprimento máximo de estacas

Conforme explicado na seção 5.2.3.4, as cartas de comprimento máximo de estacas foram elaboradas com base nas recomendações de Cintra e Aoki (2010). Essas cartas foram feitas para os tipos de fundações mais comuns, a saber: estacas hélice contínua, estacas pré-moldadas e estacas raiz. Para a elaboração, considerou-se a profundidade em que o valor de N_{SPT} é registrado para cada tipo de estaca, seguindo o limite superior indicado na Tabela 2 (presente na seção 3.1.5).

As cartas apresentadas são as seguintes: inicialmente, a Figura 57 mostra as estacas hélice contínua, seguida pelas Figuras 58 e 59, que representam os resultados para as estacas pré-moldadas, e, por fim, a Figura 60 exibe as estacas raiz. Nessas cartas, observa-se que as regiões com tonalidades amarelas, que começam com um alaranjado claro, tendem a apresentar estacas mais curtas (até 10 metros de comprimento). Em contraste, as áreas com alaranjado escuro e vermelho indicam estacas de tamanhos intermediários e longos (variando de 10 a 25 metros de comprimento).

Assim como nas análises anteriores, as porcentagens de área por faixa de comprimento máximo de estaca estão detalhadas na Tabela 13, que segue a apresentação das cartas.

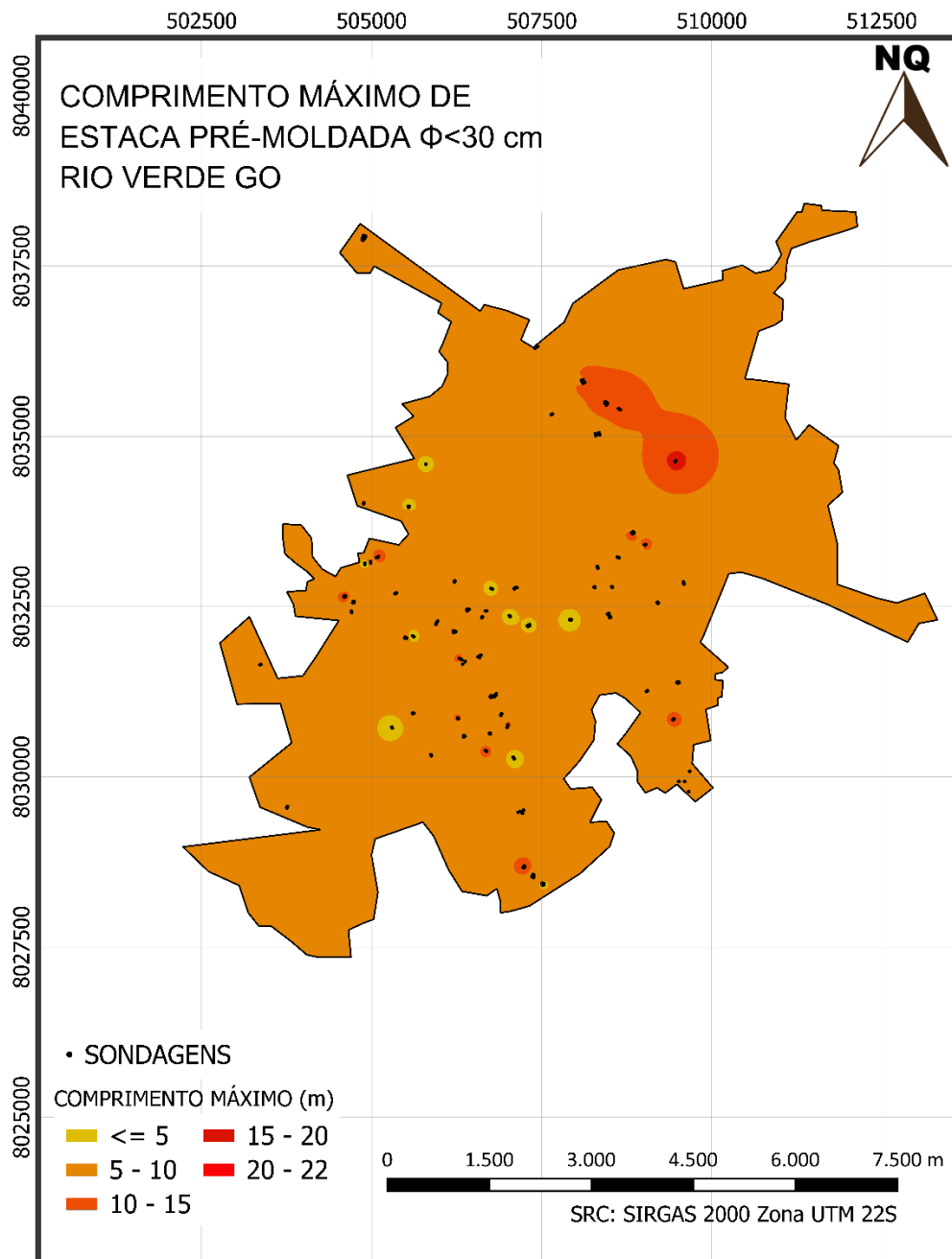
Figura 57 - Carta de comprimento máximo de estaca hélice contínua



Fonte: Autor próprio (2024)

A Figura 57 mostra que o comprimento máximo previsto para as estacas hélice contínua na zona urbana de Rio Verde é maior na região norte, especificamente no bairro Martins e no Setor Pauzanes, estendendo-se até o residencial Nilson Veloso. Conforme indicado na Tabela 13, 73,32% da área de estudo é destinada à execução de estacas hélice contínua com até 10 metros de comprimento, enquanto 26,13% da área requer estacas com comprimento entre 10 e 15 metros, que corresponde às regiões mencionadas anteriormente.

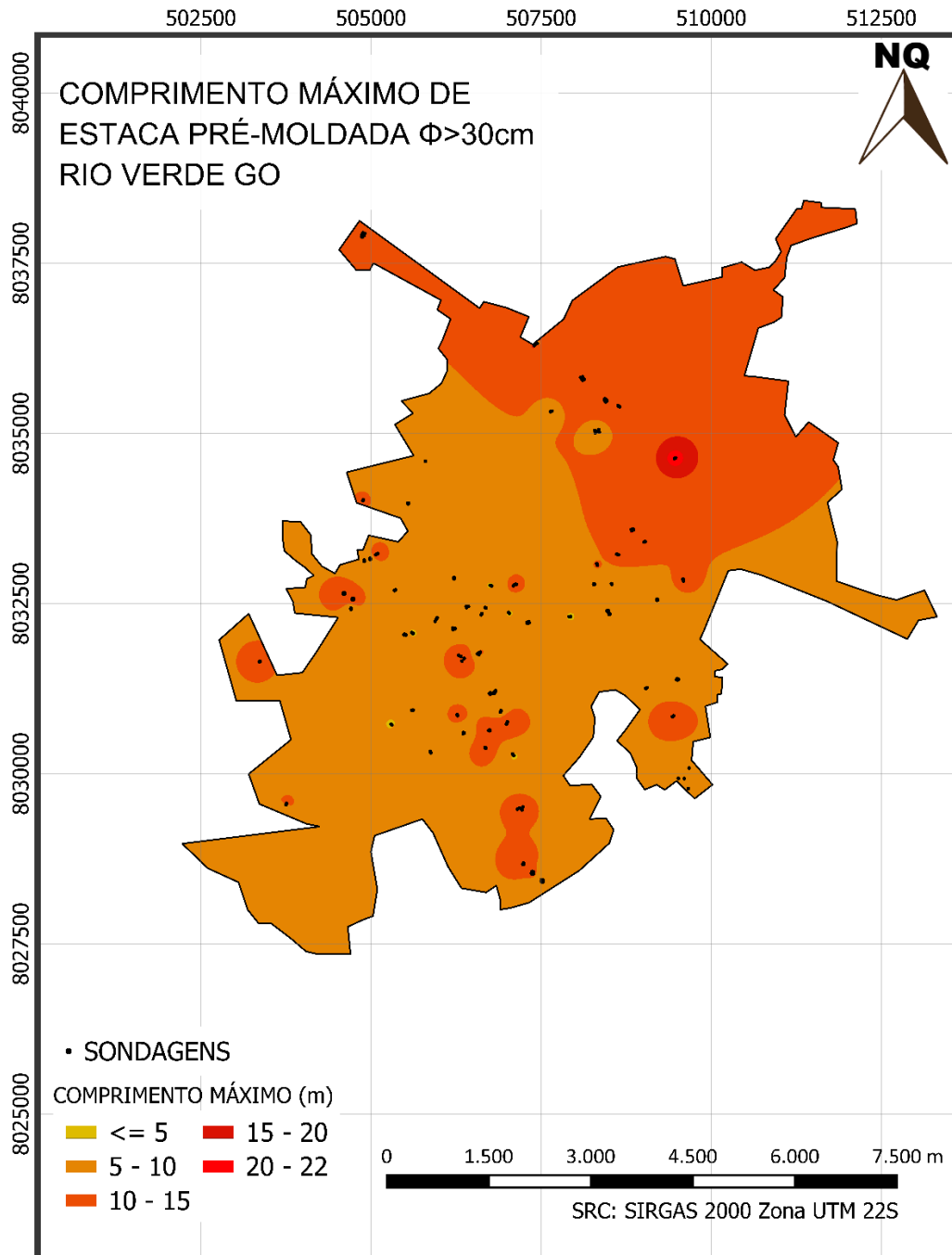
Figura 58 - Carta de comprimento máximo de estaca pré-moldada ($\Phi < 30$ cm)



Fonte: Autor próprio (2024)

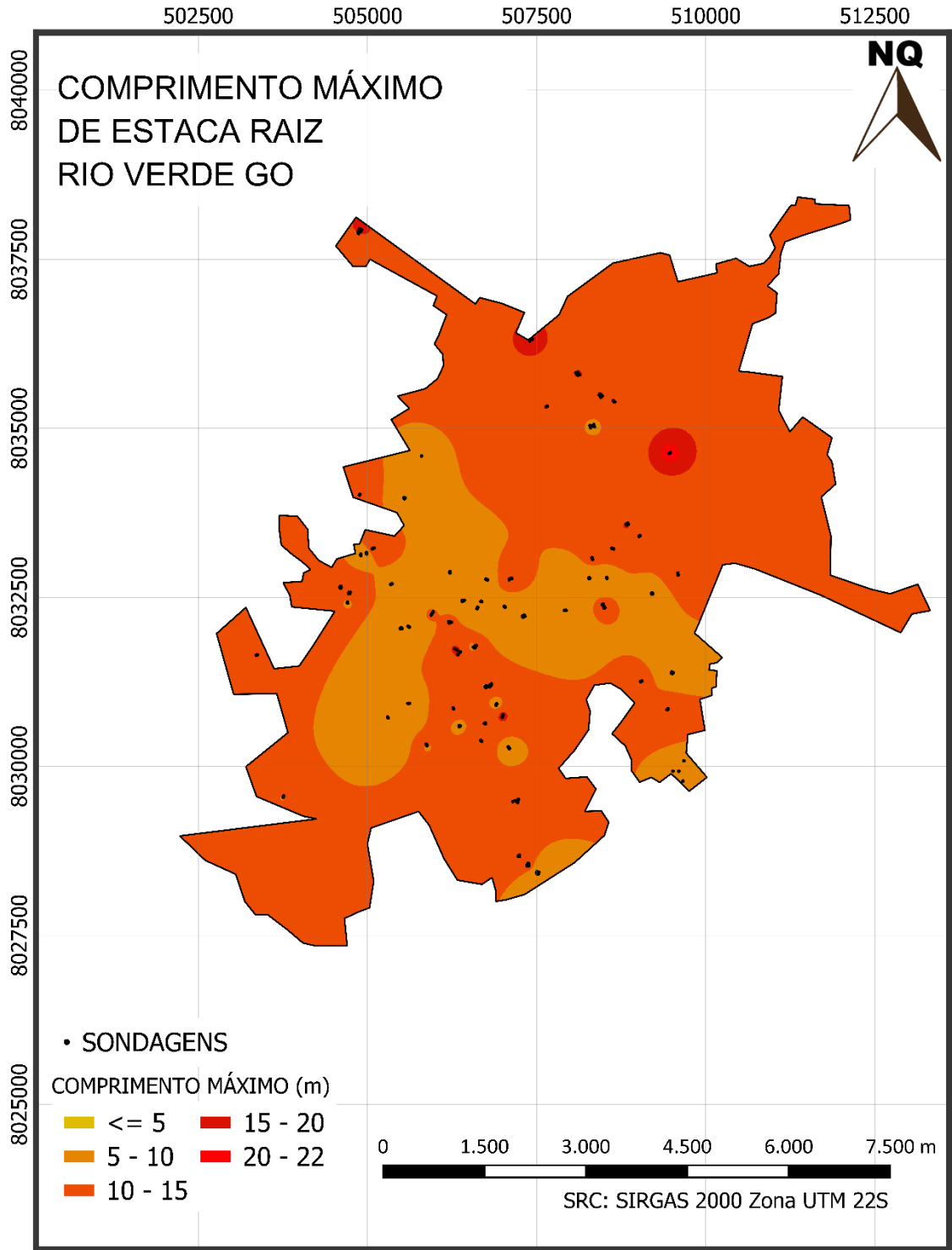
A Figura 58, que apresenta a carta para estacas pré-moldadas com diâmetro inferior a 30 cm, indica uma redução nos comprimentos das estacas para até 15 metros em comparação com as estacas hélice contínua. Isso ocorre porque o assentamento dessa fundação pode ser realizado com valores menores de $N_{SP\tau}$. Consequentemente, a Tabela 13 revela que aproximadamente 96,10% da área de Rio Verde requer comprimentos máximos de até 10 metros para esse tipo de estaca, não havendo regiões com tendência a exigir estacas com tamanhos superiores a 20 metros.

Figura 59 - Carta de comprimento máximo de estaca pré-moldada ($\Phi > 30$ cm)



Ao analisar a Figura 59, que representa as estacas pré-moldadas com diâmetro maior que 30 cm, em contraste com a Figura 58, que mostra as estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30 cm, é possível observar um aumento significativo nas estacas quando possuem diâmetros maiores. Isso ocorre porque essas estacas precisam alcançar valores mais elevados de N_{SPT} ao final da cravação. Dessa forma, conforme indicado na Tabela 13, houve uma redução de 31,37% nas áreas com comprimento máximo de até 10 metros e surgiu uma nova zona com estacas de comprimento entre 20 e 22 metros, que antes não existia.

Figura 60 - Carta de comprimento máximo de estaca raiz



Fonte: Autor próprio (2024)

Para a estaca raiz, apresentada na Figura 60, observam-se comprimentos máximos superiores aos dos outros tipos de estaca, devido ao limite maior de N_{SPT} necessário para o assentamento da fundação, alcançando até a camada de rocha impenetrável. Além disso,

conforme a Tabela 13, nota-se um aumento nas áreas com comprimentos de estacas na faixa entre 10 e 15 metros, que chega a 74,92% da área total de Rio Verde.

Dessa forma, é possível observar que os resultados obtidos, que dependem dos valores de N_{SPT} , revelam variações nas regiões com maiores e menores comprimentos de estacas. No caso das estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30 cm, houve uma redução no comprimento máximo das estacas, enquanto para as estacas raiz, verificou-se um aumento nas áreas de comprimento, conforme detalhado na Tabela 13.

Tabela 13 - Frequência de área para os comprimentos máximos das estacas

Comprimento máximo da estaca (m)	Percentual de área (%)			
	Hélice continua	Pré-moldada ($\phi < 30$)	Pré-moldada ($\phi \geq 30$)	Raiz
0 – 5	0,26%	0,94%	0,08%	-
5 – 10	73,06%	95,16%	64,65%	23,92%
10 – 15	26,13%	3,78%	34,70%	74,92%
15 – 20	0,45%	0,12%	0,49%	1,06%
20 – 22	0,10%	-	0,08%	0,10%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Cartas	Figura 57	Figura 58	Figura 59	Figura 60

Fonte: Autor próprio (2024)

Os resultados numéricos expostos na Tabela 13 apontam que a estaca pré-moldada $\Phi < 30$ cm apresenta maior frequência entre o comprimento de 5 a 10 metros, com um percentual de 95,16%, enquanto a estaca raiz tem uma maior ocorrência no comprimento de 10 a 15 metros sendo 74,92%.

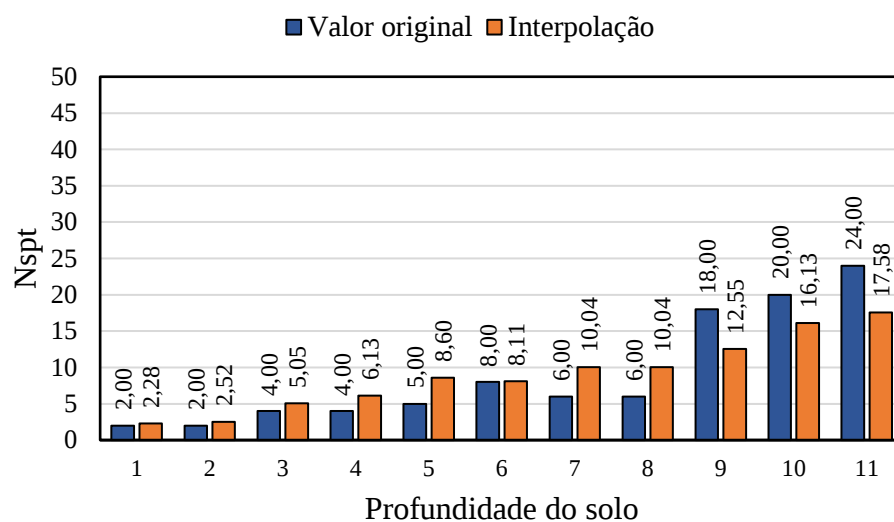
5.3 Limitações e Validações dos Resultados

As cartas desenvolvidas ao longo deste estudo têm o objetivo de fornecer aos usuários parâmetros úteis para o desenvolvimento de projetos geotécnicos. Elas oferecem, de forma antecipada, informações sobre os tipos de solo, a superfície do impenetrável à percussão, os isovalores de N_{SPT} e o comprimento máximo de estacas. No entanto, é importante considerar que o método utilizado para gerar esses resultados apresenta algumas limitações, que podem causar imprecisões no modelo.

1. As coordenadas dos furos de sondagem foram obtidas de forma visual, por meio de visitas a campo, além da utilização de *Google Maps* e *Google Earth*. Durante esse processo, foram observados simultaneamente o croqui dos boletins e a imagem aérea da área de estudo.
2. Não houve um planejamento da localização e da distribuição da coleta dos dados (laudos de sondagem), em virtude de serem provenientes de fontes secundárias (pois esses pontos foram coletados com outros propósitos e não de atender as necessidades da pesquisa em andamento).

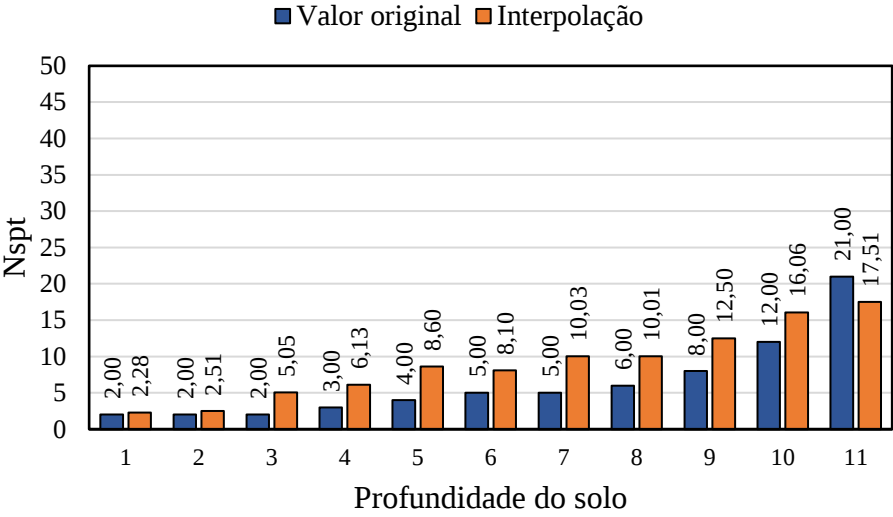
Diante do exposto, foi selecionado desta forma 3 lugares distantes, que possui ao todo 8 pontos de sondagem a percussão (Figura 8). Por conseguinte, comparou-se os valores de N_{SPT} a cada metro de profundidade das novas sondagens com os valores obtidos pelas interpolações, com a finalidade de comparar e validar os resultados obtidos. Deste modo, foi organizado os dados em uma planilha e produziu-se gráficos para uma melhor visualização.

Figura 61 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de N_{spt} : sondagem PN1



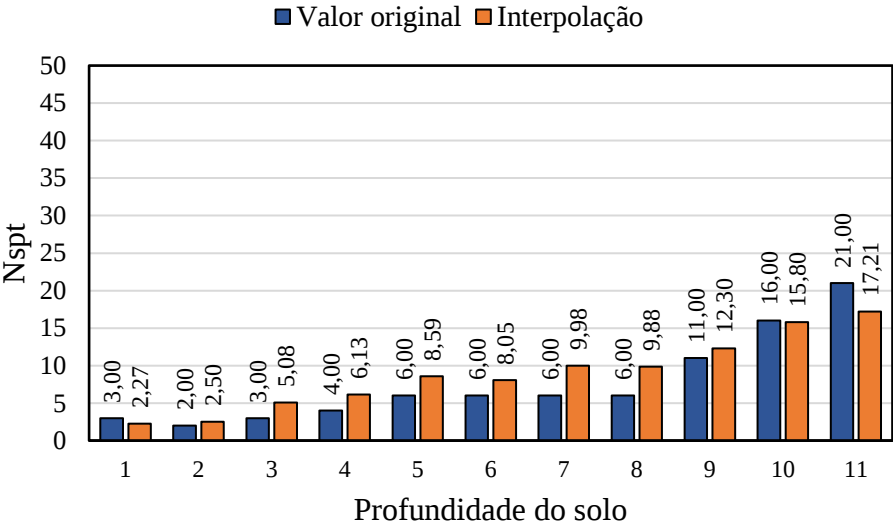
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 62 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN2



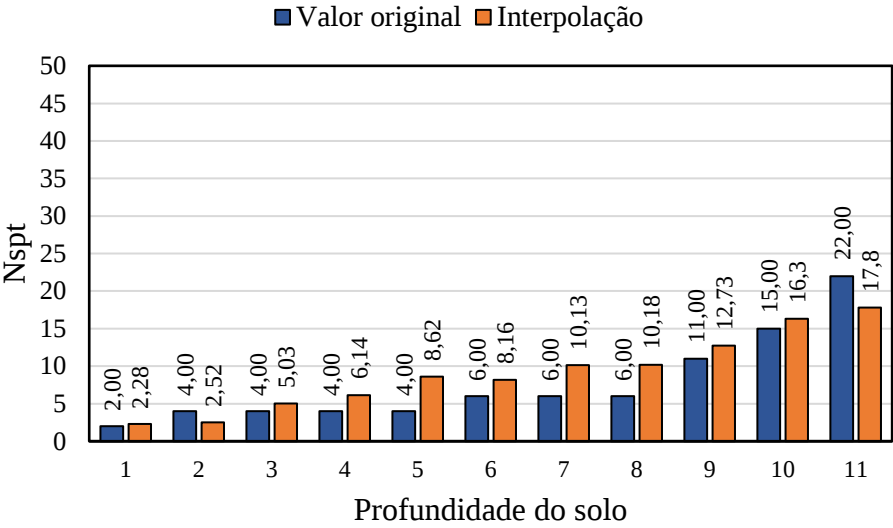
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 63 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN3



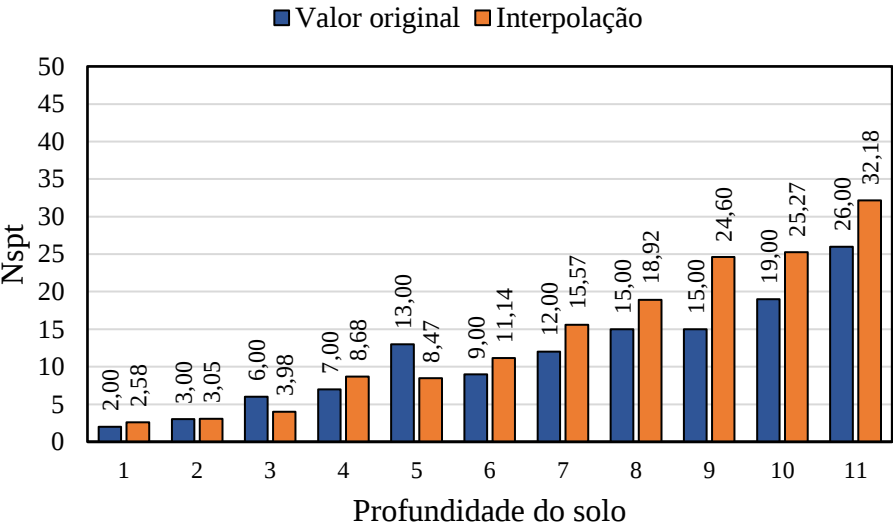
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 64 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN4



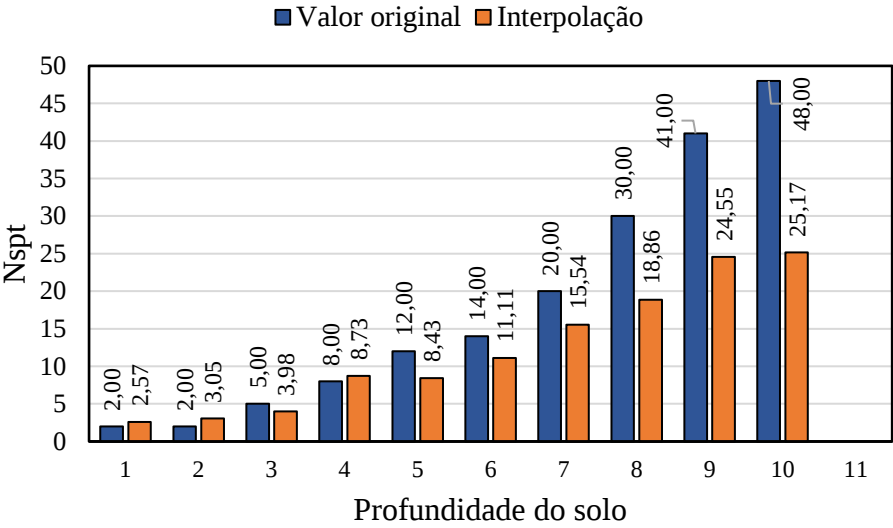
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 65 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN5



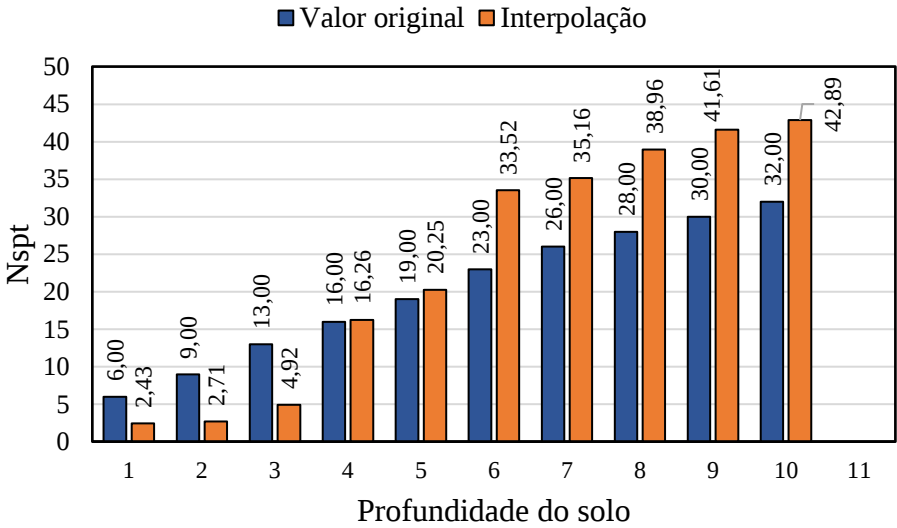
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 66 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN6

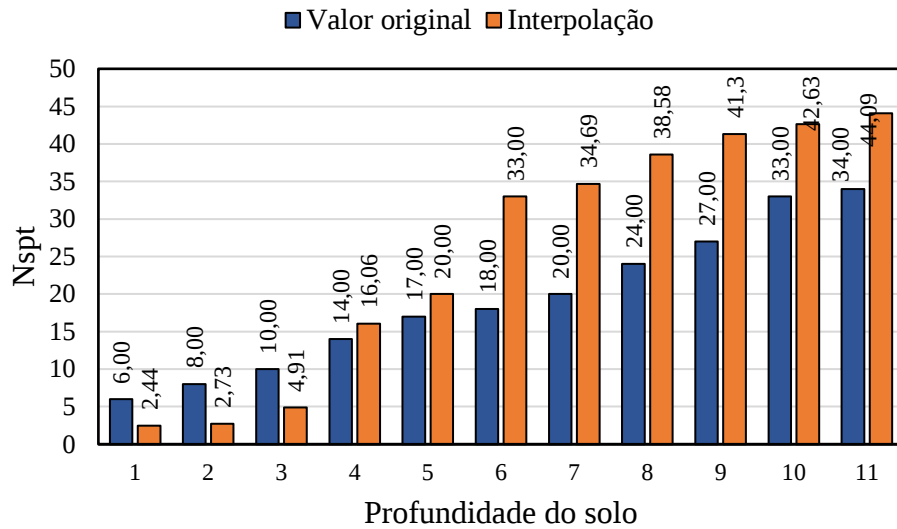


Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 67 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de Nspt: sondagem PN7



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 68 - Comparação entre valor original e o valor interpolado de N_{spt} : sondagem PN8

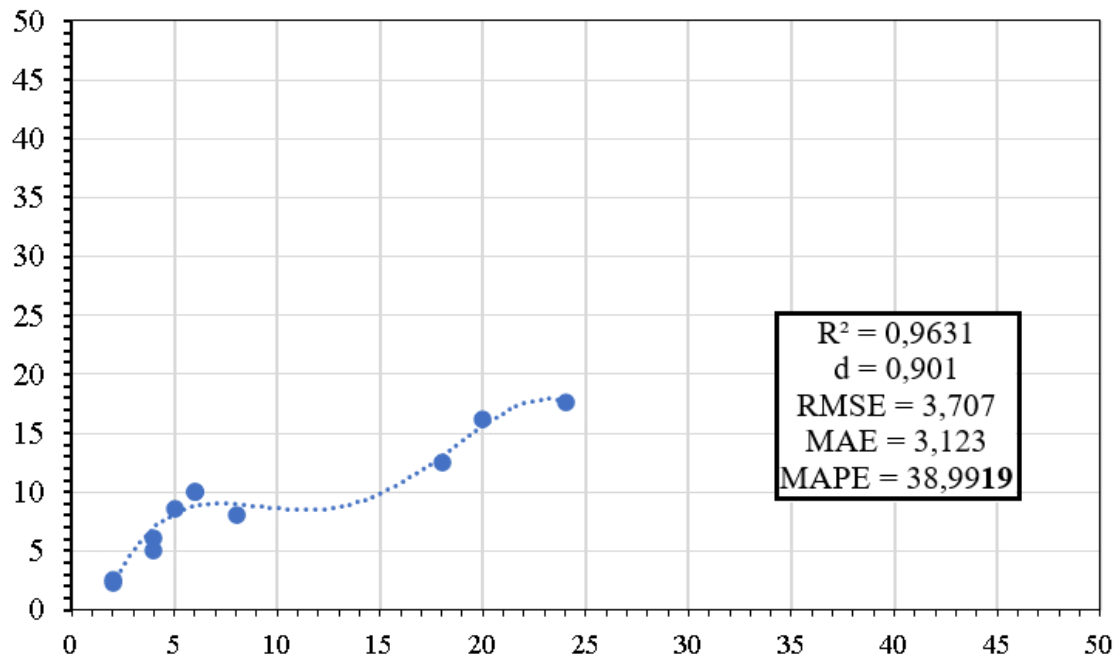
Fonte: Autor próprio (2024)

Finalmente, observa-se a discrepância entre a profundidade dos valores de N_{SPT} originais e os valores interpolados. Os valores em azul correspondem às sondagens obtidas para validação, enquanto as colunas em laranja representam os valores interpolados no QGIS, no mesmo local das sondagens fornecidas.

Durante a validação dos resultados obtidos pelas interpolações geotécnicas, foram aplicadas diversas métricas estatísticas para avaliar a precisão das previsões, tais como o coeficiente de determinação (R^2), o erro absoluto médio (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro percentual absoluto médio (MAPE) e o índice de concordância (d). Essas métricas forneceram uma base sólida para verificar a confiabilidade das previsões, comparando os valores observados e interpolados.

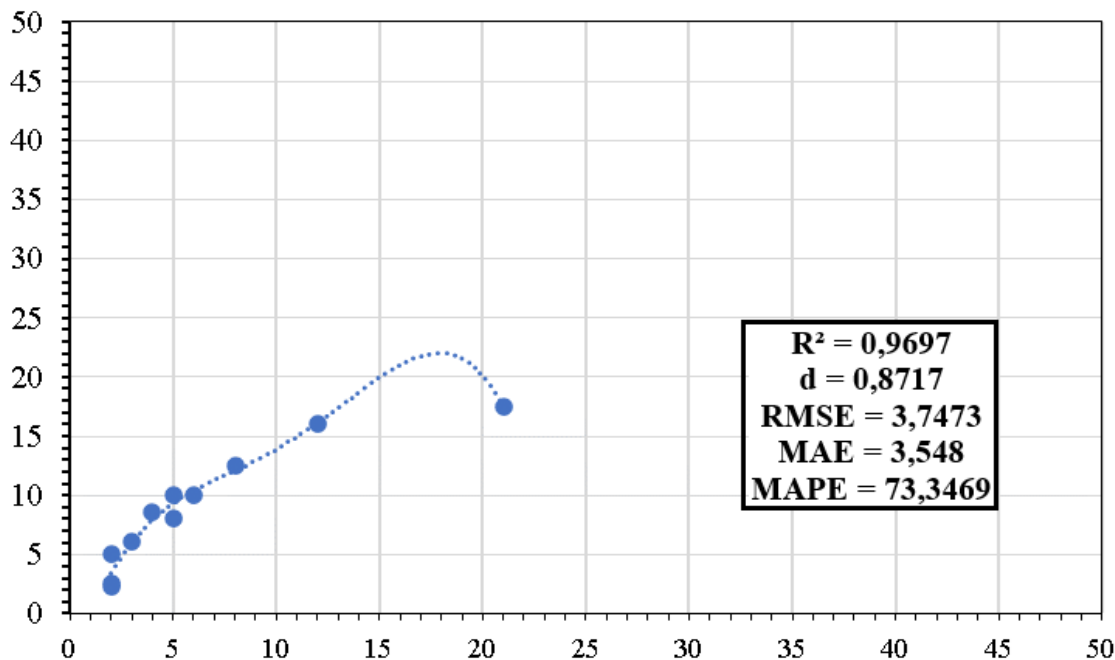
Os gráficos gerados mostraram a distribuição dos erros em diferentes profundidades, permitindo uma avaliação detalhada da eficácia das interpolações em camadas mais profundas ou superficiais. Essa análise visual, aliada às métricas estatísticas, destacou as áreas onde o modelo apresentou maior precisão, bem como as limitações de previsão em determinadas regiões geotécnicas. As Figuras 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75 e 76 mostra-se os gráficos de dispersão com todos os valores já calculados para cada ponto.

Figura 69 – Análises estatísticas PN1



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 70 - Análises estatísticas PN2



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 71 - Análises estatísticas PN3

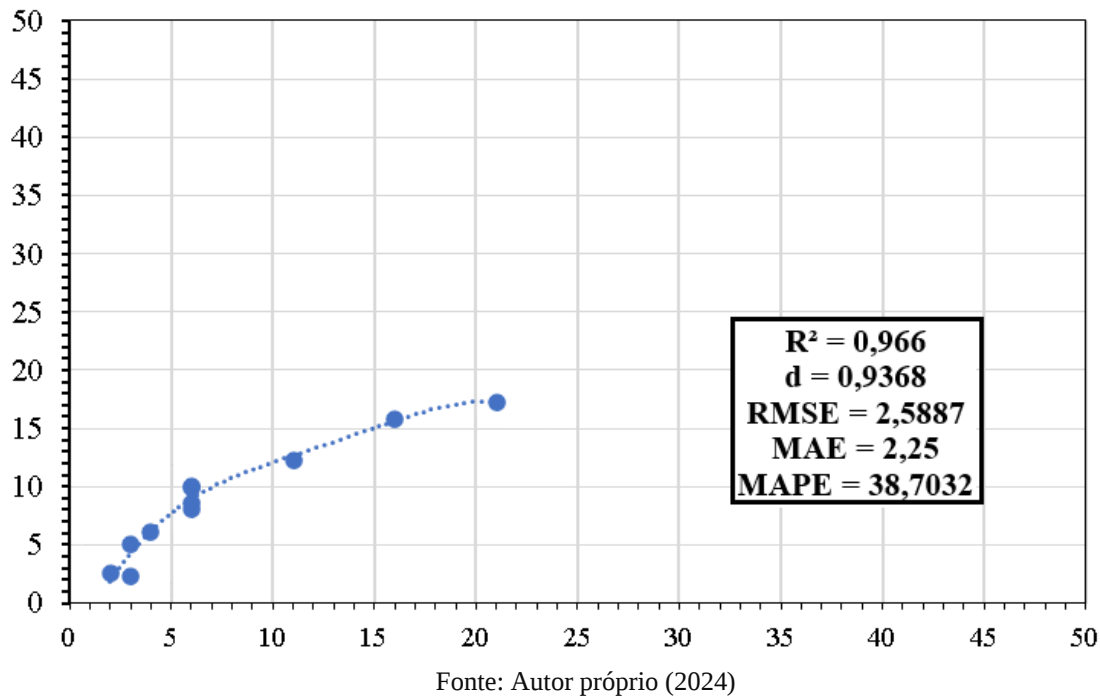


Figura 72 - Análises estatísticas PN4

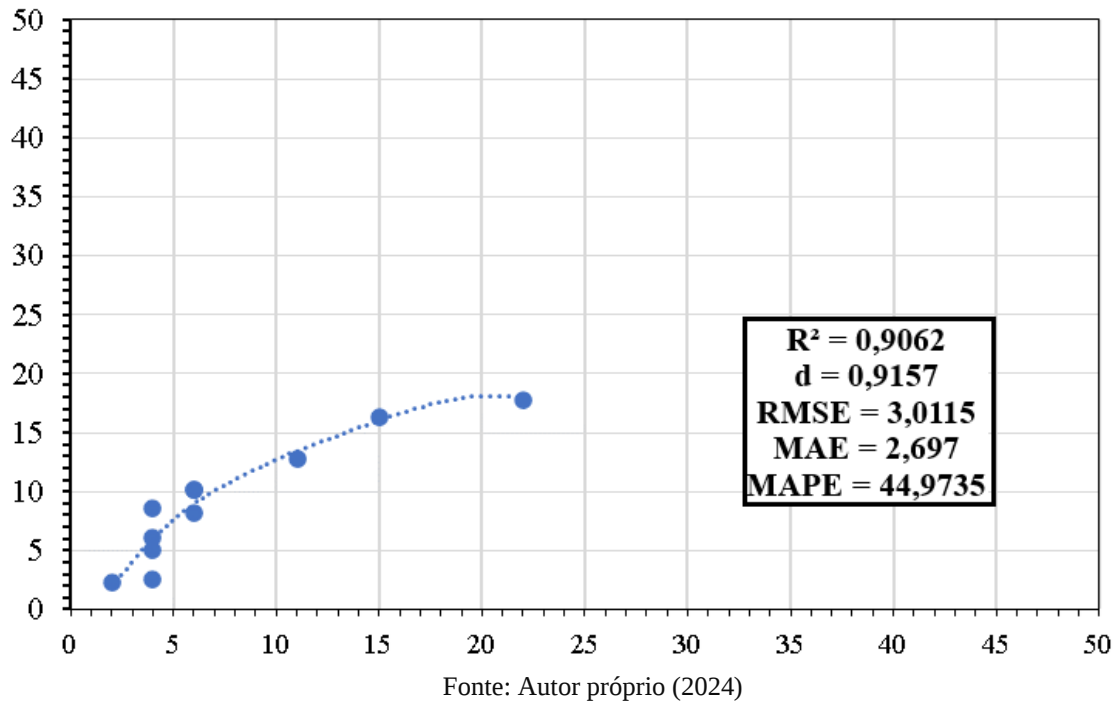
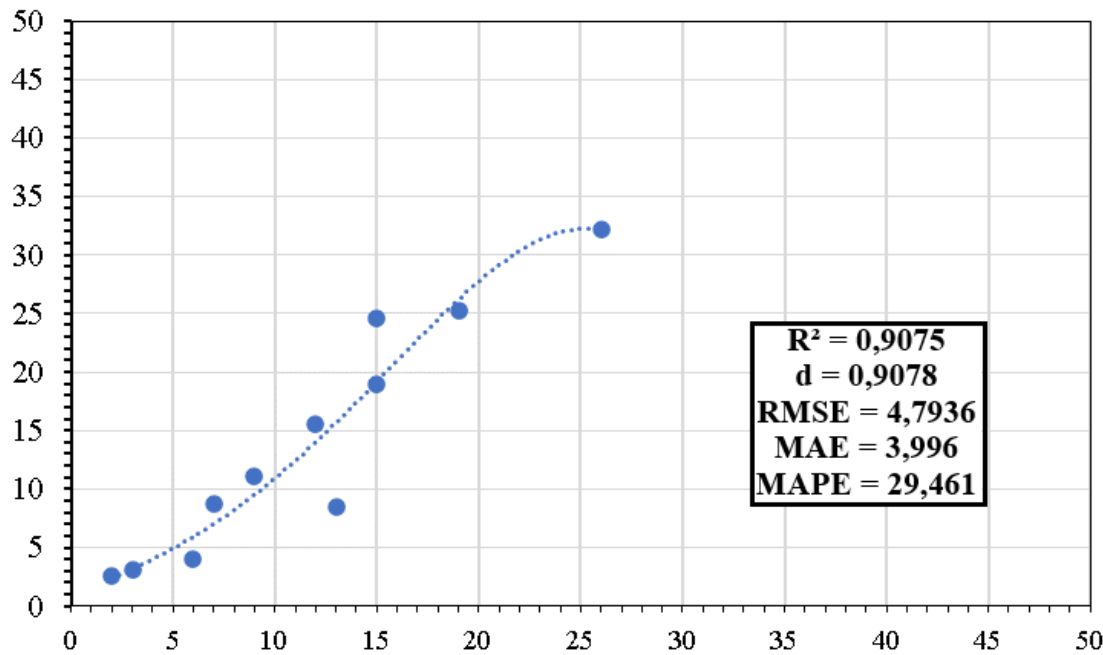
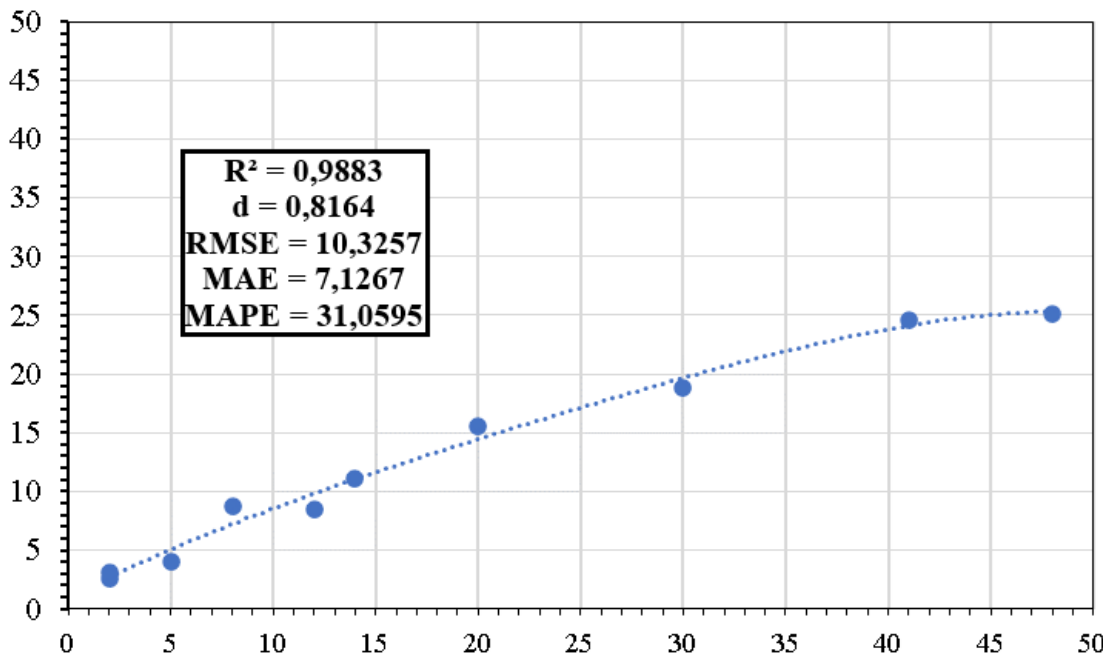


Figura 73 - Análises estatísticas PN5



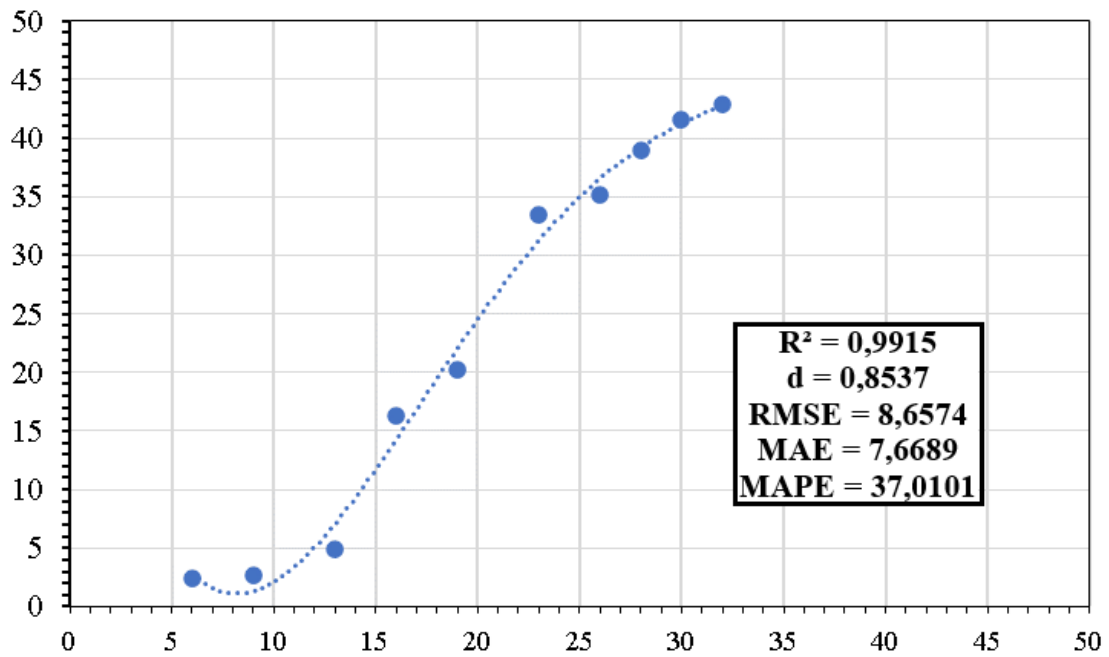
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 74 - Análises estatísticas PN6



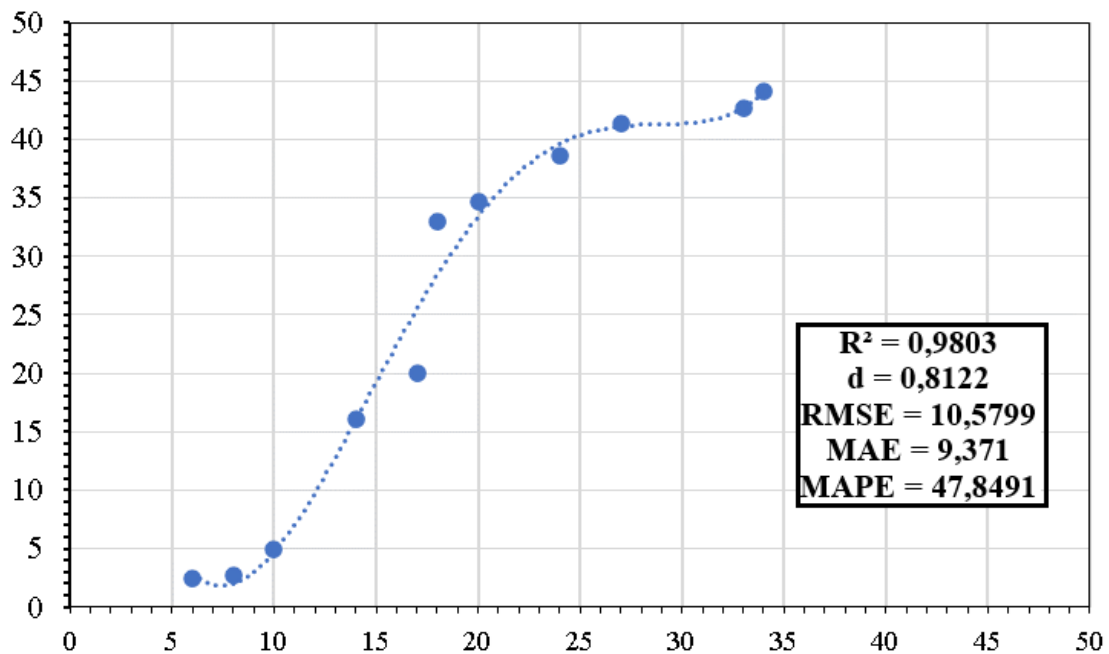
Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 75 - Análises estatísticas PN7



Fonte: Autor próprio (2024)

Figura 76 - Análises estatísticas PN8



Fonte: Autor próprio (2024)

Esses resultados demonstram que as profundidades de N_{SPT} interpoladas não são exatas e apresentam diferenças significativas quando comparadas às profundidades encontradas nos ensaios SPT. Por fim, embora as métricas e os gráficos tenham confirmado a consistência geral

dos resultados, é importante reconhecer que a precisão das previsões pode ser limitada pela disponibilidade de dados de sondagens em algumas áreas. Novas sondagens e ajustes nos modelos poderão reduzir essas limitações em estudos futuros.

6 CONCLUSÃO

Em suma, o presente estudo desenvolvido neste trabalho e suas observações gerais obtidas acima, é possível levantar considerações e concluir os seguintes tópicos.

- Predomina o solo argiloso até a profundidade de 6 metros. A partir dos 7 metros, o solo siltoso começa a prevalecer, estendendo-se até os 9 metros. Entre 9 e 14 metros, o solo torna-se arenoso, e finalmente, a partir dos 14 metros, encontra-se a rocha impenetrável.
- Observa-se o primeiro sinal de impenetrabilidade a partir dos 5 metros de profundidade; com 15 metros, esse valor passa a representar mais de 50% do território urbano da cidade de Rio Verde, Goiás.
- Constatou-se também que os solos menos resistentes vão reduzindo sua participação conforme aumenta a profundidade. Por exemplo, a partir dos 10 metros, o valor total da argila chega a apenas 2%, e, após o décimo sexto metro, não há mais traços argilosos no solo.
- Pode-se observar que a maior parte da rocha impenetrável na cidade de Rio Verde, Goiás, está localizada entre 8 e 14 metros de profundidade, totalizando 94,31%, enquanto apenas 0,12% está entre 20 e 23 metros.
- Conclui-se que as estacas hélice contínua e as estacas pré-moldadas com diâmetro maior que 30 cm têm comprimentos máximos mais próximos de até 15 metros. Por outro lado, as estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30 cm têm comprimento máximo predominante apenas até 10 metros.
- No caso das estacas raiz, como os comprimentos máximos são superiores aos dos demais tipos, devido ao limite do N_{SPT} ser alcançado quando se atinge a rocha, essas estacas não possuem comprimentos menores que 5 metros, ao contrário dos outros tipos.
- Com a validação dos resultados, observou-se que os valores interpolados são um tanto quanto diferentes em relação aos valores originais das sondagens SPT adquiridas. Isso demonstra que as interpolações não são totalmente precisas, pois os valores são apenas estimativas para os espaços não sondados, baseando-se em sondagens próximas para prever o valor.,

- A validação mostra-se, que o gráfico de dispersão com o valor de RMSE menor é de 2,588 e o maior é de 10,58, com isso demonstra que os valores interpolados não tem uma grande precisão, pois quanto menor o RMSE indica que o modelo previu com maior precisão as variáveis dependentes.
- O R^2 quanto mais próximo de 1, quer dizer que o modelo ajusta bem os dados, neste trabalho o mais próximo ponto de sondagem chegou a 0,99 e o com maior diferença chegou a 0,906.

Por fim, é importante destacar que este trabalho serve apenas como um complemento para a área da engenharia, sem substituir a necessidade e a importância de realizar investigações geológico-geotécnicas nos locais. Este estudo tem o propósito de orientar os profissionais sobre a utilização do solo em Rio Verde, com base nos laudos de sondagens já realizados na cidade.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L.C. Análise espacial de dados com o quantum GIS: exercícios realizados durante tópico especial ofertado pelo programa de Pós-Graduação em Geografia da UFSC. **Revista eletrônica de geografia**, Santa Catarina, v.3, n.8, p.173-194, dez. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR **6484**: solo - sondagens de simples reconhecimento com SPT - método de ensaio. Rio de Janeiro 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR **8036**: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundação de edifícios. Rio de Janeiro 1983.

BELICANTA, A. **Energia dinâmica no SPT – Resultado de uma investigação teórico**. Dissertação (Mestrado) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

BELINCANTA, A. **Avaliação de fatores intervenientes do índice de resistência à penetração do SPT**. Disponível em <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-12062018-162336/publico/Tese_Belincanta_Antonio_v1.pdf>. Acesso em: 10/04/2023.

BERBERIAN, Dickran. **O chão exige muito cuidado**. 2011. Escrito por Daniel Guerra. Disponível em: <http://www.cristianepoleto.com.br/mostra_noticias.php?id=200>. Acesso em: 30/08/2023.

BOTCHKAREV, A. Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*, 14, 45-79.

BRUNO, L.O. Aplicabilidade de sistemas de informação geográfica (SIGs) livres nas ciências ambientais: o uso do QGIS. **Revista brasileira de gestão ambiental e sustentabilidade**, Cuiabá, v.4, n.8, p. 321-326, dez. 2017.

CÂMARA, G. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográficas**. Projeto GEOTEC – Instituto de Computação UNICAMP. Rio de Janeiro, p. 193. 1996.

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

DÉCOURT, L. The Standard Penetration Test – State of the art report. In: **XII international conference on soil mechanics and foundation engineering (ICSMFE)**, vol.4. p.2405-2416. Rio de Janeiro, 1989.

DataTechNotes. (2019). Regression Accuracy Check in Python (MAE, MSE, RMSE, R-Squared). DataTechNotes. Disponível em: <https://www.datatechnotes.com/2019/10/regression-accuracy-check-in-python.html>. Acesso em: 06 set.2024.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores SPT. In: **VI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações**, vol. 1, p.45-54. Rio de Janeiro, 1978.

EnjoyAlgorithms. (2022). Evaluation Metrics for Regression Models. *EnjoyAlgorithms*. Disponível em: <https://www.enjoyalgorithms.com/blog/evaluation-metrics-for-regression-models>. Acesso em: 06 set.2024.

Escola Engenharia. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/sondagem-spt/>. Acesso em: 16 mai.2024.

FOLLE, D. **O estudo geoestatístico de sondagens SPT para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia.** Tese (Mestrado em engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 199. 2002.

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.

HOFFMANN, Geovano et al. Adequação do software livre de sistema de informações geográficas QGIS ao público brasileiro. **Revista eletrônica de extensão**, Florianópolis, v.15, n.31, p. 144-153, 2018.

IRELAND, H. O.; MORETTO, O.; VARGAS, M. **The dynamic penetration test: a standard that is not standardized.** *Géotechnique*, v. 20, n. 2, p. 185-192, 1970.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas.** Lab. Geomatemática, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03, 2000.

MOROSSINO, A. **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.** TCC (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, p.162. 2021.

NEVES, L. **Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão.** Tese (Mestrado em geotecnia) – Universidade de São Pulo, São Carlos, p. 90. 2004.

QUARESMA, A. R.; DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A. R.; ALMEIDA, M. S. S.; DANZIGER, F. Investigações Geotécnicas. In: **Fundações: Teoria e Prática – Terceiro Capítulo, p.119-162.** 2ª ed., São Paulo: Editora PINI, 1998. ISBN: 85-7266-098-4.

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 (Pós-graduação em engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 200. 2016.

SCHNAID, F; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

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.

SKEMPTON, A. W. Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. In: **Géotechnique**, vol. 36, issue 3, p.425-447. Ice Publishing, 1986. ISSN: 0016-8505 (print). ISSN: 1751-7656 (online).

SPT Equipamentos de Sondagens. Disponível em: <https://sptequipamentosdesondagem.com.br/loja/produto/amostrador-padrao-spt-com-bico-e-valvula/>. Acesso em: 16 mai. 2024.

TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. In: **3º Seminário de engenharia de fundações especiais e geotecnia (SEFE)**, vol. 1, p.33-50. São Paulo, 1996.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. (1996). Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: **Fundações: teoria e prática – Sétimo Capítulo**, p.227-264. 2ª ed., São Paulo: Editora PINI, 1998. ISBN: 85-7266-098-4.

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