

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA DE GRANDE ESCALA: ESTUDO
DE CASO BRASÍLIA – ÁREA TOMBADA PELA UNESCO**

CARLOS PETRÔNIO LEITE DA SILVA

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 153/07

BRASÍLIA / DF: MARÇO/2007


UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA DE GRANDE ESCALA: ESTUDO
DE CASO BRASÍLIA – ÁREA TOMBADA PELA UNESCO**

CARLOS PETRÔNIO LEITE DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR:



NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)



ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



PATRÍCIA DE ARAÚJO ROMÃO, DSc (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 DE MARÇO DE 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, CARLOS PETRÔNIO LEITE DA

Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Brasília - Área Tombada pela Unesco.

xv, 106 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2007)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Cartografia Geotécnica

2. Mapeamento 2D, 2,5D e 3D

3. Interpolações

4. Cadastro de Sondagens

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, C.P.L. (2007). Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Brasília - Área Tombada pela Unesco. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-153/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carlos Petrônio Leite da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Brasília - Área Tombada pela Unesco.

GRAU / ANO: Mestre / 2007

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Carlos Petrônio Leite da Silva

Rua Helsink, nº 15-A, Quadra 15, Conjunto Campos Elíseos.

CEP 69045-110 - Manaus/AM – Brasil.

DEDICATÓRIA

*Aos Meus Pais, José Carlos Marinho da Silva e Maria
Lígia Leite da Silva.*

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, pelos ensinamentos de vida. Aos meus irmãos, pelo apoio.

Ao meu orientador, Professor Newton Moreira de Souza, pelo privilégio que tive por ser seu orientando. Agradeço, também, pelo profissionalismo, humanidade e amizade.

À Professora Consuelo Alves da Frota, pelos conselhos de mãe, pela amizade, pelo apoio incondicional e por acreditar em mim.

À Carmem Lúcia, por estar ao meu lado compartilhando cada momento dessa caminhada.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos conhecimentos transmitidos e pela relação amigável.

À Anelise Friedrich pela ajuda concedida e pela paciência em me atender sempre que solicitada.

Agradeço a colaboração das empresas Embre Ltda, Sonda Engenharia Ltda, Infrasolo, Francisco de Oliveira Filho e demais que se propuseram a colaborar cedendo os relatórios de sondagem. Além da Codeplan que nos forneceu a base cartográfica de Brasília na escala 1:2000.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro.

Agradeço aos colegas da Geotecnia, em especial, aos colegas do laboratório de geoprocessamento, Salomé, Íris, Wallace e Renato, pela troca de idéias e pela feliz convivência.

Aos amigos Carlos Eduardo e Raidel Pereira, pela amizade eterna.

Por fim, agradeço a todos aqueles que por acaso deixei de citar, mas que, de alguma forma, contribuíram com esta pesquisa. Meus sinceros agradecimentos a todos!

RESUMO

CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA DE GRANDE ESCALA: ESTUDO DE CASO BRASÍLIA – ÁREA TOMBADA PELA UNESCO

A necessidade de conhecimento de características geotécnicas do subsolo é cada vez mais crescente face às obras de engenharia civil exigirem informações cada vez mais confiáveis para o planejamento de seus empreendimentos. Diante destas exigências, as técnicas de mapeamento geotécnico e geoprocessamento que envolveram aqui as técnicas de aquisição, armazenamento e manejo dos dados coletados do subsolo tornam-se cada vez mais poderosas com a evolução dos computadores e programas computacionais. Optar pela área tombada de Brasília foi uma tentativa de contribuição com informações geotécnicas que ajudem no processo de minimização das distorções e agressões ao plano original de Lúcio Costa, realizando na área de estudo um mapeamento detalhado com fins de planejamento, uso e ocupação do subsolo. Esse mapeamento foi baseado em dados de sondagem geotécnica e mapa base. A principal idéia deste trabalho foi criar um banco de dados alfanuméricos com dados geotécnicos de sondagem de simples reconhecimento – SPT (*Standard Penetration Test*). Para isso, foi utilizado o programa computacional *Spring 4.2* para manipulação dos dados obtidos. E como objetivo mais específico o projeto buscou a espacialização tridimensional dos dados de sondagem de três áreas de estudo: Projeto Ilhas do Lago, Universidade de Brasília (UnB) e Setor Sudoeste de Brasília. Utilizando o programa computacional *RockWorks 2006* para espacialização tridimensional dos dados de sondagem. Como resultados obtiveram-se: mapas volumétricos de camadas de solos (3D), mapas volumétricos de níveis interpolados de NSPT (3D), mapas hipsométricos com identificação de seções de interesse (2D), seções de interesse para camadas de solos e NSPT (2D), mapas de superfícies das interfaces de horizontes de solo e nível d'água com espacialização dos furos de sondagem (2,5D) e prédios (3D), mapas de seções ortogonais de NSPT (3D), e um banco de dados com 1563 furos de sondagem cadastrados com o máximo de informações contidas nos relatórios de sondagens. Apesar dessa pesquisa ter enfoque regional, a sua importância está relacionada, além do aspecto acadêmico, ao fato de fornecer um banco de dados digital acessível a profissionais e demais interessados no assunto.

ABSTRACT

MAPPING GEOTECHNIC OF LARGE SCALE: CASE STUDY BRASÍLIA - TUMBLED AREA BY UNESCO

The necessity of knowledge about geotechnical characteristics of underground soil are growing in face of civil engineering's sites needs more reliable information with reference to their enterprises' planning. In front of this requirement, the geotechnical mapping techniques and the geoprocessing, which involve, acquisition, storage and data management picked up on the underground, makes more powerful with the evolution of the compute processor and software. The preserved Brasilia area were chosen because the proposal is add geotechnical information to help minimization process of distortion and aggression to Lucio Costa's design by making an detailed mapping evaluation to use in using and occupation of the underground. These mapping were based in geotechnical drilling data and basics map. The focus of this thesis was to create a georeferencing data base with geotechnical drilling data – SPT (Standard Penetration Test). Thus, Spring 4.2 software was used to work with mapping data in this research. With specific objective the project searched for three-dimensional data spatializing of survey of three study areas: Project The Lake's Islands, University of Brasília (UnB) and Southwest Sector of Brasília. Using the RockWorks 2006 software for three-dimensional spatializing of survey data. As results were obtained: volumetric maps of layers of soils (3D), volumetric maps of interpolated levels of NSPT (3D), hipsometrics maps with identification of sections of interest (2D), surfaces maps of the interfaces of soil horizons and groundwater with spatializing of the boreholes drilling (2,5D) and buildings (3D), orthogonal sections maps of NSPT (3D), and a database with thousand five hundred and sixty three (1563) boreholes drilling registered with the maximum of information contained in the drilling reports. In spite of that research to have regional focus, the importance is related, besides the academic aspect, to the fact of supplying a digital database accessible to professionals and too much interested parties in the subject.

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1- INTRODUÇÃO	1
1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2- JUSTIFICATIVA.....	1
1.3- OBJETIVOS	2
1.4- CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO	2
1.5- ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	6
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1- NOÇÕES DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ÁREAS URBANAS	7
2.2- GEOPROCESSAMENTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	8
2.2.1- SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	8
2.2.2- REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE DADOS GEOGRÁFICOS	9
2.2.3- BANCO DE DADOS.....	12
2.2.4- SIG 3D – UMA NOVA FORMA DE MODELAGEM.....	12
2.2.5- MODELAGEM DE SÓLIDOS NO SIG 3D	13
2.3- MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO E GEOESTATÍSTICA	15
2.3.1- INVERSO PONDERADO DA DISTÂNCIA (<i>IDW</i>)	19
2.3.2- KRIGEAGEM (<i>KRIGING</i>).....	21
2.4- INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA	27
2.4.1- SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT (<i>STANDARD PENETRATION TEST</i>)	28
3- MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1- INTRODUÇÃO	33
3.2- ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	33
3.3- MATERIAIS	34
3.3.1- BASE CARTOGRÁFICA	34
3.3.2- RELATÓRIOS TÉCNICOS DE SONDAGEM	35
3.3.3- PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS	35
3.4- MÉTODOS	36
3.4.1- SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E SISTEMA DE BANCO DE DADOS DIGITAL	40
3.4.2- GERAÇÃO DO MODELO DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: PROJETO ILHAS DO LAGO.....	43
3.4.3- GERAÇÃO DO MODELO DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: UnB (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA).....	46
3.4.4- GERAÇÃO DO MODELO DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: SETOR SUDOESTE DE BRASÍLIA (DF)	49
4- RESULTADOS	52
4.1- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
4.2- IMPORTÂNCIA DO CADASTRAMENTO DOS FUROS DE SONDAGEM	52
4.3- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS MODELOS	52
4.4- MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM	55
4.5- BANCO DE DADOS DIGITAL	57
4.6- RESULTADOS DO MAPEAMENTO TRIDIMENSIONAL – ESTUDO DE CASO: PROJETO ILHAS DO LAGO.	59
4.7- RESULTADOS DO MAPEAMENTO TRIDIMENSIONAL – ESTUDO DE CASO: UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.	73

4.8- RESULTADOS DO MAPEAMENTO TRIDIMENSIONAL – ESTUDO DE CASO: SETOR SUDOESTE DE BRASÍLIA (DF).	84
5- CONCLUSÕES	95
5.1- CONCLUSÕES	95
5.2- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
A - TABELAS DE FOLHAS DA BASE CARTOGRÁFICA UTILIZADAS PARA O MOSAICO DA ÁREA DO PROJETO	102
B – FIGURA APRESENTANDO A SEQUÊNCIA PARA A CONFECÇÃO DO MOSAICO DAS FOLHAS DA BASE CARTOGRÁFICA.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do interpolador inverso ponderado da distância (Modificado de LANDIM, 2000).....	20
Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens da krigagem (Modificado de LANDIM, 2000).	22
Tabela 2.3 – Comparação de resultados entre os principais interpoladores (LANDIM, 2000).	23
Tabela 2.4 – Modelos transitivos de semivariograma (CAMARGO, 1997).....	25
Tabela 3.1 – Classificação do solo conforme compactidade. (ABNT, 2001).	46
Tabela A-0.1 – Folhas utilizadas para o mosaico da área de trabalho (Codeplan, 1998).	103
Tabela A-0.2 – Folhas utilizadas para o mosaico da área de trabalho (Codeplan, 1998).	104

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1.1 – Localização da área de trabalho.....	4
Figura 1.2 – Esquema do perfil completo de solo (MARTINS, 2000).....	5
Figura 1.3 – Esquema do perfil truncado de solo (MARTINS, 2000).....	5
Figura 2.1 – Arquitetura de sistemas de informação geográfica (CÂMARA <i>et al.</i> , 1996).....	9
Figura 2.2 – Paradigma dos quatro universos de representação geográfica (CÂMARA <i>et al.</i> , 1998).....	10
Figura 2.3 – Representação dos objetos no SIG (SPRAGUE <i>et al.</i> , 2006).....	11
Figura 2.7 – Representação de objetos em ambiente tridimensional. (a) organograma de representação dos objetos 3D e (b) formas de representação dos objetos 3D.....	14
Figura 2.8 – Representação da estrutura <i>raster</i> 3D e <i>voxel</i>	15
Figura 2.6 – Exemplo de semivariograma experimental (CAMARGO, 1997).....	24
Figura 2.7 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais (CAMARGO, 1997).....	25
Figura 2.8 – Dimensões em milímetros de parte do amostrador Raymond mostrando a cabeça e sapata (NBR 6484/2001).....	29
Figura 2.9 – Esquema de elaboração do ensaio SPT.....	31
Figura 2.10 – Distribuição dos furos de sondagens - (a) Sugestão para distribuição em planta dos furos (b) Tabela com o número mínimo de furos. (NBR 8036/83).....	32
Figura 3.1 – Base cartográfica na escala 1:2000 exibida no <i>Spring</i> 4.2.....	34
Figura 3.2 – Estrutura do trabalho no <i>Spring</i> 4.2.....	37
Figura 3.3 – Seqüência de elaboração do modelo numérico de terreno no <i>Spring</i> 4.2 – (a) Geração da grade triangular (<i>TIN</i>), (b) Geração da grade retangular a partir do <i>TIN</i> , (c) Geração de imagem em níveis de cinza, (d) Geração de imagem sombreada.....	38
Figura 3.4 – Exemplo de relatório de sondagem – (a) formato analógico digitalizado (extensão <i>TIFF</i>) e (b) formato digital (extensão <i>dxg</i> – <i>AutoCAD</i>).....	39
Figura 3.5 – Organização dos relatórios de sondagens com sistema de endereçamento embutido na própria pasta.....	40
Figura 3.6 – Formulário para inserção dos dados contidos nos relatórios de sondagens.....	41
Figura 3.7 – Trecho da tabela do cadastro de sondagens.....	41
Figura 3.8 – Detalhe do formulário de cadastro de sondagens indicando a escolha dos parâmetros de descrição do tipo de solo e cor de acordo com a NBR-6502 (ABNT, 1995) e NBR-13441 (ABNT, 1995).....	42
Figura 3.9 – Associação da tabela de atributos aos furos de sondagem no <i>Spring</i> 4.2.....	42
Figura 3.10 – Fotos do local da obra com detalhe do nível d’água aflorante - Projeto Ilhas do Lago.....	43
Figura 3.11 – Mapa de localização das sondagens na área de estudo do Projeto Ilhas do Lago.....	44
Figura 3.12 – Definição da grade 3D no <i>RockWorks</i> 2006 do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.....	45
Figura 3.13 – Definição do perfil de solo do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.....	45
Figura 3.14 – Definição da grade 3D no <i>RockWorks</i> 2006 do estudo de caso UnB.....	47
Figura 3.15 – Definição do perfil de solo do estudo de caso UnB.....	47
Figura 3.16 – Mapa de localização das sondagens na área de estudo da UnB.....	48
Figura 3.17 – Definição da grade 3D no <i>RockWorks</i> 2006 do estudo de caso Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	49

Figura 3.18 – Definição do perfil de solo do estudo de caso Setor Sudoeste de Brasília (DF).	50
Figura 3.19 – Mapa de localização das sondagens na área de estudo do Setor Sudoeste de Brasília (DF).	51
Figura 4.1 – Efeito do exagero vertical – (a) sem exagero vertical, (b) com exagero vertical de 5 vezes.	53
Figura 4.2 – Representação gráfica em 3D dos furos de sondagem no <i>RockWorks</i> 2006.	54
Figura 4.3 – Opção de representação gráfica <i>oblates</i> em 3D dos furos de sondagem no <i>RockWorks</i> 2006.	54
Figura 4.4 – Mapa de localização dos 1563 furos de sondagem à percussão do trabalho – Brasília (DF).	56
Figura 4.5 – Diagrama de relacionamentos do banco de dados que modela e documenta a base de dados no <i>Spring</i> 4.2.	57
Figura 4.6 – Diagrama de relacionamentos do banco de dados que modela e documenta a base de dados no <i>RockWorks</i> 2006.	57
Figura 4.7 – Trecho da tabela de consulta por atributos dos furos de sondagem no <i>Spring</i> 4.2.	58
Figura 4.8 – Seqüência 1 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 2, mostrando todas as camadas de solo, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	61
Figura 4.9 – Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando o nível d’água, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	62
Figura 4.10 – Seqüência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando a camada de argila arenosa com pedregulhos, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	63
Figura 4.11 – Seqüência 4 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando a camada de silte arenoso intercalada com a camada de silte argiloso, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	64
Figura 4.12 – Seqüência 5 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando a camada de silte argiloso, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	65
Figura 4.13 – Modelo tridimensional de NSPT, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	66
Figura 4.14 – Mapa hipsométrico, com localização de seção de interesse, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	67
Figura 4.15 – Seção A-A mostrando os níveis de NSPT, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	68
Figura 4.16 – Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	69
Figura 4.17 – Seção A-A não interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	70
Figura 4.18 - Modelo 2,5D de solo (superfícies) com a localização dos furos de sondagem e conjunto de edificações, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	71
Figura 4.19 - Seções ortogonais 2,5D de NSPT, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.	72
Figura 4.20 – Seqüência 1 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, mostrando todas as camadas de solo, do estudo de caso da UnB.	75
Figura 4.21 – Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, destacando a camada de argila siltosa com pedregulhos, do estudo de caso da UnB.	76
Figura 4.22 – Seqüência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, destacando a camada de silte e a superfície do nível d’água, do estudo de caso da UnB.	77

Figura 4.23 – Modelo tridimensional de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.....	78
Figura 4.24 - Mapa hipsométrico, com localização de seção de interesse, do estudo de caso da UnB.	79
Figura 4.25 – Seção A-A mostrando os níveis de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.	80
Figura 4.26 – Seção A-A mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.....	81
Figura 4.27 - Modelo 2,5D de solo com a localização do conjunto de prédios, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.....	82
Figura 4.28 - Seções ortogonais 2,5D de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.....	83
Figura 4.29 – Seqüência 1 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	86
Figura 4.30 – Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	87
Figura 4.31 – Seqüência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	88
Figura 4.32 – Modelo tridimensional de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	89
Figura 4.33 - Mapa hipsométrico, com localização de seção de interesse, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	90
Figura 4.34 – Seção A-A interpolada, mostrando os níveis de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	91
Figura 4.35 – Seção A-A interpolada, mostrando as camadas de solo local, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	92
Figura 4.36 - Modelo 2,5D de solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	93
Figura 4.37 - Seções ortogonais 2,5D de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).....	94
Figura B-0.1 – Seqüência para confecção do mosaico das folhas da base cartográfica.....	106

LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

2 D	Duas dimensoes
2,5 D	Duas dimensoes e meia
3 D	Tres dimensoes
4 D	Quatro dimensoes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCII	<i>American Standard Code For Information Interchange</i>
BDG	Banco de dados digital
Blue	<i>Best, linear, unbiased estimate</i>
B-Rep	Representação de Limites (<i>Boundary Representation</i>)
CA	Circulação de gua
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer Aided Design</i>)
cm	Centímetro (s)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Codeplan	Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central
CPT	Ensaio de Cone (<i>Cone Penetration Test</i>)
CSG	Construção de Sólidos Geométricos
dxf	<i>Drawing Exchange File</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
Grass	<i>Geographical Resources Analysis Support System</i>
GRID	Grade regular
IDW	Inverso Ponderado da Distância (<i>Inverse Distance Weighted</i>)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
km	Quilmetro (s)
km ²	Quilmetro (s) quadrado (s)
m	Metro (s)
mm	Milímetro (s)
MNT	Modelo Numérico de Terreno
N	Norte
NA	Nível d'gua
NBR	Norma Brasileira
NSPT	Número de golpes do SPT
PDOT	Plano Diretor de Organização Territorial
RN	Referência de Nível
S	Sul
SIG	Sistema de Informações Geográficas
Spring	Sistema para Processamento de Informações Geográficas
SPT	Ensaio de sondagem  percussão (<i>Standard Penetration Test</i>)
t	tempo
TEN 3D	Rede de Tetraedros Irregulares 3D (<i>Tetrahedral Network 3D</i>)
TH	Trado Helicoidal
TIFF	Tagged Image File Format

TIN	Rede de Triângulos Irregulares (<i>Triangular Irregular Network</i>)
UnB	Universidade de Brasília
Unesco	Organização das Nações Unidas para a educação, a ciência e a cultura (<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
UTM	Projeção Universal Transversa de Mercator (<i>Universal Transverse Mercator</i>)
Voxel	<i>Volume elementar</i>
W	Oeste (<i>West</i>)
X	Eixo Cartesiano X
x	Coordenada cartesiana x
Xmax	Coordenada máxima de x (UTM) na grade tridimensional
Xmin	Coordenada mínima de x (UTM) na grade tridimensional
Y	Eixo Cartesiano Y
y	Coordenada cartesiana y
Ymax	Coordenada máxima de y (UTM) na grade tridimensional
Ymin	Coordenada mínima de y (UTM) na grade tridimensional
z	Profundidade em metros (coordenada cartesiana z)
Z	Eixo Cartesiano Z
Zmax	Coordenada máxima de z (UTM) na grade tridimensional
Zmin	Coordenada mínima de z (UTM) na grade tridimensional

1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesses 47 anos de existência, Brasília passou a ser considerada por muitos como um bem tombado ainda em fase de consolidação. A escolha de Brasília como patrimônio mundial foi possível graças aos valores de seu plano urbanístico, fundamentado em seus quatro grupos estruturadores: o monumental, o gregário, o residencial e o bucólico. O grupo monumental é configurado pelo Eixo Monumental, onde estão concentrados os símbolos do poder político do país. O grupo gregário define os setores de convergência da população como a Rodoviária do Plano Piloto. O grupo residencial é representado pelas superquadras e seus conjuntos de edifícios sobre pilotis e o grupo bucólico com os gramados, praças, jardins e áreas de lazer, Parque da Cidade e Orla do Lago Paranoá.

A partir dessa imagem de cidade planejada, tem-se tomado várias medidas de minimização de distorções e agressões ao Plano Piloto, apesar de críticas de alguns arquitetos em dizer que da área tombada só se preserva o gabarito. Nesse sentido, a Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação passou a monitorar a área tombada para garantir o cumprimento das recomendações feitas pela Unesco, a pedido do *Bureau* do Comitê do Patrimônio Mundial que expressou sua preocupação com as agressões sofridas por tal patrimônio.

A primeira medida adotada pelo Governo do Distrito Federal foi elaborar um Plano Diretor da Área de Preservação de Brasília, discutido com dezenove entidades, servindo como instrumento básico em termos de política de desenvolvimento e expansão urbana.

1.2- JUSTIFICATIVA

A preocupação crescente, tanto por parte do poder público quanto por parte da população e da própria Unesco, em querer preservar a área tombada, levando em consideração que a cidade ainda está em processo de consolidação, motiva as empresas locais, construtoras, imobiliárias, instituições e o próprio poder público a buscar o conhecimento de características geotécnicas do subsolo. Os principais motivos que levam a esta busca são: o planejamento da cidade, em termos de expansão urbana, torna-se mais preciso; tem-se algum conhecimento técnico que de maneira geral os solos do Distrito Federal são estruturalmente instáveis e colapsíveis; orientação nos projetos de engenharia (principalmente em obras de fundações); diminuir

custos de implantação, qualquer que seja o empreendimento visado; auxiliar cálculos imobiliários (valorização do empreendimento, avaliação de seguro), além de motivar e aprimorar pesquisas científicas em tal campo da engenharia.

Diante de tais fatos, as técnicas de mapeamento geotécnico e geoprocessamento que envolvem aqui as técnicas de aquisição, armazenamento, espacialização e manejo de dados coletados do subsolo tornam-se cada vez mais necessárias e presentes no dia a dia da engenharia. Grande parte desse avanço se deve a evolução dos computadores e programas computacionais que cada vez mais facilitam o manejo de enormes quantidades de dados. A idéia desta pesquisa foi criar uma base de dados digital com dados geotécnicos georeferenciados de sondagem SPT (sondagem à percussão). Para isso, foi utilizado o programa computacional *Spring 4.2* para georeferenciamento dos furos de sondagem, organização e manipulação dos dados obtidos dos relatórios de sondagem. E com objetivo mais específico a pesquisa buscou a espacialização dos dados de sondagem com uso de ferramentas de análise geoestatística e interpoladores tridimensionais, utilizando para isso o programa computacional *RockWorks 2006*.

1.3- OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi reunir, organizar, e desenvolver técnicas para a espacialização tridimensional de dados de investigação geotécnica, coletadas dos relatórios de sondagem SPT, tendo como objetivos mais específicos os seguintes itens:

- Obtenção da base cartográfica da região de estudo;
- Criar um modelo numérico de terreno (MNT);
- Obter dados de ensaios de campo (SPT);
- Elaborar uma metodologia para criação do banco de dados;
- Caracterizar as camadas de solos da área de estudo baseados nos ensaios de SPT;
- Elaborar mapas de espacialização em superfície e em profundidade de índices de NSPT;
- Elaborar mapas de profundidade de nível d'água;
- Elaborar modelos tridimensionais do subsolo (modelo volumétrico) a partir dos dados de sondagem SPT.

1.4- CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

A área de trabalho situa-se no Distrito Federal e compreende a cidade de Brasília, mais especificamente a área tombada pela UNESCO em 1987 como patrimônio mundial. As

coordenadas geográficas que delimitam essa área são: 47° 45' 5" e 47° 59' 19" W de longitude e 15° 39' 0" e 15° 6' 47" S de latitude. O polígono de aproximadamente 750 km² é o limite para os pontos de sondagem coletados (Figura 1.1).

Segundo MARTINS (2000), geomorfologicamente a área é classificada como - Área de Dissecação Intermediária - que são áreas fracamente dissecadas, apresentando em seus interflúvios lateritos, latossolos e colúvios/elúvios delgados com ocorrência de fragmentos de quartzo. A Região de Dissecação Intermediária corresponde ao padrão de relevo suave ondulado, que está situado no interior do domo Estrutural de Brasília, com cotas entre 1.000 e 1.150 m, e é preservada sobre ardósias, quartzitos e metassiltitos do Grupo Paranoá. As características dos horizontes lateríticos são descritas na Figura 1.2.

Geologicamente, os horizontes de solo, aqui denominados de camadas de solo, foram classificados por meio da proposta de MARTINS (2000) que sugere um perfil laterítico completo (Figura 1.2), porém, BÁRDOSSY & ALEVA em 1990, citados por MARTINS (2000), dizem que essa descrição é ideal e que raramente são observados todos os horizontes num mesmo perfil, ou mesmo em toposseqüência. Os perfis geralmente são truncados, apresentando a predominância de um ou mais horizontes (Figura 1.3). ALEVA em 1986, citado por MARTINS (2000), afirma que o processo de redução e truncamento dos perfis geralmente está associado com mudanças nas condições morfo-hidrológicas durante a evolução do ambiente, principalmente no aumento da velocidade de denudação física do perfil, em vertentes mais íngremes. Dessa forma, esses processos superimpostos produzem variações faciológicas dos horizontes nos solos lateríticos.

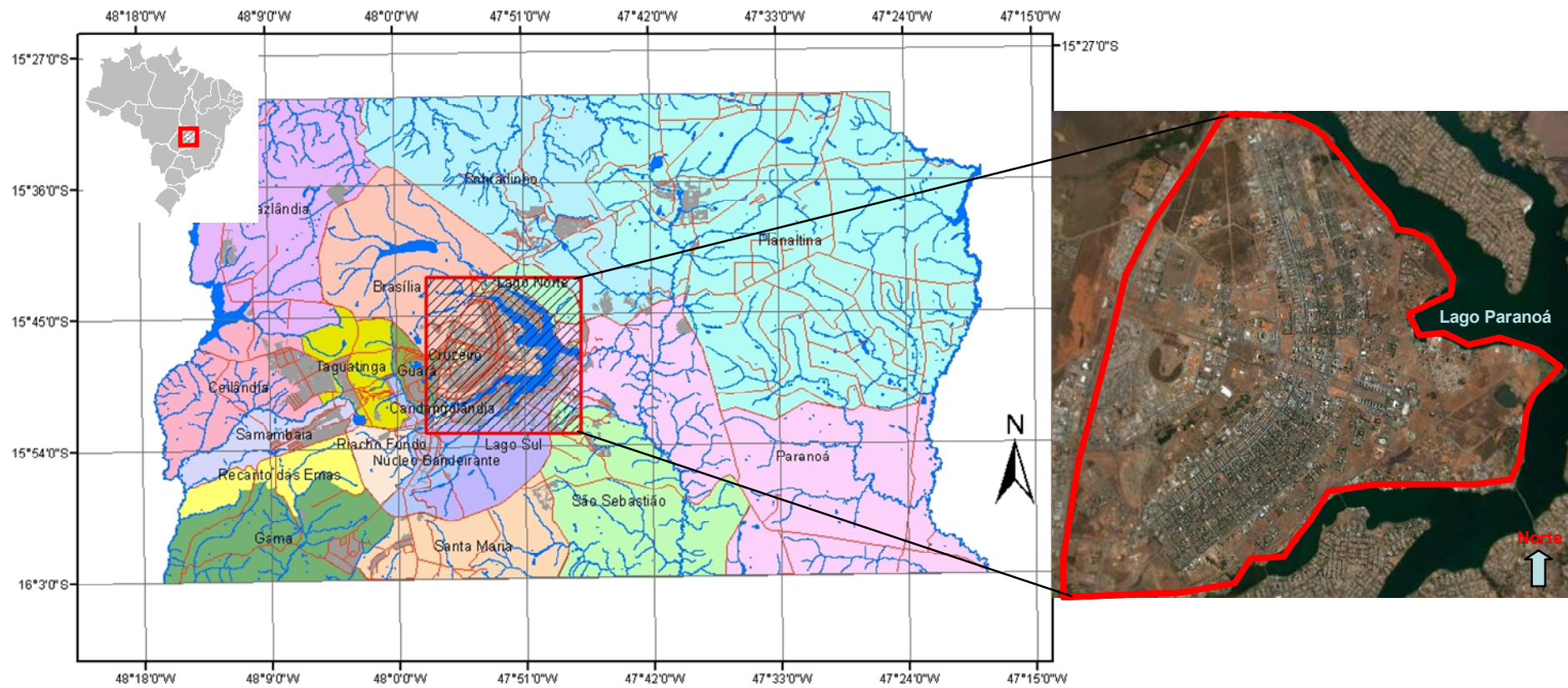


Figura 1.1 – Localização da área de trabalho.

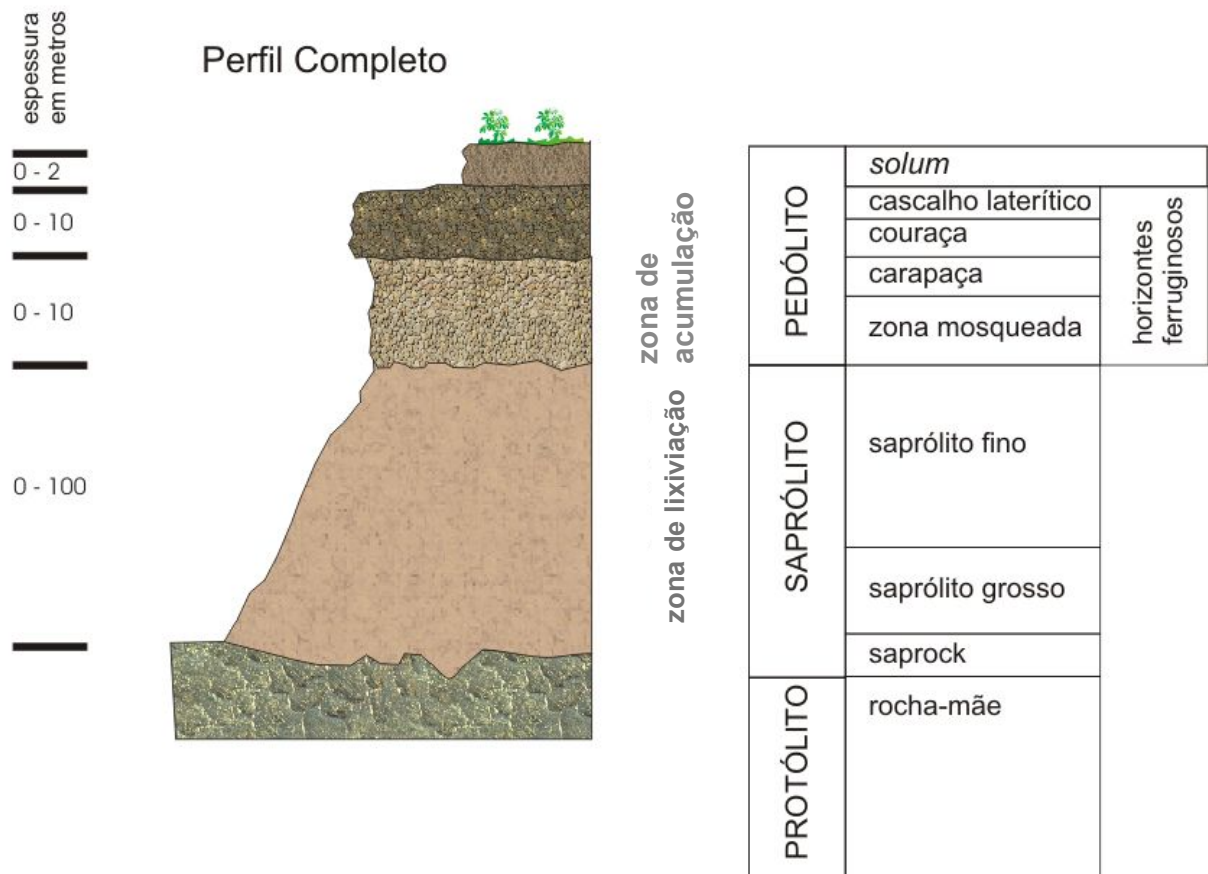


Figura 1.2 – Esquema do perfil completo de solo (MARTINS, 2000).

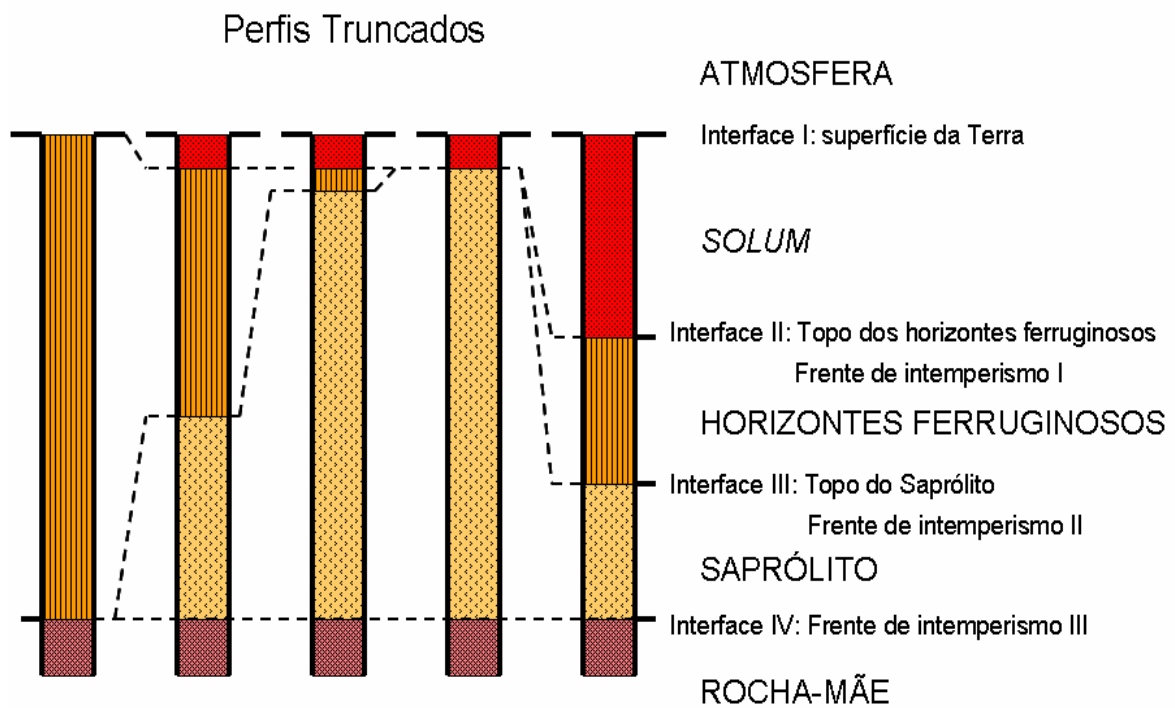


Figura 1.3 – Esquema do perfil truncado de solo (MARTINS, 2000).

1.5- ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Para atingir aos objetivos traçados na seção anterior, a dissertação organizou-se em sete capítulos, descritos sucintamente de acordo com o conteúdo de cada um.

O Capítulo 1 até aqui descrito, contém a introdução, justificativa, objetivos, caracterização da área de trabalho e escopo da dissertação.

O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica a respeito de: noções de cartografia geotécnica para áreas urbanas, geoprocessamento e representação de dados geográficos, banco de dados, investigação geotécnica, geoestatística e técnicas de modelagem bidimensional e tridimensional.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos empregados na pesquisa. Informações sobre os materiais são resumidas, seguidas pelo detalhamento das metodologias de aquisição e tratamento dos dados, desenvolvimento do banco de dados digital, escolha de algumas áreas de estudo (estudo de caso) para análises geoestatísticas e as técnicas de modelagem bidimensional (2D), pseudo-tridimensional (2,5D) e tridimensional (3D) dos parâmetros obtidos dos relatórios de sondagem à percussão.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos: banco de dados digital, mapa de localização dos furos de sondagem, mapas hipsométricos, mapas de localização de seções de interesse, mapas 3D de camadas de solo, mapas 3D de NSPT, mapas 2,5D de superfícies de cada camada de solo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões inerentes aos assuntos tratados nos capítulos anteriormente descritos, como também estão presentes algumas sugestões para pesquisas futuras.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer da pesquisa e os apêndices.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- NOÇÕES DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ÁREAS URBANAS

A primeira noção que se deve ter a respeito de cartografia geotécnica é diferenciar os termos cartografia geotécnica e mapeamento geotécnico. A diferença fica evidenciada na medida em que se compreende mapeamento geotécnico como o processo que contém em si toda a técnica necessária para obtenção da carta geotécnica, ao passo em que cartografia geotécnica é a representação gráfica dos produtos do mapeamento.

Na definição proposta por ZUQUETTE (1987), mapa ou carta geotécnica é a representação gráfica na qual são avaliados todos os componentes de um ambiente geológico de particular interesse para o planejamento, projeto e construção civil. Segundo MATULA (1979), o mapeamento geotécnico tem sido usado nos mais diferentes países como uma ferramenta que ajuda a definir e fiscalizar a ocupação territorial das regiões, de uma maneira ajustada tecnicamente e respeitando as áreas de interesse ambiental e as condições necessárias para que a população desfrute-as sem alterar suas condições básicas de vida.

A elaboração de cartas geotécnicas é mais freqüente para o ambiente urbano, subsidiando a definição do direcionamento da expansão urbana. O mapeamento geotécnico, de acordo com ROMÃO & SOUZA (1996), auxilia no planejamento da ocupação do meio físico, amenizando os impactos ambientais provenientes da ação antrópica. O mapeamento possibilita, ainda, a orientação de anteprojetos de grandes obras de engenharia (projetos de urbanização, barragens, estradas, linhas de transmissão de energia), assim como a avaliação dos impactos causados por essas obras; localização de depósitos de rejeitos; definição de áreas a serem preservadas para proteção de recursos hídricos; entre outras possibilidades de utilização.

DEARMAN (1991) diz que mapeamento urbano é geralmente feito com escalas médias, ou seja, escala variando de 1/100000 até 1/10000, embora esta escala esteja condicionada às condições de uso do solo, como uma possível atividade de construção em terrenos com restrições diversas, que exija informações suficientes para o estudo de viabilidade e implantação de tal atividade. Nesse caso, a escala deve ser adequada para tais atividades, podendo variar de 1/2500 até 1/1000, e mais severamente pode-se utilizar escalas ainda maiores, na ordem de 1/500 ou até mesmo 1/100.

ZUQUETTE (1987) e RÊGO (1997) comentam em suas pesquisas que no Brasil, a aplicação dos trabalhos pioneiros que tratam da metodologia de mapeamento geotécnico ou similar teve seu lugar na década de 60 e 70. A extensão territorial do país, a realidade sócio-econômica, a carência de dados básicos sobre o meio físico e de planos diretores levaram à necessidade de uma metodologia que propusesse técnicas simples, baratas e objetivas, que não exigissem uma equipe numerosa de profissionais especialistas, e que utilizasse ao máximo os dados existentes.

2.2- GEOPROCESSAMENTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Segundo CÂMARA *et al.* (1996) o termo geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional. As ferramentas computacionais para geoprocessamento, chamadas de sistemas de informação geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georeferenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

2.2.1- SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Segundo CÂMARA *et al.* (1996) o termo sistemas de informação geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. A principal diferença de um SIG para um sistema de informação convencional é sua capacidade de armazenar tanto os atributos descritivos, como as geometrias dos diferentes tipos de dados geográficos. Assim, para cada furo (ponto) num cadastro de sondagens, um SIG guarda, além de informação descritiva como numeração do furo e endereço, a informação geométrica a partir das coordenadas geográficas do furo. A partir desses conceitos, é possível indicar as principais características do SIG:

- Inserir e integrar, em uma única base de dados, informações espaciais provenientes de meio físico-biótico, de dados censitários, de cadastros urbano e rural, e outras fontes de dados como imagens de satélite, e GPS;
- Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, por meio de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados geográficos.

A estrutura geral do SIG é formada pelos seguintes componentes que se relacionam de forma hierárquica (Figura 2.1):

- Interface homem-máquina, que define como o sistema será operado e controlado;
- Mecanismos de processamento de dados espaciais. Entrada e integração de dados;
- Funções de consulta e análise espacial;
- Mecanismos de visualização e plotagem;
- Gerência de banco de dados geográficos. Armazenamento dos dados espaciais e seus atributos.

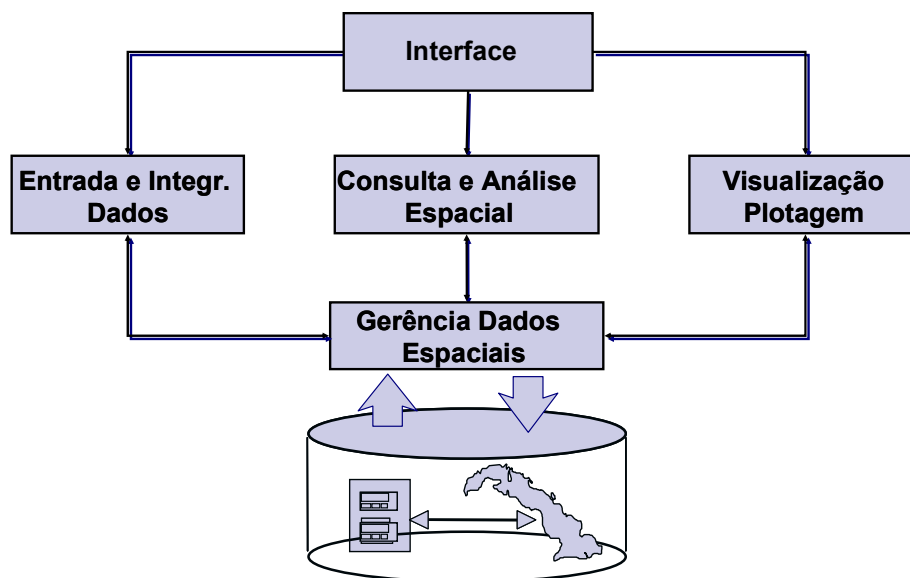


Figura 2.1 – Arquitetura de sistemas de informação geográfica (CÂMARA *et al.*, 1996).

CARNEIRO (1999) comenta que a conveniência de um SIG não reside somente na questão da lógica do armazenamento, mas também e, principalmente, numa abordagem tecnológica mais abrangente, que envolve a integração de dados, a combinação, a consulta, a recuperação e a atualização da informação disponível, proporcionando amplo embasamento para interpretações e sínteses dos fatores constituintes da natureza, sobretudo para os fins de planejamento e gestão.

2.2.2- REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE DADOS GEOGRÁFICOS

CÂMARA *et al.* (1998) diz que a representação computacional de dados geográficos é o resultado da transposição da realidade para o computador, e esta operação requer uma série complexa de mediações (Figura 2.2). Primeiro é preciso dar nomes às entidades da realidade (universo ontológico). Depois, gerar modelos formais que as descrevam de forma precisa

(universo formal). A seguir, escolher as estruturas de dados e algoritmos que melhor se adaptam a estes modelos formais. Por fim, fazer a implementação em um suporte computacional apropriado (universo de implementação).

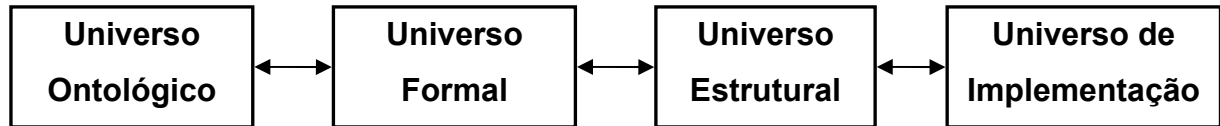


Figura 2.2 – Paradigma dos quatro universos de representação geográfica (CÂMARA *et al.*, 1998).

Toda essa estrutura tem como principal finalidade proporcionar ao usuário o reconhecimento e a aquisição de informações, de forma correta e clara, a respeito do espaço representado. Porém, de todos os universos citados, o universo estrutural tende a uma discussão semântica no meio cartográfico, pois trata dos elementos que representam as entidades geográficas, de maneira que o propósito do mapa determina a simbologia que deve ser usada para representar de forma adequada as características do fenômeno geográfico a que se refere. De maneira que essa estrutura de dados utilizada em banco de dados geográficos divide-se em duas classes: estruturas vetoriais e estruturas matriciais.

ROBINSON *et al.* em 1995, citado por FOSSE (2004), define mapa como a representação gráfica de fenômenos geográficos, de forma que esses podem ser classificados de cinco formas diferentes, quanto a sua dimensão espacial:

- Ponto (adimensional);
- Linha (unidimensional);
- Área (bidimensional);
- Volume (tridimensional);
- Espaço-tempo (quarta-dimensão).

SLOCUM em 1999, citado por FOSSE (2004), diz que os fenômenos pontuais são adimensionais e podem ser localizados pela especificação de duas ou três dimensões espaciais, ou seja, um par de coordenadas x e y (longitude e latitude) e uma coordenada z (altitude), quando for o caso. Os fenômenos lineares têm uma dimensão, e sua localização também pode ser definida por duas ou três coordenadas, representando o seu comprimento e não sua largura. O fenômeno de área possui duas dimensões, comprimento e largura, e pode ser definido por uma série de coordenadas (x,y) formando um polígono fechado.

O fenômeno volumétrico é o que merece mais atenção, pois do ponto de vista cartográfico pode ser dividido em 2,5D e 3D. Os vários pesquisadores desse tema, aqui citados, preocupam-se em definir o que é 2,5D e o que é 3D para evitar confusões, diante de tantas definições e discussões a respeito do tema. A proposta de SLOCUM em 1999, citado por FOSSE (2004), torna-se a mais consistente, quando define 2,5D como uma superfície, onde em cada ponto têm-se os valores de latitude, longitude e um valor acima (ou abaixo) de um ponto de referência, chamado ponto zero, o que faz mais sentido no ambiente SIG. Um exemplo clássico da representação desse fenômeno é a superfície da Terra, onde cada ponto tem as duas coordenadas e um valor de elevação em relação ao nível do mar (Figura 2.3). Ao elemento 3D, chamado de 3D verdadeiro pelo pesquisador, são associados múltiplos valores de elevação para cada par de coordenadas (x,y), como mostra a Figura 2.3. Assim, por exemplo, um ponto associado a esse fenômeno pode ser especificado por quatro valores: latitude, longitude, elevação (acima ou abaixo do ponto zero especificado) e o valor do fenômeno nesse ponto, como por exemplo, o valor de NSPT a cada metro perfurado no ensaio.

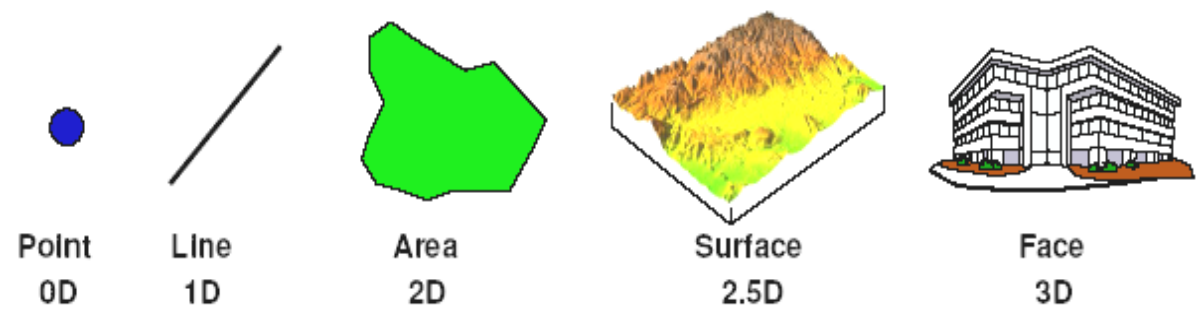


Figura 2.3 – Representação dos objetos no SIG (SPRAGUE *et al.*, 2006).

De acordo com TURNER (1997), o avanço computacional ocorrido nas duas últimas décadas tem possibilitado o desenvolvimento de aplicações que criam, apresentam e operam dados para descrever ao máximo a geometria e atributos de objetos tridimensionais. Segundo este mesmo autor, quando a superfície de elevação não é uma variável independente, ou seja, pode-se aceitar apenas um valor de elevação (z) para a superfície de localização (x, y), então esse sistema é mais bem definido como um quase 3D ou 2,5D. Entretanto, um sistema 3D contém três eixos de coordenadas independentes, e deve aceitar repetidas ocorrências (z) em cada localização (x,y).

Segundo SCOTT em 1996, citado por FOSSE (2004), na representação 2,5D (ou representação de superfície), enquanto x e y são as coordenadas espaciais, a altura z é um atributo, sendo impossível representar duas diferentes alturas para um mesmo ponto. Essa

representação (2,5D) aparenta 3D, mas mantém um modelo de dados 2D. Por isso, essa matriz de atributo é considerada 2,5D, por ser visualizada em três dimensões, enquanto o 3D representa o volume.

Um objeto 2,5D também pode ser definido como uma superfície no espaço, enquanto um objeto 3D, ou volumétrico, contém superfície e interior, além de coordenadas x, y e z no espaço.

Portanto, os pesquisadores aqui referenciados classificam os fenômenos tridimensionais em 2,5D e 3D quando representam superfícies e volumes, respectivamente. Para o ambiente SIG, esta parece ser a definição mais coerente, pois fenômenos volumétricos sempre possuem mais de duas coordenadas z para um mesmo ponto com coordenadas x e y.

2.2.3- BANCO DE DADOS

CÂMARA & QUEIROZ (2006) dizem que a construção de uma base com informações de dados geográficos, é um processo demorado e trabalhoso, e onde se gasta maior parte dos recursos. Portanto, uma base com informações de dados geográficos, melhor definida como banco de dados digital, precisa ter:

- Metodologia consistente - definição única dos atributos, padrões de interpretação dos dados e dos procedimentos a serem executados;
- Identidade de objetos - definição da articulação dos mapas (recortes arbitrários do espaço) que deverão compor a área de trabalho e identidade única dos objetos;
- Suporte a múltiplas escalas e projeções - os objetos além de serem únicos no banco de dados, podem ter várias representações, por exemplo, um rio pode ser representado por uma linha em uma escala e por um polígono em outra;
- Acesso aos dados.

2.2.4- SIG 3D – UMA NOVA FORMA DE MODELAGEM

MAGUIRE *et al.* (1991) diz que para muitas aplicações SIG, a questão de modelagem 3D em um ambiente SIG é um assunto chave. Toda informação espacial manipulada é geralmente referenciada para um sistema de coordenadas cartesianas 2D. Essa limitação de convenção para aplicações geocientíficas restringe o âmbito de aplicação em mapeamentos que requerem espacialização no eixo vertical (eixo z), como é o caso de dados geotécnicos que têm uma

estrutura de dados tridimensionais e que demandam um sistema de informações nessa dimensão.

SILVA & SOUZA (01/01/2007) comentam que enquanto a maioria dos SIG atuais limitam-se a representar duas dimensões da realidade, cada vez mais domínios de aplicações requerem SIG que representem três dimensões: geologia, engenharia, planejamento civil e militar, entre outros. Essas aplicações não só fazem uso da modelagem e visualização dos dados em 3D, como também manipulam esses dados. Dessa forma está surgindo um novo tipo de SIG: são os chamados SIG 3D.

SILVA & SOUZA (01/01/2007) ainda explicam que é importante notar a diferença entre essa nova geração de SIG e a anterior, no tratamento dado à terceira dimensão, ou seja, a variável profundidade ou altitude. Os SIG 2D usualmente representam duas dimensões espaciais, permitindo a possibilidade de um atributo do tipo altitude ou profundidade (z) para cada posição (x, y). Já os SIG 3D tratam as três dimensões (x, y, z) como atributos espaciais, o que significa que o sistema lida diretamente com a altitude. Dessa forma, rotinas para cálculo de distâncias, áreas e volumes podem envolver as três coordenadas automaticamente, não necessitando de nenhuma rotina especial desenvolvida pelo usuário.

SILVA & SOUZA (01/01/2007) também explicam que os SIG 3D apresentam algumas desvantagens: (1) a massa de dados tende a aumentar muito, (2) os cálculos geométricos em 3D são mais complexos do que em 2D, e (3) dados tridimensionais são mais difíceis de serem obtidos.

2.2.5- MODELAGEM DE SÓLIDOS NO SIG 3D

SILVA & SOUZA (01/01/2007) dizem que sistemas de informação geográfica tridimensionais atualmente em desenvolvimento são baseados, sobretudo em sistemas de *CAD*. Apesar de terem realmente muito em comum, pois ambos lidam com objetos tridimensionais, pode-se apontar algumas diferenças básicas entre os sistemas de *CAD* e de SIG 3D:

- Os mapas tridimensionais em um SIG tendem a ter essencialmente a forma de uma laje fina, no sentido de que a sua amplitude vertical é bem menor do que a contrapartida horizontal. Ou seja, as maiores distâncias verticais ao longo do eixo z serão bem menores do que as maiores distâncias horizontais ao longo dos eixos x e y ;

- SIG possuem uma característica descritiva bem mais evidente, até mesmo pela forma de se coletar dados;
- SIG lida com objetos que possuem inúmeros atributos não-espaciais;
- Embora o SIG represente um sólido, superfícies tridimensionais surgem com uma frequência bem maior.

Com relação à representação dos objetos em 3D, existe uma gama de opções, cada uma com vantagens e desvantagens (MAGUIRE *et al.*, 1991). A Figura 2.7 mostra a representação desses objetos. LI em 1994, citado por ISMAIL (2001), propõe uma classificação inicial, de representação desses objetos, dividida em duas partes:

- Representação baseada em superfícies: Nesta classificação os mais utilizados são as grades (*grids*), modelo de formas (*shape model*), modelo de faces (*facet model*) e o *B-Rep* (*Boundary Representation*). Cada um tem seus pontos fortes, fracos e campos de aplicação apropriados;
- Representação baseada em volumes: Há muitos modos de representação básica de volume, dentre tantos, os mais utilizados são os do tipo *Octree*, construção de sólidos geométricos (CSG) e o *TEN 3D* (*Tetrahedral Network*), cada um tem seus pontos fortes, fracos e campos de aplicação apropriados. Algumas dessas representações são comuns em sistemas *CAD*, mas não em SIG.

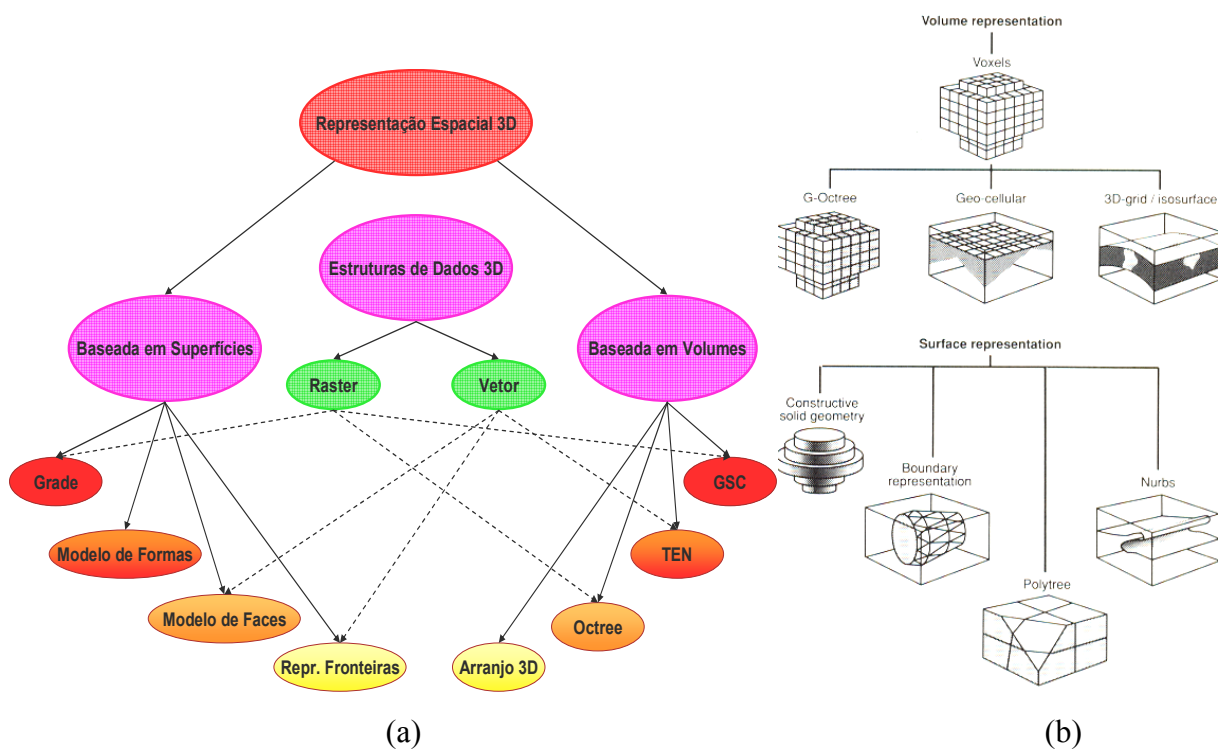


Figura 2.4 – Representação de objetos em ambiente tridimensional. (a) organograma de representação dos objetos 3D e (b) formas de representação dos objetos 3D.

Uma vez que os dados são coletados, o próximo passo é a representação desses dados dentro de um espaço 3D. Essa tarefa pode ser realizada utilizando os vários métodos até aqui apresentados, dos quais a forma final será tipicamente uma grade ou um formato triangular. Dentre essas técnicas a que mais vem obtendo dados satisfatórios no ambiente geotécnico é a estrutura de dados *raster* 3D, que por meio de *voxels* (sigla utilizada para definir o menor elemento de volume dentro de uma grade regular tridimensional) espacializa os dados. A Figura 2.8 mostra um exemplo da estrutura *raster* 3D e *voxel*.

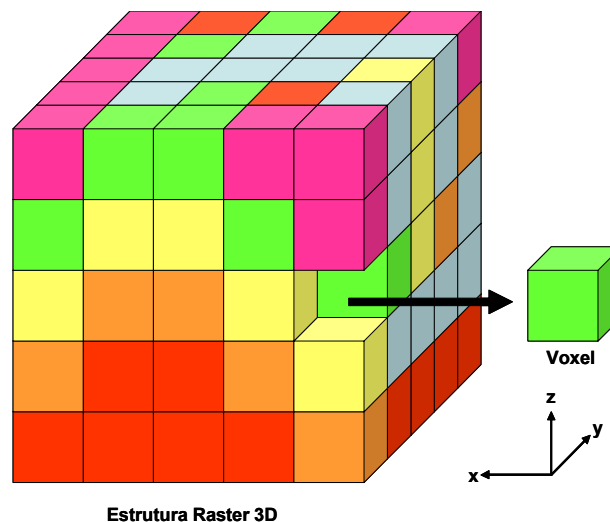


Figura 2.5 – Representação da estrutura *raster* 3D e *voxel*.

2.3- MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO E GEOESTATÍSTICA

Os métodos de interpolação são usados quando geralmente dispomos de informações pontuais. Nesta pesquisa as informações provêm de relatórios de sondagens à percursão devidamente georeferenciadas em áreas de estudo pré-estabelecidas. A idéia é estimar parâmetros em locais não amostrados na mesma área de estudo.

BURROUGH & McDONNELL (1998) explicam que os dados de observações pontuais são convertidos para campos contínuos por meio de interpolação de valores em pontos com valores conhecidos, tal como passar um mapa vetorial para matricial (*raster*). Toma-se por princípio que o valor de um atributo num ponto tende a ser semelhante aos de pontos vizinhos por comparação.

A interpolação, de maneira geral, tem a capacidade de apoiar os processos de decisão espacial, bem como passar informação vetorial (pontos) para matricial (*raster*). A dúvida que se tem é

saber que tipo de interpolador se ajusta melhor aos dados que serão interpolados e ao resultado esperado.

Há vários tipos de interpolação e qualquer uma pode ser feita a partir de dados pontuais, linhas e áreas. Nos interpoladores globais usa-se uma única função para toda a área em estudo. Por sua vez, os interpoladores locais aplicam algoritmos repetidamente a subconjuntos dos pontos de amostragem. Os interpoladores exatos respeitam os dados existentes, enquanto que os aproximados assumem incertezas (erros) nos dados existentes, respeitando as tendências globais dos dados.

A modelagem geoestatística é um ramo da estatística que lida com problemas associados ao espaço. Tem por base que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados e as propriedades são a autocorrelação, a continuidade e a dependência espacial. Segundo CAMARGO (1997), a diferença básica entre os métodos tradicionais de interpolação espacial e a geoestatística resume-se em: os primeiros requerem valores das amostras independentes espacialmente, enquanto que a geoestatística requer valores das amostras correlacionadas (dependentes) no espaço. Por esta característica, a geoestatística tem alcançado grandes aplicações em disciplinas ligadas a geociências para efetuar estimativas e/ou simulações de variáveis em locais não amostrados.

DAVIS em 1986, citado por SOZINHO (2002), diz que a geoestatística originou-se pela necessidade de se efetuarem estimativas de reservas minerais. Por volta de 1950, na África do Sul, D.G. Krige concluiu que não poderia estimar de forma adequada o conteúdo de ouro em blocos mineralizados se não fosse considerada a configuração geométrica das amostras (localização e volume). Estas avaliações, a priori empíricas e de aplicações localizadas, foram importantes para o engenheiro francês Georges Matheron desenvolver a teoria que estuda o comportamento de variáveis distribuídas espacialmente e que representam um fenômeno natural. Pois uma das características das variáveis denominadas regionalizadas, constitui-se na sua continuidade ou variabilidade espacial, cuja modelagem representa a base de toda a análise geoestatística. Assim, Matheron, durante a década 60, generalizou os métodos de estimativas usados por Krige e desenvolveu os fundamentos teóricos da variabilidade de amostragem associada com o tamanho das amostras, bem como formulou uma teoria completa.

Segundo STURARO & LANDIM (1995), para fazer a previsão em locais onde não foram coletadas amostras, é preciso ter o modelo do comportamento do fenômeno natural que deu origem às variáveis que se quer estudar. É muito difícil conhecer em detalhes os fenômenos naturais, bastando para isso imaginar o processo de formação de solos ou rochas que normalmente são o suporte das propriedades geológicas. Se houvesse um conhecimento perfeito dos processos físicos e/ou químicos que geraram os valores das variáveis, seria possível usar modelos determinísticos com um número pequeno de amostras para fazer estimativas. No entanto, em geociências, as variáveis comumente pesquisadas são o resultado de um vasto número de processos com interações complexas, que praticamente impossibilitam a sua descrição quantitativamente. Assim, para análise da maioria das variáveis, oriundas de fenômenos naturais, é necessário se admitir alguma incerteza no comportamento destes fenômenos entre duas posições espaciais da amostragem. Essa complexidade dos processos que originam os dados faz parecer que os mesmos possuem um comportamento aleatório, quando, de fato, eles refletem o desconhecimento que se tem de todos os processos e das suas interações no fenômeno natural. É neste contexto que a geoestatística, baseada em modelos probabilísticos, surge como uma consistente alternativa para modelar este comportamento com o uso de funções aleatórias.

ROMÃO (2006) aplicou a metodologia geoestatística para o mapeamento do subsolo de 560 furos de sondagens SPT, em Goiânia (GO). As informações compiladas permitiram o entendimento da distribuição de propriedades geotécnicas referentes aos compartimentos definidos na modelagem da superfície do terreno para cada atributo morfométrico. Os valores relativos aos índices NSPT foram espacializados segundo o método de interpolação denominado de método da vizinhança natural. O método da vizinhança natural consiste numa interpolação por média ponderada pelo inverso da distância que cria uma triangulação de Delaunay dos pontos de entrada e seleciona os nós mais próximos na parte convexa formada pelas facetras em torno dos pontos de interpolação, e a partir dessa vizinhança denominada natural, pondera os seus valores de forma proporcional a essa área convexa. McCOY & JOHNSTON em 2002, citados por ROMÃO (2006), dizem que esse método é mais apropriado nos casos em que os pontos amostrados são distribuídos com densidade descontínua, sendo uma técnica de interpolação que tem a vantagem de não ser necessário se especificar parâmetros tais como raio, número de pontos vizinhos, ou mesmo de ponderações. Logo, foi aplicado esse método de modelagem às amostras utilizadas a partir das sondagens

geotécnicas realizadas na área de estudo, por estarem concentradas na região central de Goiânia e possuírem uma densidade espacial descontínua.

ROMÃO (2006) ainda diz que a partir dos valores de NSPT contidos no banco de dados foram realizadas consultas específicas, tais como a espessura dos materiais inconsolidados e a profundidade do nível d'água. Modelos numéricos de terreno foram então elaborados segundo o método da vizinhança natural, para a modelagem dos índices NSPT a determinadas profundidades, para a modelagem da espessura do material inconsolidado e para a modelagem da profundidade do nível d'água a partir da superfície, considerando as duas estações ao longo do ano, para os meses de abril a setembro (estação seca) e para os meses de outubro a março (estação chuvosa). Com a finalidade de comparação, para a modelagem da espessura dos materiais inconsolidados também foi realizada a modelagem por krigeagem ordinária.

Segundo LANDIM (1998), a geoestatística trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial, mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente casuais e as totalmente determinísticas. Apresentam uma aparente continuidade no espaço. A continuidade geográfica atribuída se manifesta pela tendência que a variável tem de apresentar valores próximos em dois pontos vizinhos e diferentes à medida que os pontos vão ficando mais distantes um do outro. A variável apresenta os seguintes atributos:

- Localização – uma variável regionalizada é numericamente definida por um valor, esta variável está associada a uma amostra de: tamanho, forma e orientação específica;
- Anisotropia – algumas variáveis regionalizadas são anisotrópicas, isto é, apresentam variações graduais numa direção e irregulares em outras e;
- Continuidade – dependendo do fenômeno que está sendo observado, a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser grande ou pequena.

A variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

O uso de procedimentos geoestatísticos baseados em técnicas de krigeagem no ambiente de geoprocessamento engloba análise exploratória, geração e modelagem de semivariograma, validação e interpolação por krigeagem.

Este trabalho limita-se ao uso dos métodos de interpolação: inverso ponderado da distância e krigagem.

2.3.1- INVERSO PONDERADO DA DISTÂNCIA (*IDW*)

LANDIM (2000) comenta que um dos métodos de interpolação mais utilizados é o inverso ponderado da distância, mais comumente conhecido como *IDW – Inverse Distance Weighted*. Calcula-se o valor de um ponto fazendo a média com os pontos mais próximos, a média é ponderada pelo inverso da distância aos pontos. Suas principais características são:

- Mais utilizado dentre os métodos de distância ponderada;
- Método muito utilizado para geração de MNT;
- O peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui, conforme aumenta a distância entre eles;
- Pontos amostrados de localização próxima ao ponto a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distantes;
- Ao calcular o valor de um ponto, a soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados vizinhos é igual a um (1), ou seja, é atribuído um peso proporcional à contribuição de cada ponto vizinho;
- Quando a posição de uma observação coincide com um ponto, seu valor recebe peso 1, enquanto todos os valores vizinhos recebem peso zero (0); o resultado será o nó recebendo o valor exato da observação ali situada;
- O expoente de ponderação pode ser selecionado;
- Os resultados são variáveis, desde altamente tendenciosos a favor dos pontos mais próximos a resultados onde o peso é praticamente o mesmo para todos os pontos próximos.

O expoente tem os seguintes efeitos sobre os resultados estimados:

- Expoentes baixos (0 a 2): destacam anomalias locais;
- Expoentes altos (3 a 5): suavizam anomalias locais;
- Expoentes ≥ 10 : resultam em estimativas "poligonais" (planas);
- Expoente = zero: resulta em estimativas de "média móvel";
- Expoente = 2: inverso do quadrado da distância.

A Equação 2.1 define o processo de cálculo do valor a ser estimado.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (2.1)$$

Z = valor interpolado para o nó do reticulado (grid);

Z_i = valor do ponto amostrado vizinho ao nó;

h_{ij} = distância entre o nó da grade e Z_i ;

β = expoente de ponderação (peso);

n = número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

As médias móveis são muito usadas em SIG para transformar dados pontuais em matriciais (*raster*) e não se ajustam bem com dados espaçados irregularmente. A Tabela 2.1 mostra um resumo das principais vantagens e desvantagens desse interpolador.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do interpolador inverso ponderado da distância (Modificado de LANDIM, 2000).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • fácil de entender matematicamente. • algoritmo bem conhecido e discutido. • disponível em muitos <i>softwares</i>. • utiliza pouco tempo de computação. • é razoavelmente fiel aos valores amostrados originais. • não estima valores de pontos amostrados maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas. • muito bom para analisar variações de pequena amplitude (anomalias) entre os dados irregularmente distribuídos. • bom estimador para propósitos gerais. • pode interpolar por setor, onde o usuário pode escolher a quantidade de amostras, por setor, que serão levadas em consideração, em uma determinada estimativa de valor. 	<ul style="list-style-type: none"> • não estima valores de Z_i maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; ruim para estimativas de dados estruturais, isto é, para determinar o topo ou a base de horizontes estratigráficos ou litológicos. • muito difícil obter a localização precisa de uma determinada isolinha se os valores amostrados não contiverem este valor; é difícil projetar a curva de altitude zero se os dados não contiverem zero ou valores negativos. • Influência de valores locais anômalos é dificilmente removida; dados em <i>clusters</i> podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso. • cria muitas observações ilusórias devido às limitações do método de interpolação, o que pode ser reduzido ou eliminado se o raio de busca for reduzido, se a tendência for removida previamente e se ocorrer mudanças no expoente utilizado, no tamanho da grade, no número de pontos utilizados e ponderação direcional.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • estimativas de propósito gerais. • distribuição uniforme de dados. • boa densidade de dados. • para destacar anomalias locais. • para calcular volume em operações entre <i>grids</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • dados agrupados • tendência pronunciada presente. • dados com falhas e distribuídos de forma esparsa. • não quiser imperfeições no modelo.

2.3.2- KRIGEAGEM (*KRIGING*)

CÂMARA *et al.* (1996) explica que o termo krigagem ou krigeagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o pioneiro a introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração. Segundo este autor, inicialmente, o método de krigeagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos, mapeamento hidrológico, mapeamento atmosférico e outros campos correlatos.

CÂMARA *et al.* (1996) ainda comenta que a diferença entre a krigeagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a $1/n$ (n = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa a posição do valor interpolado da posição dos valores observados. Na krigeagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigeagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima.

LANDIM (2000) resume a krigeagem como:

- Método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas;
- Nas variáveis regionalizadas deve existir certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido;
- Ao ser constatado que a variável não possui continuidade espacial na área estudada, não há sentido lógico em estimar/interpolar usando-se a krigeagem;
- Único meio disponível para se verificar a existência ou não de continuidade espacial, e se houver, quais os parâmetros que caracterizam este comportamento regionalizado, com uso de análise variográfica;
- Utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis, pelos quais os pesos adequados são obtidos a partir de um variograma, representativo da média das diferenças ao quadrado dos valores irregularmente distribuídos de Z_i , a intervalos de distâncias especificados (*lags*);

- É necessário um sistema de equações em matrizes, no qual são usados os parâmetros variográficos para a obtenção dos pesos a serem usados, para o cálculo do valor do ponto a ser estimado/interpolado;
- Quando um variograma é adequadamente elaborado, a estimativa por krigeagem resultante é reconhecida como sendo a estimativa linear melhor e não tendenciosa (*BLUE = best, linear, unbiased estimate*).

A Tabela 2.2 mostra um resumo das principais vantagens e desvantagens desse interpolador.

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens da krigeagem (Modificado de LANDIM, 2000).

Vantagens	Desvantagens
<p>Valores estimados baseiam-se no semivariograma; se for apropriado, fornece as seguintes informações:</p> <ul style="list-style-type: none"> • parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade; • parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsóide) e, se elipsóide, orientação do eixo principal; • parâmetros adequados da grade: tamanho das células, forma e orientação; • natureza da distribuição espacial da variável investigada: uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial x casual; • previsibilidade da variação espacial da variável avaliada. <p>Se o semivariograma for apropriado, controla a krigeagem, com as seguintes vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados; • permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade: o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); • permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; • precisão, contornos suaves, artefatos indesejáveis raros a não ser nas bordas do mapa. • interpolador exato: os valores estimados para os nós das células são exatamente iguais ao valor amostrado naquela posição. • estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados. • modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais. <p>Calcula variâncias dos pontos estimados (erros), que podem ser utilizadas para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • quantificar um intervalo de valores (\pm) para os pontos estimados, definindo estimativas realistas; • calcular intervalos de confiança para verificar a probabilidade dos valores ocorrerem dentro de um intervalo de ± 2 unidades de desvio padrão da média; variâncias mapeadas podem indicar locais para adensamento da amostragem. 	<ul style="list-style-type: none"> • O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto resultados são sempre obtidos. • É necessário tempo para preparo do variograma e entendimento de geoestatística. • Pode não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos. • Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos. • Necessidade de software capacitado. • Presença de discontinuidades podem requerer o ajuste dos dados, a serem interpolados, em mais de um modelo.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais. • Anomalia local não presente em toda a área, por ex. em ambiente fluvial. • Quiser estimar com base em uma média global. • Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados (<i>clustered</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> • Menos de 30 pontos amostrados: número insuficiente de pares para modelar o semivariograma. • Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado). • Amostras de populações diversas.

KRAJEWSKI & GIBBS em 1966, citados por LANDIM (2000), ainda fornecem uma comparação entre os principais algoritmos de interpolação, descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Comparação de resultados entre os principais interpoladores (LANDIM, 2000).

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão geral
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da Distância	3	4	2	4
Superfície/ Tendência	5	1	3	2
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigeagem	2	3	5	1

1 = melhor → 5 = pior

LANDIM (2000) ainda comenta que os tipos de krigreagem mais utilizados são:

- **Krigeagem simples:** Assume que as médias locais são relativamente constantes e de valor muito semelhante à média da população que é conhecida. A média da população é utilizada para cada estimativa local, em conjunto com os pontos vizinhos estabelecidos como necessários para a estimativa.
- **Krigeagem ordinária:** As médias locais não são necessariamente próximas da média da população usando-se apenas os pontos vizinhos para a estimativa. É o método mais usado em problemas ambientais.
- **Cokrigeagem:** É uma extensão do anterior a situações em que duas ou mais variáveis são espacialmente dependentes e a variável que se quer estimar não está amostrada com a intensidade com que estão as outras variáveis dependentes, utilizando-se os valores destas e as suas dependências para estimar a variável requerida.

No processo de interpolação por krigreagem, após a aquisição dos dados, o primeiro passo é a construção de um semivariograma experimental. Segundo CAMARGO (1997), o semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigreagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. Os conceitos de semivariograma e semivariância são necessários para que se entenda todo o processo de interpolação. A semivariância é a medida do grau de dependência espacial entre duas amostras. A magnitude da semivariância entre dois pontos depende da distância entre eles, implicando em semivariâncias menores para distâncias menores e semivariâncias maiores para distâncias maiores. O gráfico das semivariâncias em função da distância a um ponto é chamado de semivariograma.

CAMARGO (1997) diz que no semivariograma experimental (Figura 2.6), observam-se os seguintes componentes:

- Alcance (a) – distância que as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- Patamar (C) – valor do semivariograma correspondente ao alcance. Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras;
- Efeito pepita (C_0) - valor de y quando $h=0$, revela a descontinuidade do semivariograma.

Segundo LANDIM (2000), a razão entre C_0/C determina o grau de aleatoriedade dos dados:

- $C_0/C < 0,15$ – componente aleatória pequena;
- $0,15 < C_0/C < 0,30$ – componente aleatório significativo; e
- $C_0/C > 0,30$ – componente aleatório muito significativa.

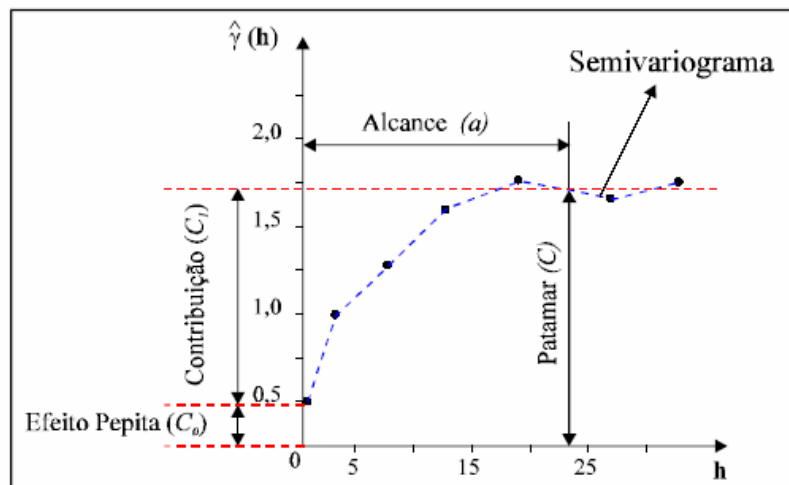


Figura 2.6 – Exemplo de semivariograma experimental (CAMARGO, 1997).

Na krigeagem geralmente são utilizados três tipos de semivariogramas chamados de modelos transitivos, são eles: modelo esférico, modelo exponencial e modelo gaussiano. A Figura 2.7 ilustra o gráfico de cada modelo e a Tabela 2.4 mostra as fórmulas e características de cada modelo.

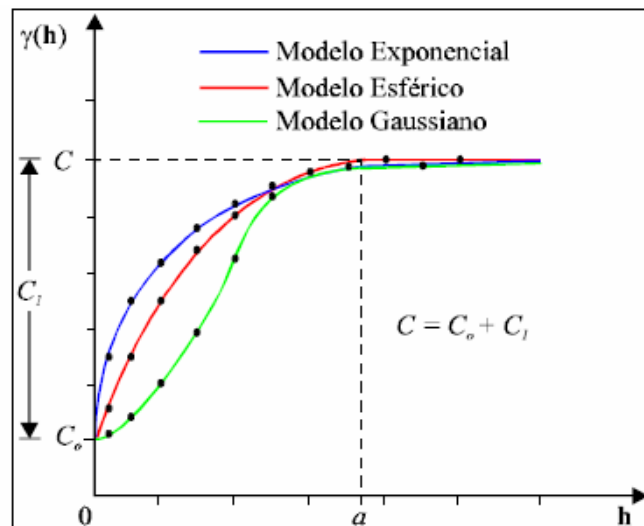


Figura 2.7 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais (CAMARGO, 1997).

Tabela 2.4 – Modelos transitivos de semivariograma (CAMARGO, 1997).

Modelo	Fórmula	Característica
Esférico	$\gamma(h) = C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{ hl }{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{ hl }{a} \right)^2 \right] \rightarrow h \leq a$ $\gamma(h) = C \rightarrow h > a$	Tem comportamento linear na origem do gráfico. É um modelo comum e de fácil aplicação.
Exponencial	$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-\frac{ hl }{a}\right) \right]$	Tem comportamento não linear na origem do gráfico e só alcança quando $h \rightarrow \infty$.
Gaussiano	$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right]$	Na curva do gráfico a curva tem comportamento parabólico.

Os semivariogramas experimentais podem ser elaborados para várias direções, com o intuito de detectar anisotropias. As direções mais usadas, que são 0° (leste-oeste), 45° (nordeste-sudoeste), 90° (norte-sul) e 135° (noroeste-sudeste).

SOZINHO (2002) cita que dentre os métodos de estimativas mais empregados, o método geostatístico da krigagem ordinária pode ser considerado como o melhor estimador linear, dado as seguintes características:

- As estimativas são feitas através de uma combinação linear dos dados;
- O método procura calcular que o erro residual seja igual a zero e;
- Tem como objetivo minimizar a variância dos erros.

SOZINHO (2002) ainda comenta que as duas últimas proposições, do ponto de vista prático, são difíceis de serem concebidas visto que não se conhece os valores reais dos pontos estimados para avaliar o erro e a variância verdadeiros. Para superar esses aspectos, a krigagem ordinária baseia-se em um modelo probabilístico, cujo erro residual médio, bem como a variância dos erros podem ser estimados. Dessa forma, pode-se atribuir pesos às amostras utilizadas nas estimativas de tal modo que o erro médio seja zero e a variância dos erros seja mínima.

A estimativa do valor da variável $\hat{V}(x_o)$ em posição não amostrado x_o é feita pela combinação linear $V(x_i)$ para $i = 1, 2, \dots, n$ por meio da Equação 2.2.

$$\hat{V}(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i V(x_i) \quad (2.2)$$

Onde, w_i representa os fatores de ponderação (pesos de krigagem) associados a cada valor $V(x_i)$. Assim, o erro da estimativa pode ser expresso pela Equação 2.3.

$$R(x_o) = \hat{V}(x_o) - V(x_o) \quad (2.3)$$

Onde $V(x_o)$ representa a modelagem aleatória do valor verdadeiro em x_o . A variância dos erros pode ser definida pela Equação 2.4.

$$Var\{R(x_o)\} = Var\{\hat{V}(x_o) - V(x_o)\} \quad (2.4)$$

O sistema de equações da krigagem ordinária pode ser escrito em notação matricial como sistema de $n+1$ equações, como se mostra na Equação 2.5.

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tilde{C}_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ W_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Cuja solução é:

$$[C]\{W\} = \{D\} \quad (2.6)$$

Onde, a matriz C corresponde aos valores de covariância dos pontos amostrais com eles mesmos. O vetor D consiste nos valores de covariância entre os pontos amostrais e os locais onde se deseja estimar. O vetor W corresponde aos pesos de krigeagem e μ ao multiplicador de Lagrange.

Assim, as estimativas em posições não amostradas podem ser feitas via Equação 2.6 e a respectiva variância do erro de estimativa minimizada (σ_R^2) pode ser calculada pela Equação 2.7.

$$\sigma_R^2 = \sigma^2 - [W]^T x [D] \quad (2.7)$$

2.4- INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

TSUTSUMI (2000) explica que um programa de investigação deve levar em consideração a importância e o tipo da obra, bem como a natureza do subsolo e da rocha. Assim, a construção de um metro de uma barragem necessita de um conhecimento mais minucioso do subsolo e da rocha do que aquele necessário à construção de uma residência térrea. Solos que apresentam características peculiares de comportamento, como colapso, alta compressibilidade, elevada sensibilidade e outras características geotécnicas de importância para um projeto de engenharia, exigem cuidados e técnicas diferentes das utilizadas em solos com comportamento típico.

Um programa de investigação deve fornecer várias informações do subsolo e da rocha, dentre as mais importantes pode-se considerar:

- Espessura e dimensões em planta de cada camada para a profundidade de interesse do projeto, além da caracterização de cada camada através de observações locais ou de resultados de laboratório;
- Profundidade do topo da camada rochosa ou do material impenetrável ao amostrador;
- No caso de rocha, o tipo litológico e suas condições geológicas, além de propriedades e características intrínsecas à rocha como a presença de descontinuidades, permeabilidade, porosidade, densidade, resistência, entre outras características;

- Existência de água com a respectiva posição do nível d'água no período da investigação e, se possível, sua variação durante o ano. Se for o caso indicar a existência de pressões artesianas;
- As propriedades do solo, tais como permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

Nem sempre os projetos necessitam de todas estas informações. Já para certos projetos específicos, alguns dados não relacionados acima podem ser necessários.

2.4.1- SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT (*STANDARD PENETRATION TEST*)

O ensaio SPT (*Standard Penetration Test*), também conhecido por sondagem de simples reconhecimento, é o mais utilizado pelos projetistas de fundações no Brasil, devido ao seu baixo custo e por fornecer dados como a resistência à penetração do solo, descrição dos horizontes de solo e obtenção fácil de amostras deformadas. A sua execução está normalizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR-6484 (ABNT, 2001) e as recomendações constantes, tanto para equipamento quanto para procedimento, devem ser rigorosamente seguidas para a obtenção de resultados comparáveis com ensaios realizados em outros lugares.

Segundo TSUTSUMI (2000), a história da sondagem de simples reconhecimento começa em 1902 com uma proposta de Cow para um processo de amostragem, utilizando um amostrador de parede grossa com diâmetro de 25,4 mm e comprimento cravado variando entre 300 e 450 mm, em substituição à amostragem por circulação de água, de forma que o amostrador era cravado no solo, usando-se um martelo de massa aproximada de 50 kg. Em 1927, Hart e Fletcher introduziram um amostrador, com diâmetro externo e interno de 51 e 35 mm, respectivamente, constituído por três partes, engate, corpo e sapata, tendo como principal modificação o fato do corpo ser bipartido, possibilitando uma coleta mais fácil da amostra retirada. Este amostrador, conhecido como amostrador Raymond ou Terzaghi-Peck é, atualmente, o único que deve ser usado no ensaio de penetração realizado durante a elaboração de uma sondagem de simples reconhecimento. A Figura 2.4 mostra um corte de parte do amostrador, indicando as principais dimensões da cabeça e sapata para fabricação.

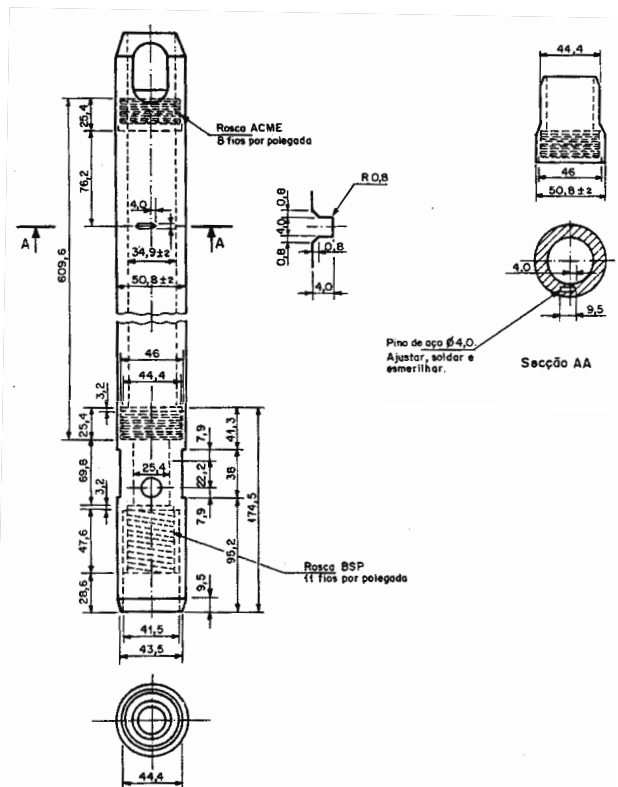


Figura 2.8 – Dimensões em milímetros de parte do amostrador Raymond mostrando a cabeça e sapata (NBR 6484/2001).

Segundo OLIVEIRA (1996), em 1930, H. A. Mohr introduziu a contagem do número de golpes para fazer penetrar o amostrador no terreno. O ensaio fornece dados de posição do nível d'água ou dos níveis d'água encontrados durante a perfuração; descrição do tipo de solo encontrado a cada metro perfurado e permite a retirada de amostras deformadas. Ao número de golpes aplicados convencionou-se chamar de NSPT.

TSUTSUMI (2000) explica que a sondagem de simples reconhecimento foi introduzida no Brasil em 1939, pela Seção de Solos e Fundações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), que em face das dificuldades encontradas em conseguir tubos com as dimensões do amostrador Raymond, desenvolveu seu próprio amostrador, utilizando-o até a década de 70. Com a tendência internacional de normalização do equipamento e procedimento de ensaio este equipamento deixou de ser usado.

Segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001), a cravação do amostrador-padrão é interrompida antes dos 45 cm de penetração sempre que ocorrer uma das seguintes situações:

- Em qualquer dos três segmentos de 15 cm, o número de golpes ultrapassar 30;
- Um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação; e
- Não se observar avanço do amostrador-padrão durante a aplicação de cinco golpes

sucessivos do martelo.

Ainda, segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001) o processo de perfuração por circulação de água, associado aos ensaios penetrométricos, deve ser utilizado até onde se obtiver, nesses ensaios, uma das seguintes condições:

1. Quando, em 3 m sucessivos, se obtiver 30 golpes para penetração dos 15 cm iniciais do amostrador-padrão;
2. Quando, em 4 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 30 cm iniciais do amostrador-padrão; e
3. Quando, em 5 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para a penetração dos 45 cm do amostrador-padrão.

Dependendo do tipo de obra, das cargas a serem transmitidas às fundações e da natureza do subsolo, admite-se a paralização da sondagem em solos de menor resistência à penetração do que os valores descritos anteriormente, desde que haja uma justificativa geotécnica ou solicitação do cliente (ABNT, 2001).

Na sondagem de simples reconhecimento, dividem-se as operações em diversas fases:

- Abertura do furo;
- Ensaio de penetração;
- Amostragem;
- Avaliação do nível d'água;
- Identificação e classificação das amostras;
- Relatório.

A elaboração de uma sondagem é um processo repetitivo das três primeiras fases, para cada metro de solo sondado, conforme esquema mostrado na Figura 2.5. Assim, em cada metro faz-se inicialmente a abertura do furo de um comprimento igual a 55 cm, deixando-se os restantes 45 cm de solo para a realização do ensaio de penetração e amostragem.

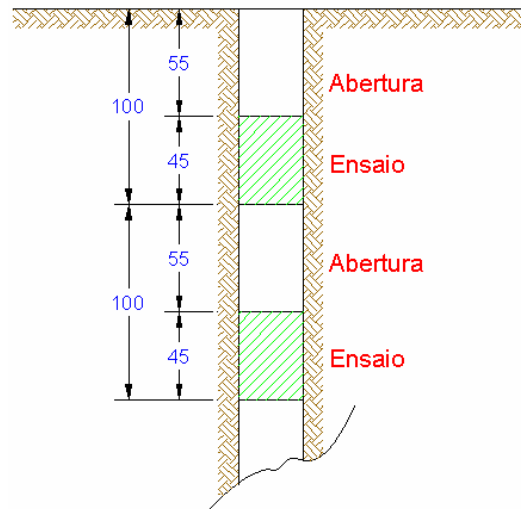


Figura 2.9 – Esquema de elaboração do ensaio SPT.

Os resultados de uma sondagem devem ser apresentados em forma de relatório e anexos. O relatório fornece dados gerais sobre o local e o tipo de obra, descrição sumária sobre equipamentos e outras julgadas pertinentes. Uma planta de localização dos furos e da referência de nível (RN) adotada, bem como o perfil de cada furo, deve ser apresentado como anexo em cada boletim de sondagem. Em cada perfil deverão constar as seguintes informações:

- Número do furo de sondagem;
- Cota da boca do furo;
- Data de início e término da sondagem;
- Posição das amostras coletadas e das não recuperadas;
- Profundidade das diversas transições entre camadas e do fim do furo;
- Os índices de resistência à penetração (NSPT);
- Identificação, classificação e a convenção gráfica das amostras segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995) e NBR 13441 (ABNT, 1995);
- Posição do NA e data de observação;
- Processos de perfuração empregados e profundidades atingidas: TH para trado helicoidal, CA para circulação de água;
- Cota da boca do tubo de revestimento.

O número e distribuição de sondagens em planta dependerão do tipo de obra e da fase em que se encontra a investigação do subsolo. Quando a área de projeção em planta do edifício tem sua localização bem definida dentro do terreno, segundo a NBR 8036 (ABNT, 1983), o

número mínimo de sondagens a serem realizadas é em função de tal área de projeção, conforme mostrado na Figura 2.10.

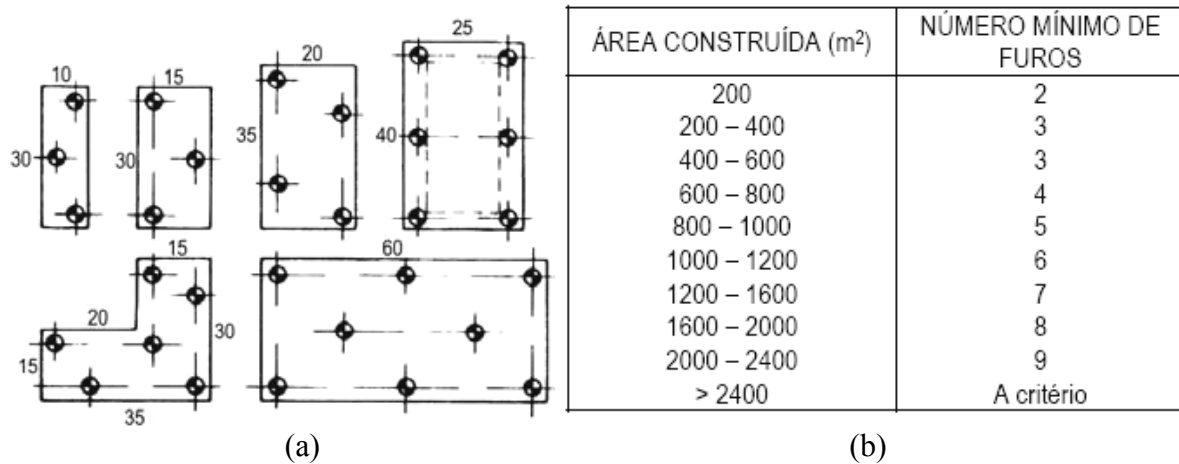


Figura 2.10 – Distribuição dos furos de sondagens - (a) Sugestão para distribuição em planta dos furos (b) Tabela com o número mínimo de furos. (NBR 8036/83).

Segundo a NBR 8036 (ABNT, 1983), nos casos em que não houver ainda disposição em planta dos edifícios, como nos estudos de viabilidade ou escolha de local, o número de sondagens deve ser fixado de forma que a distância máxima entre elas seja de 100 m, com um mínimo de três sondagens.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- INTRODUÇÃO

Com o intuito de dar enfoque real à aplicação deste trabalho, contou-se com a colaboração das empresas de fundações brasilienses: Embre Ltda, Sonda Engenharia Ltda, Infrasolo e Francisco Oliveira Filho, que disponibilizaram os dados de sondagem. Além das empresas de fundações, o apoio da Codeplan (Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central) foi de fundamental importância, fornecendo a base cartográfica de Brasília em escala 1:2000.

Quanto ao mapeamento bidimensional, foram feitos o modelo numérico de terreno (MNT) para toda área tombada, e o cadastramento de 1563 furos de sondagem.

Quanto ao mapeamento tridimensional, o trabalho dividiu-se em três estudos de caso. O primeiro é o Projeto Ilhas do Lago que consiste em um conjunto de prédios localizados na orla do Lago Paranoá em Brasília (DF), o segundo é a Universidade de Brasília (UnB), e o terceiro o Setor Sudoeste de Brasília (DF).

Após essa breve descrição, são apresentados os materiais e métodos empregados na busca dos objetivos deste trabalho.

3.2- ESTRUTURA METODOLÓGICA

A estrutura metodológica consistiu basicamente de procedimentos usuais que envolvem a investigação científica, entre eles, a reunião e o diagnóstico de informações inerentes ao tema do estudo, a interpretação dos dados e síntese dos resultados. As definições e métodos técnicos de cada etapa do trabalho estão resumidas nos itens a seguir:

1. Pesquisa da bibliografia existente com respeito aos aspectos teóricos e práticos do tema;
2. Levantamento de informações - Esta etapa consistiu no levantamento de informações disponíveis da área em estudo, abrangendo a base cartográfica de Brasília na escala 1:2000 e mais de 4000 relatórios de sondagens à percussão dos quais foram posteriormente selecionadas as 1563 sondagens;
3. Criação de um modelo numérico de terreno (MNT) que auxiliou na obtenção da cota da boca dos furos de sondagem e geração de mapas hipsométricos;

4. Elaboração de uma metodologia para criação do banco de dados digital;
5. Escolha de três áreas, com maior concentração de sondagens, para estudo de caso;
6. Caracterização e espacialização volumétrica (mapa 3D de subsolo) das camadas de solo por meio de perfis de solo previamente definidos a partir dos relatórios de sondagem de cada área de estudo;
7. Elaboração de mapas 3D de NSPT;
8. Elaboração de mapas 3D de nível d'água, de acordo com a data de interesse (período de recarga do aquífero, estiagem, ou data específica).

3.3- MATERIAIS

3.3.1- BASE CARTOGRÁFICA

O processo de obtenção dos dados necessários da área em estudo começou com a aquisição da base cartográfica do Plano Diretor de Organização Territorial (PDOT) de Brasília de 1998 junto à Codeplan, as folhas utilizadas para a montagem do mosaico da área tombada estão descritas no apêndice B. A base cartográfica na escala 1:2000 apresenta os seguintes dados vetoriais: vias, lagos e rios, edifícios comerciais, edifícios residenciais, edifícios públicos, igrejas e templos, escolas, hospitais, quadras, lotes, conjuntos, pontos cotados e curvas de nível com equidistância de 1m, e que cobrem toda área de estudo. A Figura 3.1 mostra uma parte da base cartográfica montada no programa computacional *Spring 4.2*.

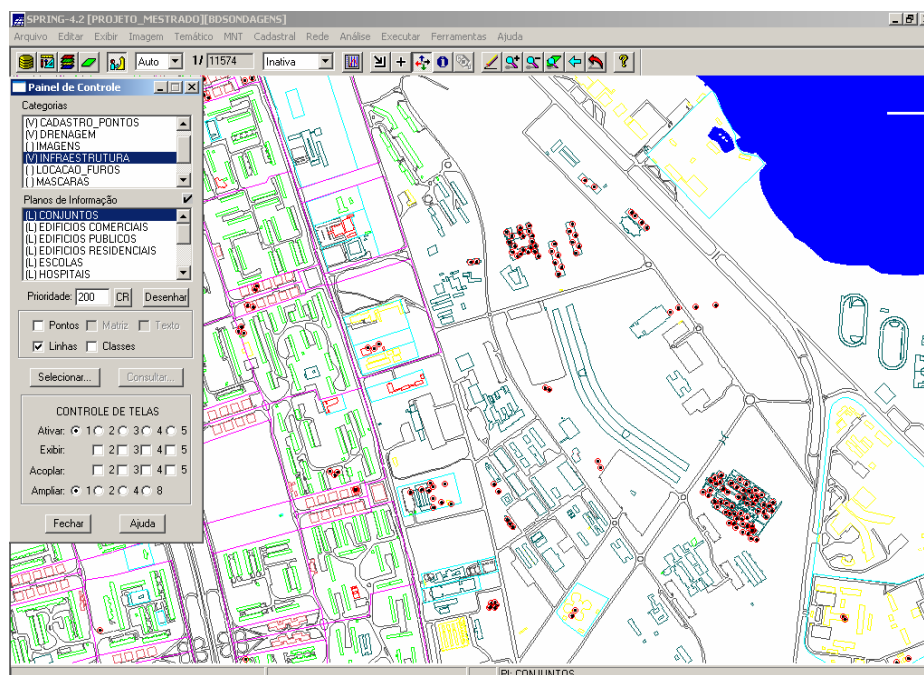


Figura 3.1 – Base cartográfica na escala 1:2000 exibida no *Spring 4.2*.

3.3.2- RELATÓRIOS TÉCNICOS DE SONDAGEM

Os relatórios técnicos de sondagem foram obtidos junto às empresas de sondagem, sendo que o período de elaboração desses ensaios varia entre os anos de 1973 até 2006.

A utilização dos relatórios técnicos de sondagens foi condicionada à existência de informações suficientes sobre a sua localização exata (georeferenciamento) na base cartográfica digital, de maneira que muitos relatórios foram descartados, em muitos casos por ter endereço fora da área tombada. Outros foram descartados por conta de mudanças e atualizações do sistema de endereçamento da base cartográfica, dificultando a localização dos endereços dos relatórios técnicos. Um número pequeno de sondagens também tiveram que ser descartadas devido à forma bastante simplificada de representação de alguns croquis de localização dos furos de sondagem, impossibilitando o georeferenciamento dos furos. É importante para o banco de dados digital ter um bom grau de confiança nessas informações para que se obtenham bons produtos.

3.3.3- PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

O primeiro programa computacional utilizado para este trabalho foi o *Spring* 4.2 que é um programa cedido gratuitamente pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O *Spring* 4.2 é um SIG no estado-da-arte com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. Com o *Spring* 4.2 foi possível montar o mosaico da base cartográfica, elaborar o modelo numérico de terreno (MNT) da área de estudo com uso das curvas de nível com equidistância de 1m, além de permitir a localização dos furos de sondagem, coleta da cota da boca dos furos de sondagem e espacialização 2D do banco de dados com 1563 furos de sondagens localizadas, devidamente comportadas em modelo cadastral.

O segundo programa computacional utilizado foi o *Access* 2003 da *Microsoft*[®], trata-se de um gerenciador de banco de dados que permitiu a construção de toda estrutura do banco de dados digital de sondagens e inserção das informações.

O terceiro programa computacional foi o *RockWorks* 2006, um SIG com diversas funcionalidades tais como: gerenciamento e espacialização tridimensional dos furos de sondagem, permite interpolação de dados tridimensionais, visualização bidimensional e tridimensional e construção de modelos volumétricos (3D e 4D).

3.4- MÉTODOS

A primeira fase do trabalho, já comentada, foi obter a base cartográfica da Codeplan. Após a obtenção das folhas em formato digital (dxf – *AutoCAD*) da área de estudo, procedeu-se o mosaico das mesmas com uso do *Spring 4.2*. No *Spring 4.2* foi criado um projeto com as seguintes coordenadas UTM: Xmin = 182241, Xmax = 201842, Ymin= 8241556, Ymax= 8261364, datum Astro-Chuá com meridiano central de 45°, cobrindo toda área de estudo da pesquisa. O mosaico foi organizado de maneira a agrupar cada informação em modelos de dados organizados em categorias e planos de informações correspondentes à informação, por exemplo: categoria (VIAS) – plano de informação (Ruas, Estradas, Ferrovias, Rodovias).

A identificação de cada camada (*layer*) importada do *AutoCAD* para o *Spring 4.2* permite a organização e o reconhecimento da informação de acordo com a categoria, por exemplo, no caso das curvas de nível, as isolinhas foram inseridas dentro de uma categoria MNT, esta categoria possui um modelo de dados que permite ao programa computacional realizar o modelo numérico de terreno a partir das isolinhas, reconhecendo o atributo de elevação (z) embutido em cada isolinha. Já a categoria que recebe o cadastro de furos tem um outro modelo de dados do tipo cadastral, com a interligação de uma representação vetorial (ponto, linha ou polígono) a uma tabela de atributos. A Figura 3.2 mostra a estrutura do trabalho no *Spring 4.2* e a Figura 3.3 mostra a seqüência de elaboração do modelo numérico de terreno (MNT) no *Spring 4.2*.

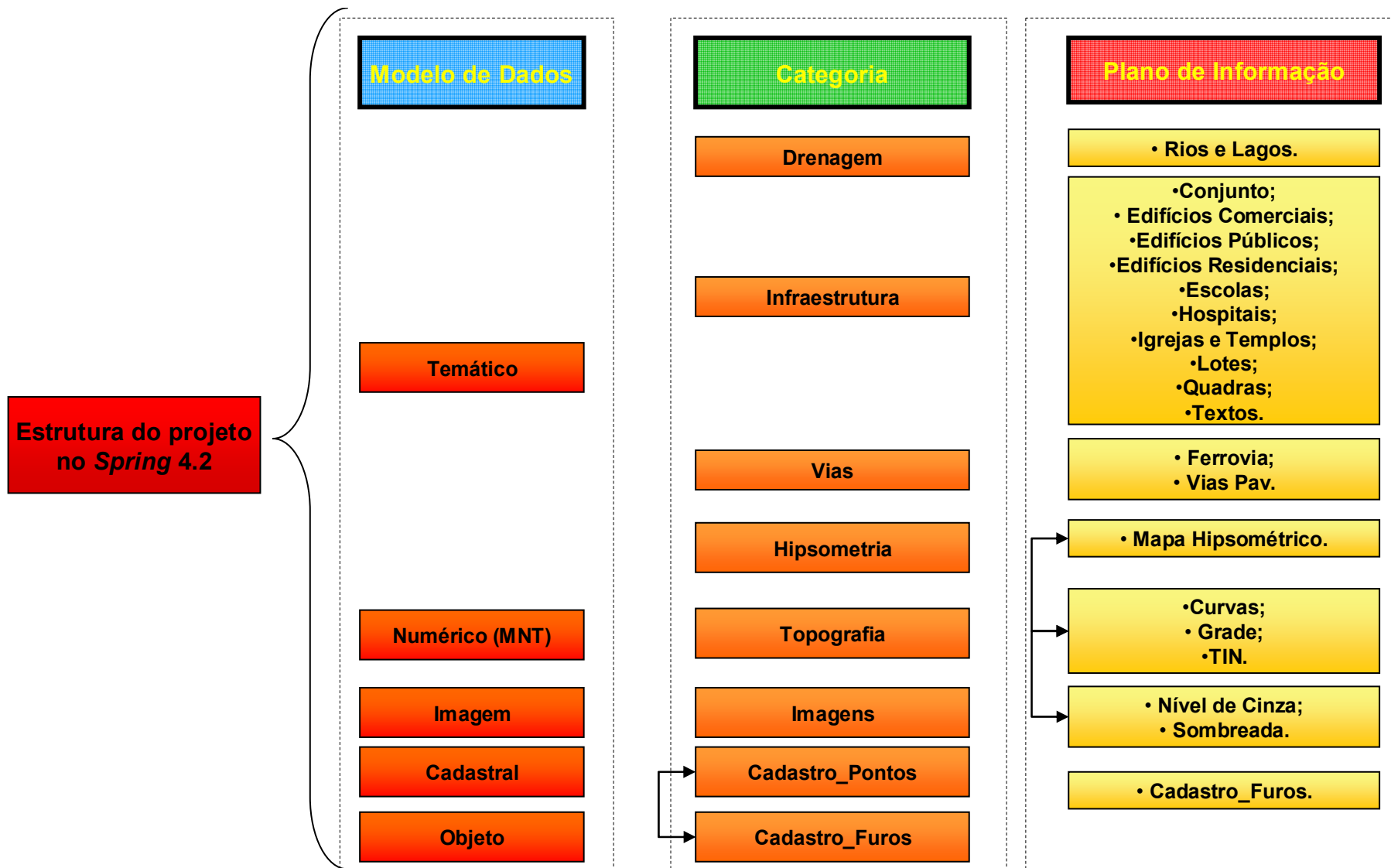


Figura 3.2 – Estrutura do trabalho no Spring 4.2.

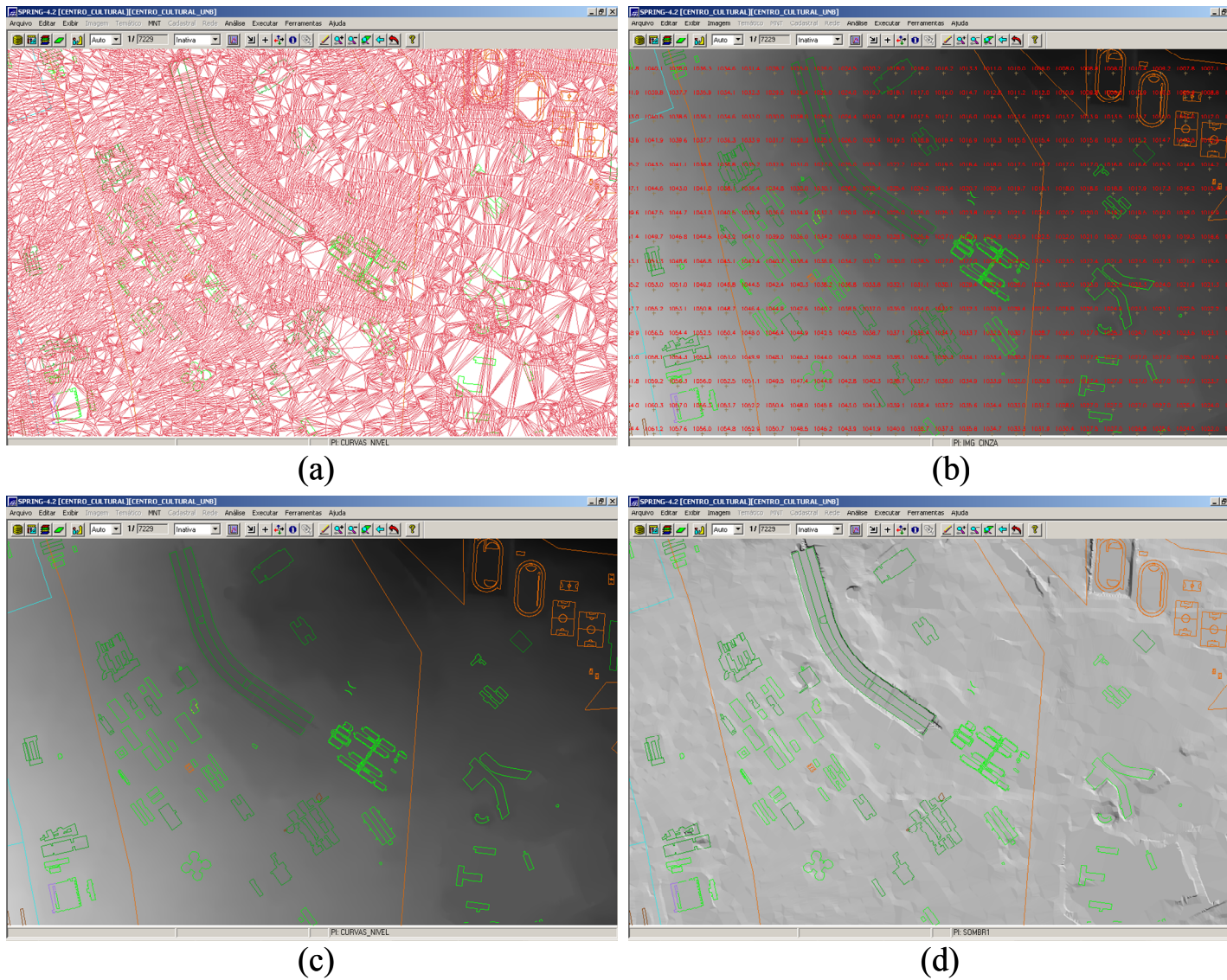


Figura 3.3 – Sequência de elaboração do modelo numérico de terreno no *Spring 4.2* – (a) Geração da grade triangular (*TIN*), (b) Geração da grade retangular a partir do *TIN*, (c) Geração de imagem em níveis de cinza, (d) Geração de imagem sombreada.

Após essa etapa, houve o processo de aquisição das informações junto às empresas de fundações. Essa fase constou de duas etapas: a primeira foi digitalizar por meio de um escaner todos os relatórios que estavam em formato analógico (Figura 3.4a). Esses foram convertidos para um formato digital com extensão *TIFF*. Os arquivos eletrônicos resultantes do processo de digitalização dos formatos analógicos foram organizados por ano de realização do ensaio, empresa, e um sistema de endereçamento inserido na própria pasta para facilitar a busca no computador (Figura 3.5). De todas as sondagens obtidas (em torno de 4000 relatórios de sondagem), 60% estavam no formato analógico. A segunda etapa foi organizar os arquivos concedidos pelas empresas em formato digital (arquivos com extensão *dxf* – *AutoCAD*), agrupando-os no mesmo processo de organização: ano de realização do ensaio, empresa e sistema de endereçamento (Figura 3.5), a Figura 3.4b mostra um exemplo de relatório em formato digital (*dxf* – *AutoCAD*).

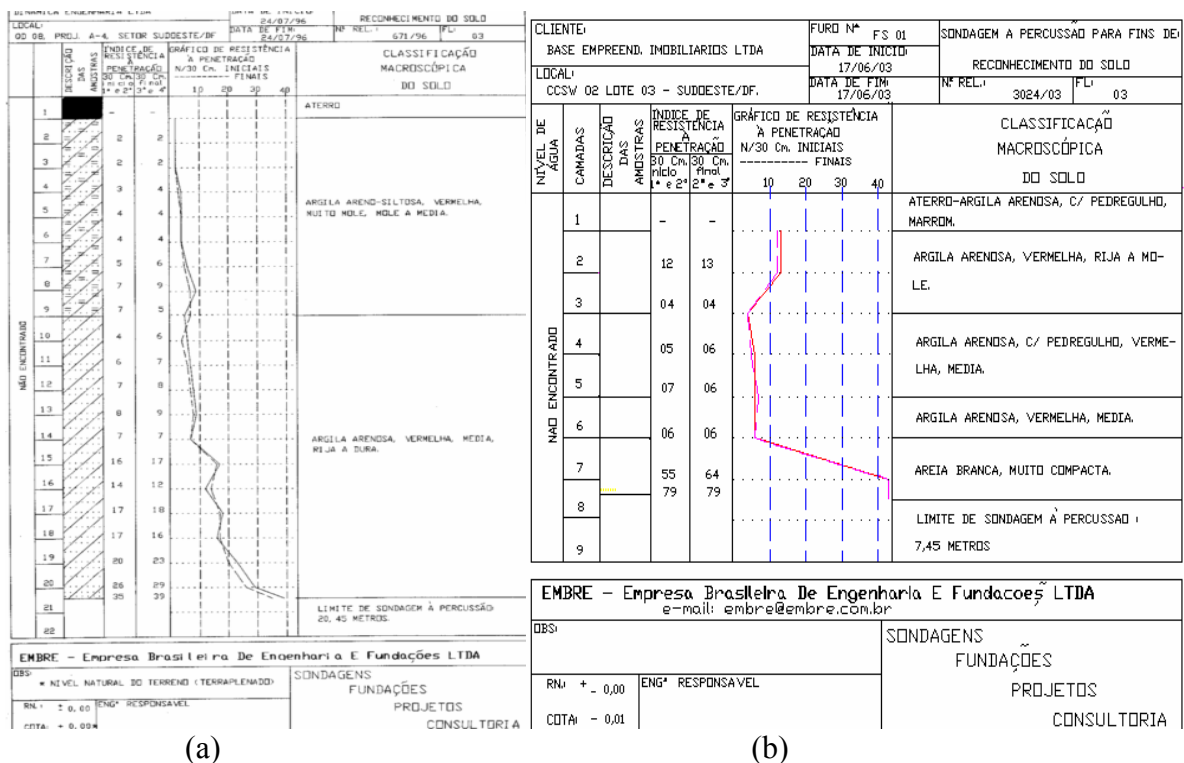


Figura 3.4 – Exemplo de relatório de sondagem – (a) formato analógico digitalizado (extensão *TIFF*) e (b) formato digital (extensão *dxf* – *AutoCAD*).

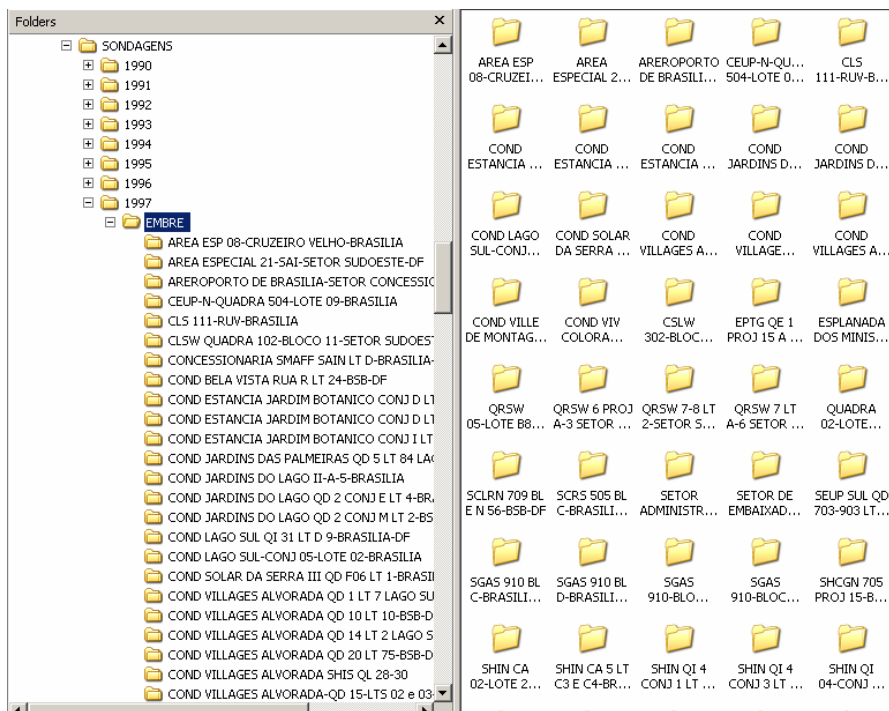


Figura 3.5 – Organização dos relatórios de sondagens com sistema de endereçamento embutido na própria pasta.

3.4.1- SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E SISTEMA DE BANCO DE DADOS DIGITAL

Os sistemas de informação geográfica (SIG) são aplicados para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos, esse tratamento foi dividido aqui em duas partes principais. A primeira consistiu no desenvolvimento de um sistema de banco de dados digital destinado ao armazenamento e administração dos dados que caracterizam o solo. A outra parte consistiu da modelagem e visualização, usando programas computacionais de SIG.

O sistema de banco de dados é parte essencial deste estudo. É a coluna vertebral que sustentou todo o desenvolvimento do trabalho. Com os dados reunidos, houve a necessidade da estruturação do banco de dados digital para que fossem gerados arquivos para serem inseridos ao sistema de informações geográficas. Posteriormente, a preocupação foi quanto à acessibilidade e à qualidade das informações que os dados gerariam no programa. Desta forma, os dados foram divididos em tabelas e formulários.

Por meio da utilização do programa computacional *Spring* 4.2 e com o uso do gerenciador de banco de dados *Access* 2003 da *Microsoft*[®] foi montada uma estrutura de organização das informações, para que, na medida em que novas informações fossem geradas, mais campos e

estruturas fossem implementadas ao programa. A Figura 3.6 e Figura 3.7 mostram o formulário elaborado para inserção dos dados e as tabelas resultantes respectivamente.

COD_FURO	PONTO	ANO	EMPRESA					
SP-15	SP-226	2004	EMBRE					
ENDEREÇO								
TRECHO ENSEADA 01 - PROJETO ORLA - POLO 03 - LOTE 24								
DATA	X	Y	Z					
12/28/2004	195638.22	8252417.58	1006.66					
PROF_NA	CT_NA	PROF_IMP	CT_IMP	PROF_SND	CT_SND			
3.79	1002.87	25	981.66	25.3	981.36			
ESP_CAM1	DESC_1	COR1						
20	ARGILA ARENOSA	VERMELHO						
ESP_CAM2	DESC_2	COR2						
3	SILTE ARENOSO COM PEDREGULHOS	VARIEGADO						
ESP_CAM3	DESC_3	COR3						
2.3	SILTE ARGILOSO	VARIEGADO						
ESP_CAM4	DESC_4	COR4						
ESP_CAM5	DESC_5	COR5						
NSPT_1M	NSPT_2M	NSPT_3M	NSPT_4M	NSPT_5M	NSPT_6M	NSPT_7M	NSPT_8M	NSPT_9M
2	2	2	2	2	2	4	9	7
NSPT_10M	NSPT_11M	NSPT_12M	NSPT_13M	NSPT_14M	NSPT_15M	NSPT_16M	NSPT_17M	NSPT_18M
22	26	23	32	36	39	36	32	33
NSPT_19M	NSPT_20M	NSPT_21M	NSPT_22M	NSPT_23M	NSPT_24M	NSPT_25M	NSPT_26M	NSPT_27M
34	35	30	41	37	62	74		
NSPT_28M	NSPT_29M	NSPT_30M						

Figura 3.6 – Formulário para inserção dos dados contidos nos relatórios de sondagens.

COD_FURO	PONTO	ANO	EMPRESA	ENDEREÇO	DATA	X	Y	Z	PROF_NA	CT_N
FS1	SP-269	1992	EMBRE	QRSW-1-LOTE B8-SETOR SUDOESTE	7/13/1992	185892.3917	8251664.7653	1150.22		
FS2	SP-270	1992	EMBRE	QRSW-1-LOTE B8-SETOR SUDOESTE	7/10/1992	185910.3887	8251665.0947	1150.53		
FS1	SP-271	1992	EMBRE	QRSW-2-LOTE B7-SETOR SUDOESTE	7/14/1992	185863.5999	8251824.8081	1148.93		
FS2	SP-272	1992	EMBRE	QRSW-2-LOTE B7-SETOR SUDOESTE	7/15/1992	185848.6034	8251824.4834	1148.61		
FS1	SP-273	1992	EMBRE	QRSW 1-BL B3-SETOR SUDOESTE	9/9/1992	185796.0715	8251626.5788	1148.94		
FS2	SP-274	1992	EMBRE	QRSW 1-BL B3-SETOR SUDOESTE	9/10/1992	185777.5767	8251626.1399	1148.4		
FS1	SP-278	1992	EMBRE	SHCSW QRSW 1-BLOCO 01-SUDOESTE	3/10/1992	185740.96	8251573.746	1147.94		
FS2	SP-279	1992	EMBRE	SHCSW QRSW 1-BLOCO 01-SUDOESTE	3/11/1992	185722.13	8251573.5117	1147.64		
FS1	SP-282	1993	EMBRE	CRUZEIRO NOVO-QUADRA 501-COLEGIO CIMAN	7/6/1993	184758.3907	8251071.1288	1124.94		
FS1	SP-290	1993	EMBRE	QRSW 01-PROJECÃO B1-SETOR SUDOESTE	11/5/1993	185721.8153	8251648.7968	1147.2		
FS2	SP-291	1993	EMBRE	QRSW 01-PROJECÃO B1-SETOR SUDOESTE	11/6/1993	185739.4879	8251649.243	1147.45		
FS1	SP-292	1993	EMBRE	SCLR SW 101-LOTE 05-SETOR SUDOESTE	7/13/1993	187031.1188	8251203.2976	1131.4		
FS2	SP-293	1993	EMBRE	SCLR SW 101-LOTE 05-SETOR SUDOESTE	7/14/1993	187012.6406	8251207.72	1132.19		
FS3	SP-294	1993	EMBRE	SCLR SW 101-LOTE 05-SETOR SUDOESTE	7/14/1993	187007.5199	8251186.3243	1132.04		
FS4	SP-295	1993	EMBRE	SCLR SW 101-LOTE 05-SETOR SUDOESTE	7/15/1993	186993.9044	8251189.5829	1132.46		
FS1	SP-311	1994	EMBRE	QD 104-PROJ E-SETOR SUDOESTE	6/23/1994	186261.941	8250467.2774	1125.22		
FS2	SP-312	1994	EMBRE	QD 104-PROJ E-SETOR SUDOESTE	6/24/1994	186270.4594	8250472.5154	1125.25		
FS3	SP-313	1994	EMBRE	QD 104-PROJ E-SETOR SUDOESTE	6/27/1994	186258.8534	8250481.8138	1125.5		
FS4	SP-314	1994	EMBRE	QD 104-PROJ E-SETOR SUDOESTE	6/27/1994	186255.7048	8250486.9213	1125.61		

Figura 3.7 – Trecho da tabela do cadastro de sondagens.

É importante salientar que houve um processo de tratamento dos dados existentes nos relatórios de sondagem, de maneira que dados como descrição do solo e cor foram processados, para que houvesse compatibilidade com as descrições das normas NBR-6502 (ABNT, 1995) e NBR-13441 (ABNT, 1995). Para isso, o formulário foi criado de forma que houvesse uma interligação das descrições de campo com as descrições dessas normas (Figura 3.8). Com relação às camadas de solo, baseado no perfil típico de solo proposto, foram estabelecidas somente até cinco camadas, que atenderam a todos os relatórios de sondagem.

COD_FURO	PONTO	ANO	EMPRESA
F51	SP-269	1992	EMBRE
ENDEREÇO			
QRSW-1-LOTE B8-SETOR SUDOESTE			
DATA	X	Y	Z
7/13/1992	185892.3917	8251664.7653	1150.22
DESCRICAÇÃO			
PROF_NA	CT_NA	PROF_IMP	CT_IMP
		19.5	
ESP_CAM1	DESC_1	CDR1	
16	ARGILA SILTOSA	VERMELHO	
ESP_CAM2	ARGILA SILTOSA	CDR2	
3.5	ARGILA SILTOSA COM PEDREGULHOS	VARIEGADO	
ESP_CAM3	ATERRO ARENOSO	CDR3	
	ATERRO ARGILOSO	CDR4	
ESP_CAM4	ATERRO SILTOSO	CDR4	
	MATERIA ORGANICA	CDR5	
ESP_CAM5	DESC_5	CDR5	
NSPT_1M	NSPT_2M	NSPT_3M	NSPT_4M
2	4	6	7
NSPT_5M	NSPT_6M	NSPT_7M	NSPT_8M
8	6	5	6
NSPT_9M	NSPT_10M	NSPT_11M	NSPT_12M
7	7	8	8
NSPT_13M	NSPT_14M	NSPT_15M	NSPT_16M
10	13	20	32
NSPT_17M	NSPT_18M	NSPT_19M	NSPT_20M
4	5	5	5
NSPT_21M	NSPT_22M	NSPT_23M	NSPT_24M
5	5	5	5
NSPT_25M	NSPT_26M	NSPT_27M	NSPT_28M
5	5	5	5
NSPT_29M	NSPT_30M		

Figura 3.8 – Detalhe do formulário de cadastro de sondagens indicando a escolha dos parâmetros de descrição do tipo de solo e cor de acordo com a NBR-6502 (ABNT, 1995) e NBR-13441 (ABNT, 1995).

Depois de inseridas no sistema de informações geográficas *Spring 4.2*, as tabelas podem ser acessadas de forma muito simples, como mostra a Figura 3.9. O *Spring 4.2* permite acesso completo às informações do banco de dados de forma otimizada.

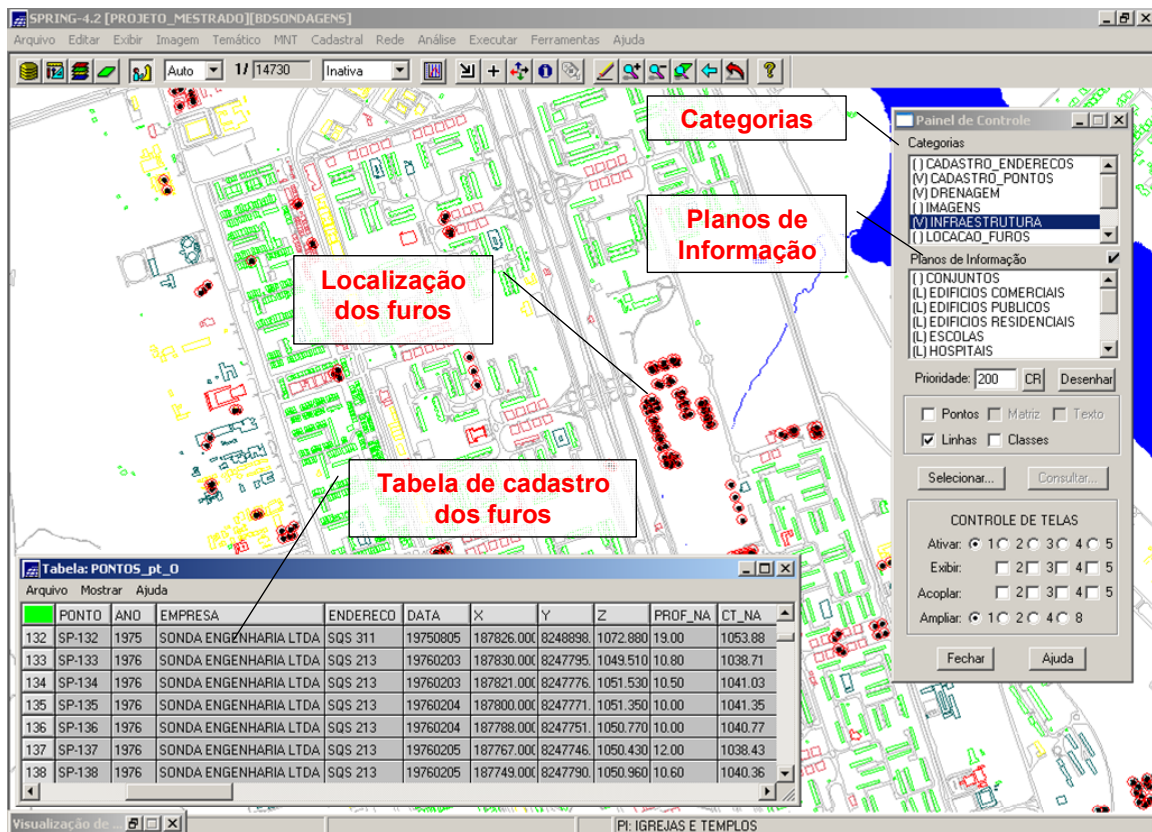


Figura 3.9 – Associação da tabela de atributos aos furos de sondagem no *Spring 4.2*.

3.4.2- GERAÇÃO DO MODELO DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: PROJETO ILHAS DO LAGO

O Projeto Ilhas do Lago consiste em um conjunto de edificações localizadas na orla do Lago Paranoá em Brasília (DF) que enfrenta problemas geotécnicos complexos, como a presença do lençol freático superficial em vários locais e uma espessa camada de argila mole (Figura 3.10). Com um conjunto de 45 furos de sondagem distribuídos em uma área retangular de 210 m por 310 m, ou seja, uma malha densa de furos, que motivou, devido a tais problemas técnicos aqui citados, o estudo de caso para este trabalho. As coordenadas UTM que delimitam essa área são: $X_{min} = 195450$, $X_{max}=195650$, $Y_{min}= 8252300$, $Y_{max}=8252600$, $Z_{min}=970$, $Z_{max}=1010$, datum Astro-Chuá com meridiano central de 45° . A Figura 3.11 mostra a localização das sondagens na área de estudo.



Figura 3.10 – Fotos do local da obra com detalhe do nível d'água aflorante - Projeto Ilhas do Lago.

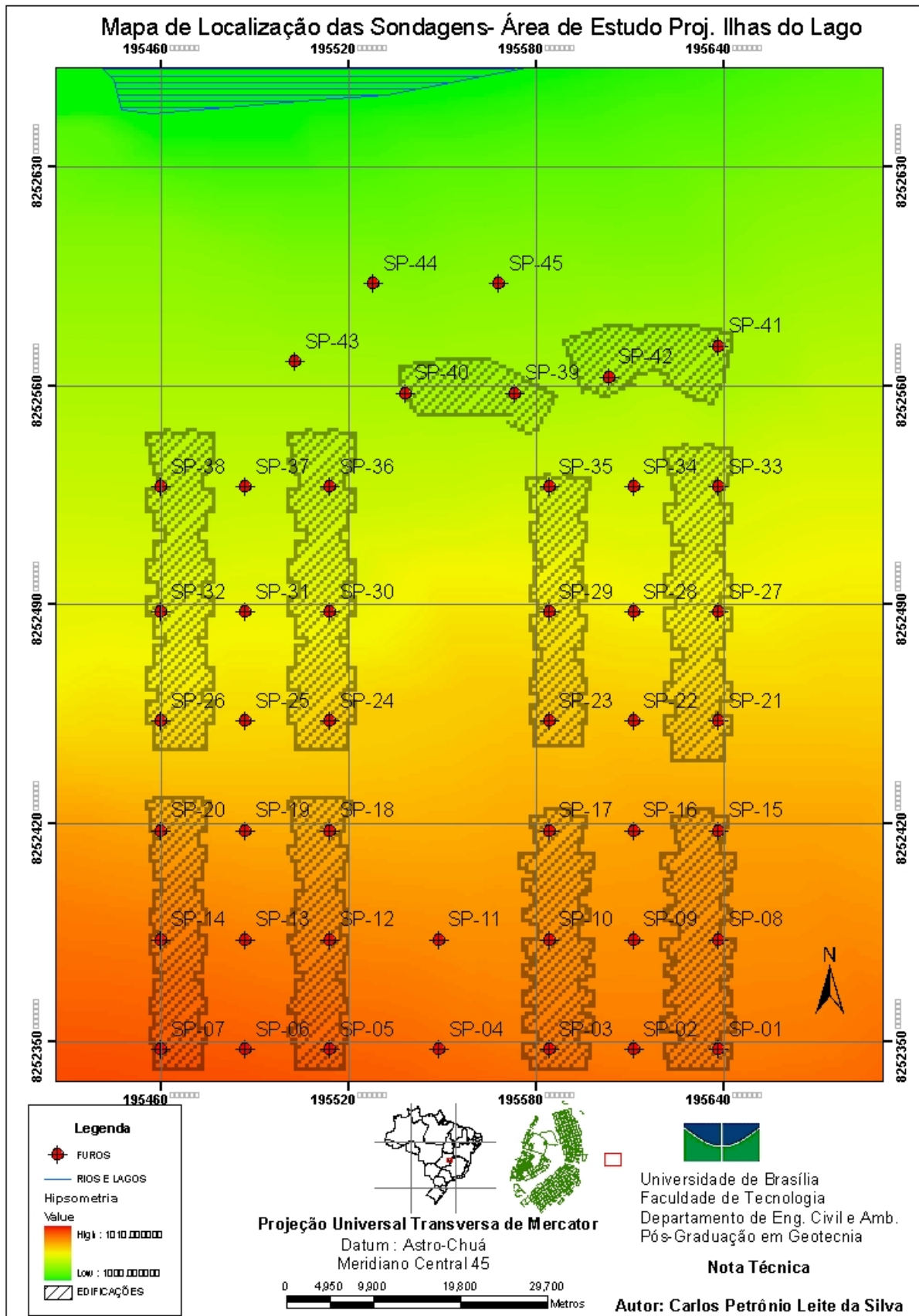


Figura 3.11 – Mapa de localização das sondagens na área de estudo do Projeto Ilhas do Lago.

Depois que todos os relatórios de sondagem foram inseridos no banco de dados, realizou-se a modelagem tridimensional desses dados. Essa etapa consistiu nas seguintes fases:

1. Definição de uma grade tridimensional que envolve todos os furos localizados. Essa grade serviu como esqueleto para absorver as informações providas dos resultados das interpolações, a Figura 3.12 mostra como é definida a grade no programa computacional *RockWorks 2006*;

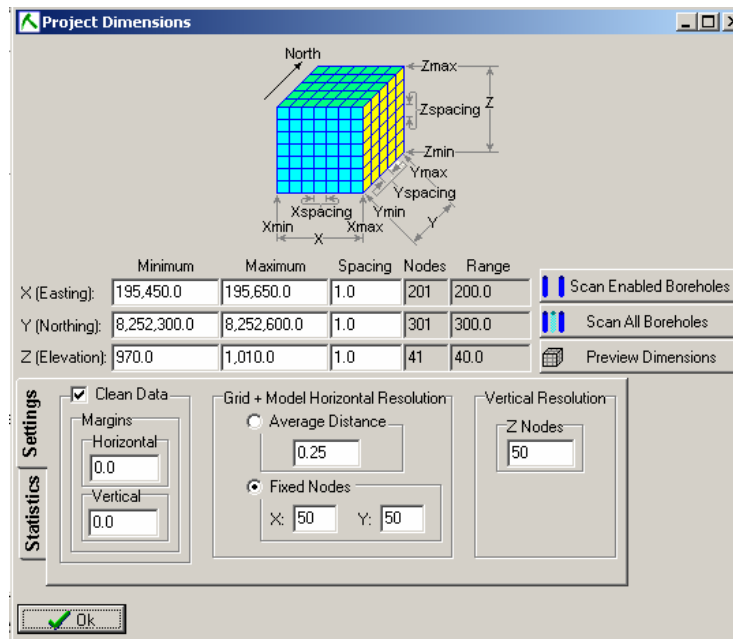


Figura 3.12 – Definição da grade 3D no *RockWorks 2006* do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

2. Definição do perfil de solo, baseado nos relatórios de sondagem. O perfil é um atributo sem o qual o programa computacional não permite a realização das interpolações das camadas de solo (Figura 3.13);

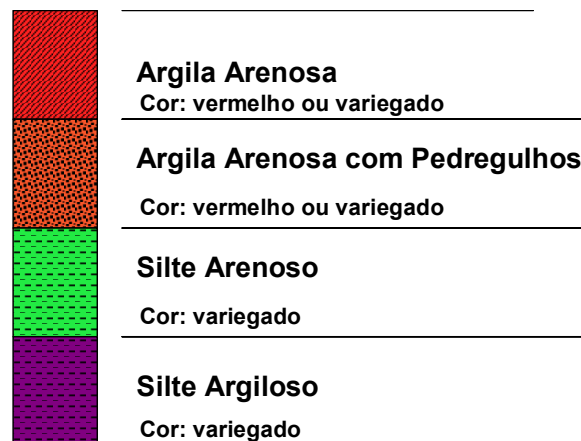


Figura 3.13 – Definição do perfil de solo do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

3. Definição das faixas de valores de NSPT, conforme a Norma NBR-6484 (ABNT, 2001), classificadas de acordo com a compactidade, como mostra a Tabela 3.1.
4. Definição do posicionamento e data de leitura do nível d'água em cada furo.
5. Criação de um arquivo ASCII (texto puro) com as coordenadas (x,y) das edificações para posterior espacialização 3D;
6. Espacialização 3D dos dados com uso de krigeagem, interpolação com o inverso da distância e *voxels*.

Tabela 3.1 – Classificação do solo conforme compactidade. (ABNT, 2001).

SOLO	NSPT	DESIGNAÇÃO
Areia e Silte Arenoso	<4	Fofa
	5 - 8	Pouco compacta
	9 - 18	Medianamente compacta
	19 - 40	Compacta
	> 40	Muito compacta
Argila e Silte Argiloso	< 2	Muito mole
	3 - 5	Mole
	6 - 10	Média
	11 - 19	Rija
	> 19	Dura

Os modelos bidimensionais e tridimensionais produzidos de tipo de solo, NSPT e nível d'água estão dispostos no capítulo referente aos resultados.

3.4.3- GERAÇÃO DO MODELO DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: UnB (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

Trata-se de uma área com condições geotécnicas suficientemente interessantes, que ora apresenta material dito impenetrável praticamente superficial em locais como a Faculdade de Administração e ora apresenta nível d'água quase superficial em locais próximo à Biblioteca. Por esse motivo serviu de estudo de caso para este trabalho. As coordenadas UTM que delimitam essa área são: $X_{min} = 192000$, $X_{max} = 193700$, $Y_{min} = 8254000$, $Y_{max} = 8255950$, $Z_{min} = 997$, $Z_{max} = 1046$, datum Astro-Chuá com meridiano central de 45° . A Figura 3.16 mostra a localização das sondagens na área de estudo.

A metodologia é semelhante à que foi utilizada para o estudo de caso do Projeto Ilhas do Lago, com exceção do perfil de solo que foi ajustado de acordo com os solos apresentados nos

relatórios de sondagem e da quantidade de furos de sondagem que é de 126. A definição da grade 3D está ilustrada na Figura 3.14 e o perfil de solo está descrito na Figura 3.15.

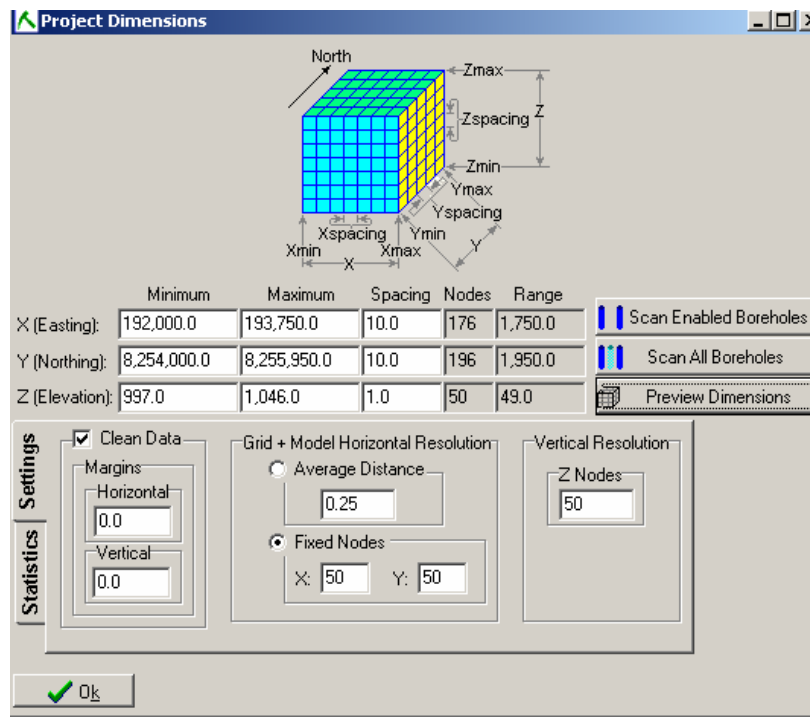


Figura 3.14 – Definição da grade 3D no *RockWorks* 2006 do estudo de caso UnB.

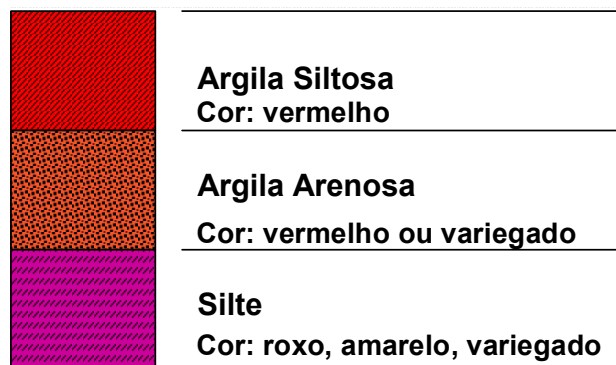


Figura 3.15 – Definição do perfil de solo do estudo de caso UnB.

O padrão de cor apresentado no solo em campo não é o mesmo que o apresentado na Figura 3.15, porém, segue descrito em tal figura, a coloração do solo apresentada nos relatórios: para a argila siltosa a cor é vermelha, para a argila arenosa a cor é vermelha a variegado e para o silte a coloração pode ser roxa, amarela ou variegada. Portanto a escolha da cor nesse perfil é tão somente para favorecer a visualização em tela de computador e para a impressão em papel.

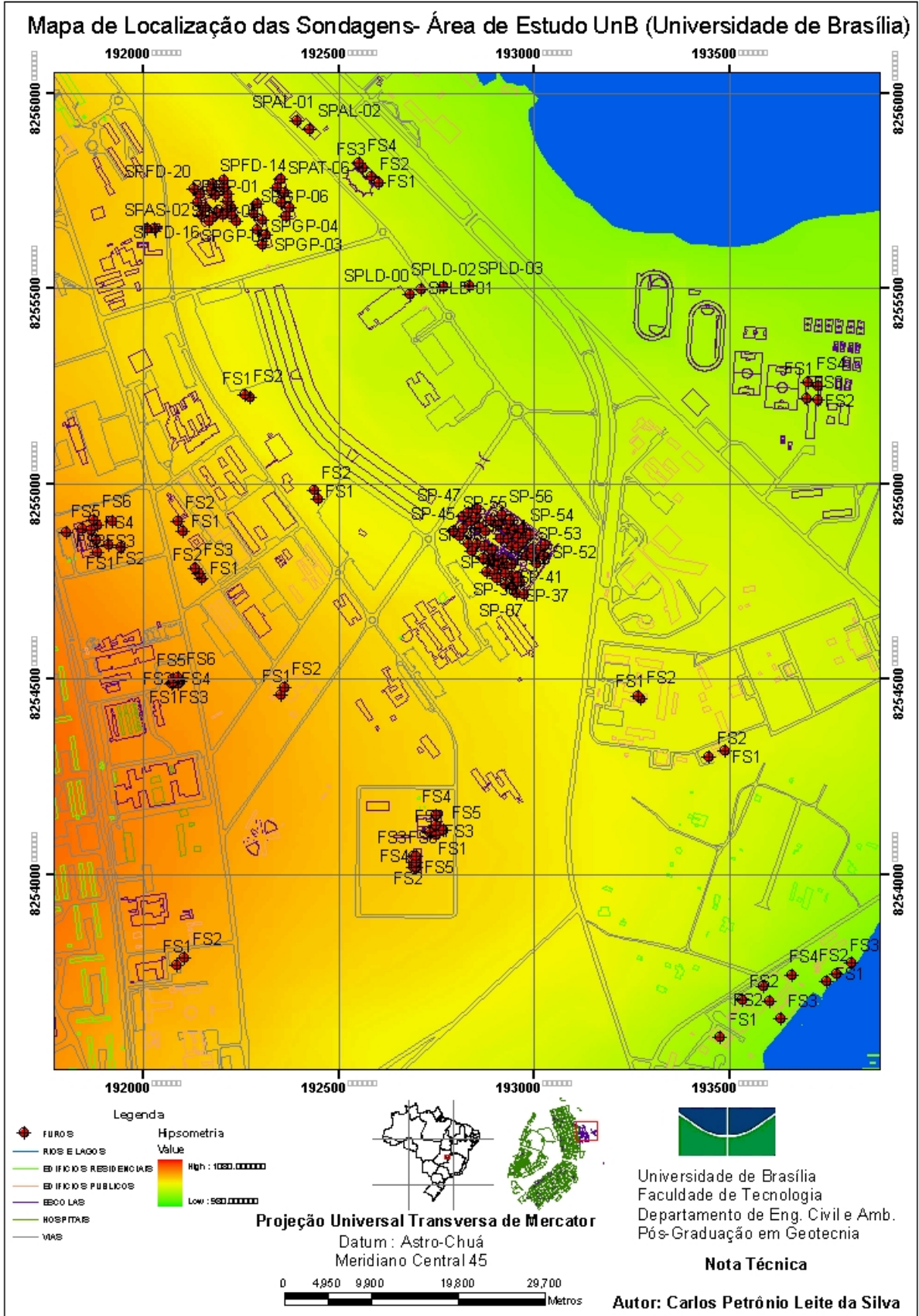


Figura 3.16 – Mapa de localização das sondagens na área de estudo da UnB.

3.4.4- GERAÇÃO DO MODELO DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: SETOR SUDOESTE DE BRASÍLIA (DF)

Utilizando praticamente toda a metodologia empregada no Projeto Ilhas do Lago, o Setor Sudoeste foi escolhido para estudo de caso por apresentar algumas peculiaridades, como a presença de uma camada de solo dito impenetrável próximo a superfície em algumas áreas e por não apresentar nível d'água nos limites máximos das sondagens do banco de dados. Além dessas características, o Setor Sudoeste tem o formato de um domo, o que chama atenção para essa forma de relevo e para as características do solo que sustenta essa formação. As coordenadas UTM que delimitam essa área são: $X_{min} = 184700$, $X_{max} = 187600$, $Y_{min} = 8250000$, $Y_{max} = 8253300$, $Z_{min} = 1090$, $Z_{max} = 1166$, datum Astro-Chuá com meridiano central de 45° . A Figura 3.19 mostra a localização das sondagens na área de estudo.

A metodologia empregada foi a mesma proposta para o Projeto Ilhas do Lago, com algumas exceções, como o perfil de solo que foi ajustado de acordo com os solos apresentados nos relatórios de sondagem e da quantidade furos de sondagem que é de 315 furos de sondagem. A definição da grade está ilustrada na Figura 3.17, mostrando que para este estudo de caso as definições de espaçamento nos três eixos cartesianos (x,y,z) são diferentes. O perfil de solo está descrito na Figura 3.18.

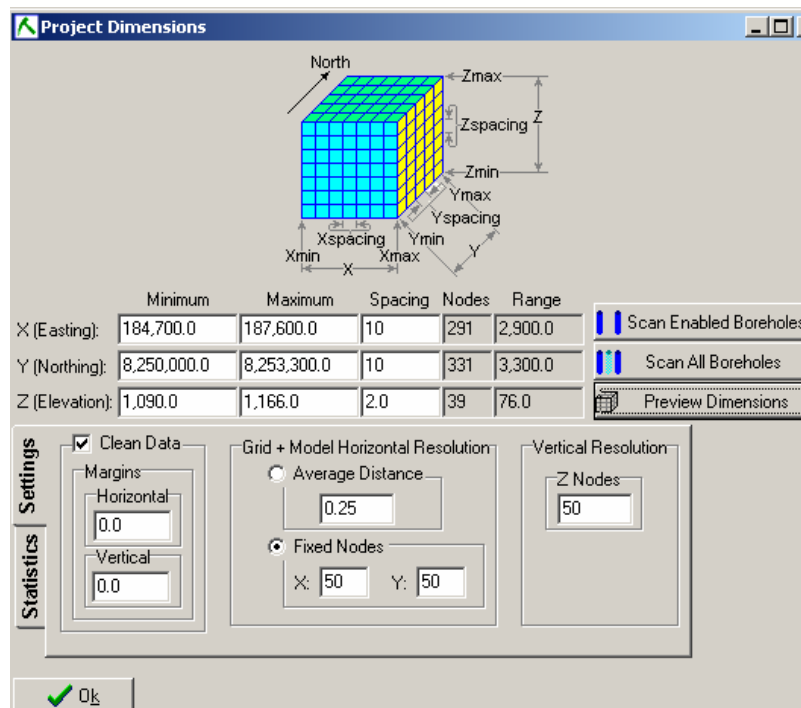


Figura 3.17 – Definição da grade 3D no *RockWorks* 2006 do estudo de caso Setor Sudoeste de Brasília (DF).

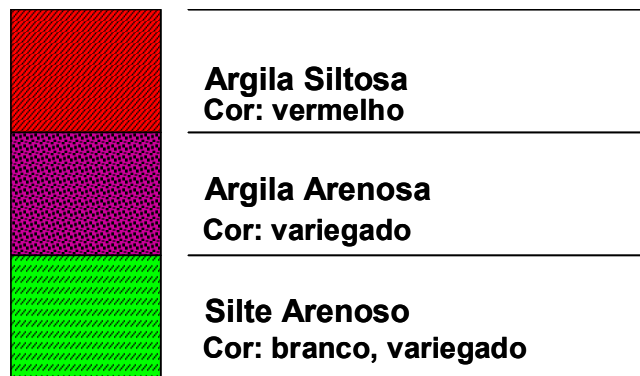


Figura 3.18 – Definição do perfil de solo do estudo de caso Setor Sudoeste de Brasília (DF).

Esclarece-se novamente que as definições de cor para o perfil de solo apresentado na Figura 3.18 foram escolhidas muito mais para favorecer a visualização em tela de computador ou para impressão em papel. O motivo para essa definição, já discutida no estudo de caso da UnB, é devido às descrições dos solos nos relatórios de sondagem apresentarem padrões de cores de difícil representação no programa computacional. Portanto, para melhor esclarecimento, apresenta-se a descrição de cor dos relatórios de sondagem do Setor Sudoeste: a camada de argila siltosa apresenta cor vermelha, a camada de argila arenosa apresenta cor variegada e a camada de silte arenoso possui cor branca ou variegada.

As cores variegadas, creme e a cor branca, dificultam a escolha de uma cor que expresse a realidade desse tipo de coloração no programa computacional. Porém, o usuário pode consultar a qualquer momento o banco de dados e verificar qual a cor do solo descrita em cada relatório de sondagem.

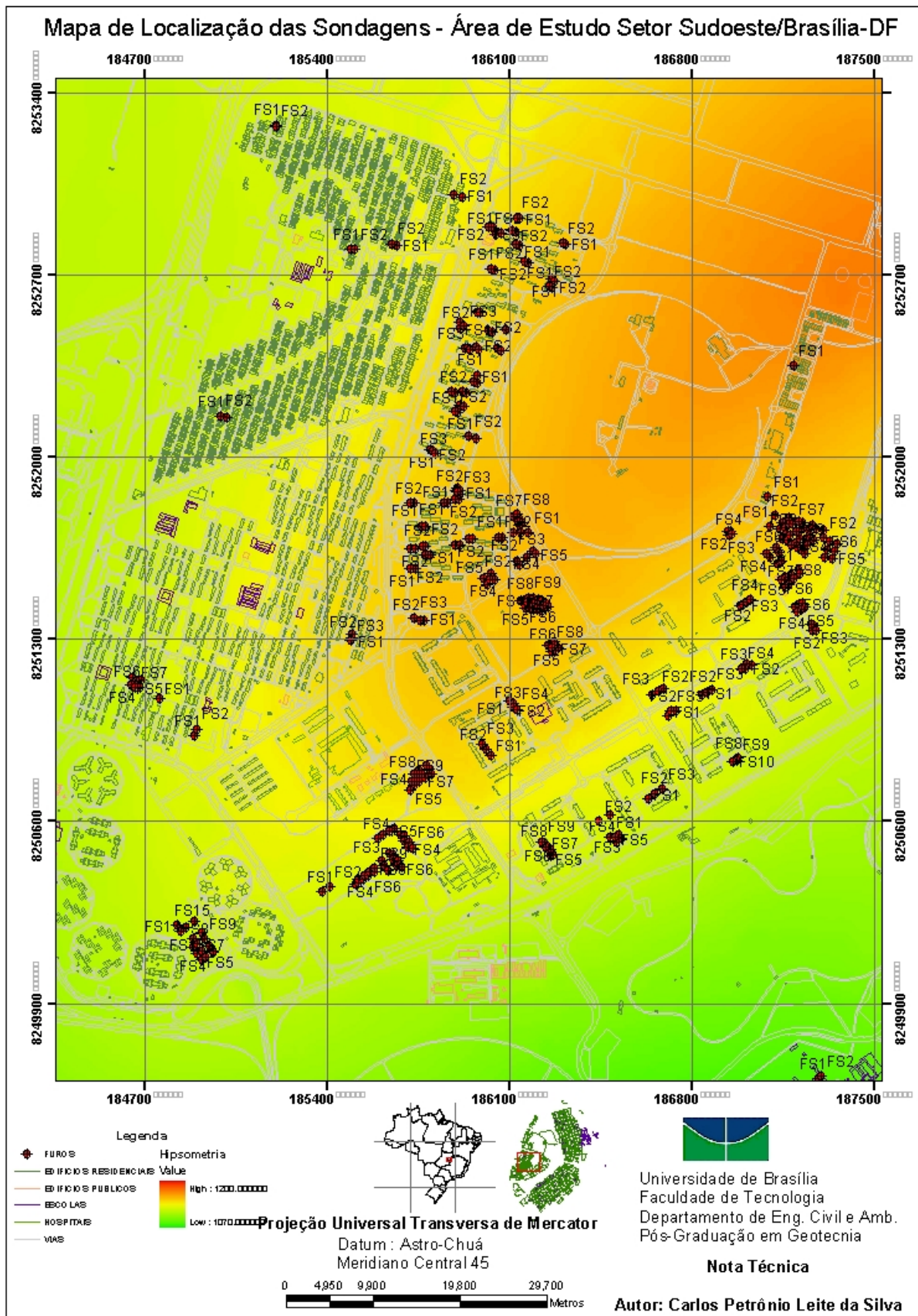


Figura 3.19 – Mapa de localização das sondagens na área de estudo do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

4.1- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Serão apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos nesta pesquisa. Inicialmente apresenta-se o mapa de localização dos furos de sondagem, o banco de dados digital com os furos de sondagem devidamente cadastrados, o formulário de cadastro dos furos no *Spring* 4.2, que foram o objetivo principal deste trabalho. A exposição dos resultados continua com a apresentação dos modelos tridimensionais, perfis e localização de seções de interesse de cada estudo de caso aqui apresentados.

4.2- IMPORTÂNCIA DO CADASTRAMENTO DOS FUROS DE SONDAGEM

A importância desse cadastro revelou-se na espacialização tridimensional dos valores de NSPT, na espacialização do nível d'água de acordo com a data de interesse (períodos de recarga de aquífero ou períodos de estiagem) e das camadas de solos apresentados nos relatórios, identificando de forma fácil, devido a facilidade com que se consulta e se visualiza os dados espacializados, locais com solo mole ou locais com solo mais resistentes (dito impenetrável em obras de fundações), bem como sua descrição. A Figura 4.1 mostra o Mapa de Localização dos Furos de Sondagem.

4.3- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS MODELOS

Em termos de representação gráfica, os perfis de solo obtidos no programa computacional *RockWorks* 2006 não estão totalmente compatíveis com as normas brasileiras, devido ao padrão de hachuras (preenchimento) do programa ser diferente do padrão de hachuras sugeridos pelas normas brasileiras. De maneira que foram escolhidas hachuras, mais próximas possíveis do padrão de representação gráfica sugeridos pelas normas brasileiras.

As cores de cada camada de solo visualizadas nos perfis de solo apresentados, foram escolhidas muito mais para favorecer a visualização, tanto em tela de computador quanto em formato impresso, do que propriamente seguir a descrição dos solos de cada relatório, apesar de muitas cores estarem de acordo com a descrição dos relatórios de sondagem, como é o caso da argila siltosa cuja cor usada foi o vermelho, que é a cor desse solo encontrada efetivamente na região de estudo. De maneira que cores como o branco ou cor variegada, foram substituídas por cores que favorecessem a visibilidade tanto em tela de computador quanto em formato impresso em papel.

Algumas sobreposições de textos nas grades geradas dos modelos 3D devem-se principalmente ao efeito de “laje”, onde a dimensão horizontal é muito maior que a vertical, obrigando o usuário a aplicar valores de exagero vertical para melhor visualizar o modelo (Figura 4.1), o que afeta as configurações originais do modelo, afetando assim: textos da grade (tamanho, sobreposições de textos), resolução em tela.

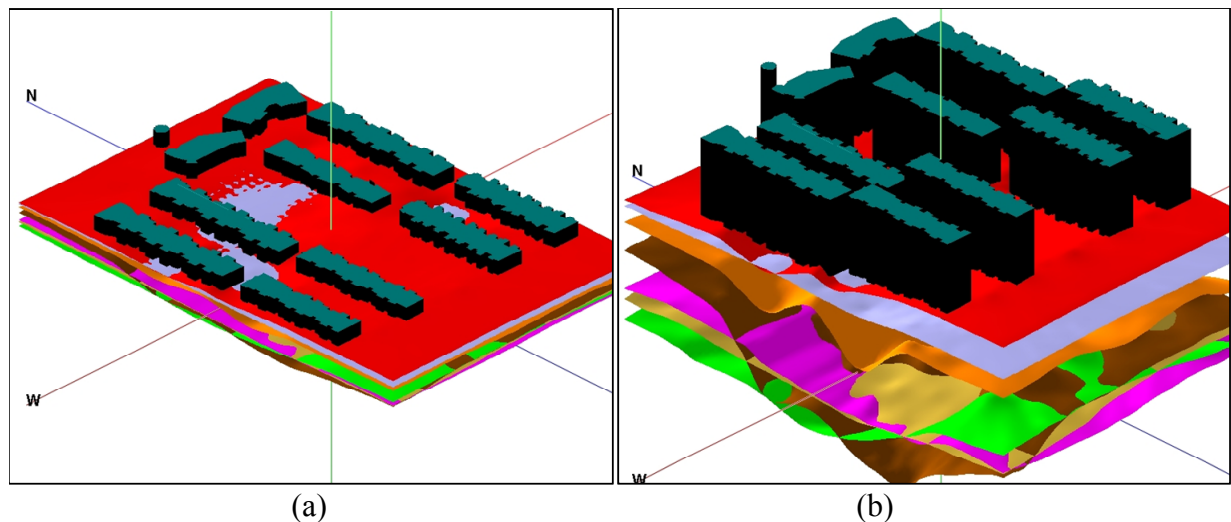


Figura 4.1 – Efeito do exagero vertical – (a) sem exagero vertical, (b) com exagero vertical de 5 vezes.

Observou-se que há várias opções para representar graficamente os furos de sondagem no programa *RockWorks 2006*, que vão desde a simples representação bidimensional em forma de círculo até a forma tridimensional de representação, chamada de *striplogs*, onde o usuário escolhe os tipos de dados que quer representar para cada furo de sondagem, conforme mostra a Figura 4.2. Nesse processo de representação, neste caso, representação tridimensional de cada furo, pode-se escolher os dados que serão espacializados para cada furo, de maneira que foram escolhidos os dados de perfil de solo e valores de NSPT.

Esta forma de representação (*striplogs*) foi extremamente útil, pois ajudou na avaliação de certos resultados. Em se tratando da avaliação de valores de NSPT e perfil de solo, não houve como detectar a presença de finas camadas intermediárias de concreções lateríticas nos valores observados nos relatórios; camada essa, detectada nos resultados das espacializações dos furos de sondagem, como picos de NSPT elevados, logo nos primeiros metros de sondagem, quando o amostrador atinge essas camadas intermediárias (Figura 4.2), o que sugere um outro tipo de investigação em campo mais minuciosa, como ensaios geofísicos que não destroem a estrutura do solo.

A Figura 4.2 mostra que se pode avaliar o perfil de solo e os valores de NSPT para o mesmo furo de sondagem, colocando lado a lado os dados que o usuário quer espacializar, tendo o usuário a opção de mudar a forma de representação que melhor lhe agrada. No caso da Figura 4.2 foi usada a forma de representação de cilindros de mesmo diâmetro para os dados de perfil de solo, e a forma de cilindros com diâmetro variável para representar os valores de NSPT. Na Figura 4.3 foi utilizada outra forma de representação para os valores de NSPT definida no *RockWorks* 2006 como *oblates*, que nada mais é que um sólido formado pela revolução no eixo z do gráfico de valores de NSPT.

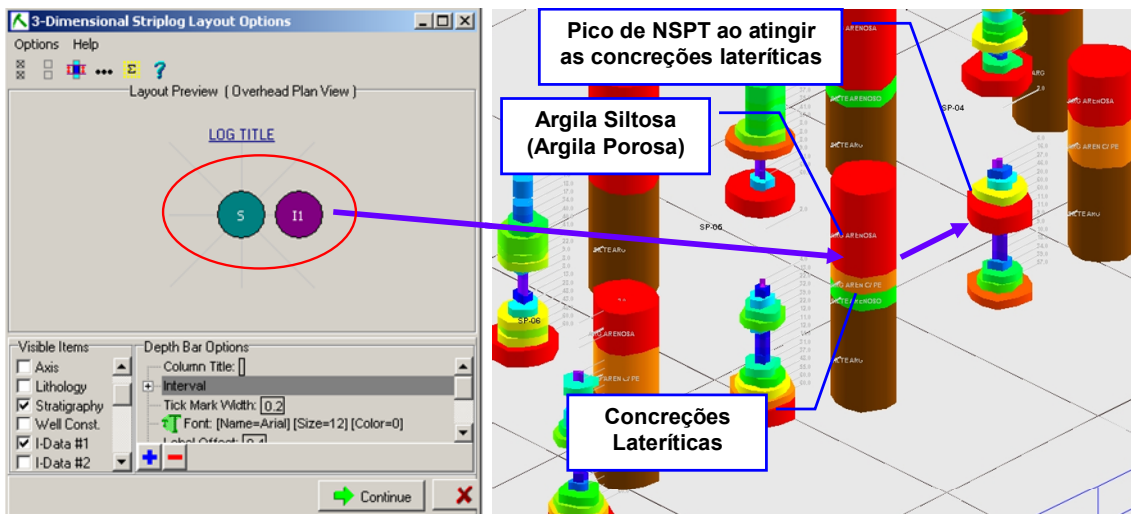


Figura 4.2 – Representação gráfica em 3D dos furos de sondagem no *RockWorks* 2006.

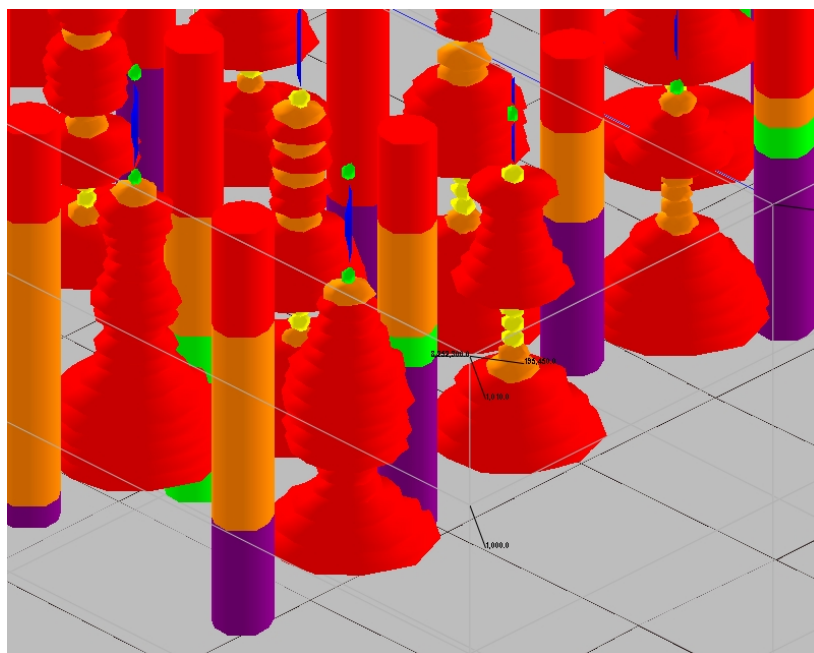


Figura 4.3 – Opção de representação gráfica *oblates* em 3D dos furos de sondagem no *RockWorks* 2006.

4.4- MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM

O Mapa de Localização dos Furos de Sondagem (Figura 4.4) é o resultado do cadastro de 1563 furos de sondagem à percussão. A organização dos relatórios técnicos em pastas proporcionou uma contagem de aproximadamente 16000 furos de sondagem à percussão, desses, apenas 4195 estavam dentro da área tombada, porém, nem todos possuíam todas as características necessárias para que pudessem fazer parte do banco de dados digital. A maior dificuldade, e por isso muitos foram descartados, ficou por conta de mudanças e atualizações do sistema de endereçamento da base cartográfica, dificultando a localização dos endereços dos relatórios técnicos. Um número pequeno de sondagens também tiveram que ser descartadas devido à forma bastante simplificada de representação de alguns croquis de localização dos furos de sondagem, impossibilitando o georeferenciamento dos furos.

A informação considerada mais importante para a inserção dos relatórios de sondagens, no banco de dados digital, é a localização exata do furo (georeferenciamento) no mapa base (mapa com as principais feições básicas de interesse: vias, drenagem, edifícios residenciais, edifícios públicos, escolas, hospitais, entre outras informações), apesar dos boletins de sondagens apresentarem a localização dos furos de sondagem da obra tomando como referência as ruas, projeção do terreno e edificações. A quantidade de informações apresentadas nos croquis desses boletins pode ser insuficiente num determinado momento em que se tenta resgatar a localização exata dos furos de sondagem. Um bom exemplo, aqui citado, são as atualizações da base cartográfica. Poucas empresas preocupam-se em localizar os furos de sondagem com equipamentos de precisão, como teodolito, estação total, ou até mesmo GPS de alta precisão, o que facilitaria muito o trabalho de resgate desses dados de localização e o posterior georeferenciamento.

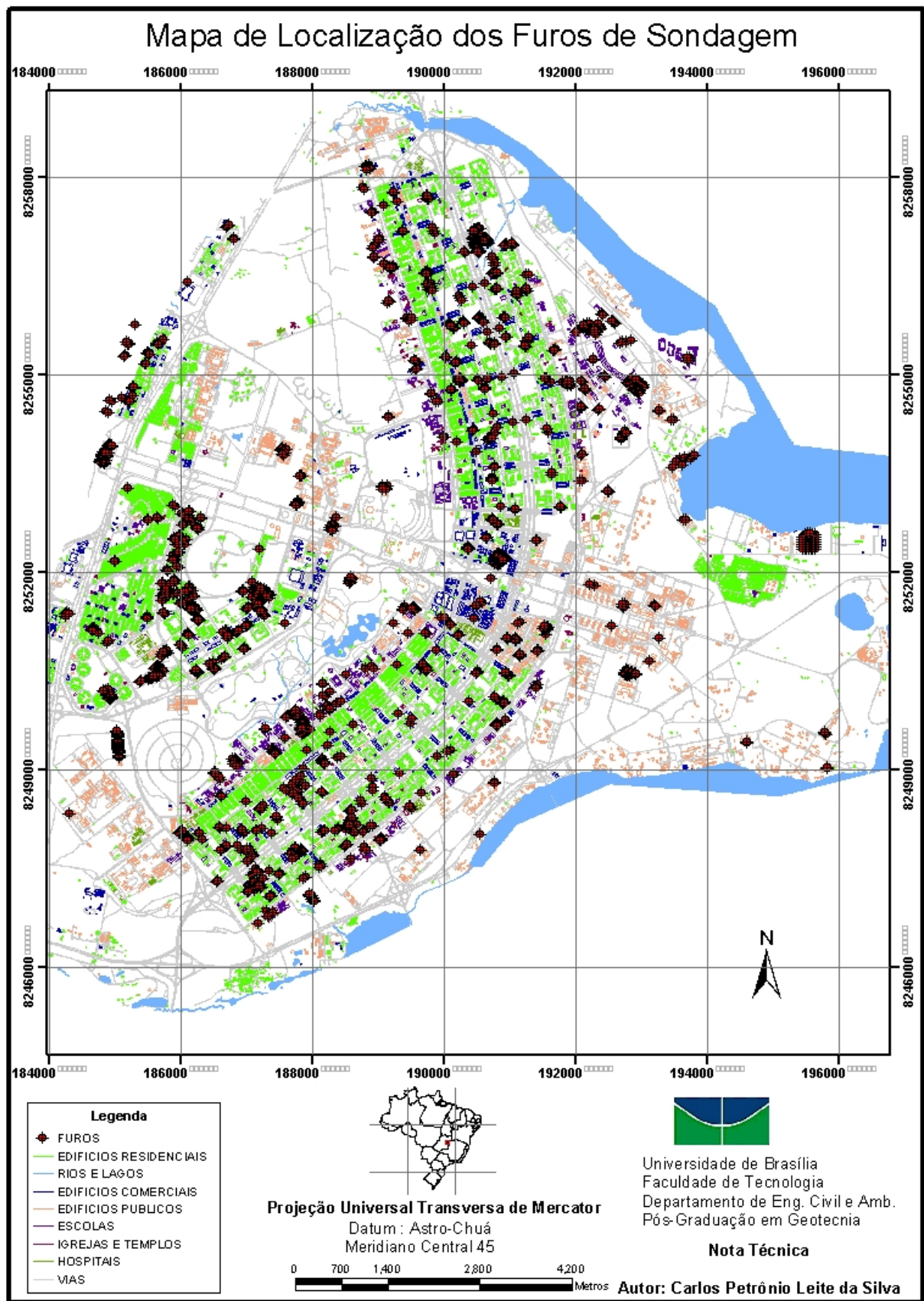


Figura 4.4 – Mapa de localização dos 1563 furos de sondagem à percussão do trabalho – Brasília (DF).

4.5- BANCO DE DADOS DIGITAL

Apesar da metodologia utilizada pelos programas computacionais ser uma metodologia orientada a objetos, o produto resultante, em termos de bancos de dados, é um banco de dados relacional. Este contra-senso é esclarecido a partir do momento em que os programas computacionais utilizados passam a visualizar os bancos relacionais apenas como repositórios para o mapeamento de seus objetos (registro das informações dos objetos). De qualquer forma vale a pena ilustrar os diagramas de relacionamento dos bancos de dados resultantes no *Spring* 4.2 (Figura 4.5) e *RockWorks* 2006 (Figura 4.6).

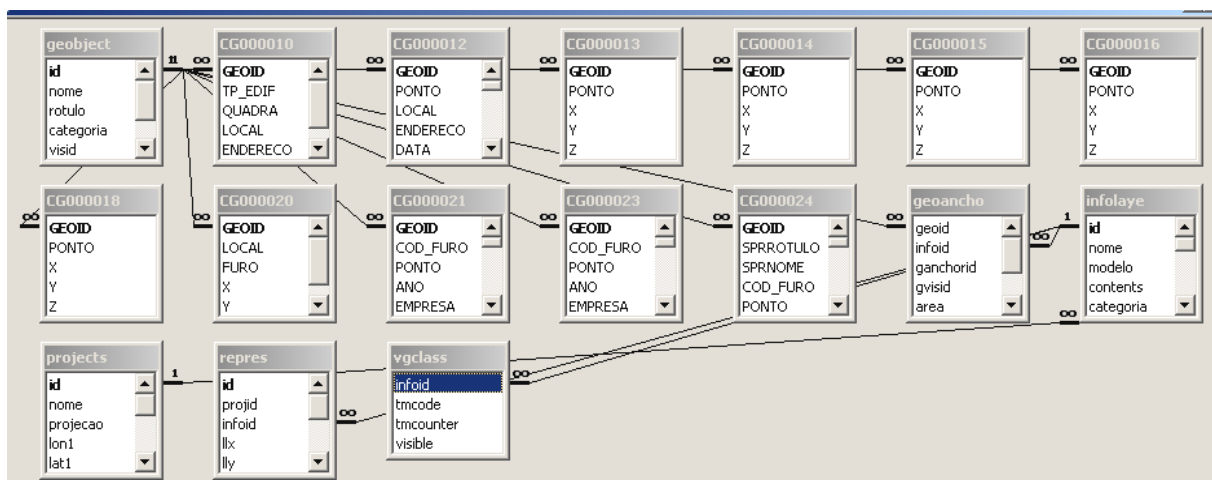


Figura 4.5 – Diagrama de relacionamentos do banco de dados que modela e documenta a base de dados no *Spring* 4.2.

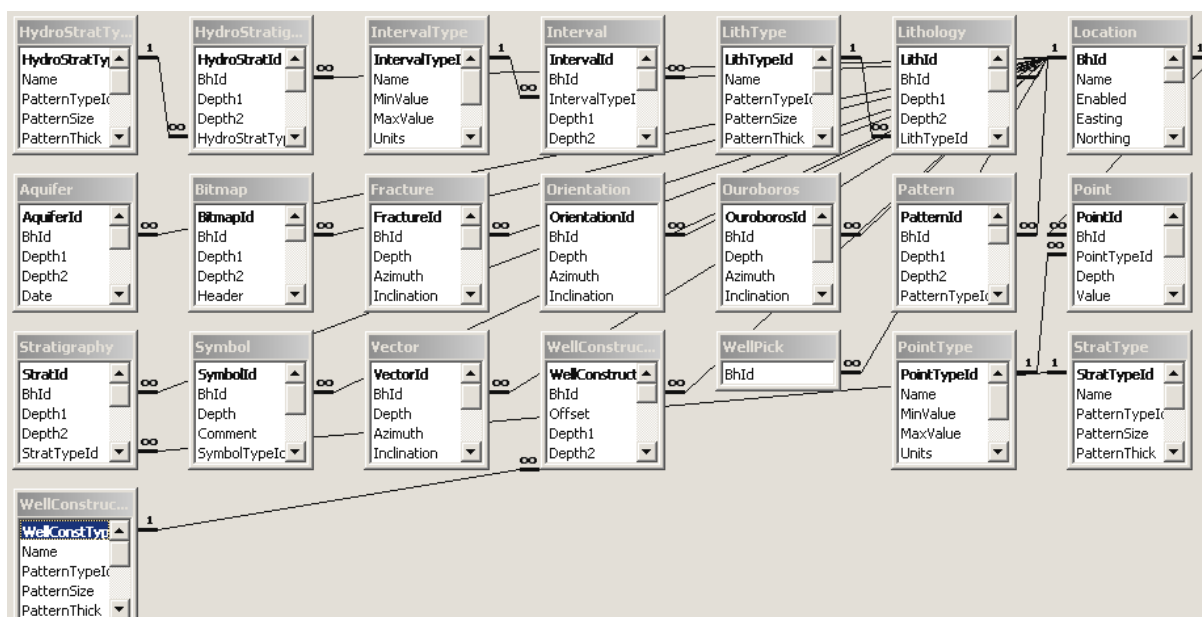


Figura 4.6 – Diagrama de relacionamentos do banco de dados que modela e documenta a base de dados no *RockWorks* 2006.

Os atributos do cadastro georeferenciado dos furos de sondagem foram: código do furo, ponto, ano da sondagem, empresa responsável pela sondagem, endereço da obra, data de realização do ensaio, coordenada x, coordenada y, coordenada z, profundidade do nível d'água, cota do nível d'água (com relação ao nível do mar), profundidade da camada impenetrável, cota da camada impenetrável (com relação ao nível do mar), profundidade da sondagem, cota da sondagem (com relação ao nível do mar), espessura das camadas de solo, variando da primeira até a quinta camada de solo, descrição do tipo de solo da primeira até a quinta camada de solo, cor da primeira até a quinta camada de solo, valores de NSPT do primeiro metro até o máximo de trinta metros de profundidade. Tais atributos podem ser parcialmente visualizados (devido à extensão da tabela, todos os dados não podem ser visualizados na mesma tabela de ilustração) na Figura 4.7, que é um trecho da tabela de consulta do *Spring 4.2*.

	COD_FURO	PONTO	ANO	EMPRESA	ENDEREÇO	DATA	X	Y	Z	PROF_NA	CT_NA	PROF_IMP	CT_IMP	PROF_SND	CT_SND
219	SP-08	SP-219	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195638.	825238	1006.8	4.10	1002.70	25.00000	981.8000	27.22000	979.580000
220	SP-09	SP-220	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195611.	825238	1007.2	3.84	1003.36	28.00000	979.2000	31.24000	975.960000
221	SP-10	SP-221	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195584.	825238	1007.0	3.89	1003.19	24.00000	983.0900	26.14000	980.940000
222	SP-11	SP-222	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195549.	825238	1006.8	4.00	1002.85	24.00000	982.8500	26.15000	980.700000
223	SP-12	SP-223	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195514.	825238	1007.0	3.80	1003.22	28.00000	979.0200	28.25000	978.770000
224	SP-13	SP-224	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195487.	825238	1006.6	3.90	1002.79	29.00000	977.6900	30.15000	976.540000
225	SP-14	SP-225	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195460.	825238	1006.8	3.81	1003.06	26.00000	980.8700	26.45000	980.420000
226	SP-15	SP-226	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195638.	825241	1006.6	3.79	1002.87	25.00000	981.6600	25.30000	981.360000
227	SP-16	SP-227	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195611.	825241	1006.6	3.75	1002.87	30.00000	976.6200	31.15000	975.470000
228	SP-17	SP-228	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195584.	825241	1006.1	3.60	1002.58	25.00000	981.1800	27.14000	979.040000
229	SP-18	SP-229	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195514.	825241	1006.0	3.70	1002.39	23.00000	983.0900	26.28000	979.810000
230	SP-19	SP-230	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195487.	825241	1005.8	3.50	1002.34	24.00000	981.8400	27.12000	978.720000
231	SP-20	SP-231	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195460.	825241	1005.3	3.38	1001.95	29.00000	976.3300	30.15000	975.180000
232	SP-21	SP-232	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195638.	825245	1003.9	2.01	1001.96	21.00000	982.9700	21.45000	982.520000
233	SP-22	SP-233	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195611.	825245	1004.9	3.15	1001.78	22.00000	982.9300	22.30000	982.630000
234	SP-23	SP-234	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195584.	825245	1005.8	3.60	1002.23	24.00000	981.8300	27.21000	978.620000
235	SP-24	SP-235	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195514.	825245	1004.6	3.95	1000.71	22.00000	982.6600	23.15000	981.510000
236	SP-25	SP-236	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195487.	825245	1005.6	3.15	1002.48	24.00000	981.6300	26.30000	979.330000
237	SP-26	SP-237	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195460.	825245	1005.1	3.03	1002.09	24.00000	981.1200	27.10000	978.020000
238	SP-27	SP-238	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195638.	825248	1004.5	3.10	1001.47	29.00000	975.5700	32.11000	972.460000
239	SP-28	SP-239	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195611.	825248	1004.9	1.07	1003.88	24.00000	980.9500	26.15000	978.800000
240	SP-29	SP-240	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195584.	825248	1002.1	0.00	1002.15	22.00000	990.1500	23.30000	978.850000
241	SP-30	SP-241	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195514.	825248	1001.6	0.00	1001.60	23.00000	978.6000	23.30000	978.300000
242	SP-31	SP-242	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195487.	825248	1003.8	1.02	1002.80	23.00000	980.8200	24.30000	979.520000
243	SP-32	SP-243	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195460.	825248	1004.6	2.20	1002.40	27.00000	977.6000	28.45000	976.150000
244	SP-33	SP-244	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004092	195638.	825252	1004.0	2.15	1001.92	22.00000	982.0700	27.15000	976.920000
245	SP-34	SP-245	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195611.	825252	1001.8	0.37	1001.49	28.00000	973.8600	29.15000	972.710000
246	SP-35	SP-246	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195584.	825252	1002.0	0.28	1001.72	27.00000	975.0000	29.30000	972.700000
247	SP-36	SP-247	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195514.	825252	1001.4	0.40	1001.06	22.00000	979.4600	22.30000	979.160000
248	SP-37	SP-248	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195487.	825252	1003.1	1.90	1001.23	23.00000	980.1300	23.45000	979.680000
249	SP-38	SP-249	2004	EMBRE	TRECHO EN	2004122	195460.	825252	1003.5	1.53	1002.01	19.00000	984.5400	21.45000	982.090000

Figura 4.7 – Trecho da tabela de consulta por atributos dos furos de sondagem no *Spring 4.2*.

4.6- RESULTADOS DO MAPEAMENTO TRIDIMENSIONAL – ESTUDO DE CASO: PROJETO ILHAS DO LAGO.

As ilustrações dos resultados provenientes dos modelos tridimensionais seguirão da seguinte seqüência de figuras: mapa volumétrico de tipo de solo (3D), mapa volumétrico de níveis interpolados de NSPT (3D), mapa hipsométrico com identificação da seção de interesse (2D), seção de interesse para tipo de solo e NSPT (2D), mapa de superfícies de solo e nível d'água com espacialização dos furos de sondagem (2,5D) e prédios (3D) e finalmente o mapa de seções ortogonais de NSPT (2,5D). Essa seqüência de resultados vale para todos estudos de caso.

A Figura 4.8 apresenta uma visão geral 3D dos horizontes de solos identificados na área de estudo. Percebe-se pelo modelo que o nível d'água está aflorante exatamente nos locais identificados na Figura 3.10, além disso, percebe-se a forma de cada camada de solo, com as camadas de silte bastante onduladas. As figuras Fig. 4.9, Fig. 4.10, Fig. 4.11 e Fig. 4.12 mostram a seqüência de visualização de cada camada de solo interpolada.

A Figura 4.13 apresenta uma visão geral dos níveis de NSPT interpolados e espacializados volumetricamente. Percebe-se que existe uma espessa camada de solo mole no local da obra. De acordo com MARTINS (2000), as condições morfo-hidrologicas moldaram os perfis de Brasília, e a Figura 4.13 sugere uma condição hidrogeológica interessante, mostrando um possível canal de água na direção nordeste, com a presença de uma espessa camada de solo mole intercalada a solos duros.

A Figura 4.14 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da seção de interesse. Pelos valores hipsométricos nota-se que nos locais de cota menos elevadas são os locais onde o nível d'água está mais aflorante.

A Figura 4.15 mostra uma seção longitudinal, com valores interpolados pelo programa *RockWorks* 2006, com a identificação dos valores de NSPT seguida da Figura 4.16, mostrando a mesma seção longitudinal sem nenhum tipo de interpolação. A Figura 4.17 mostra uma seção interpolada com as camadas de solo e o nível d'água. Na Figura 4.16 fica mais evidente que existe um possível e antigo canal de água na direção nordeste, mostrando a espessa camada de solo menos resistente. A Figura 4.17 mostra mais claramente o que é um perfil truncado, com a intercalação da camada de silte arenoso e silte argiloso, além de uma

espessa camada de argila com pedregulhos, evidenciando as flutuações de nível d'água que pode ser o principal agente modelador desse perfil de solo.

Observa-se que a partir do momento em que a espacialização tridimensional é realizada, torna-se possível extrair qualquer seção de interesse, bem como obter valores de NSPT ou da seqüência de horizontes do solo em qualquer posição, o que permite que cálculos, como os de dimensionamento de fundações, sejam realizados com valores mais próximos da realidade e não com valores médios como freqüentemente ocorre.

A Figura 4.18 mostra as interfaces das camadas de solo com a localização das sondagens, bem como a localização das edificações em construção, observando-se a intercalação de camadas. Além disso, observa-se o lençol freático praticamente superficial em vários locais da obra. A Figura 4.18 mostra ainda, a formação de pequenas bacias nas superfícies de cada camada, o que pode evidenciar apenas a forma irregular da superfície de cada camada. A localização das edificações serviu para ajudar no entendimento do modelo tridimensional.

A Figura 4.19 mostra um conjunto de seções ortogonais identificando os valores de NSPT por faixas de cores. Observam-se várias intercalações de solo menos resistentes no interior de solos mais resistentes, deixando claro que as condições morfo-hidrológicas foram preponderantes no processo de modelagem desse ambiente, ou seja, as variações de nível d'água do Lago Paranoá e as condições geológicas estruturais tornam-se o principal agente modelador desse ambiente. Na prática de campo, os valores de NSPT vão muito além do valor considerado para definir o impenetrável segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001), isto ocorre devido à prática das empresas de sondagens, em Brasília, de levarem as sondagens além do impenetrável devido a essa possibilidade de ocorrência de camadas menos resistentes sotopostas a camadas mais resistentes, ou mesmo de se obter falsos valores altos de NSPT devido à presença de concreções lateríticas ou mesmo fragmentos de quartzo de grandes dimensões comparadas à ponta do amostrador. A experiência e preocupação das empresas mostraram-se evidentes quando observamos a Figura 4.19 com as seções ortogonais de NSPT, com camadas de solos menos resistentes dentro de camadas de solo mais resistentes, justificando tal prática.

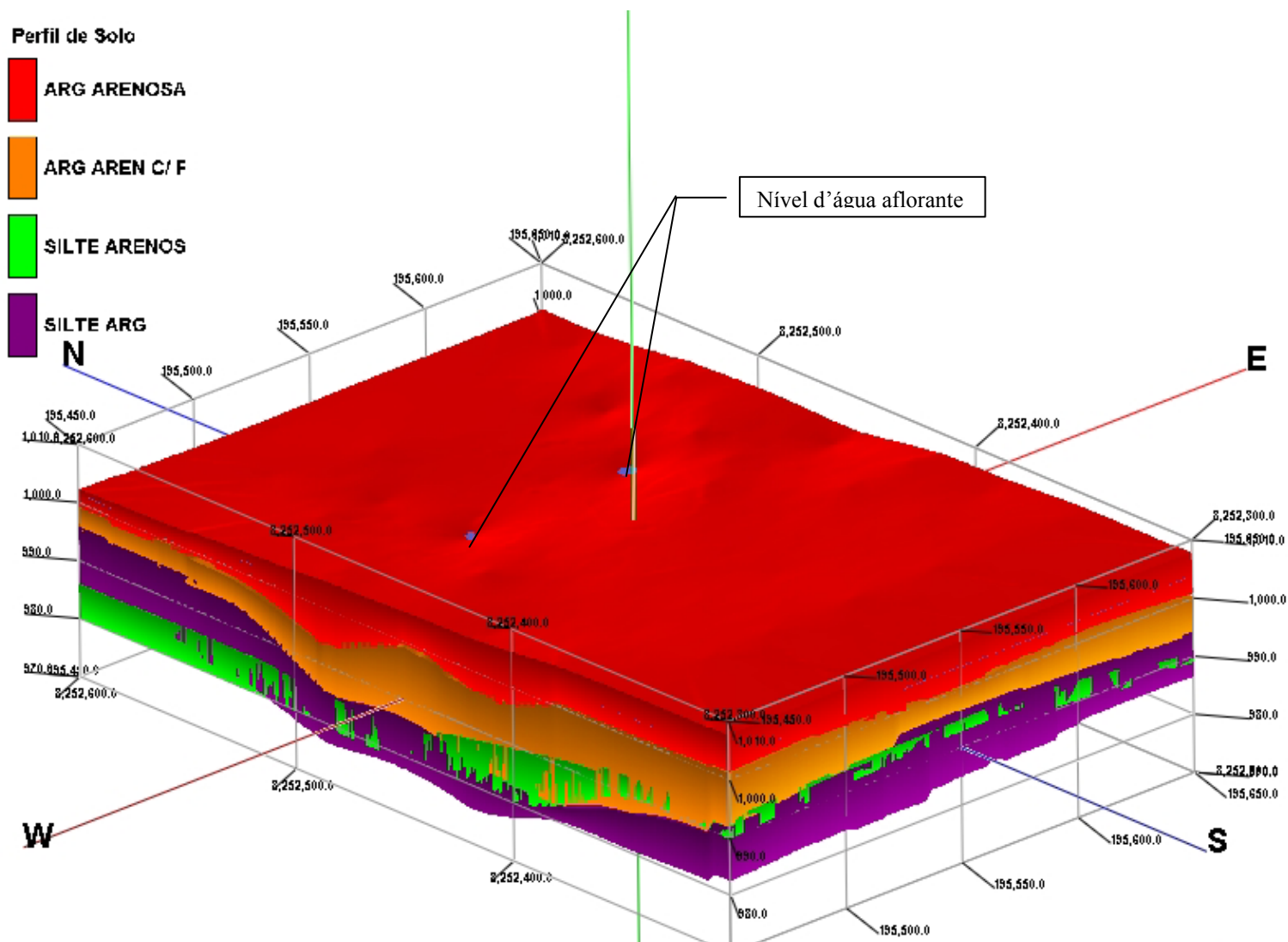


Figura 4.8 – Seqüência 1 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exa­gero vertical de 2, mostrando todas as camadas de solo, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

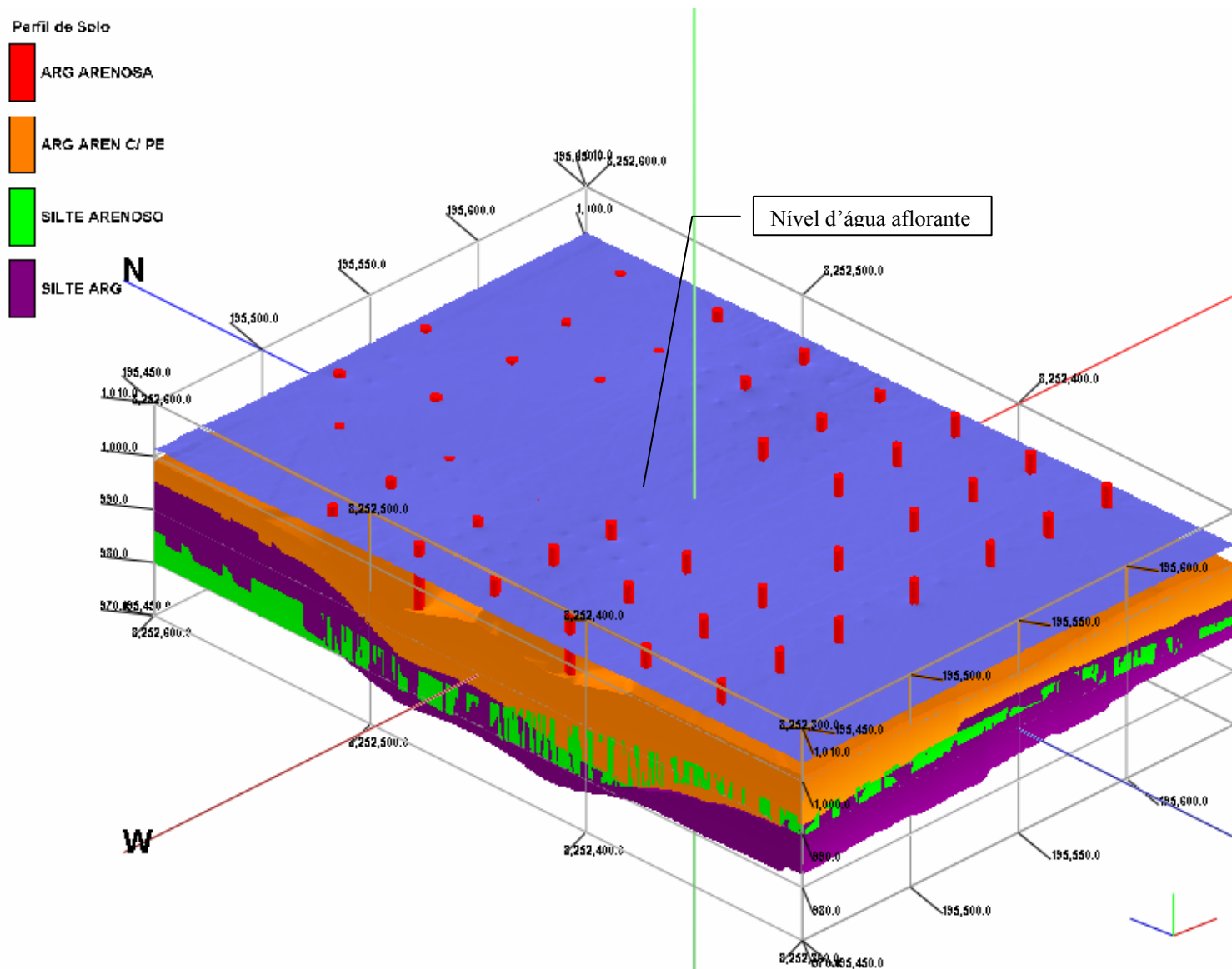


Figura 4.9 – Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando o nível d'água, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

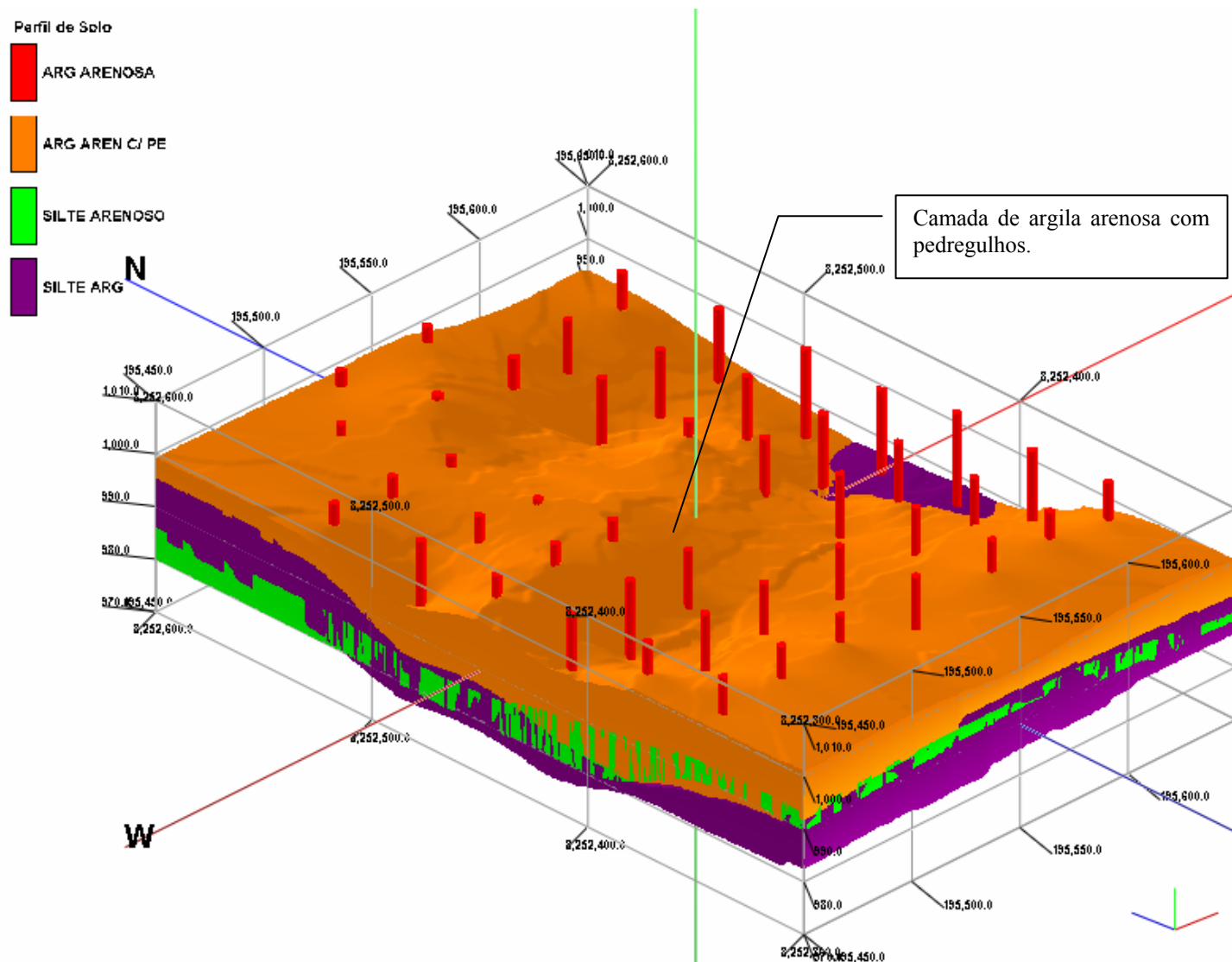


Figura 4.10 – Seqüência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando a camada de argila arenosa com pedregulhos, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

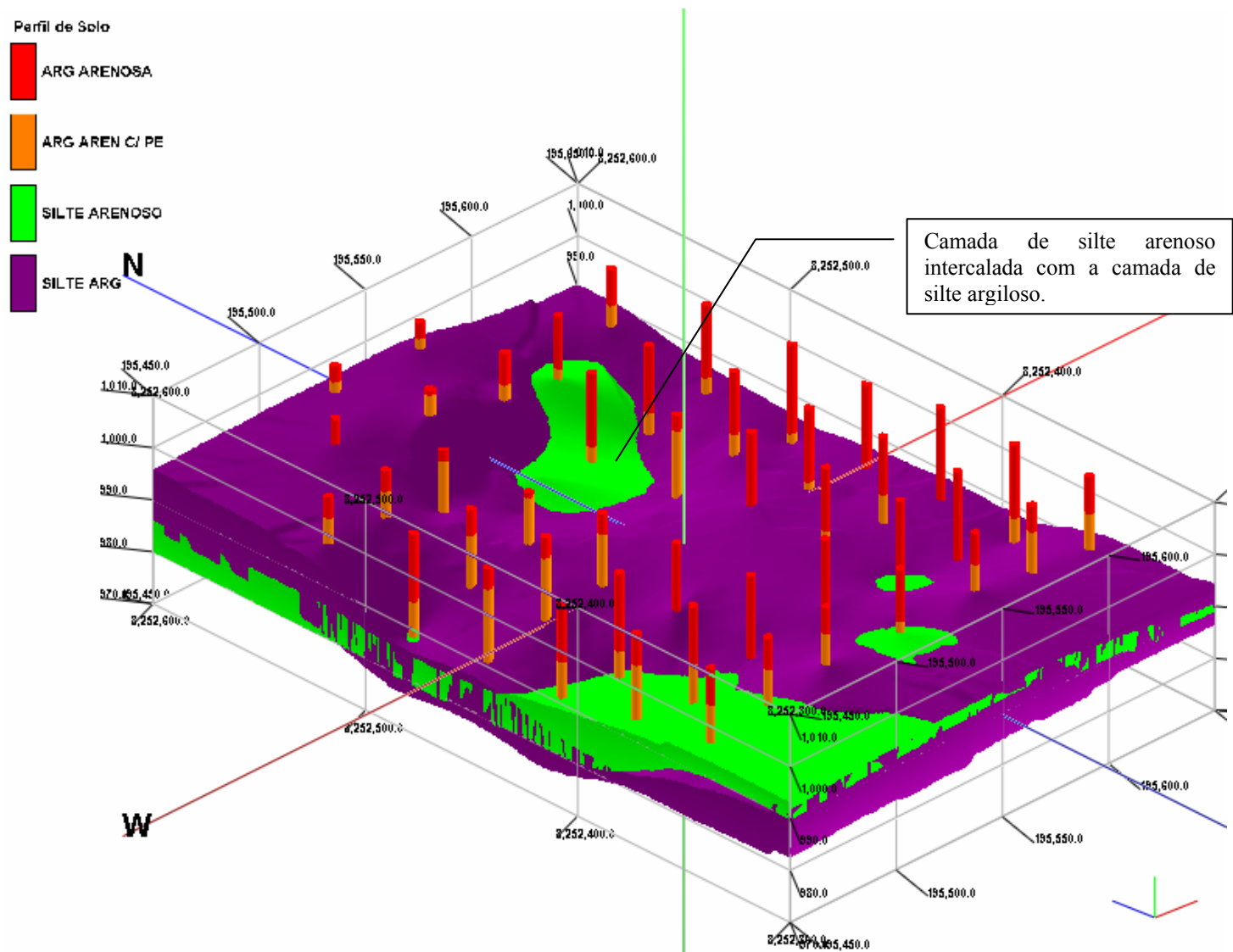


Figura 4.11 – Seqüência 4 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando a camada de silte arenoso intercalada com a camada de silte argiloso, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

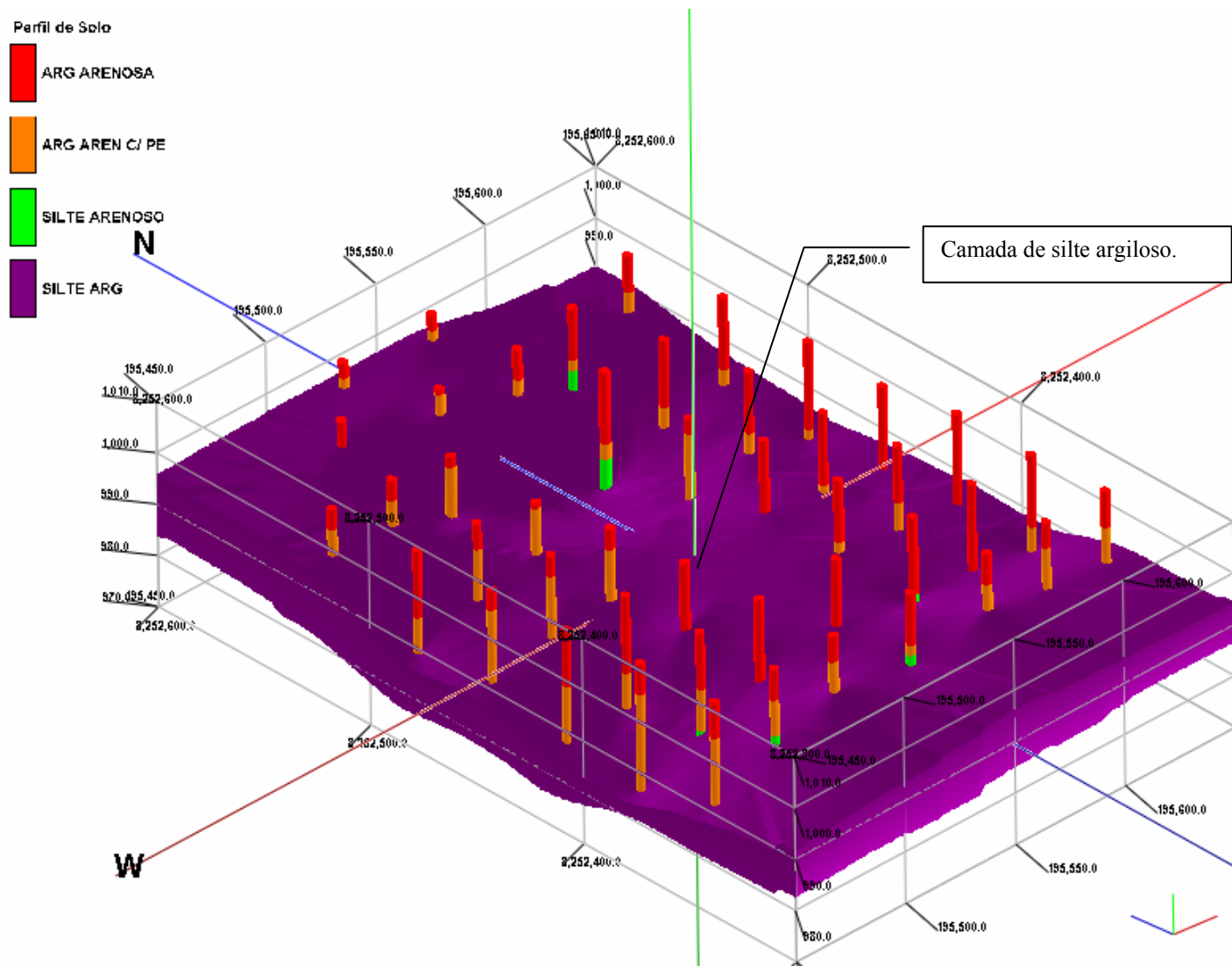


Figura 4.12 – Seqüência 5 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 2, destacando a camada de silte argiloso, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

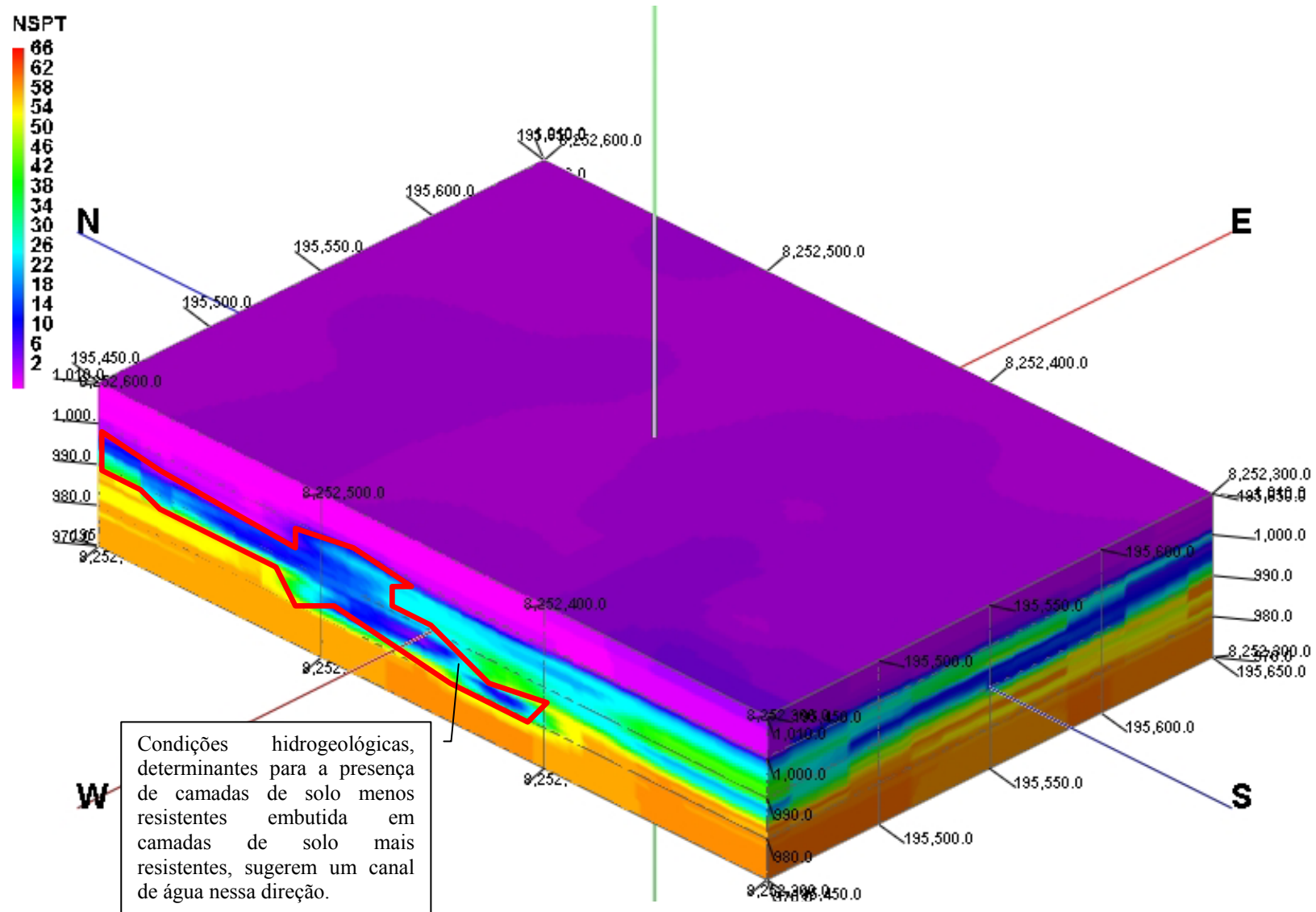


Figura 4.13 – Modelo tridimensional de NSPT, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

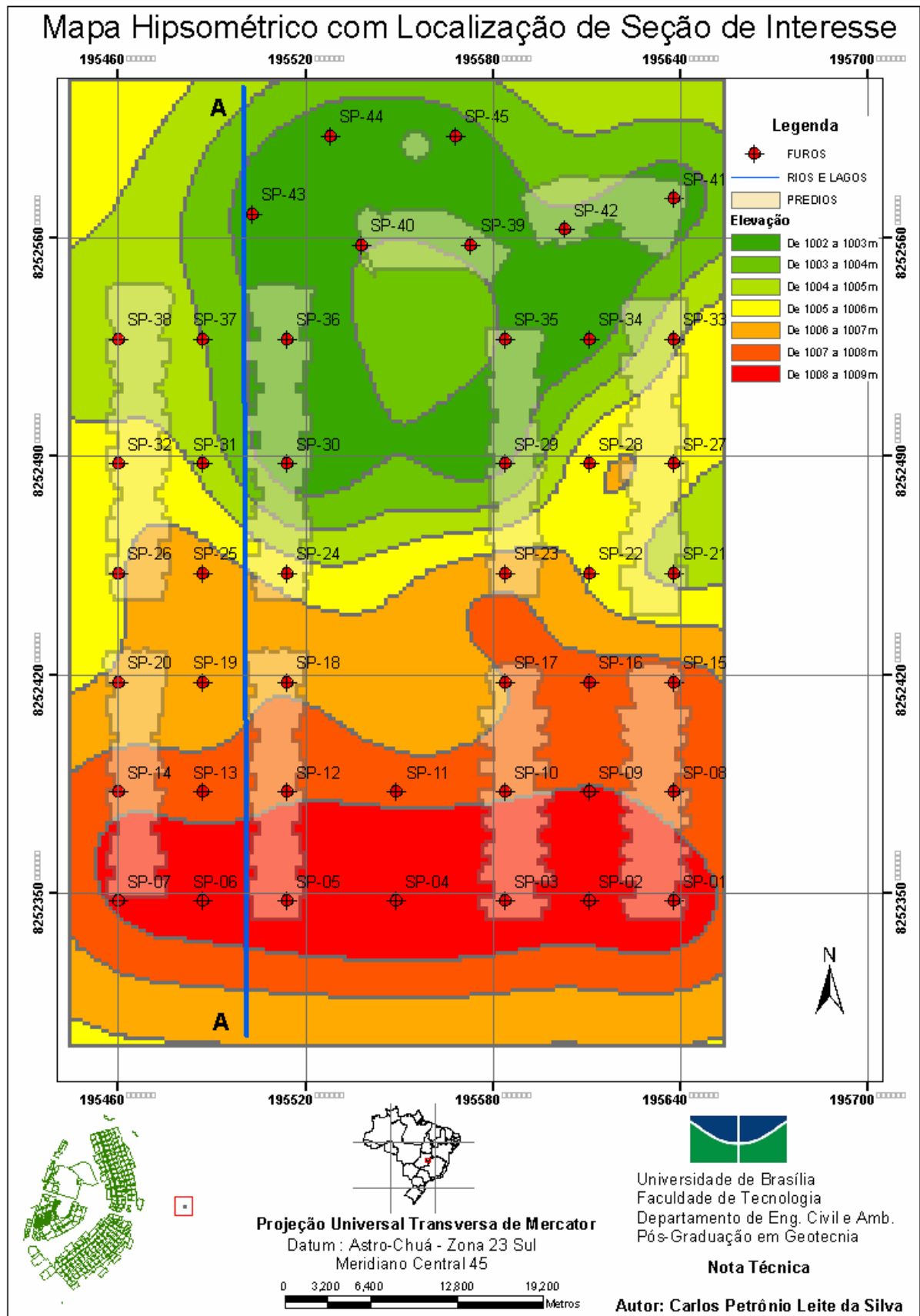


Figura 4.14 – Mapa hipsométrico, com localização de seção de interesse, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

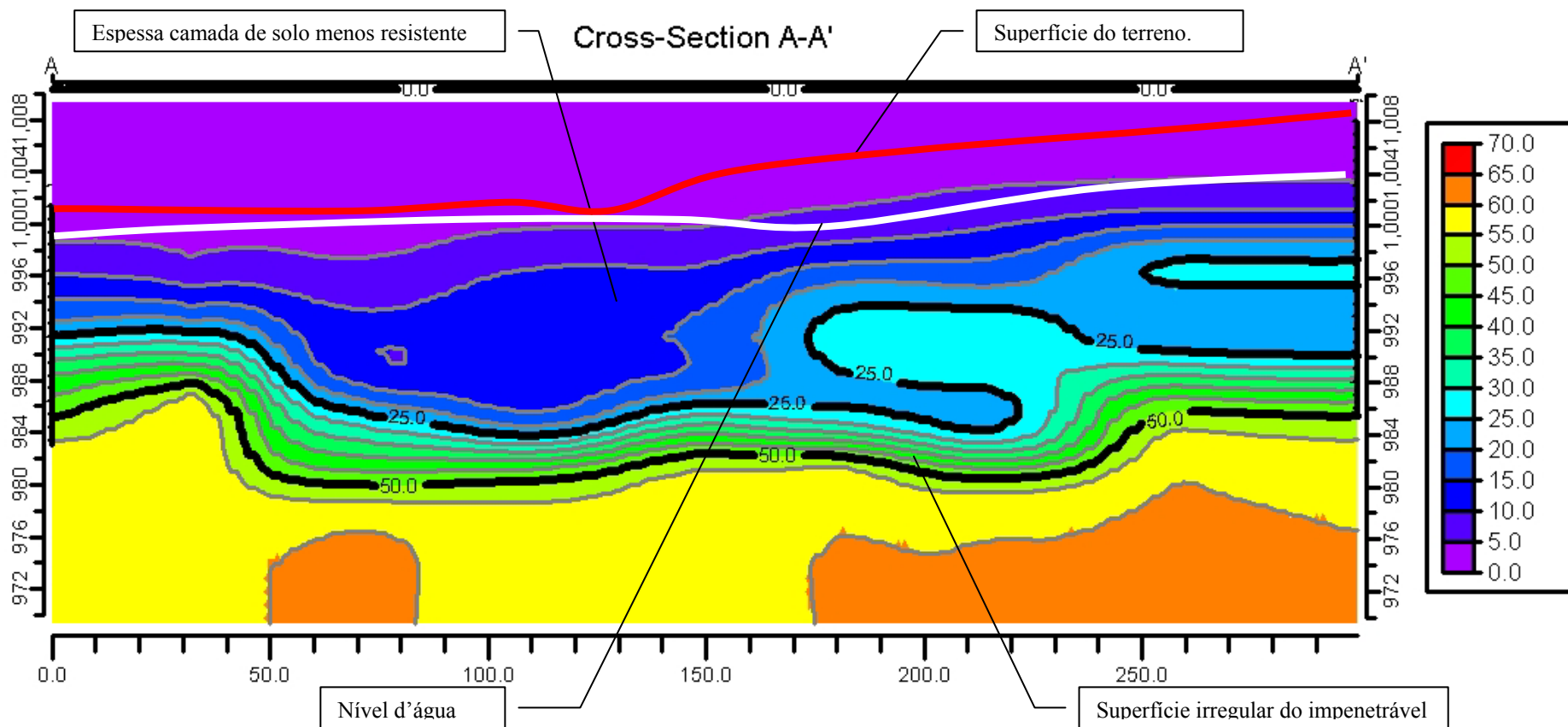


Figura 4.15 – Seção A-A mostrando os níveis de NSPT, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

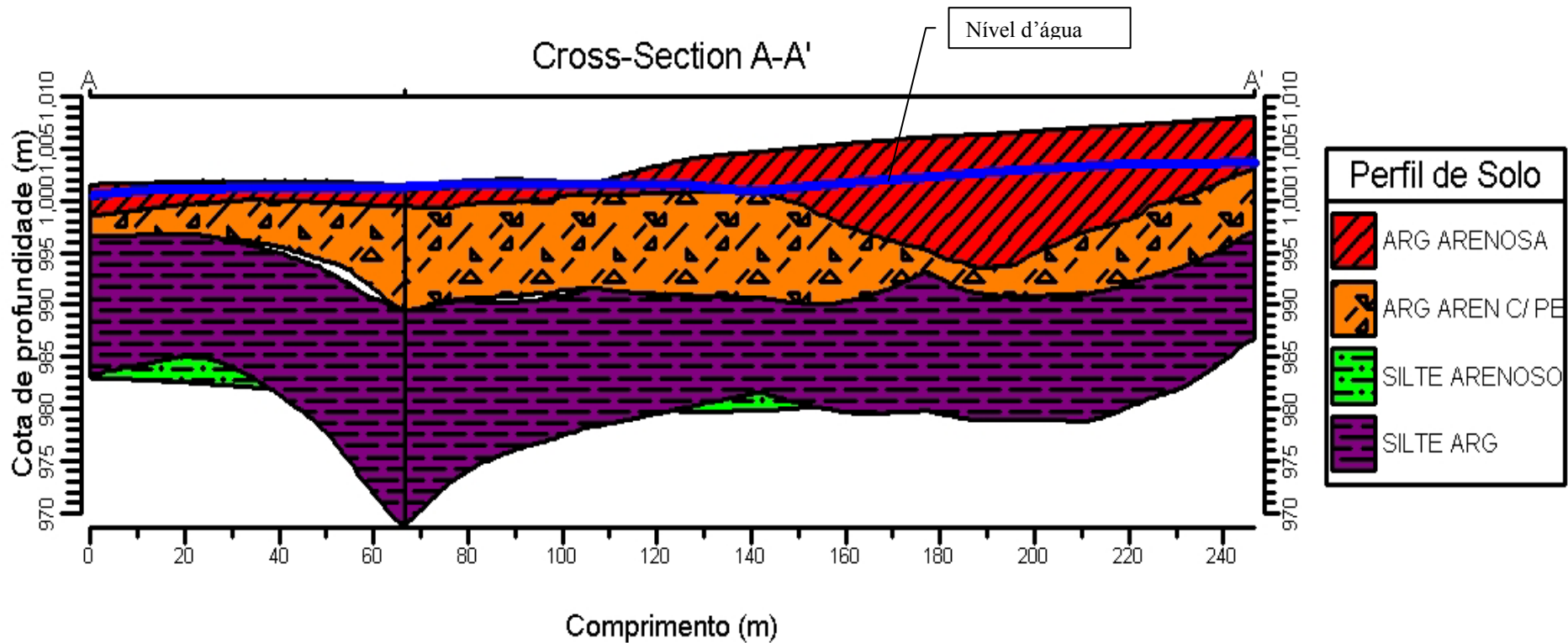


Figura 4.16 – Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

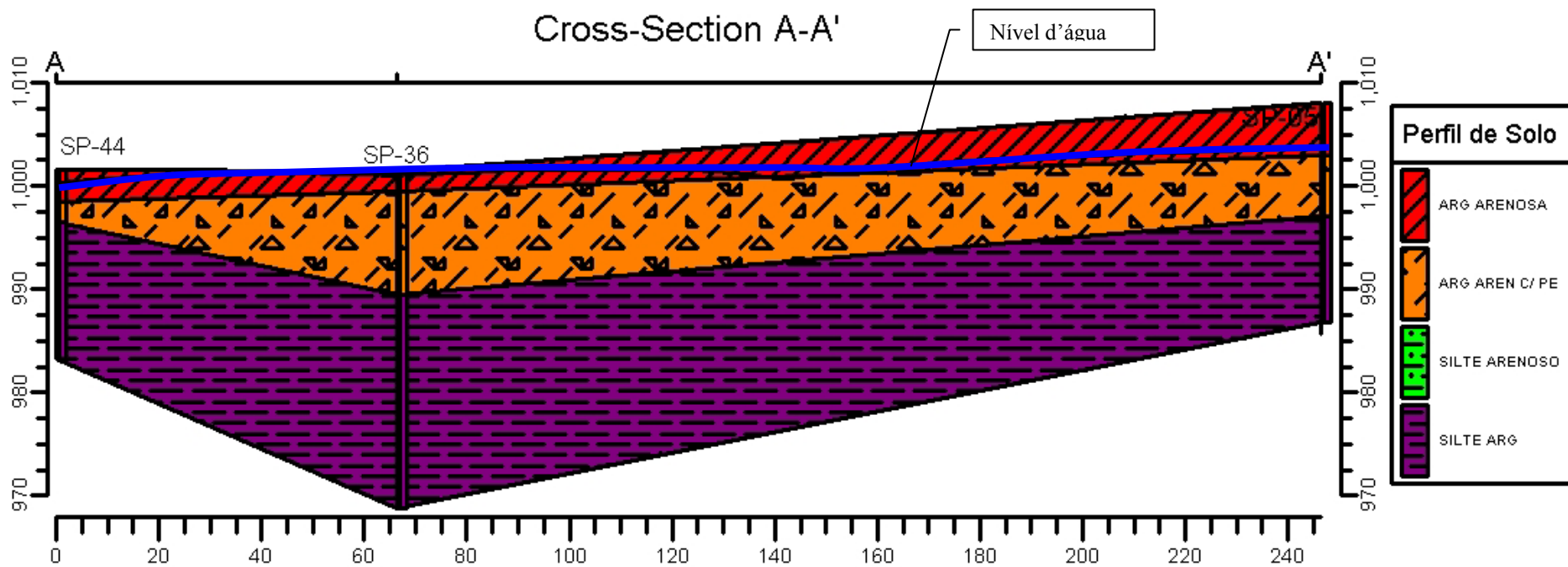


Figura 4.17 – Seção A-A não interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

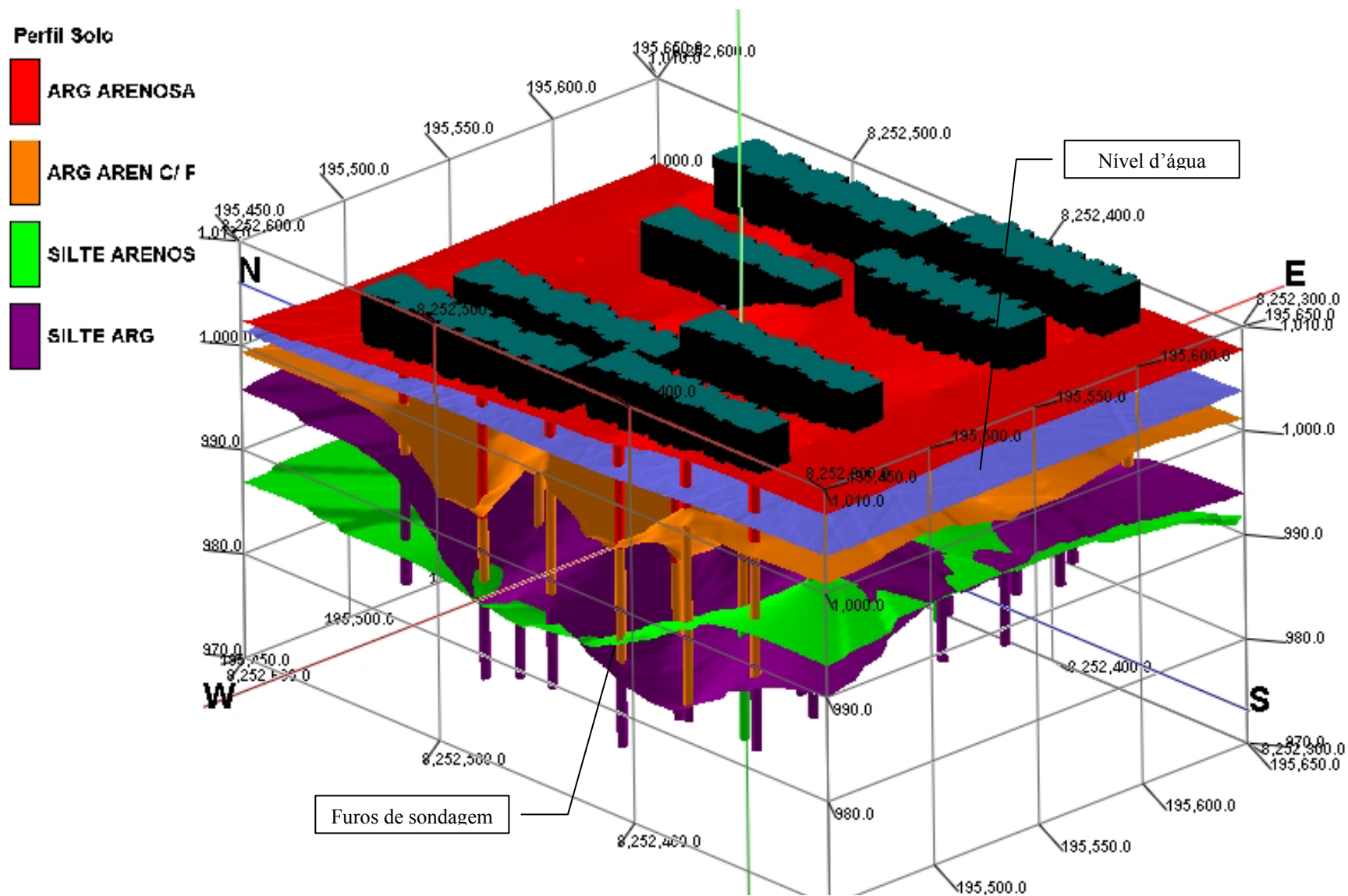


Figura 4.18 - Modelo 2,5D de solo (superfícies) com a localização dos furos de sondagem e conjunto de edificações, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

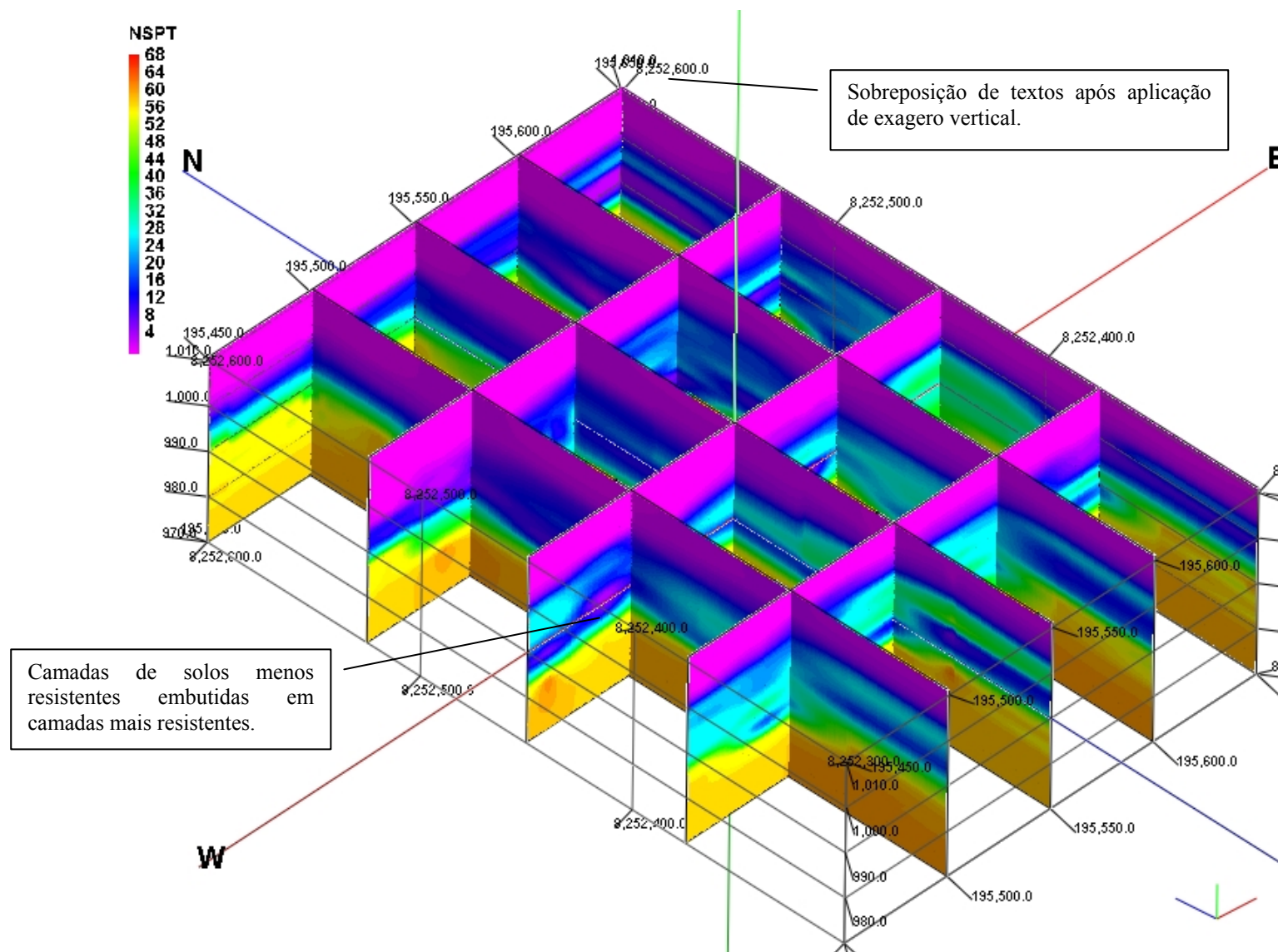


Figura 4.19 - Seções ortogonais 2,5D de NSPT, com exagero vertical de 2, do estudo de caso Projeto Ilhas do Lago.

4.7- RESULTADOS DO MAPEAMENTO TRIDIMENSIONAL – ESTUDO DE CASO: UnB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.

Na visão geral do modelo tridimensional de solo, apresentada na Figura 4.20, mostra-se além das camadas de solos identificadas na área de estudo, o afloramento do topo da camada de silte, que foi considerada aqui, por meio de correlações com o perfil proposto por MARTINS (2000), como o topo do saprólito e da camada de argila siltosa com pedregulhos, considerada a camada de solo laterítico, segundo tal perfil proposto. É interessante notar a indicação de um canal de água no modelo, evidenciando novamente que as condições morfo-hidrológicas foram preponderantes no processo de formação do relevo desse local e do perfil de solo encontrado. Observa-se pela Figura 4.20 que a forma do relevo converge em direção ao canal de água. A presença desse canal foi confirmada nos relatórios de sondagem, algumas dessas sondagens foram feitas exatamente com o intuito de localizar a direção de fluxo desse canal. No banco de dados essas sondagens estão identificadas com o nome “Linhas de Dreno”, nome dado pela empresa que executou as sondagens, e a localização desses furos está próximo à Biblioteca da UnB.

As Figuras 4.21 e Fig. 4.22 são as seqüências de visualização das camadas de solo presentes na área de estudo.

A Figura 4.23 apresenta uma visão geral dos níveis de NSPT interpolados e espacializados volumetricamente. Nota-se que pelos valores de NSPT, os resultados da espacialização do solo conferem, mostrando na Figura 4.23 o afloramento do topo do saprólito, identificado por valores elevados de NSPT.

A Figura 4.24 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação de uma seção de interesse. Evidentemente que a escolha dessa seção foi conveniente, pois passa em linha reta na direção do afloramento do saprólito.

A Figura 4.25 mostra uma seção longitudinal com a identificação dos valores de NSPT seguida da Figura 4.26 mostrando as camadas de solo local, interpoladas. Na Figura 4.25 percebe-se a espessa camada de solo menos resistente. Algumas observações devem ser feitas na Figura 4.26, como a identificação do nível d'água e o topo do saprólito nas imediações da Faculdade de Administração da UnB. Não foi identificado em nenhum relatório de sondagem a presença do nível d'água nas imediações da Faculdade de Administração, e por isso a indicação, na Figura 4.26, de um nível d'água projetado, resultante do processo de

interpolação. A Figura 4.26 ainda mostra o perfil truncado com a camada de argila siltosa entremeando-se com a camada de argila siltosa com pedregulhos.

A Figura 4.27 mostra as interfaces das camadas de solo e localização do nível d'água, bem como a localização das edificações, como o ICC (Minhocão), Finatec e Biblioteca da UnB. Pode-se observar, pela figura, uma melhor definição do canal de água.

A Figura 4.28 mostra um conjunto de seções ortogonais identificando os valores de NSPT por faixas de cores. As intercalações de valores médios e valores baixos de NSPT, principalmente nas proximidades do canal de água, sugerem que as flutuações no nível d'água e a forma do relevo, com as declividades naturais da superfície do terreno convergindo para o canal de água, são o principal agente modelador dessa condição de solo em campo.

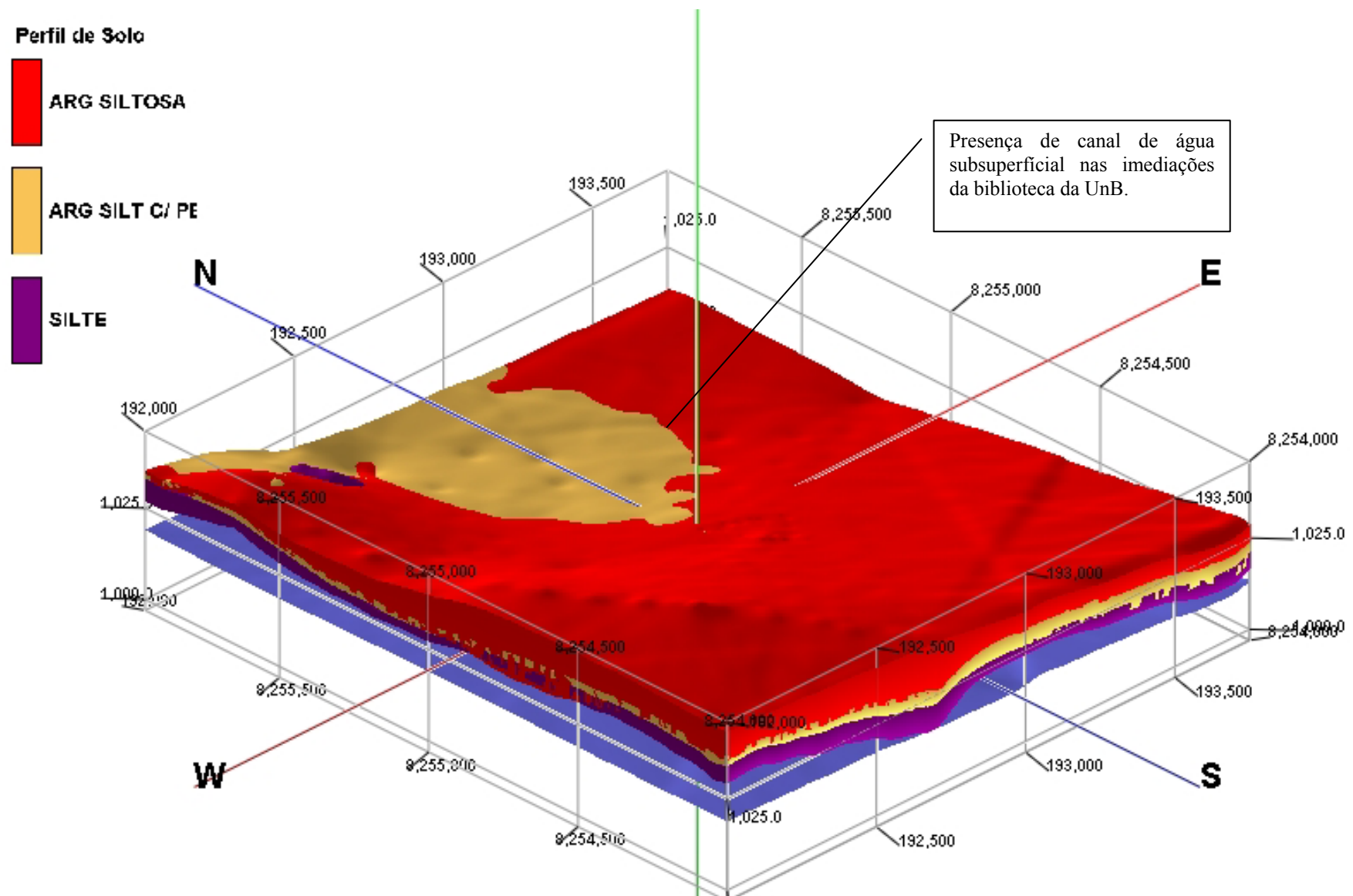


Figura 4.20 – Sequência 1 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, mostrando todas as camadas de solo, do estudo de caso da UnB.

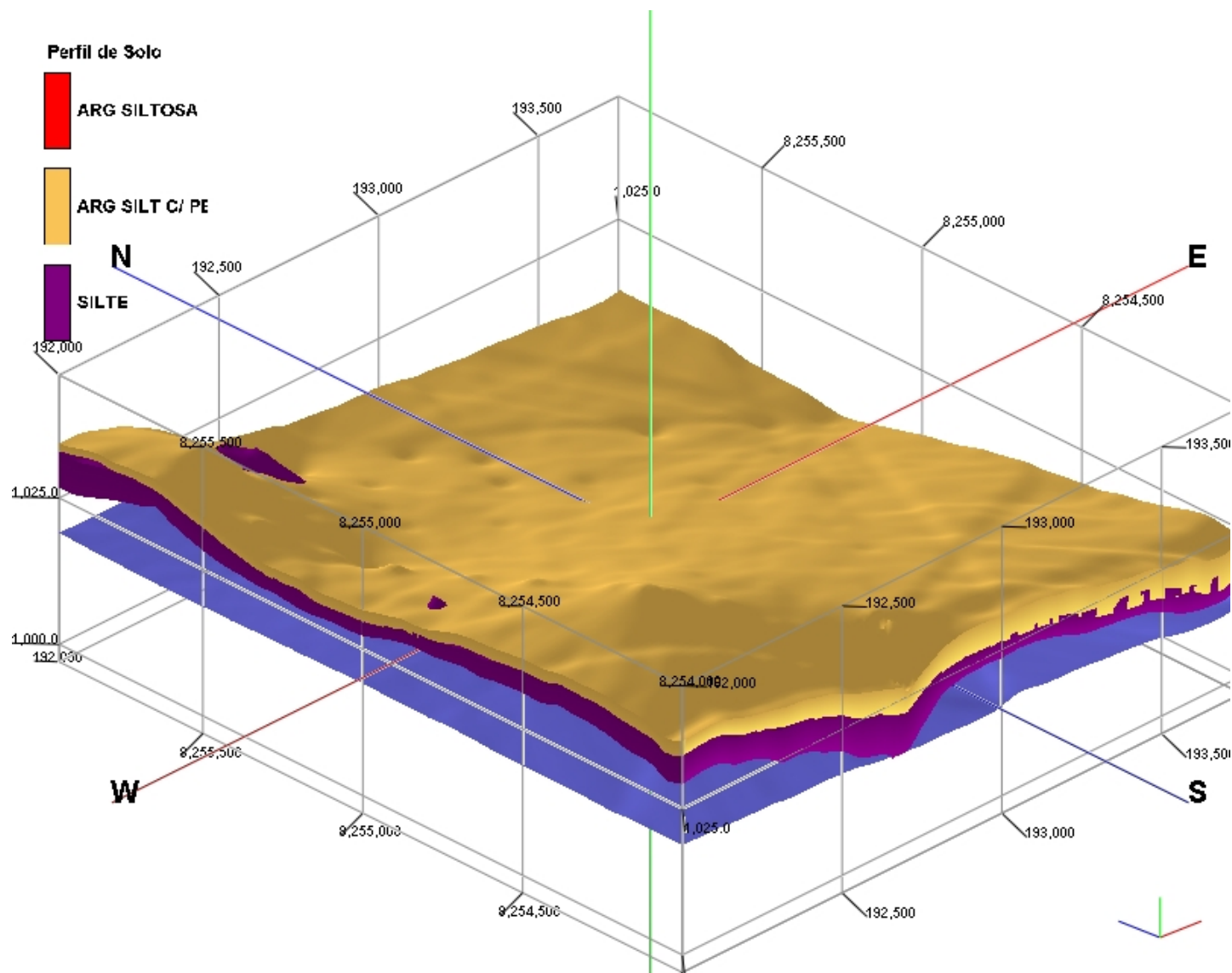


Figura 4.21 – Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, destacando a camada de argila siltosa com pedregulhos, do estudo de caso da UnB.

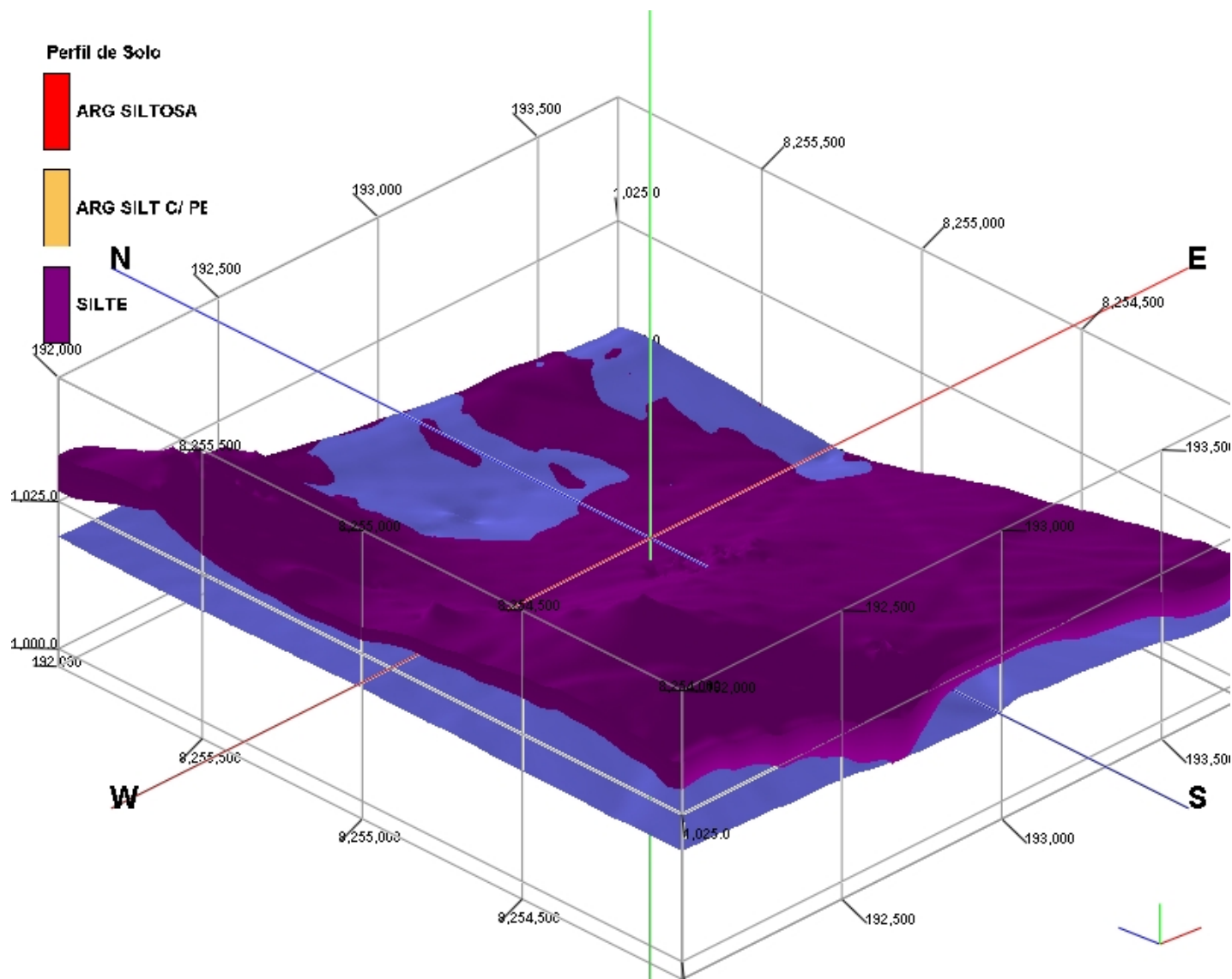


Figura 4.22 – Seqüência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, destacando a camada de silte e a superfície do nível d’água, do estudo de caso da UnB.

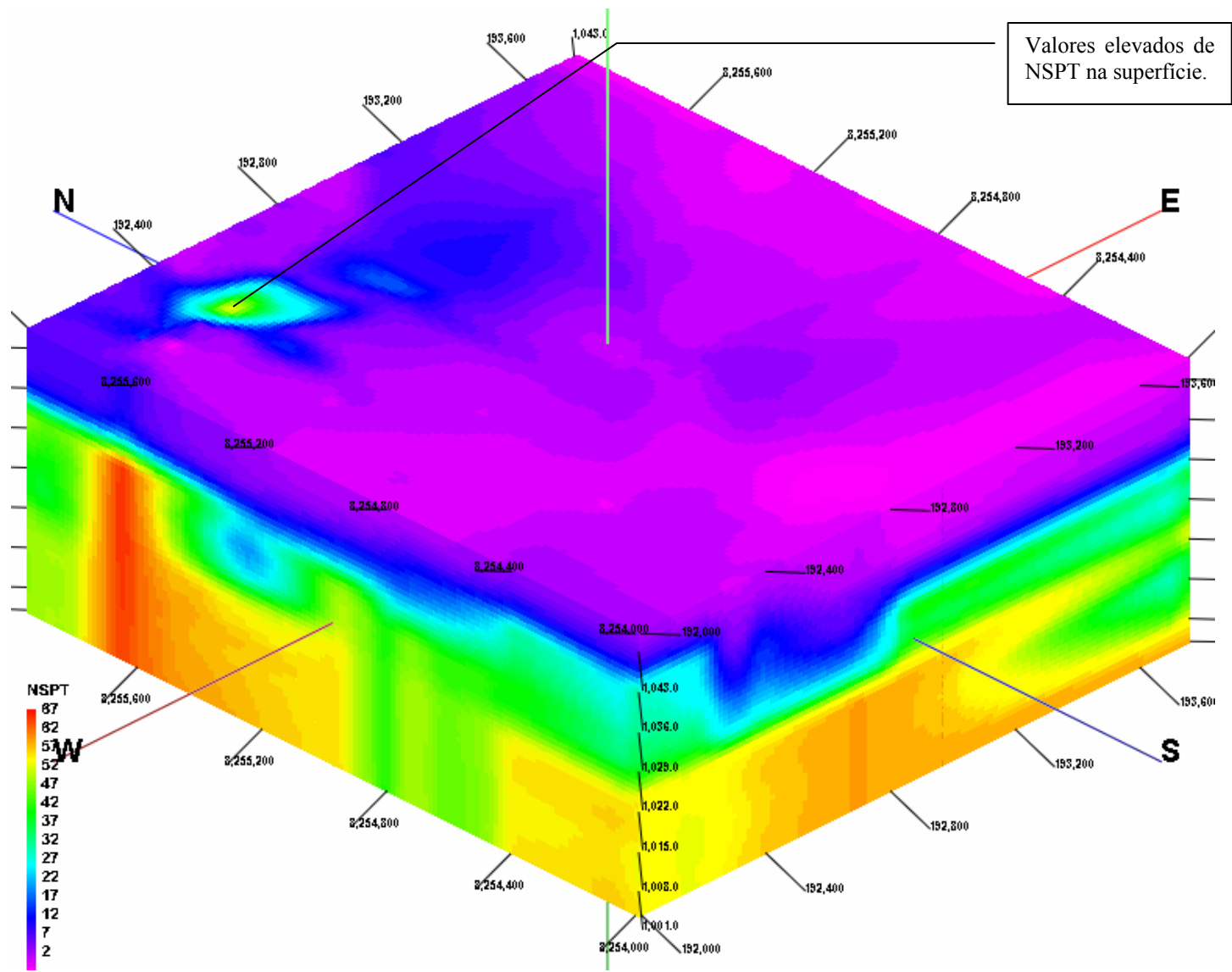


Figura 4.23 – Modelo tridimensional de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.

Mapa Hipsométrico com Localização de Seção de Interesse - UnB

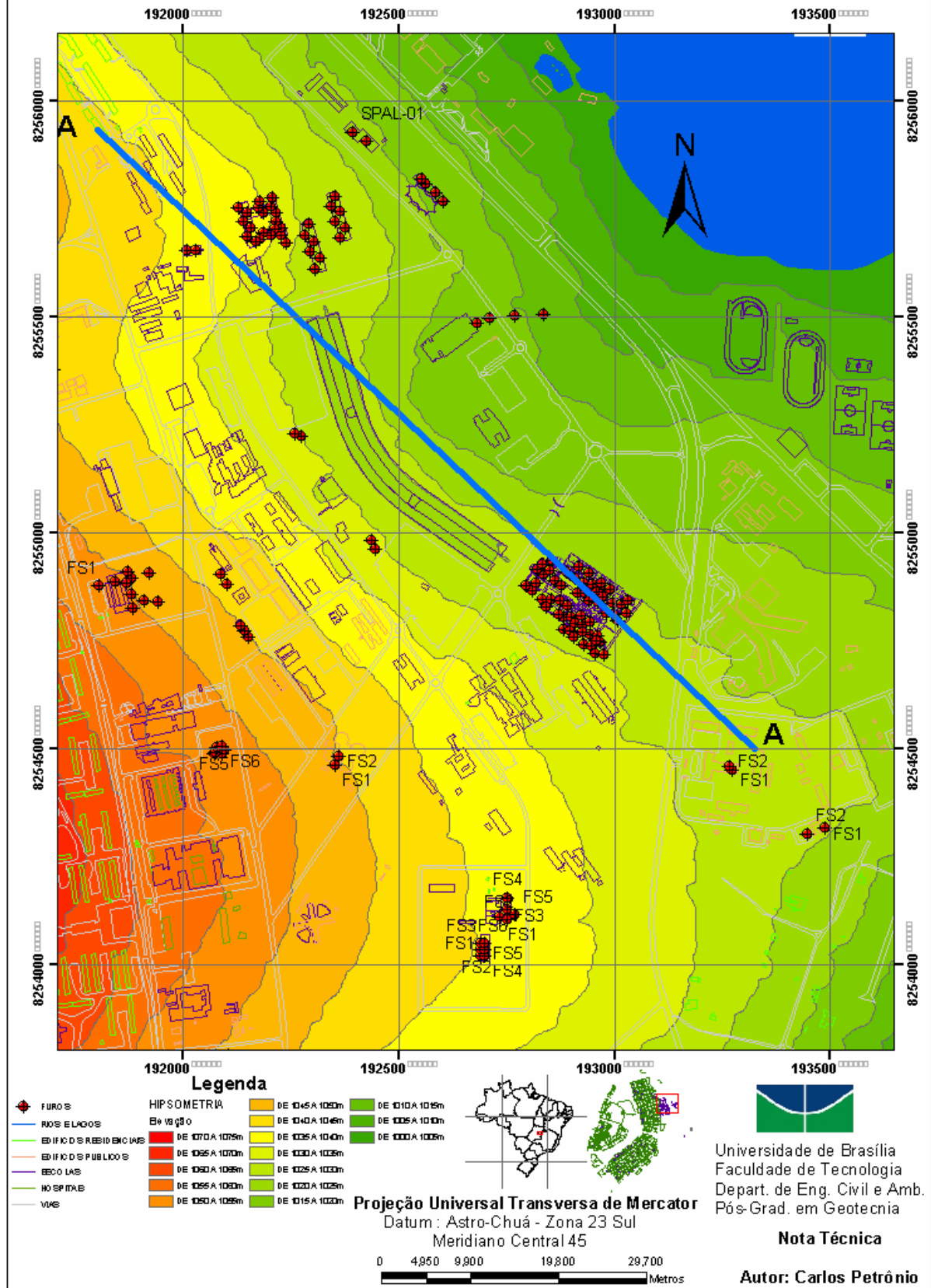


Figura 4.24 - Mapa hipsométrico, com localização de seção de interesse, do estudo de caso da UnB.

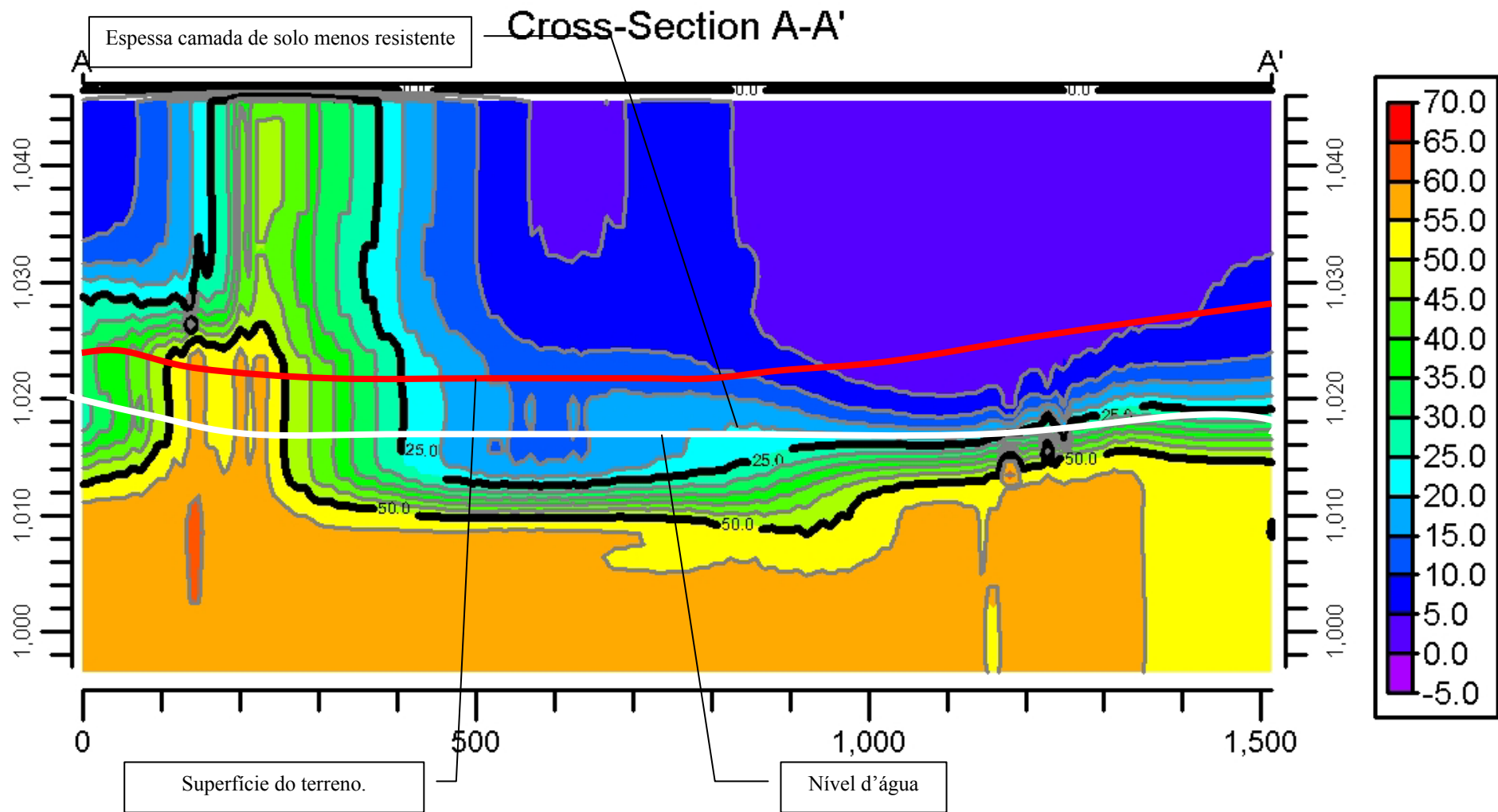


Figura 4.25 – Seção A-A mostrando os níveis de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.

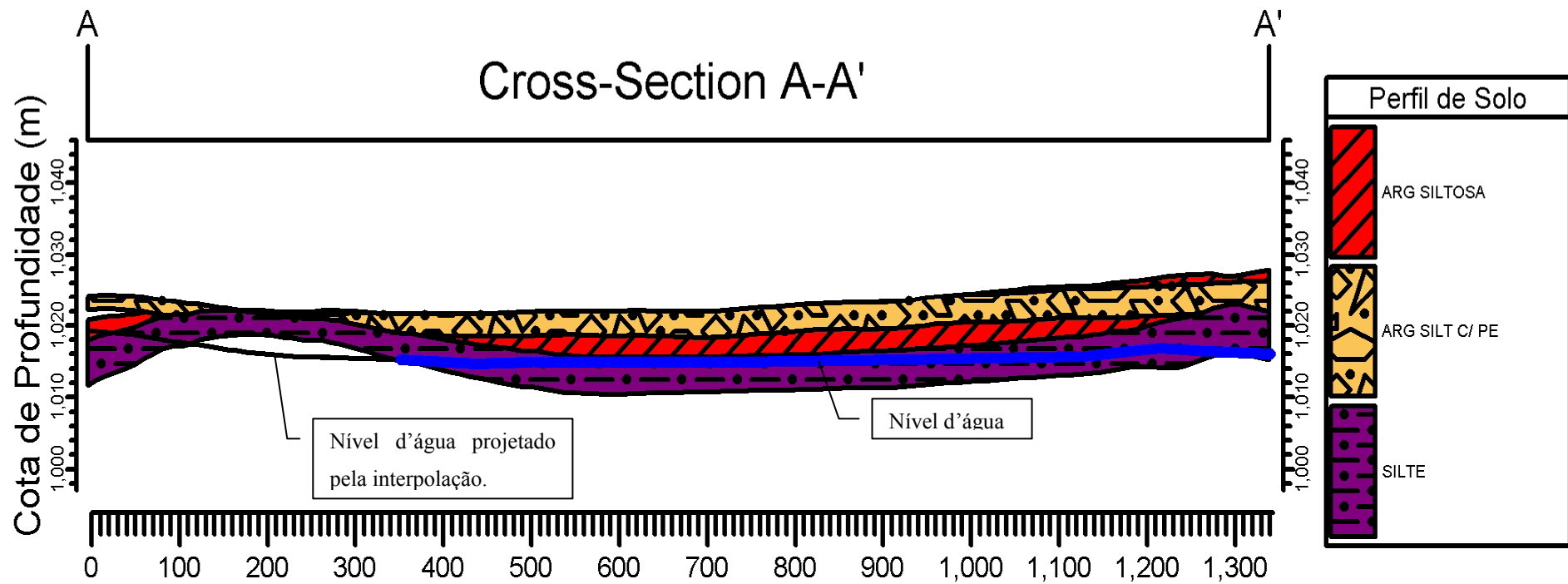


Figura 4.26 – Seção A-A mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.

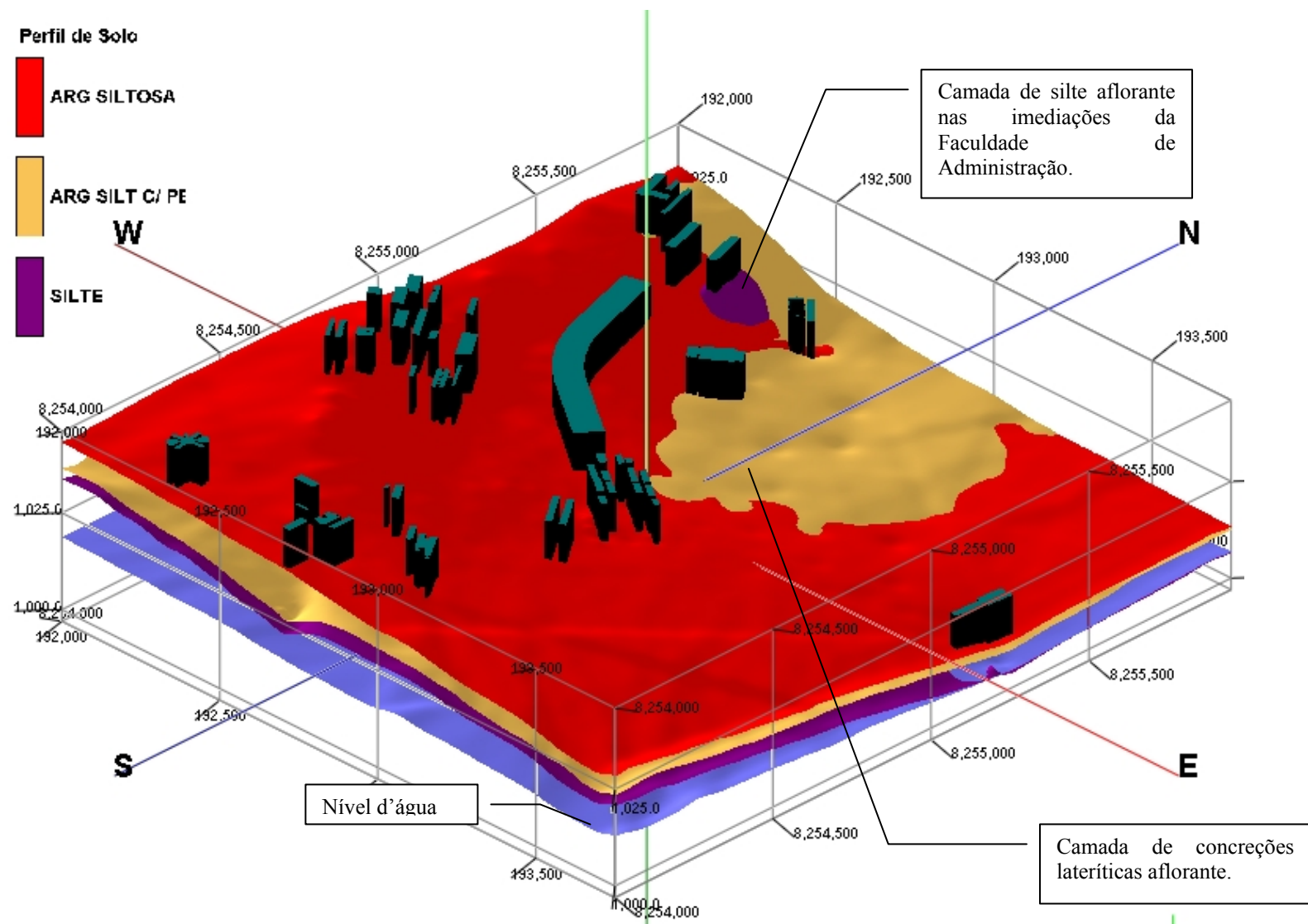


Figura 4.27 - Modelo 2,5D de solo com a localização do conjunto de prédios, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.

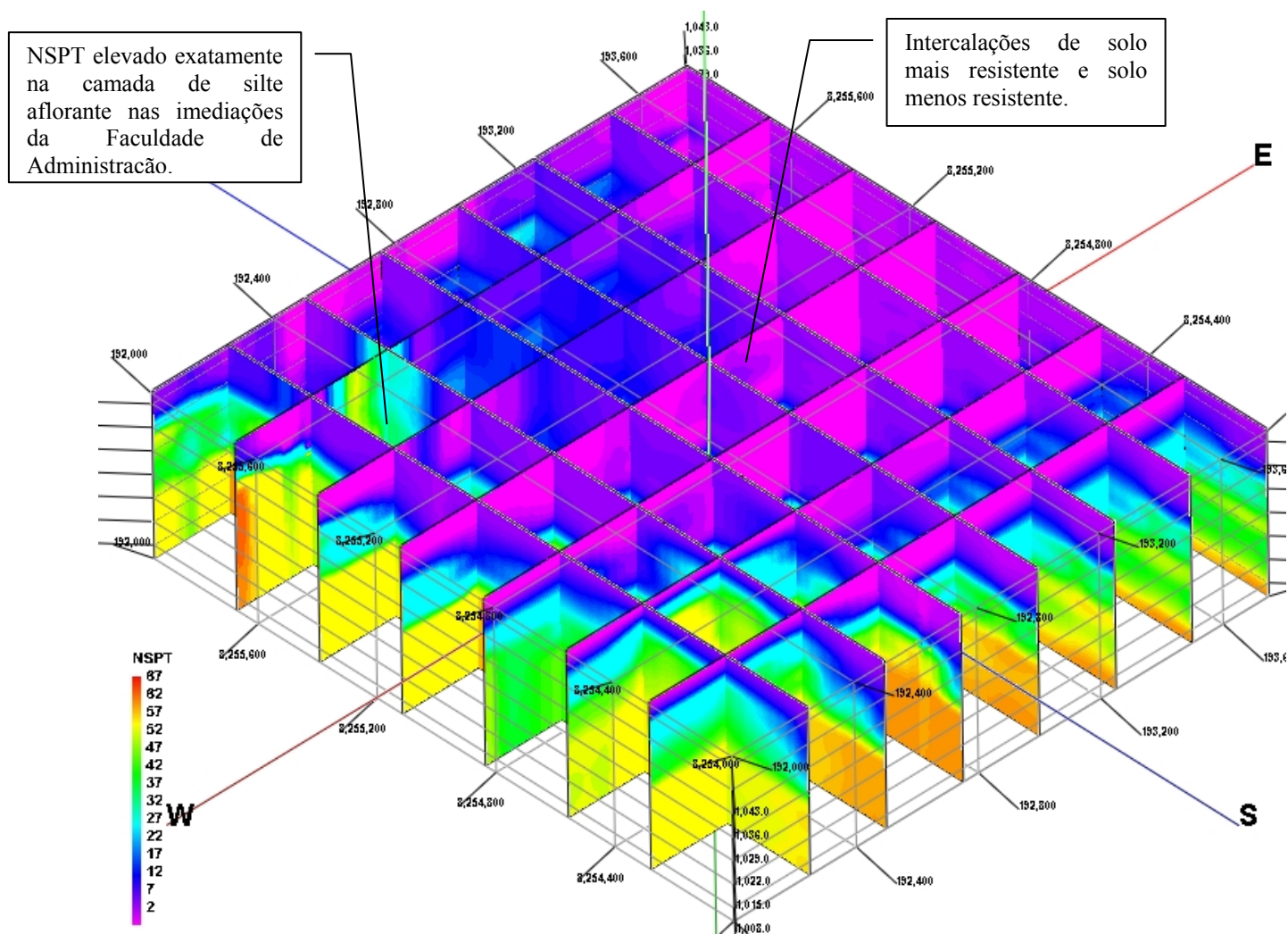


Figura 4.28 - Seções ortogonais 2,5D de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso da UnB.

4.8- RESULTADOS DO MAPEAMENTO TRIDIMENSIONAL – ESTUDO DE CASO: SETOR SUDOESTE DE BRASÍLIA (DF).

A Figura 4.29 apresenta uma visão geral 3D dos horizontes de solos identificados na área de estudo. Fazendo uma análise na superfície do modelo, percebe-se a formação de um domo na direção nordeste, sugerindo que essa porção mais elevada é sustentada por uma camada de solo mais resistente (silte arenoso). A figura identifica ainda, um possível canal de água (antigo) em direção ao parque central da cidade. As sondagens locais e o modelo não identificaram a presença de nível d'água, mas a forma do relevo nesse local, a forma das camadas de solo e os níveis baixos de NSPT na direção identificada na figura, fortalecem a suposição. As Figuras 4.30 e Fig. 4.31 mostram a seqüência de visualização das camadas de solo local.

A Figura 4.32 apresenta uma visão geral dos níveis de NSPT interpolados e espacializados volumetricamente. Percebe-se o afloramento do saprólito e uma tendência de valores médios de NSPT na direção nordeste próximos à superfície.

A Figura 4.33 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação de uma seção de interesse. Pelo mapa hipsométrico, percebe-se a formação do domo na direção nordeste. Vale esclarecer que o Setor Sudoeste é o local de cotas mais elevadas da área tombada. A seção de interesse foi definida na direção de maior concentração de sondagens.

A Figura 4.34 mostra uma seção longitudinal com a identificação dos valores de NSPT seguida da Figura 4.35 com as camadas de solo, interpoladas. Pela Figura 4.34 percebe-se a rápida convergência para valores elevados de NSPT em poucos metros de profundidade em algumas localidades, e o afloramento do topo do saprólito. Na Figura 4.35 nota-se também a pouca espessura da camada de argila siltosa em alguns trechos da seção, mostrando que o Setor Sudoeste possui solos menos intemperizados que os apresentados nos outros dois estudos de caso.

A Figura 4.36 mostra as interfaces das camadas de solo. Nessa figura, percebe-se com mais detalhes o possível canal de água, mostrando as deformações das superfícies de solo, e a possível direção de fluxo de água.

A Figura 4.37 mostra um conjunto de seções ortogonais identificando os valores de NSPT por faixas de cores. Seguindo a direção dos valores elevados de NSPT, percebe-se que o domo é sustentado por uma camada de solo resistente, e que apesar da quantidade de sondagens nessa direção pode-se concluir que o solo responsável por essa sustentação é o silte arenoso, aflorando em alguns locais. Porém a camada de silte arenoso possui algumas deformações nas bordas do modelo, o que sugere uma maior quantidade de sondagens melhor distribuídas nessa área. Percebe-se ainda, na figura, que os locais que apresentam maior espessura de solo menos resistente são exatamente os locais próximos ao suposto canal de água identificado, reforçando tal suposição.

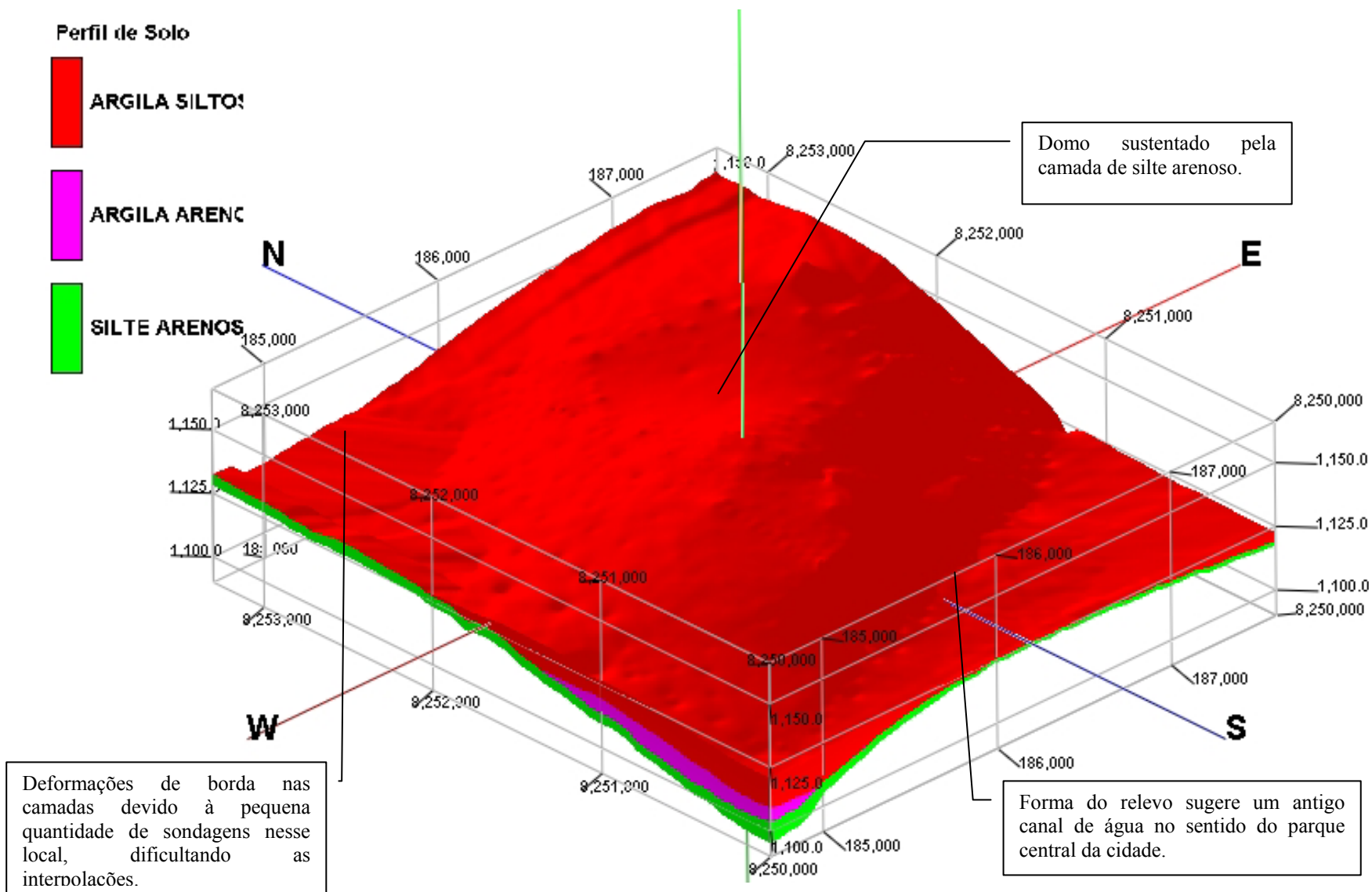


Figura 4.29 – Seqüência 1 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

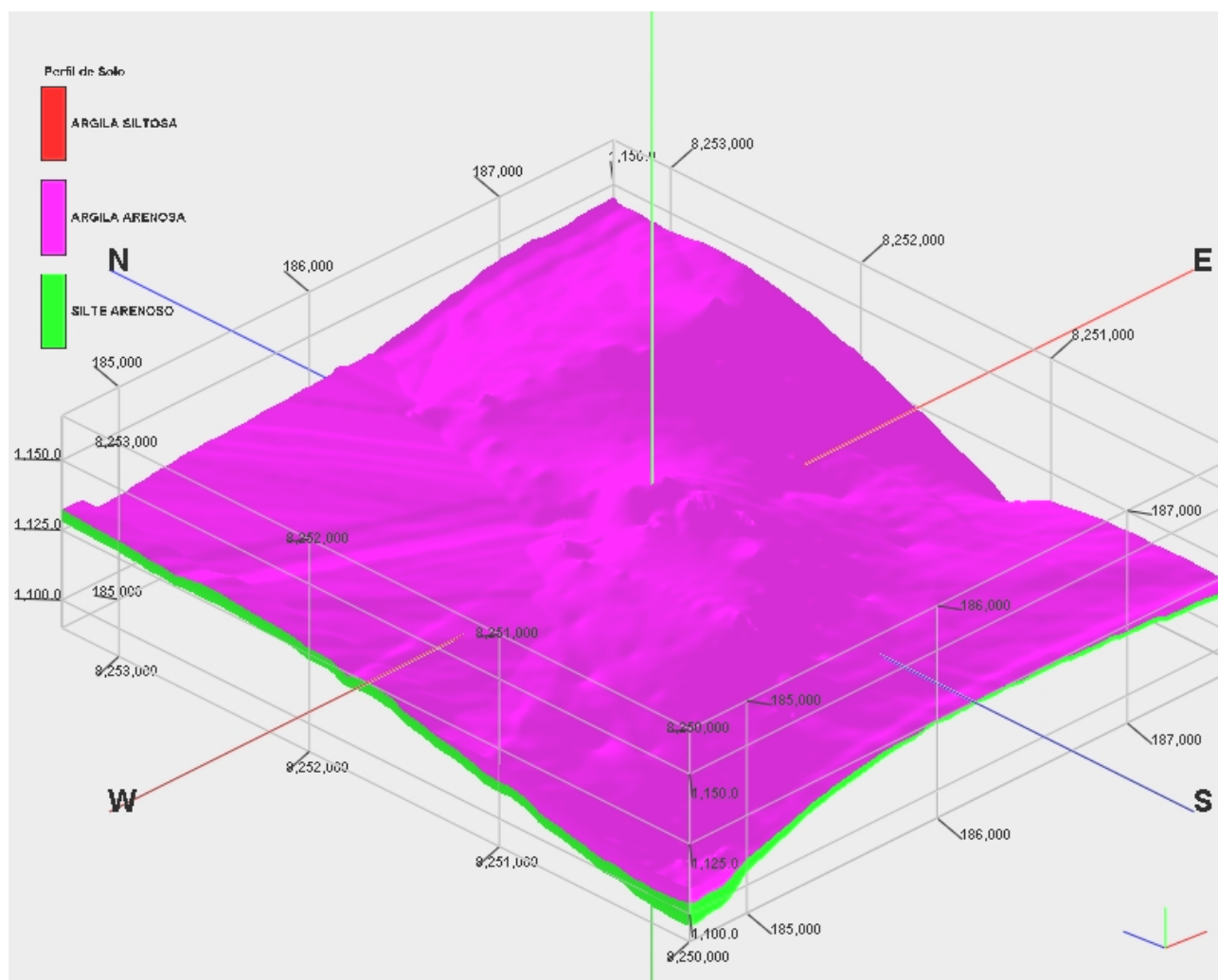


Figura 4.30 – Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

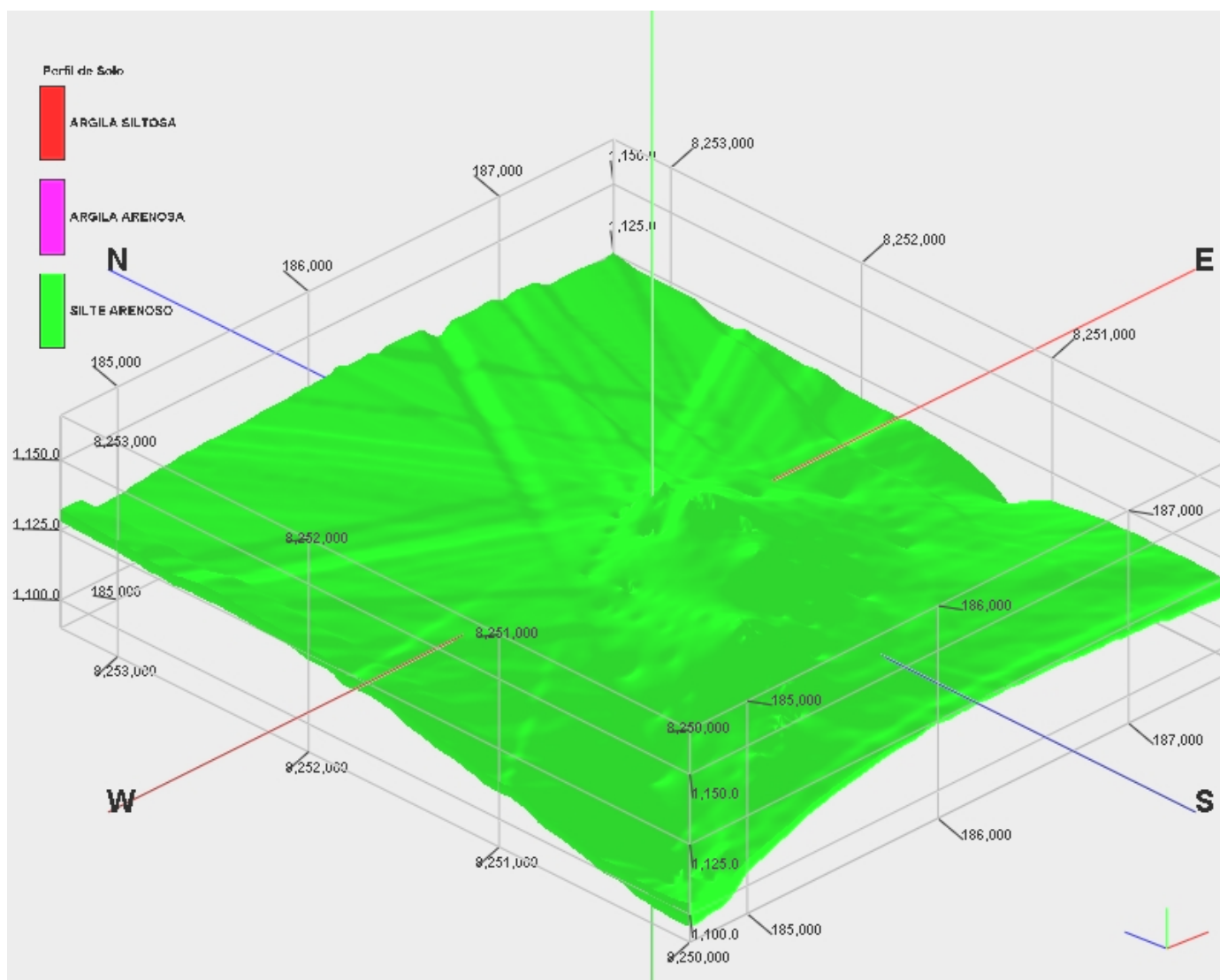


Figura 4.31 – Sequência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

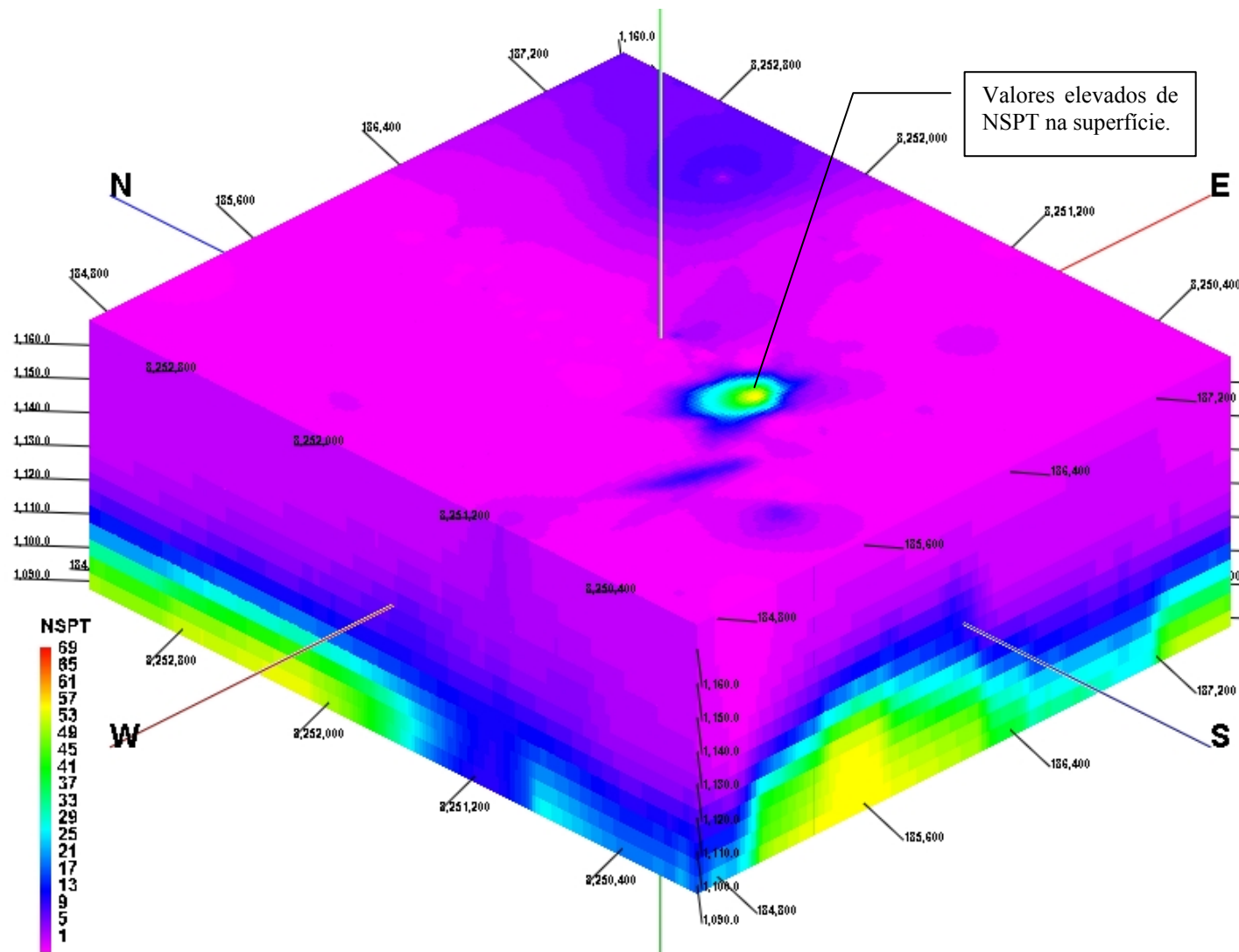


Figura 4.32 – Modelo tridimensional de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

Mapa Hipsométrico e Localização de Seção de Interesse - Setor Sudoeste/Brasília-DF

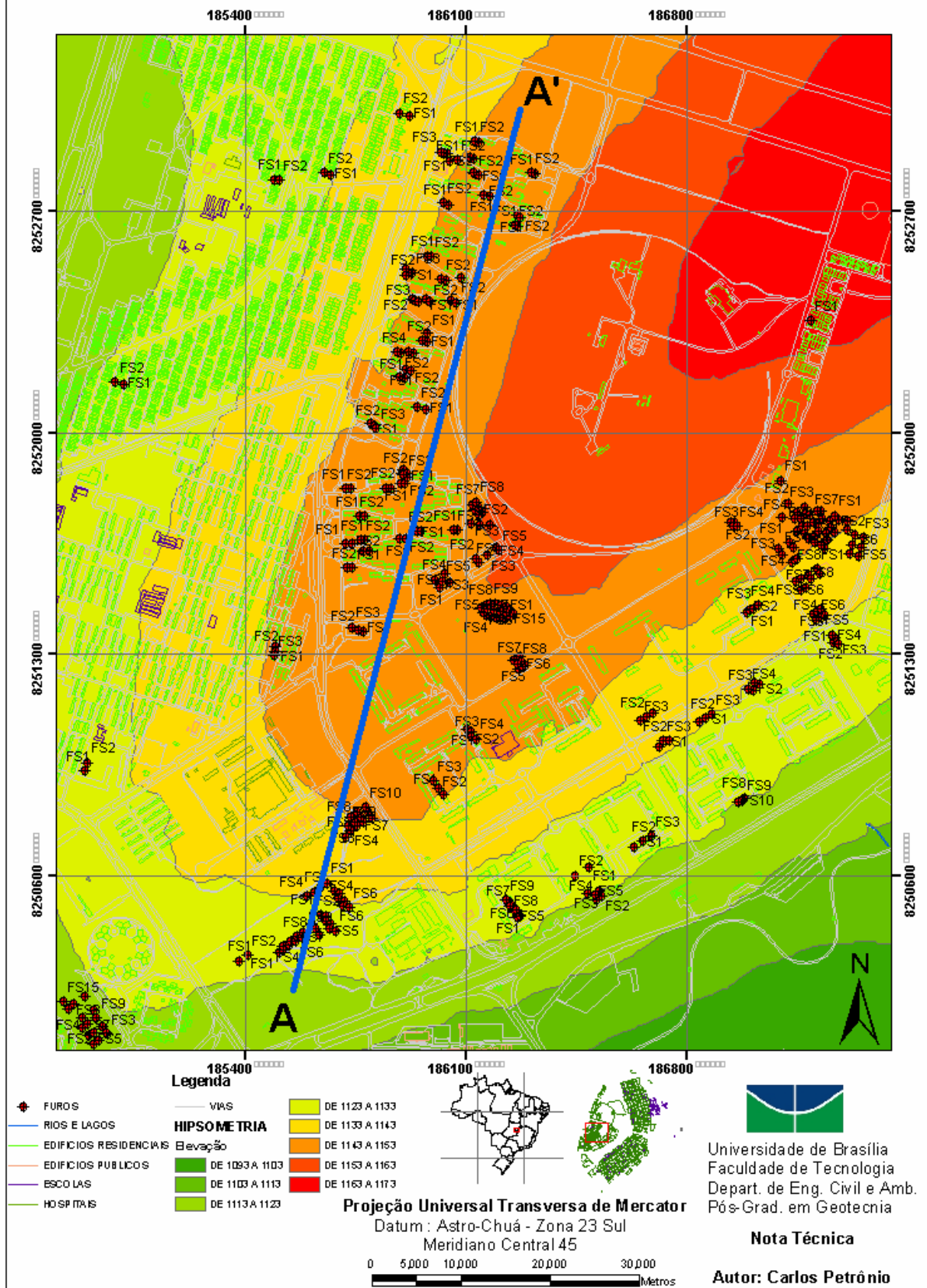


Figura 4.33 - Mapa hipsométrico, com localização de seção de interesse, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

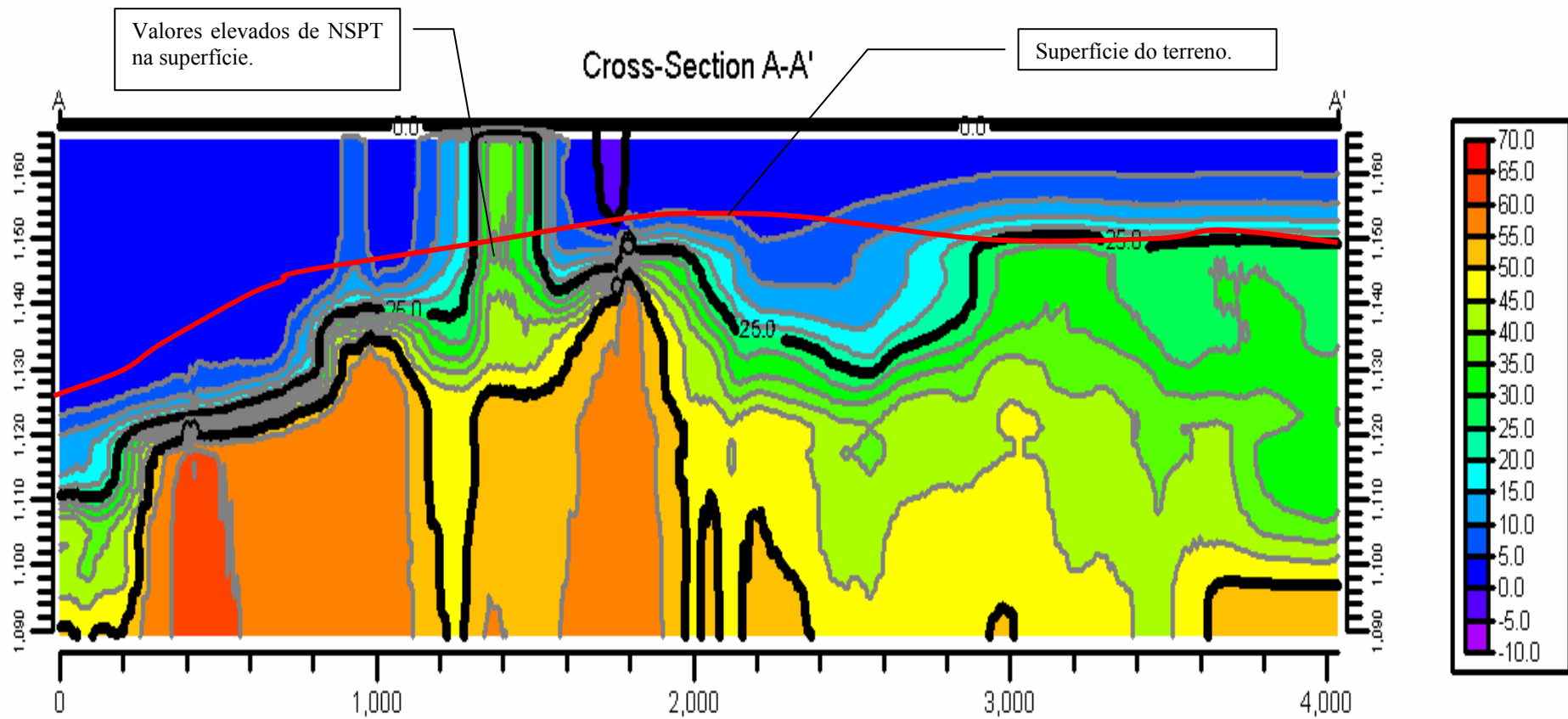


Figura 4.34 – Seção A-A interpolada, mostrando os níveis de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

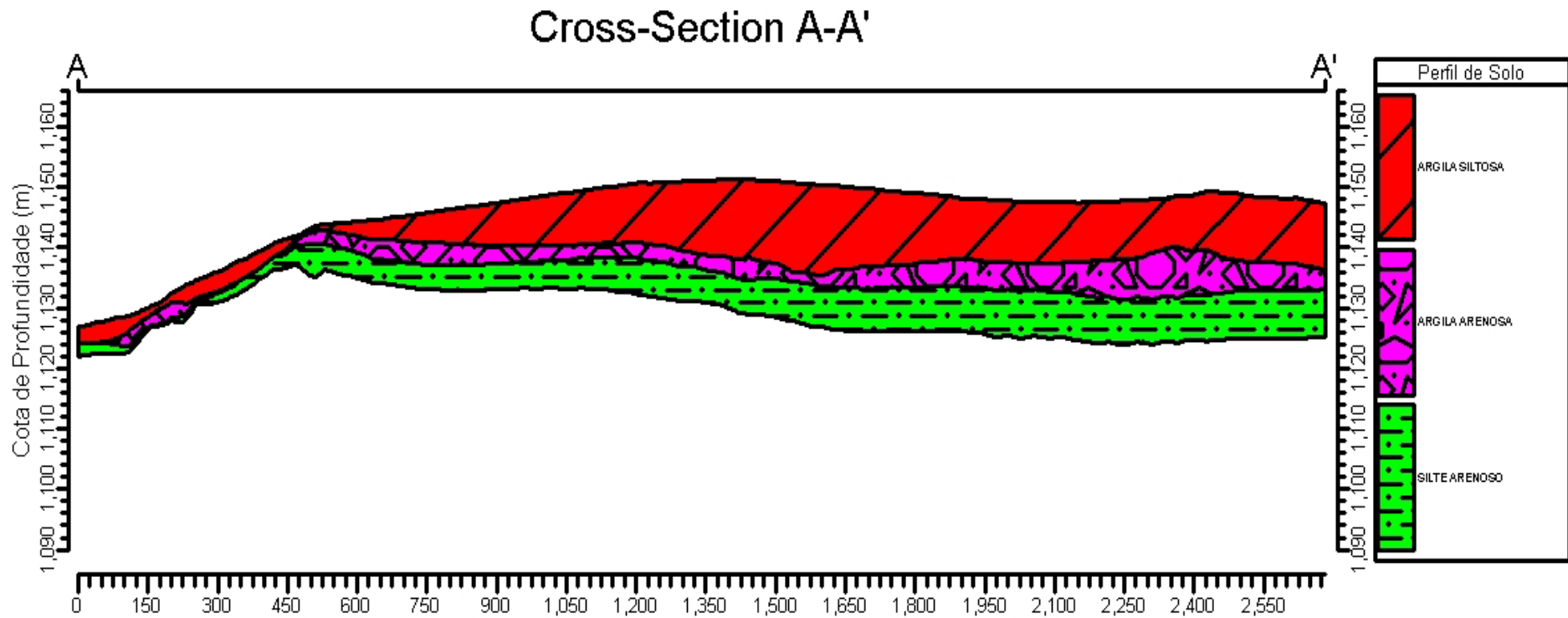


Figura 4.35 – Seção A-A interpolada, mostrando as camadas de solo local, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

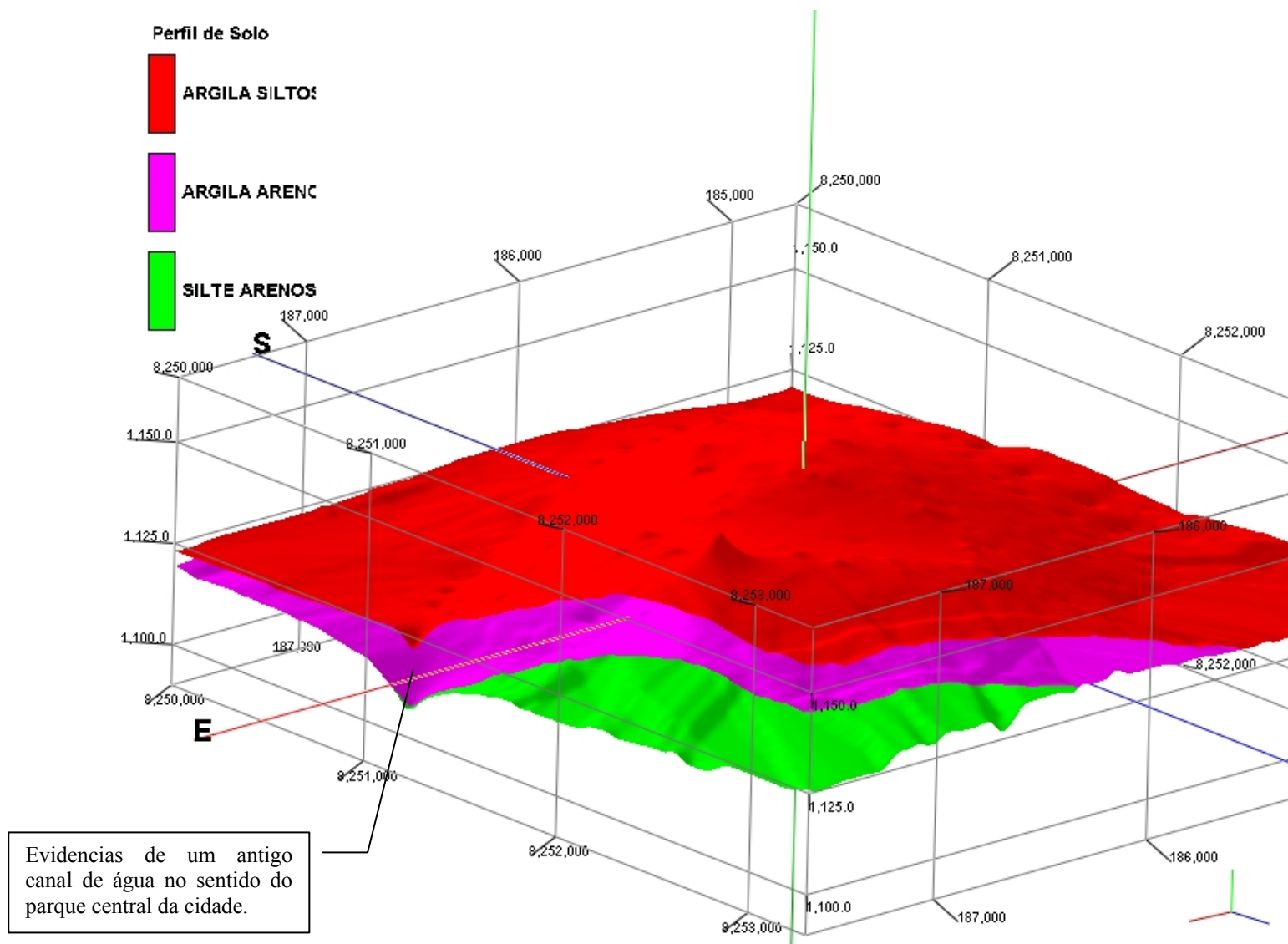


Figura 4.36 - Modelo 2,5D de solo, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

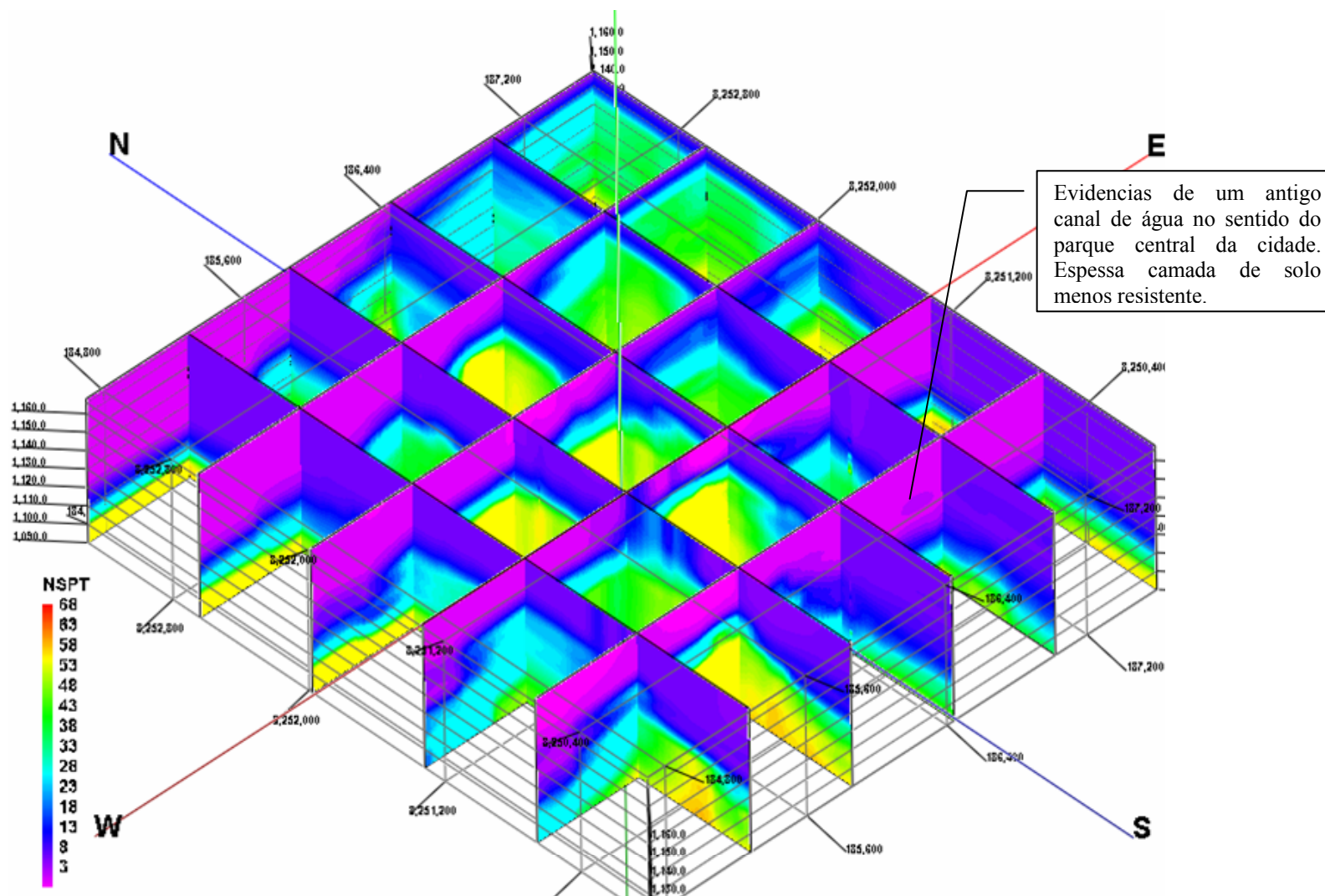


Figura 4.37 - Seções ortogonais 2,5D de NSPT, com exagero vertical de 15, do estudo de caso do Setor Sudoeste de Brasília (DF).

5.1- CONCLUSÕES

A elaboração de um banco de dados digital com acesso facilitado e o mapeamento tridimensional do subsolo, visando obter o máximo de conhecimento das condições geotécnicas do local da obra, facilitam as análises dos engenheiros. Ao contrário dos métodos bidimensionais (2D) que se aplicam somente aos dados de uma seção específica. A interpolação de dados durante o processo de modelagem 3D promovem modelos mais seguros e precisos.

Localmente, as camadas de solo encontrados na área de estudo são:

- Argila Porosa, contendo em vários locais, fragmentos de laterita ou quartzo, considerada porosa por apresentar alto índice de vazios. Constitui-se num material muito mole a mole com índices de resistência a penetração NSPT variando de 1 a 5 golpes e espessura variando de poucos metros a mais de 40 metros. Trata-se de um solo colapsível, apresentando nível d'água quase superficial nas proximidades do Lago Paranoá;
- Solo Argilo-siltoso, de cor vermelha, também com fragmentos de laterita ou quartzo, é um material de compactação média a dura que perde muito da sua capacidade de suporte quando desconfinado;
- Ardósia Intemperizada, de coloração vermelha ou roxa, em alguns locais pode-se encontrar com cor cinza a branca ou amarela, em estado bastante fraturado. O saprólito da ardósia é um silte argiloso ou até mesmo um silte arenoso, dependendo do local, de cor vermelha, roxa, amarela, branca ou cinza, de consistência rija a dura e índice de compactação que vão desde aproximadamente 10 golpes, mas que crescem rapidamente com a profundidade, até o impenetrável, com valores de NSPT acima de 50 golpes.

O estudo geoestatístico, baseados em interpoladores como a krigeagem e inverso ponderado da distância, tem-se mostrado uma valiosa ferramenta, principalmente quando a necessidade de estimativa de valores, com controle e quantificação de erros, de dados provenientes de ensaios de campo torna-se necessário. É de fácil entendimento que, amostragens mais adequadas melhoram substancialmente os resultados aqui alcançados.

O sucesso dos resultados obtidos deve-se principalmente às características do interpolador de krigeagem, que não permite a produção de resultados caso não se obtenha um variograma ajustado, ou seja, caso haja uma grande aleatoriedade dos dados fornecidos o variograma não

se ajustará e o processo de krigagem não será realizado, evitando, dessa maneira, estimativas erradas no modelo.

É notória a diferença entre o mapa bidimensional e estático comparado a um mapa tridimensional e interativo, do ponto de vista cartográfico. Um exemplo disso foi a geração dos modelos tridimensionais das edificações, que mesmo com generalizações na representação, ajudam o usuário na reconstrução do ambiente real tridimensional. Além disso, torna-se fácil produzir mapas bidimensionais e seções de interesse a partir do modelo 3D.

Analisando as figuras com representação tridimensional percebeu-se que a qualidade em termos de representação em *layout* sofre desvantagens quando comparadas aos mapas bidimensionais. Este fato deve-se principalmente às características de uso do ambiente tridimensional que é muito mais voltado à visualização e interatividade com o usuário. Percebe-se pelas figuras que existe a dificuldade em ajustar uma figura gerada de um modelo tridimensional que possa atender todas as expectativas de cada usuário, seria necessária a geração de várias vistas em várias perspectivas e ângulos diferentes para que tal expectativa seja atendida. Pode-se dizer que o produto final de um ambiente tridimensional está voltado para a representação na tela do computador da qual o usuário pode visualizar e consultar da maneira que melhor atenda suas expectativas.

A espacialização tridimensional de grandes áreas merece alguns cuidados, um deles é com as tabelas de resultados, devido à limitação de registros no *Access 2003*, um exemplo prático é o estudo de caso do Projeto Ilhas do Lago que possui 45 furos de sondagem e consumiu somente na tabela de valores de NSPT 1096 registros, não contando com o registro do modelo de tipo de solo e nível d'água. Outro cuidado que deve ser tomado é quanto ao ajuste da grade 3D para geração do modelo, quanto mais refinada a grade, maior é o tempo para processamento do modelo e maior será o tamanho do banco de dados, consumindo grandes quantidades de espaço em disco rígido.

Os perfis de solo baseados nos relatórios de sondagem mostram ser aplicável o perfil proposto apresentado por MARTINS (2000), porém tal perfil deve ser analisado com critério quando se trata de espacialização de dados de sondagem à percussão, o que chama a atenção para duas observações. A primeira quanto ao perfil truncado, onde as camadas apresentadas no perfil proposto (Figura 1.2) são consideradas por MARTINS (2000) como a descrição ideal do solo e que raramente são observados todos os horizontes num mesmo perfil, ou mesmo em

toposseqüência, fato observado nas espacializações, que mostraram muito mais os perfis truncados (Figura 1.3). A segunda observação é quanto aos dados de descrição do tipo de solo observado em campo, em especial a presença ou não de cascalho laterítico, couraça, carapaça e zona mosqueada que podem ou não ser detectadas nos ensaios de SPT. Os principais fatores para a não detecção dessas camadas intermediárias, propostas por MARTINS (2000), é o uso da água durante o processo de ensaio e a força dinâmica desprendida pelos golpes do martelo, o que pode destruir a estrutura de tais camadas, que muitas vezes apresentam pouca espessura em campo, não passando de poucos centímetros.

Os valores de resistência do solo apresentados nos relatórios de sondagens tendem a ser menores do que os valores reais de campo, principalmente na camada de argila siltosa que é uma argila porosa com alto índice de colapso, a explicação encontrada para tal fato está no método de ensaio, onde a alta energia desprendida pelos golpes do martelo (força dinâmica) durante a elaboração do ensaio de sondagem e o uso da água, destroem a estrutura do solo. De maneira que não é difícil concluir o que tal método de ensaio pode ocasionar em solos com características colapsíveis, nesse caso os solos de Brasília, que apresentam uma diminuição considerável da capacidade de suporte durante os ensaios de SPT, que em muitos casos apresentam valores baixos de NSPT até próximo à camada considerada impenetrável para as obras de fundações.

As análises feitas aqui, consideraram os modelos como um ambiente contínuo, pois não foram feitas análises de campo para identificação de possíveis planos de falhas ou discontinuidades, que podem ser inseridas nos modelos. Porém, vale lembrar, que o enfoque principal desse trabalho é o cadastramento dos furos de sondagem, elaboração do banco de dados digital e a modelagem 3D das informações. Análises geológico-geotécnicas mais criteriosas sugerem estudos mais criteriosos de campo, laboratório e modelagem. Além disso, a parceria entre geólogos e engenheiros civis no processo de entendimento de formação do solo da região é de suma importância.

Como esta pesquisa tem enfoque regional a sua importância está relacionada, além do aspecto acadêmico, ao fato de fornecer um banco de dados digital, conhecimento da distribuição espacial dos solos caracterizando principalmente as camadas de solo, valores de NSPT, espessura do solo, nível d'água, cor do solo, data do ensaio, entre outras informações; tornando a geologia local acessível a profissionais que eventualmente precisam realizar obras

e projetos na cidade, facilitando cálculos diversos que podem ser baseados em valores mais próximos à realidade do campo ao invés do uso de valores médios.

Com a visualização tridimensional das camadas, as intervenções necessárias no meio físico ficam evidentes, pois as características dos materiais a serem manipulados são condicionantes dos problemas esperados e do tipo de soluções adequadas.

5.2- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Embora o trabalho tenha alcançado os objetivos propostos, alguns fatores necessitam ser abordados em novas pesquisas. Apresentam-se, assim, algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Continuar o processo de expansão do banco de dados para enriquecer os resultados das interpolações, alimentando-o constantemente à medida que novas informações forem geradas;
- Desenvolver programas computacionais para cálculo de fundações que utilizem os dados provenientes dos modelos 3D de solos;
- Utilizar técnicas geoestatísticas que envolvam o uso de interpoladores híbridos para posterior comparação de resultados com os valores aqui apresentados;
- Compilar rotinas para modelagem 3D de programas computacionais do tipo *source code* para diminuir custos com programas computacionais com licença paga. Os programas do tipo *source code*, são programas com código aberto para a comunidade, ou seja, um programador pode utilizar esses códigos para criar um programa computacional personalizado, ou para incrementar o código existente com a finalidade de melhorar o que já existia. Uma boa sugestão são as rotinas chamadas de G3D, em linguagem de programação C, gratuitas para o programa computacional *Grass*, que é um programa do tipo *source code* distribuído gratuitamente e que possui funções SIG completas. As rotinas G3D, depois de compiladas e configuradas para uso no *Grass*, propõem-se a realizar todas as funções de espacialização descritas nesse trabalho.
- Espacializar dados de outros tipos de ensaio, como ensaio de cone (CPT), triaxial, cisalhamento direto ou ensaios geofísicos. Além de produzir correlações entre ensaios de campo, provas de carga e ensaios de laboratório que possam facilitar os cálculos dos engenheiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1983). Norma Técnica NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro RJ, 18 p.
- ABNT (1995). Norma Técnica NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 18 p.
- ABNT (1995). Norma Técnica NBR 13441. Rochas e solos - Simbologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 13 p.
- ABNT (2001). Norma Técnica NBR 6484. Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 12 p.
- AUTODESK (1997). AutoCAD Release 14. Autodesk – Architectural Desktop. Autodesk Electronic Press. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 1 CD-ROM + User's Guide.
- BURROUGH, A.P. & McDONNELL, R.A (1998). Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press; 2 edition: 98-132.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS., U.M.; GARRIDO, J.; & II, F.M. (1996) SPRING: integrating remote sensing and GIS by objectoriented Data modeling. National Institute for Space Research (INPE), Brazil. J Computer & Graphics 20 (3): 395-403.
- CÂMARA, G. DAVIS, C., MONTEIRO, A.M.V., (1998). Conceitos básicos em Ciência da Geoinformação. Página Web: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.htm>>. Acesso em: set. 2006.
- CÂMARA, G. & QUEIROZ, G. (2006). Banco de Dados Geográficos – Introdução aos Sistemas de Bancos de Dados – Parte I. Página Web: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser303>>. Acesso em: jun. 2006.
- CÂMARA, G. & QUEIROZ, G. (2006). Banco de Dados Geográficos – Introdução aos Sistemas de Bancos de Dados – Parte II - Modelagem de Dados. Página Web: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser303>>. Acesso em: jun. 2006.
- CAMARGO, E.C.G. (1997). Desenvolvimento, Implantação e Teste de Procedimentos Geostatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciados (SPRING). Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP, 105 p.
- CARNEIRO, P.J.R. (1999). Mapeamento Geotécnico e Caracterização dos Materiais Naturais de Construção do Distrito Federal: Uma Base de Dados para o Planejamento e Gestão. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-001A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 209 p.
- CODEPLAN (1998). Cartas planialtimétricas em formato vetorial, na escala 1:2000, com informações sobre sistema viário, hidrografia, hipsometria e áreas urbanas. Sistema Cartográfico do Distrito Federal, SICAD, Brasília, DF.

DEARMAN, W.R. (1991). Engineering Geological Mapping. British Library Cataloguing Publication Data. Butterworth & Heinemann, London, UK, 415 p.

FOSSE, J.M., (2004). Representação Cartográfica Interativa Tridimensional: Estudo da Variável Visual Cor em Ambiente VRLM. Dissertação de Mestrado, Publicação N-173, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 126 p.

INPE (2002). Sistema de processamento de informações georreferenciadas – Spring – Manual do usuário, São José dos Campos, SP. 139 p.

ISMAIL, W.M. (2001). Geographical Information System – Demographic Spatial Analysis and Modeling. Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the Degree of Master of Science (Planning – Geographical Information Systems), University Science Malaysia, Malaysia, 220 p.

LANDIM, P.M.B. (1998). Análise Estatística de Dados Geológicos. Unesp, São Paulo, SP, 266 p.

LANDIM, P.M.B. (2000). Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Unesp, São Paulo, SP, 18 p.

MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M.F., RHIND, D.W. (1991). Geographical Information Systems, Principles. Longman Scientific & Technical, Vol.1, 649 p.

MARTINS, E.S. (2000). Petrografia, Mineralogia e Geomorfologia de Rególitos Lateríticos do Distrito Federal. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 196 p.

MATULA, M. (1979). Regional Engineering geological mapping for planning purposes. Boletim da IAEG 19: 18-24.

MICROSOFT (2003). Microsoft Office Access 2003 for Windows. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 1 CD-ROM + 1 Manual de Ajuda.

OLIVEIRA, M.G. (1996). Mapeamento Geotécnico da Asa Sul - Brasília-DF. Dissertação de Mestrado, Publicação G.D.M-036A/96, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

RÊGO, M.C.A. (1997). Mapeamento Geotécnico da porção Sul da área de proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-041A/97, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123 p.

ROCKWARE (2006). RockWorks 2006. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 1 CD-ROM. Minimum System Requirements: IBM-compatible computer running Windows 2000 / NT / XP, 512 MB of RAM (1GB+ recommended), Pentium III or newer CPU (1.4 GHz or faster recommended), 75 MB of free disk space for program installation, display set to greater than 800 x 600 pixels.

ROMÃO, P. A. (2006). Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - região de Goiânia - GO. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-034/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 166p.

ROMÃO, P.A. & SOUZA, N.M. (1996). Mapeamento geotécnico da região de Águas Claras-DF: utilização de geoprocessamento. In: 2 Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e I Encontro Regional de Geotecnia e Meio Ambiente. ABGE. São Carlos, SP: 155-163.

SILVA, G.Z. & SOUZA, J.M., (01/01/2007) Futuras Direções em SIGs: O Que os Usuários Devem Esperar dos Novos Sistemas. Página Web : < <http://www.cos.ufjf.br/~zimbrao/futuras.ps> >. Acesso em: 1 de janeiro de 2007. 11 p.

SOZINHO, L.A. (2002). Caracterização Geológica-Geotécnica do Solo de Laulane para Fundações de Edifícios. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-090A/2002 Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.

SPRAGUE, K., KEMP, E., WONG, W., McGAUGHEY, J., PERRON, G., BARRIE, T. (2006). Spatial targeting using queries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration. *Computer & Geosciences* 32: 396-418.

STURARO, J.R. & LANDIM, P.M.B. (1996). Mapeamento geostatístico de ensaios de penetração padronizada (SPT). *Solos e Rochas- Revista Brasileira de Geotecnia*, 19 (1): 3-14.

TURNER, A.K. (1997). What's the difference among 2-D, 2.5-D, 3-D and 4-D? *GIS World*, [s.l.], p. 54.

TSUTSUMI, M. (2000), Exploração do Subsolo. *Mecânica dos Solos I*, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes, UFJF, Juiz de Fora, MG, 37 p.

ZUQUETTE, L.V. (1987). Análise Crítica sobre Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para as Condições Brasileiras. Tese de doutorado, EESC/USP, São Carlos, SP, 3 vols, 673 p.

ZUQUETTE, L.V. & GANDOLFI, N. (2004) – Cartografia geotécnica. Oficina de textos. São Paulo, SP. 190 p.

**A - TABELAS DE FOLHAS DA BASE CARTOGRÁFICA
UTILIZADAS PARA O MOSAICO DA ÁREA DO PROJETO**

Tabela A-0.1 – Folhas utilizadas para o mosaico da área de trabalho (Codeplan, 1998).

QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA
1	103-i-2	33	104-iv-1	65	120-iv-1	97	122-i-4	129	136-iv-3	161	138-i-5
2	103-i-3	34	104-iv-4	66	120-iv-2	98	122-i-6	130	136-iv-4	162	138-i-6
3	103-i-6	35	104-iv-5	67	120-iv-3	99	122-ii-1	131	136-iv-5	163	138-ii-1
4	103-ii-1	36	104-iv-6	68	120-iv-4	100	122-ii-4	132	136-iv-6	164	138-ii-2
5	103-ii-2	37	119-ii-3	69	120-iv-5	101	122-iii-1	133	137-i-1	165	138-ii-3
6	103-ii-3	38	119-ii-6	70	120-iv-6	102	122-iii-2	134	137-i-2	166	138-ii-4
7	103-ii-4	39	119-iii-1	71	121-i-1	103	122-iii-3	135	137-i-3	167	138-ii-5
8	103-ii-5	40	119-iii-2	72	121-i-2	104	122-iii-4	136	137-i-4	168	138-ii-6
9	103-ii-6	41	119-iii-4	73	121-i-3	105	122-iii-5	137	137-i-5	169	138-iii-1
10	103-iii-3	42	119-iii-5	74	121-i-4	106	122-iii-6	138	137-i-6	170	138-iii-2
11	103-iii-4	43	119-iii-6	75	121-i-5	107	122-iv-1	139	137-ii-1	171	138-iii-3
12	103-iii-5	44	119-iv-3	76	121-i-6	108	122-iv-4	140	137-ii-2	172	138-iii-4
13	103-iii-6	45	119-iv-5	77	121-ii-1	109	136-i-1	141	137-ii-3	173	138-iii-5
14	103-iv-1	46	119-iv-6	78	121-ii-2	110	136-i-2	142	137-ii-4	174	138-iv-1
15	103-iv-2	47	120-i-1	79	121-ii-3	111	136-i-3	143	137-ii-5	175	138-iv-2
16	103-iv-3	48	120-i-2	80	121-ii-4	112	136-i-4	144	137-ii-6	176	138-iv-3
17	103-iv-4	49	120-i-3	81	121-ii-5	113	136-i-5	145	137-iii-1	177	138-iv-4
18	103-iv-5	50	120-i-4	82	121-ii-6	114	136-i-6	146	137-iii-2	178	138-iv-5
19	103-iv-6	51	120-i-5	83	121-iii-1	115	136-ii-1	147	137-iii-3	179	138-iv-6
20	104-i-1	52	120-i-6	84	121-iii-2	116	136-ii-2	148	137-iii-4	180	139-i-1
21	104-i-2	53	120-ii-1	85	121-iii-3	117	136-ii-3	149	137-iii-5	181	139-i-2
22	104-i-3	54	120-ii-2	86	121-iii-4	118	136-ii-4	150	137-iii-6	182	139-i-3
23	104-i-4	55	120-ii-3	87	121-iii-5	119	136-ii-5	151	137-iv-1	183	139-i-4
24	104-i-5	56	120-ii-4	88	121-iii-6	120	136-ii-6	152	137-iv-2	184	139-i-5
25	104-i-6	57	120-ii-5	89	121-iv-1	121	136-iii-1	153	137-iv-3	185	139-i-6
26	104-ii-4	58	120-ii-6	90	121-iv-2	122	136-iii-2	154	137-iv-4	186	139-iii-1
27	104-iii-1	59	120-iii-1	91	121-iv-3	123	136-iii-3	155	137-iv-5	187	139-iii-2
28	104-iii-2	60	120-iii-2	92	121-iv-4	124	136-iii-4	156	137-iv-6	188	139-iii-3
29	104-iii-3	61	120-iii-3	93	121-iv-5	125	136-iii-5	157	138-i-1	189	139-iii-4
30	104-iii-4	62	120-iii-4	94	121-iv-6	126	136-iii-6	158	138-i-2	190	139-iii-5
31	104-iii-5	63	120-iii-5	95	122-i-1	127	136-iv-1	159	138-i-3	191	139-iii-6
32	104-iii-6	64	120-iii-6	96	122-i-3	128	136-iv-2	160	138-i-4	192	152-i-1

Tabela A-0.2 – Folhas utilizadas para o mosaico da área de trabalho (Codeplan, 1998).

QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA	QUANT	PRANCHA
193	152-i-2	225	153-ii-4	257	154-iv-1	289	168-iv-2	321	171-iv-4
194	152-i-3	226	153-ii-5	258	154-iv-2	290	168-iv-3	322	171-iv-5
195	152-i-4	227	153-ii-6	259	154-iv-3	291	168-iv-4	323	171-iv-6
196	152-i-5	228	153-iii-1	260	154-iv-5	292	168-iv-5		
197	152-i-6	229	153-iii-2	261	154-iv-6	293	168-iv-6		
198	152-ii-1	230	153-iii-3	262	155-i-1	294	169-i-2		
199	152-ii-2	231	153-iii-4	263	155-i-2	295	169-i-3		
200	152-ii-3	232	153-iii-5	264	155-i-3	296	169-i-4		
201	152-ii-4	233	153-iii-6	265	155-i-4	297	169-i-5		
202	152-ii-5	234	153-iv-1	266	155-i-5	298	169-i-6		
203	152-ii-6	235	153-iv-2	267	155-i-6	299	169-ii-1		
204	152-iii-1	236	153-iv-3	268	155-iii-1	300	169-iii-1		
205	152-iii-2	237	153-iv-4	269	155-iii-2	301	169-iii-2		
206	152-iii-3	238	153-iv-6	270	155-iii-3	302	169-iii-3		
207	152-iii-4	239	154-i-1	271	155-iii-4	303	169-iii-4		
208	152-iii-5	240	154-i-2	272	155-iii-5	304	169-iii-5		
209	152-iii-6	241	154-i-3	273	155-iii-6	305	169-iii-6		
210	152-iv-1	242	154-i-4	274	155-iv-4	306	170-i-1		
211	152-iv-2	243	154-i-5	275	155-iv-5	307	170-ii-3		
212	152-iv-3	244	154-i-6	276	168-i-1	308	171-i-1		
213	152-iv-4	245	154-ii-1	277	168-i-2	309	171-i-2		
214	152-iv-5	246	154-ii-2	278	168-i-3	310	171-i-3		
215	152-iv-6	247	154-ii-3	279	168-i-5	311	171-i-6		
216	153-i-1	248	154-ii-4	280	168-i-6	312	171-ii-1		
217	153-i-2	249	154-ii-5	281	168-ii-1	313	171-ii-2		
218	153-i-3	250	154-ii-6	282	168-ii-2	314	171-ii-4		
219	153-i-4	251	154-iii-1	283	168-ii-4	315	171-ii-5		
220	153-i-5	252	154-iii-2	284	168-ii-5	316	171-iii-3		
221	153-i-6	253	154-iii-3	285	168-ii-6	317	171-iii-6		
222	153-ii-1	254	154-iii-4	286	168-iii-3	318	171-iv-1		
223	153-ii-2	255	154-iii-5	287	168-iii-6	319	171-iv-2		
224	153-ii-3	256	154-iii-6	288	168-iv-1	320	171-iv-3		

**B – FIGURA APRESENTANDO A SEQUÊNCIA PARA A
CONFEÇÃO DO MOSAICO DAS FOLHAS DA BASE
CARTOGRÁFICA**

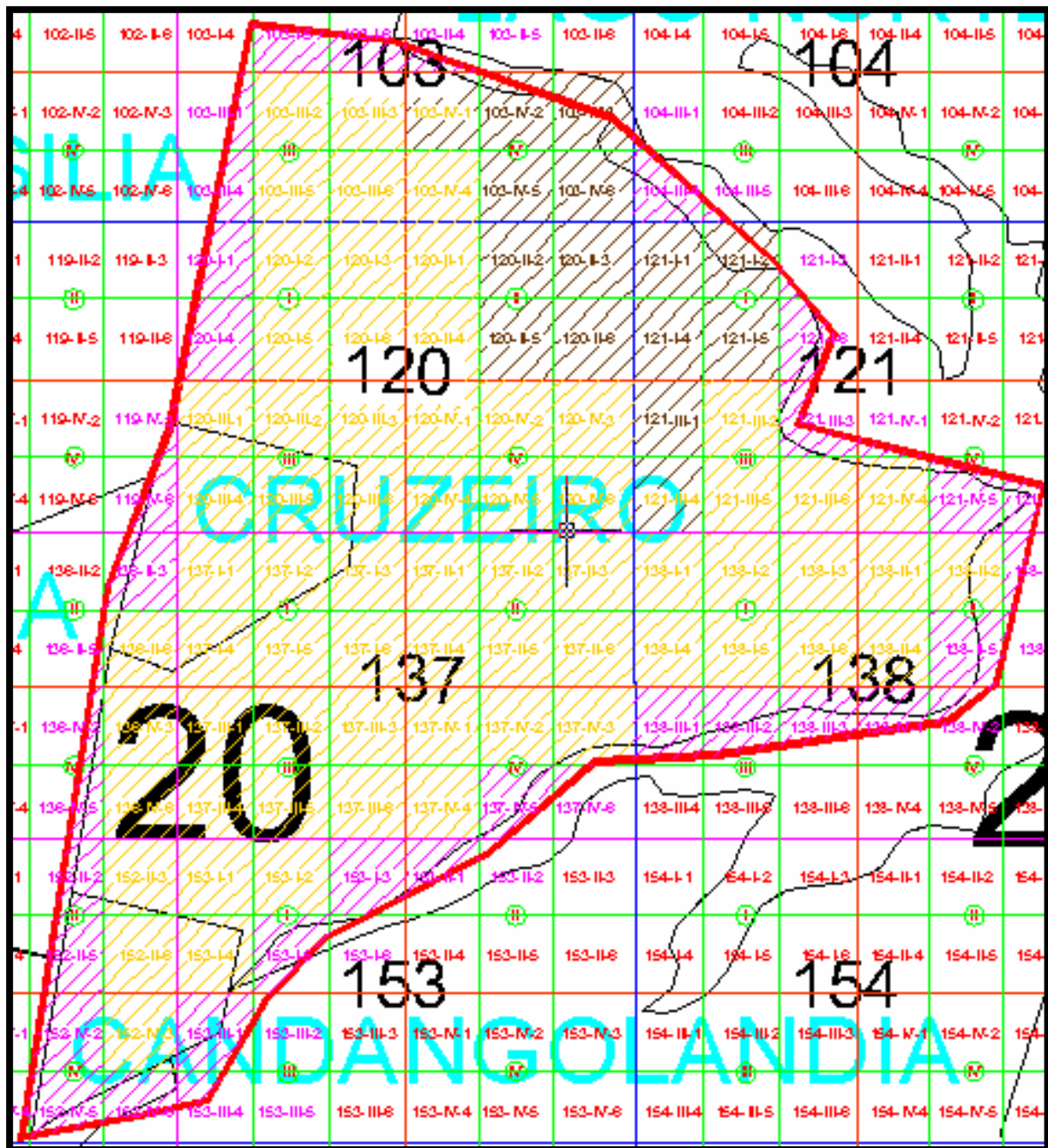


Figura B-0.1 – Sequência para confecção do mosaico das folhas da base cartográfica.