

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

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA OBRAS  
SUBTERRÂNEAS: CONDIÇÕES DE CONSTRUÇÕES DE  
GARAGENS SUBTERRÂNEAS E METRÔ NO PLANO  
PILOTO DE BRASÍLIA**

**PAOLA CRISTINA ALVES**

**ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM – 178/09**

**BRASÍLIA/DF: MAIO/2009**

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

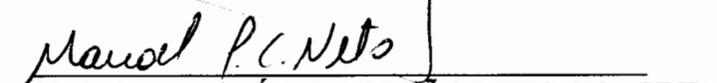
**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA  
OBRAS SUBTERRÂNEAS: CONDIÇÕES DE CONSTRUÇÕES  
DE GARAGENS SUBTERRÂNEAS E METRÔ NO PLANO  
PILOTO DE BRASÍLIA**

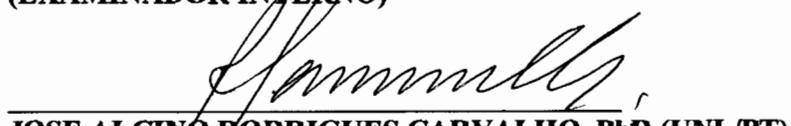
**PAOLA CRISTINA ALVES**

**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)**

  
\_\_\_\_\_  
**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UNB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

  
\_\_\_\_\_  
**JOSE ALCINO RODRIGUES CARVALHO, PhD (UNL/PT)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 25 DE MAIO DE 2009.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ALVES, PAOLA CRISTINA.

Cartografia Geotécnica para Obras Subterrâneas: Condições de Construções de Garagens Subterrâneas e Metrô no Plano Piloto de Brasília. [Distrito Federal] 2009.

xvii, 168 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Cartografia Geotécnica

2. Modelos 3D

3. Garagens subterrâneas

4. Metrô

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, P. C. (2009). Cartografia Geotécnica para Obras Subterrâneas: Condições de Construções de Garagens Subterrâneas e Metrô no Plano Piloto de Brasília. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 178/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Paola Cristina Alves

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Cartografia Geotécnica para Obras Subterrâneas: Condições de Construções de Garagens Subterrâneas e Metrô no Plano Piloto de Brasília.

GRAU / ANO: Mestre / 2009

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.

---

Paola Cristina Alves

Rua Caio Martins, nº 280, Filadélfia.

CEP 32650-060 - Betim/MG – Brasil.

paolcalves@yahoo.com.br

*Dedico esta dissertação de mestrado a Deus e a minha família, minha mãe Maria Aparecida, meu pai Eustáquio e meus amados irmãos Beto, Meire e Júnior, por todo apoio, incentivo e amor.*

## ***AGRADECIMENTOS***

---

Agradeço primeiramente a Deus, por ser o que sou, e por hoje, chegar onde estou.

A toda minha família em especial, aos meus pais e meus irmãos, pelo amor, carinho e dedicação, sem os quais não conseguiria alcançar os meus objetivos. E também ao apoio financeiro e estímulo para que pudesse completar mais este passo em minha vida.

Ao professor Newton Moreira de Souza (orientador) por sua amizade e pela dedicação e paciência durante toda a etapa de orientação.

A todos os professores da Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pela transmissão de conhecimentos e convivência acadêmica.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Às empresas de sondagens Embre, Infrasolo, Mísula e Soltec, por cederem os relatórios de sondagens.

Ao amigo Carlos Petrônio por toda a disposição em ensinar e a ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

A minha “irmã” querida Jack.

A todos os amigos de mestrado e doutorado da Geotecnia pela convivência profunda e amizade, Juliana, Janaina, Josy, Lorena, Tâmara, Rafaela, Hellen, Paula, Márcia, Cláudia, Elmagno, Tone, Glauber, Carlos Eduardo, Igor, Pedro, Alexandre Resque, Luiz Gustavo, João Paulo, Eder, Raimundo, Marcus, Luiz Abel e Bernardo. Aos amigos do mestrado em Estruturas Galileu e Iviane. E aos diversos amigos que aqui fiz nesses dois anos em Brasília.

Aos amigos eternos e verdadeiros de Betim e de Viçosa, que mesmo distantes, mantiveram-se sempre ao meu lado.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, puderam contribuir com este trabalho.

Uma das principais atribuições das obras subterrâneas está na melhoria da qualidade de vida urbana. Com o crescimento das cidades surgiram os problemas de congestionamento do espaço superficial. A cidade de Brasília, apesar de sua pouca idade e de ser uma cidade planejada, não se encontra em situação diferente. O conhecimento da distribuição espacial dos materiais com diferentes propriedades geotécnicas permite que as obras subterrâneas sejam dimensionadas e locadas de modo a garantir menor custo e tempo de execução. Assim, as técnicas de mapeamento geotécnico e geoprocessamento que envolvem 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. Esta dissertação apresenta a caracterização geotécnica do subsolo do Plano Piloto de Brasília por meio do mapeamento dos solos com diferentes adequabilidades à escavação indicando vantagens e dificuldades de construção de garagens subterrâneas bem como do prolongamento da linha do metrô na Asa Norte. Essa caracterização foi realizada a partir de um banco de dados digital existente no programa de pós-graduação em geotecnia da universidade de Brasília. Para isso foi feita a checagem e a atualização desse banco de dados totalizando 1785 sondagens de simples reconhecimento, do tipo SPT (*Standard Penetration Test*). Foi utilizado o programa *Spring 4.3.3* para a manipulação e a espacialização 2D dos dados e o programa *RockWorks 14* para a espacialização 3D dos dados de sondagem. Como resultados obtiveram-se: mapas 2D de  $N_{spt}$  para as profundidades de 3, 6, 9, 12, 15, 20 e 30 m, mapa da espessura dos materiais inconsolidados, da distância entre construções e da profundidade do impenetrável e do nível d' água. E ainda, mapas tridimensionais (3D) da estratigrafia e de níveis interpolados de  $N_{spt}$ , mapas hipsométricos com identificação de seções de interesse, seções de interesse (2D) para camadas de solos e  $N_{spt}$ . E por fim, são apresentadas cartas geotécnicas, obtidas por análise de multicritérios, orientativa para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília.

Improvement of urban life quality is one of the main attributions of the underground works. The growth of big cities brings congestion of the surface spaces. Although Brasilia is a young and planned city, its reality is not different. The knowledge on the spatial distribution of materials, which present different geotechnical properties, allows designing and locating of underground works in order to guarantee minor cost and time of execution. In this scenario, mapping and geoprocessing techniques which involve acquisition, storage, spatialization and manipulation of subsoil become more and more needed and present in daily engineering activities. This Master dissertation shows the geotechnical characterization of the subsoil in *Plano Piloto* of Brasilia by through soil mapping. This mapping intended to find different suitable processes for further excavation, indicating advantages and difficulties for construction of underground parking and of the subway line extension to North Wing region. The geotechnical characterization was carried out using the digital database of the Graduate Program in Geotechnical Engineering of the University of Brasilia. After checking and updating, the database resulted into 1785 boring profiles from SPT (Standard Penetration Test). The software Spring 4.3.3® was used for data manipulating and 2D spatialization. The software RockWorks 14® was used for 3D spatialization. The results of this work contain the following 2D maps: SPT n-values for depth equal to 3, 6, 9, 12, 15, 20 and 30 meter; unconsolidated material thickness; distance among buildings; impenetrable layer depth; and water level depth. The results also include the following 3D maps: stratigraphy and interpolated N<sub>spt</sub> levels, hipsometrics maps with identification of sections of interest and intended soils sections and N<sub>spt</sub>. Finally, some geotechnical maps obtained from multi-criterion analysis are shown as guidance for further underground works in Brasilia.

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.3.1 OBJETIVO GERAL .....	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	2
1.4 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 O CONTEXTO BRASILIENSE .....	4
2.1.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL .....	5
2.1.2 AS GARAGENS SUBTERRÂNEAS E A EXPANSÃO DO SISTEMA METROVIÁRIO .....	6
2.1.3 CARACTERÍSTICAS REGIONAIS DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA ÁREA DE ESTUDO .....	10
2.2 O ESPAÇO SUBTERRÂNEO EM MEIO URBANO .....	16
2.2.1 A UTILIZAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO.....	18
2.2.2 O PLANEJAMENTO DE OCUPAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO URBANO.	23
2.2.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS PARA OBRAS SUBTERRÂNEAS .....	24
2.2.4 ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS .....	28
2.2.4.1 MÉTODOS MECANIZADOS .....	28
2.2.4.2 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL.....	29
2.2.4.3 ESCAVAÇÃO A CÉU ABERTO (VALA RECOBERTA) .....	32
2.2.4.4 ESCAVAÇÃO INVERTIDA .....	33
2.3 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ÁREAS URBANAS.....	34
2.4 GEOPROCESSAMENTO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)....	37
2.4.1 BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO .....	39
2.4.2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA TRIDIMENSIONAL (3D).....	41
2.5 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO E A GEOESTATÍSTICA .....	44
2.5.1 KRIGAGEM .....	47
2.5.2 INVERSO PONDERADO DA DISTÂNCIA (IDW).....	53
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	55
3.2 MATERIAIS .....	56
3.2.1 BASE CARTOGRÁFICA.....	56
3.2.3 RELATÓRIOS DE SONDAGEM .....	56
3.2.4 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS .....	57
3.2 MÉTODOS.....	57
3.2.1 BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO .....	57
3.2.2 ANÁLISE DAS SONDAGENS.....	59
3.2.3 MAPAS BÁSICOS FUNDAMENTAIS.....	63

3.2.3.1 – MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT).....	63
3.2.3.2 GERAÇÃO DOS MODELOS DE SOLO - MODELAGEM 3D .....	65
3.2.4 CARTAS DERIVADAS .....	66
3.2.4.1 – CARTAS DE NSPT A DIVERSAS PROFUNDIDADES .....	67
3.2.4.2 – CARTAS DE ESPESSURAS DOS MATERIAS INCONSOLIDADOS.....	68
3.2.4.3 - CARTA DE PROFUNDIDADE DO IMPENETRÁVEL .....	69
3.2.4.4 - CARTAS DE PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA.....	69
3.2.5 CARTAS SÍNTESES - ANÁLISE MULTICRITÉRIO .....	69
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
4.1 BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO E O MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS FUROS DE SONDAAGEM .....	74
4.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS MODELOS .....	78
4.3 MAPAS BÁSICOS - MODELOS 3D.....	79
4.4 CARTAS DERIVADAS .....	82
4.4.1 ESPESSURA DO PEDÓLITO .....	82
4.4.2 ESPESSURA DA ZONA FERRUGINOSA.....	86
4.4.3 ESPESSURA DOS SAPRÓLITOS .....	90
4.4.4 PROFUNDIDADE DO IMPENETRÁVEL .....	94
4.4.5 VALORES DE NSPT A DIVERSAS PROFUNDIDADES.....	97
4.4.6 PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA .....	109
4.4.7 DISTÂNCIA DAS CONSTRUÇÕES .....	113
4.5 SEÇÕES METRÔ SUBTERRÂNEO - ASA NORTE .....	115
4.5.1 SEÇÃO 1 – EIXO RODOVIÁRIO NORTE – 116/113 .....	115
4.5.2 SEÇÃO 2 – EIXO RODOVIÁRIO NORTE – 112/106 .....	117
4.5.3 SEÇÃO 3 – EIXO RODOVIÁRIO NORTE – 105/102 .....	118
4.6 SEÇÕES METRÔ DE SUPERFÍCIE - W3 NORTE.....	120
4.6.1 SEÇÃO 1 - W3 NORTE - SETOR HOSPITALAR NORTE/513 .....	120
4.6.2 SEÇÃO 2 - W3 NORTE - 512 /506.....	122
4.6.3 SEÇÃO 3 – W3 NORTE – 505/SETOR COMERCIAL NORTE.....	124
4.7 MODELOS 3D DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: ESTAÇÃO ASA NORTE.....	126
4.8 MODELOS 3D DE SOLOS - ESTUDO DE CASO: ZONA CENTRAL SUL .....	131
4.9 MODELOS 3D DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: GARAGENS SUL .....	138
4.10 CARTAS SÍNTESES.....	146
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>150</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	150
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	153
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>158</b>

## **LISTA DE TABELAS**

---

Tabela 2.1 – Relação entre as escalas, critérios de homogeneidade e determinação de unidades geotécnicas da Metodologia IAEG (Modificada - CARNEIRO, 1999).....	36
Tabela 2.2– Exemplo de tabela relacional para uma sondagem (DATE, 2005).....	39
Tabela 2.3– Tabela de comparação entre algoritmos.....	44
Tabela 2.4 – Modelos Transitivos de semivariograma (CAMARGO, 1997). ....	51
Tabela 3.1 – Descrição da litologia apresentada nos relatórios de sondagem e a estratigrafia correspondente. ....	62
Tabela 3.2 – Classificação do solo de acordo com o valor do Nspt (ABNT, 2001). ....	63
Tabela 3.3- Escala de Valores AHP para Comparação Pareada (CÂMARA <i>et al.</i> , 1996). ....	70
Tabela 3.4 – Relação entre as classes de adequabilidade e os valores de X. ....	71
Tabela 3.5– Relação entre os atributos para a determinação da adequabilidade para obras subterrâneas.....	72
Tabela 4.1 – Áreas de classes da espessura do Pedólito. ....	84
Tabela 4.2 – Áreas de classe da espessura da Zona Ferruginosa. ....	88
Tabela 4.3 - Áreas de classes da espessura dos Saprólitos.....	92
Tabela 4.4 - Áreas de classes da profundidade do impenetrável. ....	96
Tabela 4.5 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 3 m de profundidade.....	105
Tabela 4.6 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 6 m de profundidade.....	105
Tabela 4.7 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 9 m de profundidade.....	106
Tabela 4.8 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 12 m de profundidade.....	107
Tabela 4.9 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 15 m de profundidade.....	107
Tabela 4.10 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 20 m de profundidade.....	108
Tabela 4.11 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 30 m de profundidade.....	109
Tabela 4.12 - Área correspondente na região de estudo de cada classe da profundidade do nível d' água.....	112
Tabela 4.13 - Área correspondente na região de estudo de cada classe da distância das construções.....	113

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Frota de veículos registrados no Distrito Federal (DETRAN-DF, 2008). .....	5
Figura 2.2 - Localização da área de estudo. ....	5
Figura 2.3 - Plano de revitalização para garagens subterrâneas no SCS (CARVALHO & PEIXOTO, 2006). ....	6
Figura 2.4- Metrô leve – Perspectiva (METRÔ-DF, 2008). ....	8
Figura 2.5– Metrô leve – Traçado (METRÔ-DF, 2008). ....	8
Figura 2.6 – Metrô – Expansão Asa Norte (METRÔ-DF, 2008). ....	9
Figura 2.7 - Características técnicas do túnel do metrô subterrâneo - Expansão Asa Norte (METRÔ-DF, 2008). ....	9
Figura 2.8 – Mapa geológico do Distrito Federal (FREITAS SILVA & CAMPOS, 1999, modificado por MARTINS <i>et al.</i> , 2004). ....	10
Figura 2.9– Esquema do perfil completo de solo (MARTINS, 2000). ....	13
Figura 2.10– Esquema do perfil truncado de solo (MARTINS, 2000). ....	13
Figura 2.11 – Modelo proposto para a geologia da Asa Sul (BLANCO, 1995). ....	15
Figura 2.12 – Demanda do espaço urbano (ASSIS, 2007). ....	19
Figura 2.13 – Ilustração do conceito de revitalização de áreas centrais urbanas por meio de estruturas subterrâneas (Artéria Central de Boston, EUA) (ASSIS, 2007). ....	22
Figura 2.14 – Esquema do ensaio de SPT. ....	26
Figura 2.15 – Vista Frontal de um TBM (ASSIS, 2007). ....	29
Figura 2.16 – Túnel em NATM em construção – Linha 4 – Amarela – São Paulo/SP. ....	30
Figura 2.17 – Diferentes seqüências de escavação em seção parcial (ASSIS, 2007). ....	31
Figura 2.18 – Utilização do núcleo central como proteção da frente de escavação (ASSIS, 2007). ....	31
Figura 2.19 – Construção da garagem Trianon – SP (CARVALHO & PEIXOTO, 2006). ....	33
Figura 2.20 – Instalação da laje de teto do túnel invertido no metrô de Brasília – Túnel Taguatinga (CARVALHO & PEIXOTO, 2006). ....	34
Figura 2.21 - Representação Vetorial com tabela de atributos (CÂMARA & DAVIS, 1999). ....	38
Figura 2.22 - Representação Matricial (CÂMARA & DAVIS, 1999). ....	38
Figura 2.23 – (a) Representação de camadas do subsolo em 2,5D e (b) Representação de dados do subsolo interpolados em 3D. ....	41
Figura 2.24 – Representação de objetos em ambiente tridimensional (SILVA, 2007). (a) organograma de representação dos objetos 3D e (b) formas de representação dos objetos 3D. ....	43
Figura 2.25 – Representação da estrutura raster 3D e voxel (SILVA, 2007). ....	43
Figura 2.26 – Esquema de obtenção de valores para semivariograma (LANDIM, 1998). ....	49
Figura 2.27 – Exemplo de semivariograma experimental (CAMARGO, 1997). ....	50
Figura 2.28 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais (CAMARGO, 1997). ....	51
Figura 3.1 – Base cartográfica na escala 1: 2.000 exibida no <i>Spring</i> 4.3.3. ....	56
Figura 3.2 - Área de trabalho dividida pela malha de 1 x 1 km para a avaliação das sondagens. ....	59
Figura 3.3 – Parte da tabela no <i>Excel</i> 2003 mostrando a sondagem representativa escolhida. ....	60
Figura 3.4 – Área de trabalho mostrando as sondagens representativas e as sondagens selecionadas para a avaliação da dispersão do modelo. ....	61
Figura 3.5 – Mapa classificado depois da krigagem mostrando a predominância de cada tipo de saprólito (arenoso/siltoso) na região. ....	62

Figura 3.6 – Modelo Numérico do Terreno - MNT. ....	64
Figura 3.7 – Geração de imagem sombreada no <i>Spring</i> 4.3.3. ....	64
Figura 3.8- Definição da grade 3D no <i>RockWorks</i> 14 da área de estudo. ....	65
Figura 3.9 – Definição das coordenadas (x, y, z) e a profundidade de cada furo de sondagem no <i>RockWorks</i> 14. ....	65
Figura 3.10 – Figura mostrando a janela <i>Surface P-Data</i> no <i>RockWorks</i> 14 para a geração das superfícies de Nspt em determinadas profundidades . ....	68
Figura 3.11– Matriz de Consistência AHP gerada pelo <i>Spring</i> 4.3.3 e os pesos a serem aplicados. ....	70
Figura 4.1 – Tela de consulta do banco de dados georreferenciado dos 1785 furos de sondagens à percussão no <i>Spring</i> 4.3.3. ....	75
Figura 4.2 – Mapa de localização dos 1785 furos de sondagem à percussão – Brasília-DF. ..	76
Figura 4.3 – Mapa de distância entre as sondagens. ....	77
Figura 4.4 – Representação gráfica em 3D dos furos de sondagem no <i>RockWorks</i> 14. ....	78
Figura 4.5 - Modelo tridimensional (3D) de Nspt, com exagero vertical de 35, da região de estudo - Plano Piloto. ....	80
Figura 4.6 – Modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 35, mostrando todas as camadas de solo, da região de estudo - Plano Piloto. ....	80
Figura 4.7 - Modelo 3D do impenetrável com exagero vertical de 45. ....	81
Figura 4.8 - Superfície interpolada do nível d’água gerada no <i>RockWorks</i> 14. ....	81
Figura 4.9 –Carta de espessura do Pedólito. ....	83
Figura 4.10 – Histograma da espessura do Pedólito. ....	84
Figura 4.11 - Relação da espessura em metro do Pedólito entre as sondagens e o modelo estratigráfico. ....	85
Figura 4.12 – Histograma da diferença da espessura entre o modelo e o valor da sondagem. ....	85
Figura 4.13– Carta de espessura da Zona Ferruginosa. ....	87
Figura 4.14 – Histograma da espessura da Zona Ferruginosa. ....	88
Figura 4.15 – Relação da espessura em metro da Zona Ferruginosa entre as sondagens e o modelo estratigráfico. ....	89
Figura 4.16 – Histograma da diferença entre o modelo e o valor da sondagem. ....	89
Figura 4.17 – Carta de espessura dos Saprólitos. ....	91
Figura 4.18 – Histograma da espessura dos Saprólitos. ....	92
Figura 4.19 – Relação da espessura em metro dos Saprólitos entre as sondagens e o modelo estratigráfico. ....	93
Figura 4.20 - Histograma da diferença entre o modelo e o valor da sondagem. ....	93
Figura 4.21 – Carta de profundidade do impenetrável. ....	95
Figura 4.22 – Histograma da profundidade do impenetrável. ....	96
Figura 4.23 - Carta de Nspt à 3 m de profundidade. ....	98
Figura 4.24 – Carta de Nspt à 6 m de profundidade. ....	99
Figura 4.25 – Carta de Nspt à 9 m de profundidade. ....	100
Figura 4.26 – Carta de Nspt à 12 m de profundidade. ....	101
Figura 4.27 - Carta de Nspt à 15 m de profundidade. ....	102
Figura 4.28 – Carta de Nspt à 20 m de profundidade. ....	103
Figura 4.29 – Carta de Nspt à 30 m de profundidade. ....	104
Figura 4.30 – Histograma dos valores de Nspt à 3 m de profundidade. ....	105
Figura 4.31 - Histograma dos valores de Nspt à 6 m de profundidade. ....	106
Figura 4.32 - Histograma dos valores de Nspt à 9 m de profundidade. ....	106
Figura 4.33 - Histograma dos valores de Nspt à 12 m de profundidade. ....	107
Figura 4.34 - Histograma dos valores de Nspt à 15 m de profundidade. ....	108

Figura 4.35 - Histograma dos valores de Nspt à 20 m de profundidade. ....	108
Figura 4.36 - Histograma dos valores de Nspt à 30 m de profundidade. ....	109
Figura 4.37 – Carta de profundidade do nível d’água – Período seco. ....	110
Figura 4.38 – Carta de profundidade do nível d’água – Período chuvoso. ....	111
Figura 4.39 - Histograma da profundidade do nível d’água (período seco). ....	112
Figura 4.40 – Histograma da profundidade do nível d’água (período chuvoso). ....	112
Figura 4.41 - Histograma da distância de construções. ....	113
Figura 4.42 - Carta de distância das construções. ....	114
Figura 4.43- Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse. ....	115
Figura 4.44 - Seção A-A’ mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	116
Figura 4.45 - Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	116
Figura 4.46 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse. ....	117
Figura 4.47 - Seção A-A’ mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	118
Figura 4.48 - Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	118
Figura 4.49 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse. ....	119
Figura 4.50 - Seção A-A’ mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	119
Figura 4.51 - Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	119
Figura 4.52- Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse. ....	120
Figura 4.53 -Seção A-A’ mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	121
Figura 4.54 - Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	121
Figura 4.55 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse. ....	122
Figura 4.56 - Seção A-A’ mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	123
Figura 4.57 - Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	123
Figura 4.58 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse. ....	124
Figura 4.59 - Seção A-A’ mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	125
Figura 4.60 - Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	125
Figura 4.61 –Modelo tridimensional (3D) de Nspt, com exagero vertical de 10, da região do estudo de caso – Estação Asa Norte. ....	126
Figura 4.62 - Seqüência 1 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, mostrando todas as camadas de solo, do estudo de caso – Estação Asa Norte. ....	127
Figura 4.63 - Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada da zona ferruginosa e a superfície do nível d’água, do estudo de caso – Estação Asa Norte. ....	127
Figura 4.64 - Seqüência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada do saprólito arenoso e a superfície do nível d’água, do estudo de caso – Estação Asa Norte. ....	128
Figura 4.65 - Seqüência 4 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada do saprólito siltooso e a superfície do nível d’água, do estudo de caso – Estação Asa Norte. ....	128
Figura 4.66 - Carta hipsométrica, com localização da seção de interesse. ....	129
Figura 4.67 - Seção A-A’ mostrando os níveis de Nspt e o nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	130
Figura 4.68 - Seção A-A’ interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d’água, com exagero vertical de 10. ....	130

Figura 4.69 – Modelo tridimensional (3D) de Nspt, com exagero vertical de 10, da região do estudo de caso – Região Central Sul. ....	132
Figura 4.70 - Seqüência 1 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, mostrando todas as camadas de solo, da região do estudo de caso – Região Central Sul. ....	132
Figura 4.71- Seqüência 2 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada da zona ferruginosa intercalada com os saprólito arenoso e siltoso, da região do estudo de caso – Região Central Sul. ....	133
Figura 4.72- Seqüência 3 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada do saprólito arenoso intercalada com o saprólito siltoso, da região do estudo de caso – Região Central Sul. ....	134
Figura 4.73 - Seqüência 4 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada do saprólito siltoso, da região do estudo de caso – Setor Comercial Sul. ....	134
Figura 4.74 - Carta hipsométrica, com localização das seções de interesse. ....	136
Figura 4.75 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	136
Figura 4.76 - Seção A-A' interpolada, mostrando todas as camadas de solo, com exagero vertical de 10. ....	136
Figura 4.77 - Seção B-B' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	137
Figura 4.78 - Seção B-B' interpolada, mostrando todas as camadas de solo, com exagero vertical de 10. ....	137
Figura 4.79 - Seção C-C' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	138
Figura 4.80 - Seção C-C' interpolada, mostrando todas as camadas de solo, com exagero vertical de 10. ....	138
Figura 4.81 –Modelo tridimensional (3D) de Nspt, com exagero vertical de 10, da região do estudo de caso - Garagens Sul. ....	139
Figura 4.82 - Seqüência 1 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, mostrando todas as camadas de solo, da região do estudo de caso – Garagens Sul. ....	139
Figura 4.83- Seqüência 2 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada da zona ferruginosa intercalada com a camada do saprólito arenoso, da região do estudo de caso – Garagens Sul. ....	140
Figura 4.84 - Seqüência 3 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada do saprólito arenoso intercalada com a camada do saprólito siltoso, da região do estudo de caso – Garagens Sul. ....	141
Figura 4.85 - Seqüência 4 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada do saprólito siltoso, da região do estudo de caso – Garagens Sul. ....	141
Figura 4.86- Carta hipsométrica com localização das seções de interesse. ....	143
Figura 4.87 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	144
Figura 4.88 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo, com exagero vertical de 10. ....	144
Figura 4.89 - Seção B-B' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10. ....	145
Figura 4.90 - Seção B-B' interpolada, mostrando as camadas de solo, com exagero vertical de 10. ....	145
Figura 4.91 - Carta geotécnica orientativa para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília – DF – GARAGENS SUBTERRÂNEAS – 1 pavimento. ....	147
Figura 4.92 - Carta geotécnica orientativa para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília – DF – GARAGENS SUBTERRÂNEAS – 3 pavimentos. ....	148
Figura 4.93 – Carta geotécnica orientativa para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília – DF – CONSTRUÇÃO DO METRÔ. ....	149

## **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

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASCII - *American Standard Code For Information Interchange*

BDG - Banco de dados digital

B-Rep - Representação de Limites (*Boundary Representation*)

CAD - Desenho assistido por computador (*Computer Aided Design*)

CLN- Comércio Local Norte

CLS – Comércio Local Sul

cm - Centímetro (s)

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Codeplan - Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central

CPT - Ensaio de Cone (*Cone Penetration Test*)

CSG - Construção de Sólidos Geométricos

Detran – Departamento Nacional de Trânsito

Dxf - *Drawing Exchange File*

DF – Distrito Federal

GDF – Governo do Distrito Federal

GPS - Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*)

GRID - Grade regular

IAEG - *International Association of Engineering Geology*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - Inverso Ponderado da Distância (*Inverse Distance Weighted*)

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPDF - Instituto de Planejamento Territorial e Urbano do Distrito Federal

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ITA - *International Tunnelling Association*

km - Quilmetro (s)

km<sup>2</sup> - Quilmetro (s) quadrado (s)

Lat – Latitude  
LEGAL - Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico  
Long - Longitude  
m - Metro (s)  
mm - Milímetro (s)  
MDE - Modelo Digital de Elevação  
MNT - Modelo Numérico de Terreno  
N - Norte  
NA - Nível d' água  
NATM - *New Austrian Tunnelling Method*  
NBR - Norma Brasileira  
Nspt - Número de golpes do SPT  
PDOT - Plano Diretor de Organização Territorial  
RN - Referência de Nível  
S – Sul  
SAN – Setor de Autarquias Norte  
SAS – Setor de Autarquias Sul  
SBN – Setor bancário Norte  
SBS – Setor Bancário Sul  
SCN – Setor comercial Norte  
SCS – Setor Comercial Sul  
Seduh - Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação  
SIG - Sistema de Informações Geográficas  
*Spring* - Sistema para Processamento de Informações Geográficas  
SPT - Ensaio de sondagem à percussão (*Standard Penetration Test*)  
t – tempo  
TBM - *Tunnel Boring Machine*  
TIFF - *Tagged Image File Format*  
TIN - Rede de Triângulos Irregulares (*Triangular Irregular Network*)  
UnB - Universidade de Brasília  
U.S. – Comitê de tecnologia de túneis (*Committee on tunnelling Technology*)  
UTM - Projeção Universal Transversa de Mercator (*Universal Transverse Mercator*)  
*Voxel* - Volume elementar  
W - Oeste (*West*)

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

% - Por cento

° - Grau

# ***1. INTRODUÇÃO***

---

## **1.1 APRESENTAÇÃO**

Com o crescimento e congestionamento das cidades, cada dia os espaços superficiais urbanos tornam-se mais caros e escassos. Além de prejudicar a infra-estrutura, este processo está associado à poluição atmosférica, sonora e visual, tendo como consequência final a deterioração da qualidade de vida.

Assim, as obras subterrâneas tornam-se uma interessante alternativa, pois possibilita a criação de importantes serviços como metrô, túneis rodoviários e garagens subterrâneas, aliado a isso, podem ainda liberar mais espaço na superfície para circulação, lazer, vegetação, e possibilitar a valorização de importantes áreas da cidade.

Hoje a ocupação do espaço subterrâneo urbano no Brasil é, em sua maioria, desordenada. Os diferentes tipos de estruturas, como metrô, cabos, água, esgoto, gás encanado, são implantados ou ampliados de acordo com as necessidades e de forma independente. Isso resulta em um desperdício de recursos, decorrente da realização de múltiplas escavações para instalação ou manutenção, e da solução de problemas de interferência construtiva.

O conhecimento geológico-geotécnico de uma região tem como um de seus objetivos subsidiar a implantação de obras civis, como a construção de obras subterrâneas, proporcionando uma melhor orientação para o planejamento da investigação geotécnica que leva a uma redução nos custos e otimização no prazo final de execução da obra.

Com isso, é de suma importância, por parte da comunidade técnico-científica e das autoridades governamentais, juntarem esforços, no sentido de agilizar o processo de investigação, entendimento e planejamento do espaço subterrâneo de nossas cidades.

A idéia deste trabalho é a caracterização geotécnica do subsolo do Plano Piloto de Brasília por meio do mapeamento tridimensional da subsuperfície com diferentes características em termos de sua resistência a penetração e camadas do material inconsolidado, buscando fornecer subsídios para o planejamento de ocupação do espaço subterrâneo urbano.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A cidade de Brasília, apesar de sua pouca idade e de ser uma cidade planejada, já apresenta problemas de grandes metrópoles, e por isso necessita passar por um processo de melhoria e revitalização de sua infra-estrutura. Este processo deve contemplar melhorias no transporte público, melhorias na infra-estrutura de transporte e também melhoria da infra-estrutura de locais como o centro da cidade.

Diante deste contexto, o governo do Distrito Federal (GDF) anunciou a expansão do sistema metroviário e autorizou a construção de garagens subterrâneas.

O domínio da distribuição espacial dos materiais com diferentes propriedades geotécnicas permite que as obras subterrâneas sejam dimensionadas e locadas de modo a garantir menor custo e tempo de execução. Assim, as técnicas de mapeamento geotécnico e geoprocessamento que envolvem 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.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem como objetivo geral a caracterização geotécnica do subsolo do Plano Piloto de Brasília buscando fornecer subsídios para o planejamento de ocupação do espaço subterrâneo urbano, por meio da realização de modelos tridimensionais (modelos volumétricos) dos solos com diferentes adequabilidades à escavação, a partir de um banco de dados digital que possui cerca de 1800 sondagens à percussão.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Checar e atualizar o banco de dados;
- Elaborar mapas de  $N_{spt}$  a determinadas profundidades;
- Elaborar mapas de profundidade de nível d' água;
- Elaborar mapa de profundidade do impenetrável;
- Elaborar mapas de espessura dos materiais inconsolidados;

- Caracterizar e espacializar (mapa 3D do subsolo), as camadas de solos (espessura do material inconsolidado) e o Nspt;
- Caracterizar as diferentes unidades geotécnicas mapeadas para obras subterrâneas;
- Indicar as vantagens e dificuldades de construção de garagens subterrâneas na Asa Sul e região central bem como do prolongamento da linha do metrô na Asa Norte.
- Indicar, com base nas características geológico-geotécnicas do subsolo, a possibilidade de uma alternativa de construção subterrânea ao metrô de superfície na Asa Norte.

#### 1.4 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Para atingir os objetivos apresentados, a pesquisa está dividida em cinco capítulos.

O Capítulo 1 faz a apresentação do tema, descreve o problema, os principais objetivos e o arranjo geral do trabalho.

No Capítulo 2 realizou-se uma revisão bibliográfica sobre: o contexto Brasiliense, características regionais de geologia de engenharia e características geotécnicas da área de estudo, o uso sustentado do espaço subterrâneo, investigações geotécnicas para obras subterrâneas, geoprocessamento e sistema de informação geográfica (SIG), cartografia geotécnica para áreas urbanas e métodos de interpolação e a geoestatística.

No Capítulo 3, descrevem-se os materiais e métodos empregados na pesquisa.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões inerentes aos assuntos tratados nos capítulos anteriormente descritos, como também estão presentes algumas sugestões para pesquisas futuras. Após este capítulo, são listadas as referências bibliográficas citadas durante o trabalho e o apêndice.

## ***2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

---

### **2.1 O CONTEXTO BRASILIENSE**

A cidade de Brasília, inaugurada no dia 21 de Abril de 1960, foi planejada e construída com o objetivo de dinamizar e desenvolver o interior do Brasil, deslocando o poder central e outras infra-estruturas econômicas e financeiras das regiões costeiras. Planejada para ter, no início do milênio, 800 mil habitantes, hoje, de acordo com o IBGE (2007), Brasília já tem mais de dois milhões. O grande crescimento populacional, superior ao estimado quando da sua construção, tem levado a cidade planejada com apenas 50 anos de idade, a enfrentar o mesmo caos no trânsito que atormenta os habitantes de cidades com mais de 400 anos, como o Rio de Janeiro e São Paulo.

Segundo o Departamento de Trânsito do Distrito Federal (DETRAN-DF, 2008), no mês de dezembro de 2008 estavam registrados na cidade 1.046.638 veículos, o que representa um crescimento de aproximadamente 79% quando comparado aos dados de dezembro de 2000 (Figura 2.1). A indústria automobilística teve um desenvolvimento que jamais se imaginou, socializando o uso do maior símbolo da industrialização para o transporte urbano. Este aumento exagerado tem criado sérios problemas relacionados ao serviço e infra-estrutura de transportes na cidade. O centro de Brasília sofre ainda mais, devido a grande concentração de atividades, a região tem se tornado um ambiente desagradável e congestionado, reduzindo a qualidade de vida da população local.

A utilização do subsolo do centro da cidade de Brasília para construção de garagens subterrâneas bem como para o metrô, pode ser uma importante solução para melhoria das condições da região, mas para que o local sofra uma verdadeira revitalização é necessário que estas obras estejam associadas a outras iniciativas, como por exemplo, obras de infra-estrutura urbana e paisagismo.

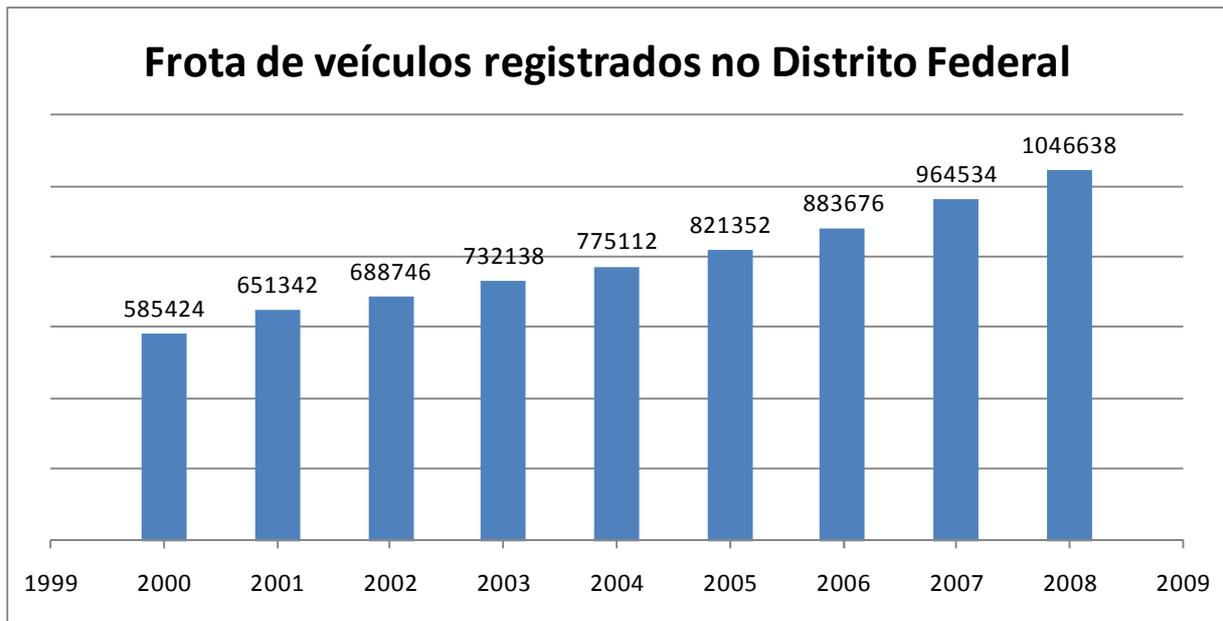


Figura 2.1 - Frota de veículos registrados no Distrito Federal (DETRAN-DF, 2008).

#### 2.1.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL

A área de estudo situa-se no Distrito Federal e compreende a cidade de Brasília, mais especificamente o Plano Piloto. 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 clima dessa localidade é caracterizado por uma estação chuvosa bem definida, que geralmente começa no final de setembro e termina em abril. O polígono de aproximadamente 154 km<sup>2</sup> é o limite para os furos de sondagem SPT obtidos (Figura 2.2).

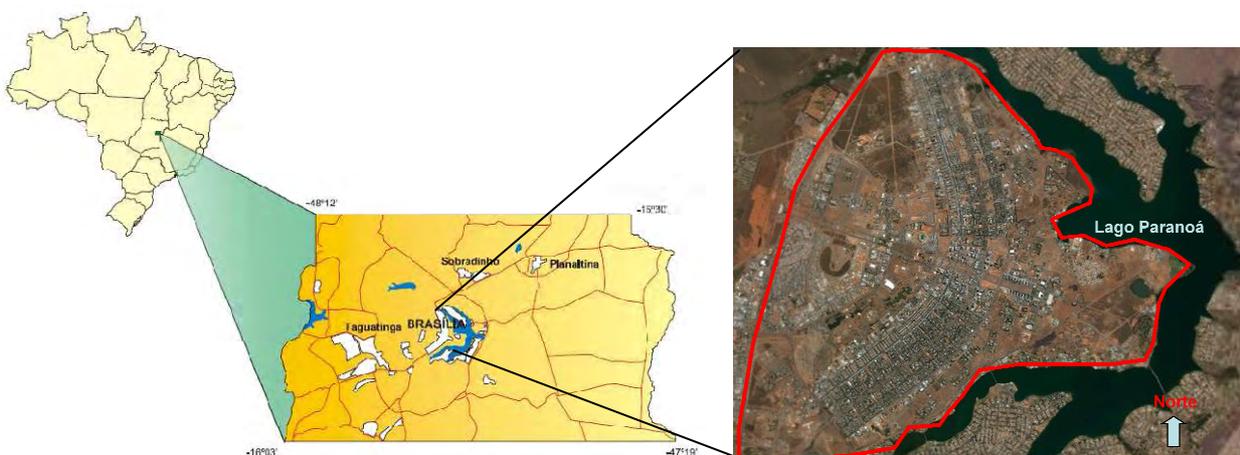


Figura 2.2 - Localização da área de estudo.

## 2.1.2 AS GARAGENS SUBTERRÂNEAS E A EXPANSÃO DO SISTEMA METROVIÁRIO

Diante das dificuldades geradas na cidade (falta de vagas, uso das calçadas como estacionamento, automóveis parados em fila dupla, transtornos, tempo de espera por vaga, poluição visual e ambiental, dentre outras) por causa do crescimento populacional e da frota, os órgãos públicos estudam propostas para reordenar o espaço urbano.

CARVALHO & PEIXOTO (2006) citam em seu trabalho o plano de revitalização para o setor comercial sul (SCS) (Figura 2.3) e o setor bancário sul (SBS) desenvolvido pela Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação (Seduh) em 2006. A Norma de Edificação, Uso e Gabarito – NGB 144/98 (IPDF, 1998) regulamenta a construção de garagens subterrâneas para o SCS. Quanto ao número de vagas, a NGB 144/98 estabelece um mínimo de 800 e 600 vagas para os estacionamentos da quadra seis e das quadras 3, 4 e cinco, respectivamente. Para todas as obras subterrâneas, a norma admite no máximo três pavimentos.

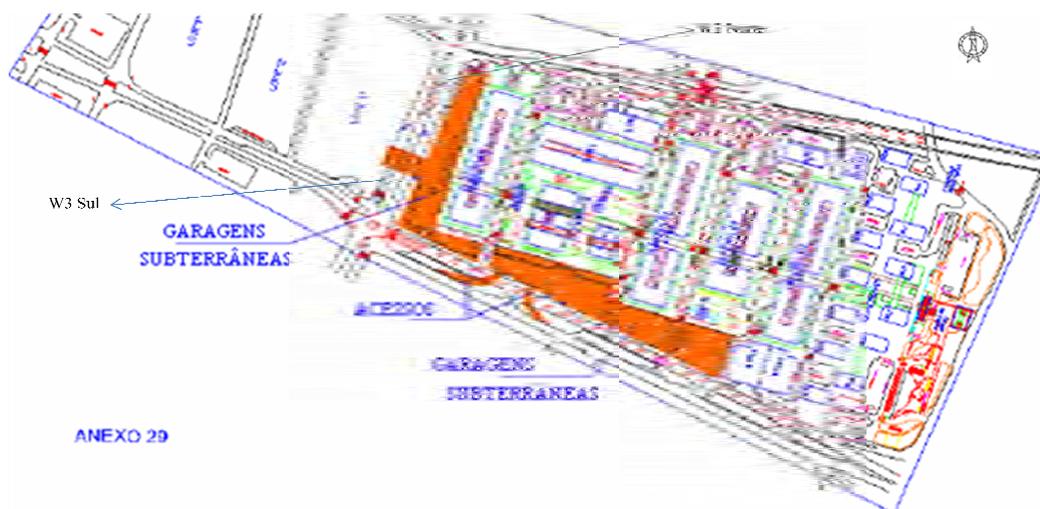


Figura 2.3 - Plano de revitalização para garagens subterrâneas no SCS (CARVALHO & PEIXOTO, 2006).

Da mesma forma que para o SCS, a NGB 144/98 regulamenta o uso do subsolo para garagens no setor bancário sul (SBS). Estabelece, também, o número mínimo de vagas (1500) e o número máximo de pavimentos de estacionamento (três).

Além do SCS e o SBS tem ainda o problema das entrequadras. O número de vagas nas entrequadras da Asa Sul (CLS) é igual ao da Asa Norte (CLN), são 11 por bloco. As comerciais 100 e 200 têm quatro blocos e, portanto, 44 vagas. Assim, em cada entrequadra, há

88 locais de estacionamento. As quadras 300 e 400 são maiores, possuem cinco blocos, 55 espaços regulares para parar o carro de cada lado e, portanto, 110 vagas nas entrequadras. Mas os espaços disponíveis nas quadras do Plano Piloto - em frente às lojas, sem contar os estacionamentos que ficam nas pontas da rua - são insuficientes para atender todos os motoristas que procuram uma padaria, uma farmácia, um bar, um restaurante ou uma loja no comércio local. O Plano Piloto tem 10 quadras críticas - na Asa Sul: 304/305, 205/206, 107/108, 109/110, 402/403, 404/405, 209/210 e na Asa Norte, 203/204, 402/403 e 207/208 (CORREIO BRAZILIENSE, 2008). Diante destes problemas a Codeplan (GDF, 2008) anunciou a construção de estacionamentos subterrâneos.

Contudo, as dificuldades geradas na cidade não estão apenas na falta de garagens, as características peculiares do desenho urbano do Distrito Federal, em especial o Plano Piloto, o crescimento acelerado de suas Cidades-Satélites, a centralização da oferta de empregos em áreas específicas e a forte concentração de viagens em determinadas faixas horárias resultam em sérios problemas na otimização da operação do sistema de transporte coletivo.

Segundo o Governo do Distrito Federal (GDF, 2008), no ano de 2010 será entregue a primeira etapa do novo sistema de transportes de Brasília. O Metrô Leve (Figura 2.4), como é chamado, partirá do Terminal Asa Sul e cortará a via W3 Sul e chegará até a altura da 502 Norte. Esta é uma das três partes previstas no projeto que, com percurso completo deve estar em pleno funcionamento em 2013, um ano antes da Copa do Mundo.

O VLT (veículo leve sobre trilhos) é um pequeno trem urbano geralmente movido a eletricidade. Seu tamanho permite que sua estrutura de trilhos se encaixe no meio urbano existente. O VLT vai funcionar no canteiro central da W3, sendo que cada um dos sentidos da via passará a contar com três faixas. A linha completa (Figura 2.5) terá três trechos no total de 22,5 km de extensão. Os trechos serão distribuídos da seguinte forma: (1) Trecho 1: Aeroporto – Terminal Asa Sul, (2) Trecho 2: Terminal Asa Sul – Brasília Shopping; e (3) Trecho 3: Brasília Shopping – Terminal Asa Norte.



Figura 2.4- Metrô leve – Perspectiva (METRÔ-DF, 2008).

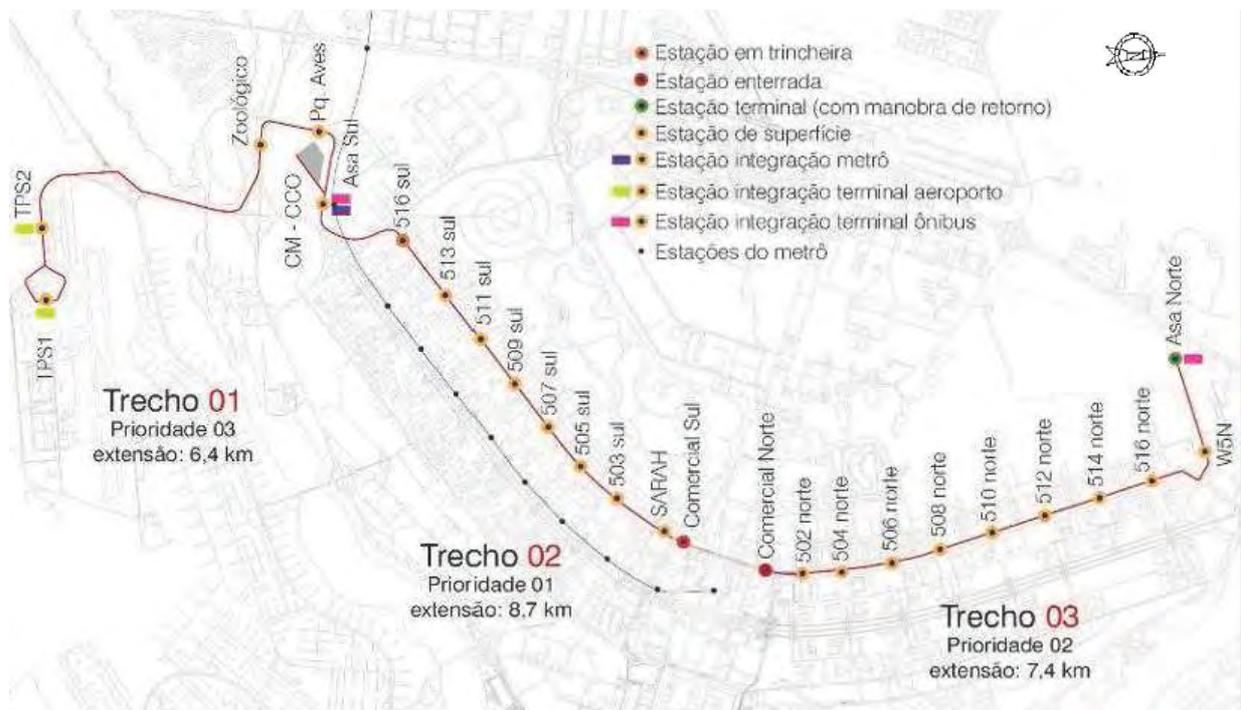


Figura 2.5– Metrô leve – Traçado (METRÔ-DF, 2008).

De acordo com o METRÔ-DF (2008), o sistema metroviário optou-se por um trecho subterrâneo na extensão Asa Norte, que será feito por meio da construção de um túnel raso, empregando-se o método NATM (*New Austrian Tunneling Method*), devido ao tombamento histórico do Plano Piloto e à previsão de grandes interferências na adoção do método escavação a céu aberto. A expansão Asa Norte, mostrada na Figura 2.6, terá a via subterrânea em túnel NATM. As características do túnel são mostradas na Figura 2.7.

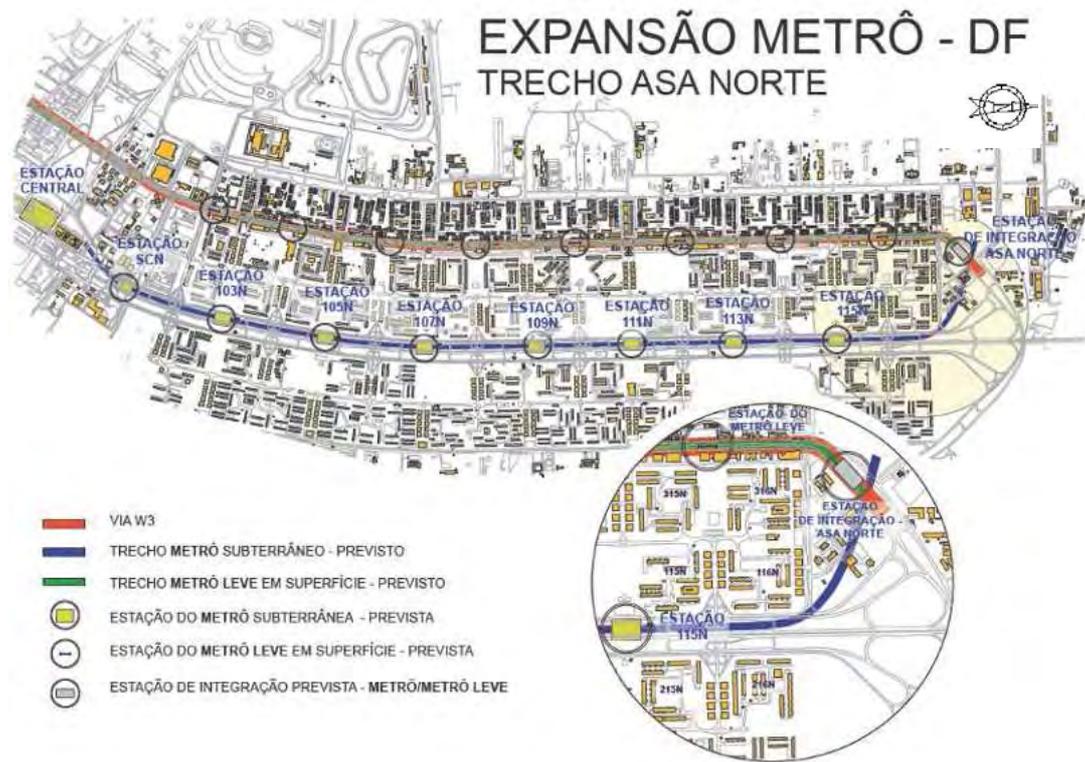


Figura 2.6 – Metrô – Expansão Asa Norte (METRÔ-DF, 2008).

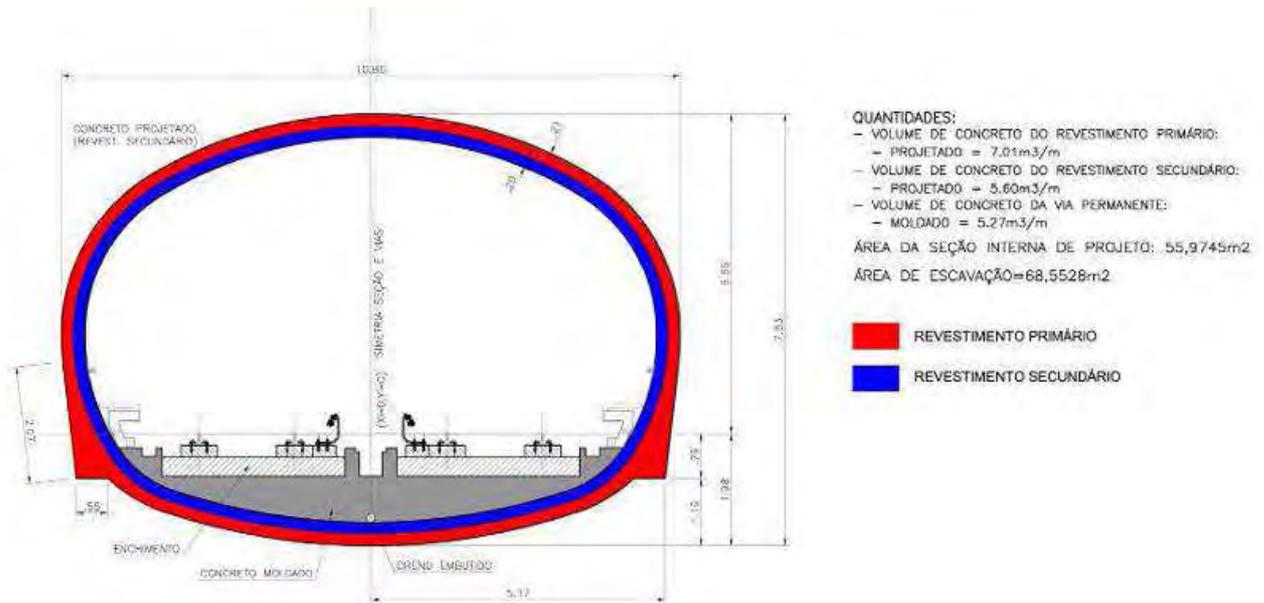


Figura 2.7 - Características técnicas do túnel do metrô subterrâneo - Expansão Asa Norte (METRÔ-DF, 2008).

### 2.1.3 CARACTERÍSTICAS REGIONAIS DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A geologia, incluindo os aspectos litológicos, estratigráficos, estruturais e sua evolução histórica, representa a base do conhecimento para a caracterização do meio físico de determinada região. Em função do substrato geológico estão condicionadas as formas de relevo, a evolução geomorfológica, o tipo, características e composição química dos solos e manto de intemperismo, a natureza e intensidade dos processos erosivos, a distribuição das ocorrências minerais, a distribuição das águas subterrâneas e o controle das disponibilidades das águas superficiais, entre outros fatores (MARTINS *et al.*, 2004).

Os estratos rochosos do Distrito Federal pertencem a duas formações geológicas principais denominadas de Grupo Canastra e Grupo Paranoá. A maior parte do DF é ocupada pelo Grupo Paranoá, sendo precisamente neste domínio geológico onde esta localizada a área de estudo. A Figura 2.8 apresenta o mapa geológico do Distrito Federal.

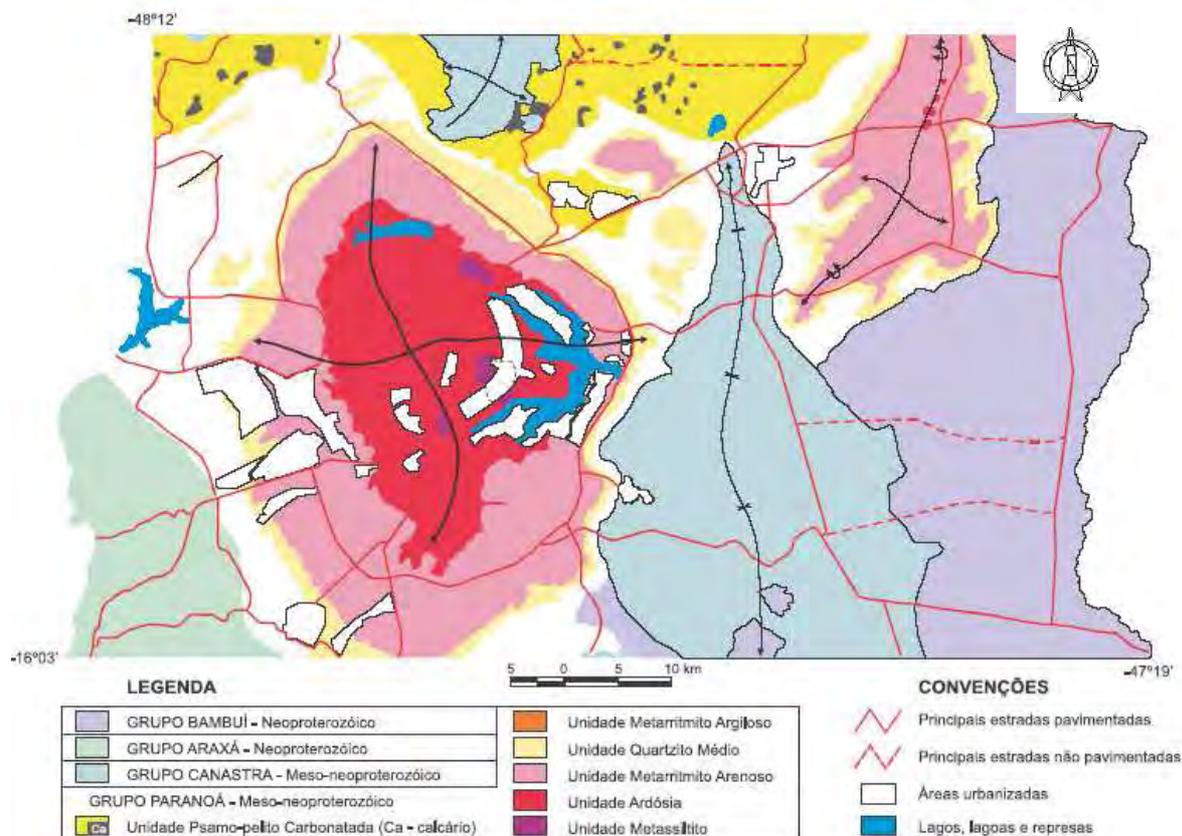


Figura 2.8 – Mapa geológico do Distrito Federal (FREITAS SILVA & CAMPOS, 1999, modificado por MARTINS *et al.*, 2004).

FARIA (1989) citado por BLANCO (1995), dividiu o Grupo Paranoá em cinco unidades deposicionais referidas da base para o topo por:

- Unidade A – Ardósias;
- Unidade B – Metarritmito inferior (arenoso);
- Unidade C – Quartzitos;
- Unidade D – Metarritmito superior (argiloso);
- Unidade E – Argilo-Carbonatados.

A unidade A (ardósia) possui mais de 50 m de espessura, constituída por ardósias roxas e vermelhas, com intercalações subordinadas de quartzitos e metassiltitos.

A unidade B (metarritmito arenoso) mostra grande alternância de camadas arenosas e argilosas, com predomínio da fração arenosa. Apresenta intercalações de quartzitos, metassiltitos e localmente, metargilitos. Possui uma espessura de cerca de 150 m.

A unidade C (quartzito) possui em torno de 50 m de espessura, apresenta localmente leitos de granulometria grossa, constituída de quartzo. Esta unidade sustenta as principais chapadas do DF.

A unidade D (metarritmito argiloso) possui cerca de 100 m de espessura, constituída por intercalações de metassiltitos, metargilitos e por vezes, quartzitos.

A unidade E (argilo-carbonatadas) possui cerca de 150 m de espessura e é representada por intercalações de ardósias, metassiltitos, quartzitos e lentes de calcário/dolomito.

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 2.9). A quantidade de horizontes e o nível de diferenciação dependem do grau de evolução do perfil e também do tipo litológico da rocha-mãe. As principais características dos horizontes lateríticos são descritas a seguir, da base para o topo:

1- Rocha-mãe ou Protólito: Caracterizada pela ausência de feições de intemperismo.

2- *Saprock*: em geral, ocorre uma transição entre a rocha-mãe e o saprólito, por meio de fragmentos de rocha fresca imersos em matriz intemperizada. Essas características indicam um intemperismo diferencial em função da organização dos materiais (estrutura, textura e trama) e da composição mineralógica. O limite de diferenciação entre essa transição e o

saprólito grosso é tênue. Pode ser definida empregando a proporção entre os materiais frescos e intemperizado, ou seja, se o primeiro domina sobre o segundo, caracteriza-se o *saprock*, e o inverso, o saprólito grosso.

3- Saprólito (espessura de até 100 m): pode ser subdividido em saprólito fino ou argiloso e saprólito grosso ou arenoso, apesar desta terminologia não representar a textura real do material. O saprólito fino também é designado de zona pálida, por sua cor geralmente branca a creme, em função do empobrecimento em Fe. O saprólito grosso caracteriza-se por apresentar porções preservadas da rocha-mãe; posiciona-se próximo ao contato com a rocha mãe ou com o *saprock*, definido acima.

4- Horizontes ferruginosos: envolvem um ou mais horizontes, diferenciados pelo grau de endurecimento de feições pedológicas resultantes do enriquecimento de oxi-hidróxidos de Fe e subsidiariamente de Al. Constituem horizontes ferruginosos:

- Zona mosqueada ou horizonte mosqueado (espessura até 5m): horizonte com a presença de concentrações de oxi-hidróxidos de Fe. É um horizonte mal drenado. Pode ser considerado o horizonte intermediário entre o saprólito e os horizontes superiores.
- Carapaça (espessura até 5m): caracteriza-se por ser transicional entre o horizonte de couraça e a zona mosqueada. Apresenta características físicas e químicas intermediárias entre estes dois horizontes.
- Couraça ou duricrosta (espessura até 5m): Constitui um horizonte de acumulação, relativa e/ou absoluta, de Fe e Al. A acumulação relativa é causada pela lixiviação seletiva da sílica e bases. A acumulação absoluta deve-se à concentração de Fe mobilizado de outros horizontes.
- Cascalho laterítico (espessura até 5m): horizonte formado pela degradação de outros horizontes ferruginosos, enriquecidos em feições pedológicas endurecidas e soltas.

5- *Solum* e *Pedon* (espessura até 15m): material superior do perfil e que pode ser residual ou não. Caracteriza-se por ser inconsolidado e apresentar estruturas formadas pela intensa atividade biológica, individualizando os horizontes A e B da classificação morfo-genética de solos. Designado como *solum*, quando observado em nível de perfil, e de *pedon*, quando caracterizado em três dimensões.

Esta descrição é ideal e raramente são observados todos os horizontes num mesmo perfil, ou mesmo em topossequência (BÁRDOSSY & ALEVA em 1990, citados por MARTINS, 2000).

Os perfis são geralmente truncados, apresentando a predominância de um ou mais horizontes (Figura 2.10).

ALEVA (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.

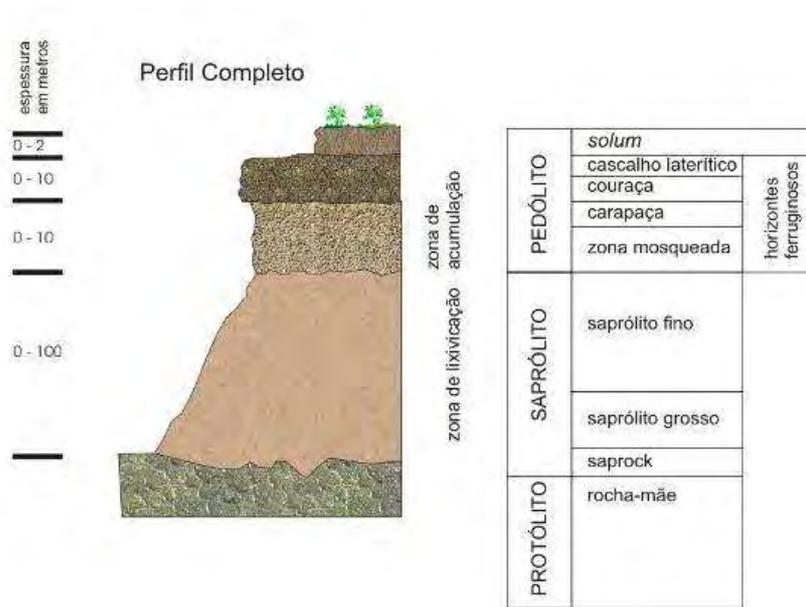


Figura 2.9– Esquema do perfil completo de solo (MARTINS, 2000).

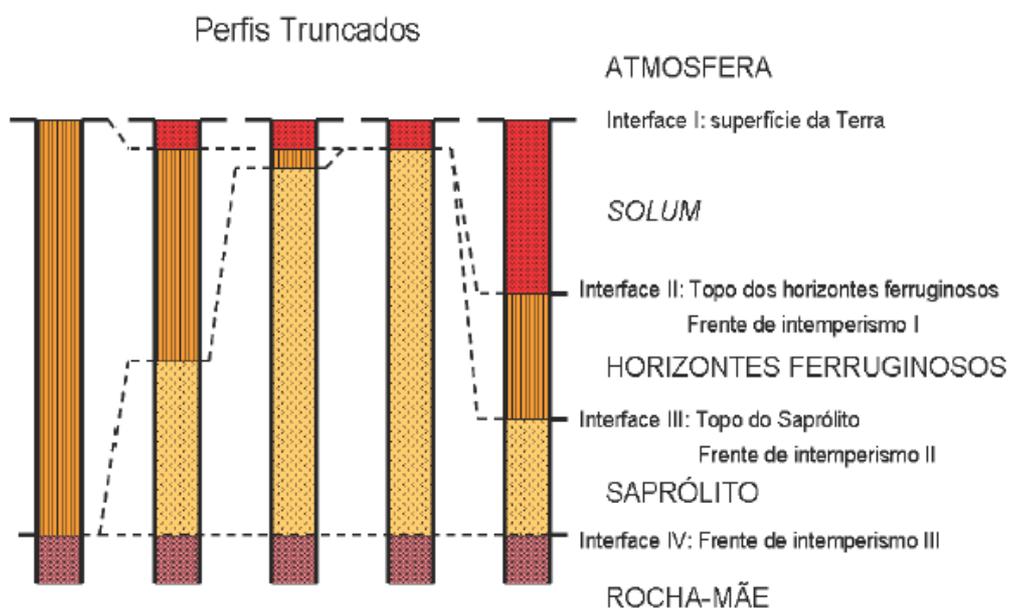


Figura 2.10– Esquema do perfil truncado de solo (MARTINS, 2000).

Segundo CAMAPUM DE CARVALHO & MORTARI (1994), no Distrito Federal, as obras subterrâneas rasas geralmente se localizam em horizontes de solos colapsíveis, argilosos e de cor vermelha e vermelha amarelada, denominados como “argila porosa”.

O termo “argila porosa” tem sido utilizado para denominar todo o solo encontrado na região caracterizado por solos finos e de alta porosidade, devido ao elevado índice de vazios, e a sua origem relacionada a material transportado de outra região.

MARTINS *et al.* (1994), mostram que a camada de “argila porosa”, na realidade corresponde ao horizonte de *solum* dos latossolos da região.

De acordo com REZENDE *et al.* (1995), citado por CARNEIRO (1999) a categoria dos saprólitos (saprólitos areno-silto-argilosos) representa os materiais associados aos solos pouco desenvolvidos, onde o processo de alteração atua numa condição de alta taxa de remoção do material alterado por processos erosivos, com contínuo e expressivo desenvolvimento do manto de alteração, ao longo do substrato rochoso, e insignificante parcela superficial de formação de solos. São solos residuais formados pela alteração da rocha que se encontra abaixo deles.

BLANCO (1995) descreve a geologia da porção escavada para o metrô de Brasília, na região da Asa Sul, onde define o perfil geotécnico (Figura 2.11). Como resultado deste trabalho pode-se descrever a geologia de engenharia da Asa Sul da seguinte forma:

- Argila porosa: constituída por uma argila arenosa, apresentando, localmente, níveis ricos em fragmentos de laterita e quartzo. É considerada porosa por apresentar alto índice de vazios, ou porosidade elevada. Constitui-se num material muito mole a mole com índice de resistência à penetração de 1 a 6 golpes e espessura variando de poucos metros a 40 m. É um material insaturado e colapsível, apresentando um nível d’água elevado apenas na parte extrema da Asa Sul.
- Ardósia, metarritmito arenoso e seus saprólitos: o saprólito da ardósia é um silte argiloso, marrom avermelhado, de consistência média a dura e espessura superior a 100 m, que perde a capacidade de suporte quando desconfinado na presença de água. É fortemente estruturado com direções proeminentes de clivagens. A areia fina a média siltosa a pouco siltosa variegada é resultado do intemperismo do metarritmito arenoso. Esta areia é fofa a muito compacta e apresenta-se localmente friável devido a um lixiviamento do seu cimento. Devem-se tomar alguns cuidados com este material quando o mesmo for

escavado. Ocorrem, ainda, no metarritmito blocos de quartzito silicificado, de pequenas dimensões que dificultam escavações, sendo que o mesmo pode ocorrer envolto em material fofo, trazendo, assim, sérios problemas para fundações apoiadas diretamente no mesmo.

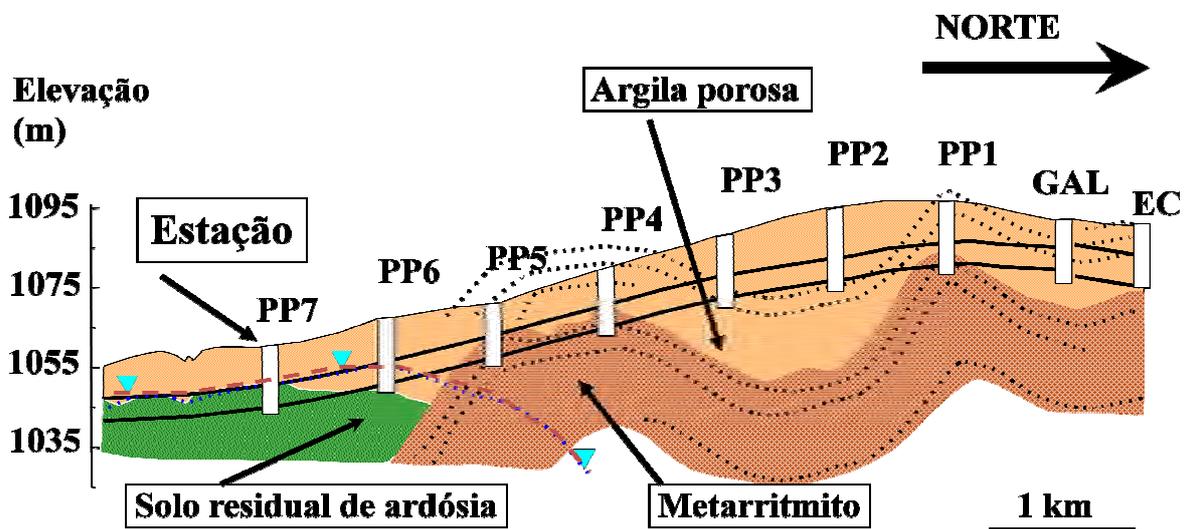


Figura 2.11 – Modelo proposto para a geologia da Asa Sul (BLANCO, 1995).

OLIVEIRA (1996) fez o mapeamento geotécnico da Asa Sul – Brasília e resumiu os solos encontrados em quatro tipos predominantes: argila siltosa, argila siltosa contendo concreções lateríticas, silte argiloso e areia siltosa. No entanto, ocorre sobre a argila siltosa, muito raramente, uma argila com matéria orgânica e aterro. Esses tipos de solo são descritos da seguinte forma:

- Argila siltosa: é uma camada contínua em toda a área, e se encontra sobre as outras três camadas. Para esta camada que é superficial a espessura é bastante variada, indo desde 2 m até mais de 30 m, com predomínio de 12 a 20 m. A profundidade máxima que se pode encontrar essa camada é de 3 m quando a mesma ocorre sob a argila siltosa contendo matéria orgânica e sob aterro. Está inserida nas duas faixas (baixa e média) de Nspt, com valores entre 0 a 4 e 5 a 15, respectivamente. A faixa média é predominante.
- Argila siltosa contendo concreções lateríticas: ocorre sempre sob a argila siltosa, mas não é contínua em toda a área. A espessura é de 0,5 a 11 m, com profundidade variando de 2 a mais de 30 m. Está inserida também nas três faixas de Nspt, mas com predomínio das faixas médio e alto.
- Silte argiloso: a sua espessura é indeterminada por estar em função das profundidades das sondagens. As profundidades que se encontram este tipo de solo é bastante variada, indo

desde 5 até mais de 30 m. Está englobado nas faixas de  $N_{spt}$  média e altas, mas com grande predomínio da faixa alta.

- Areia siltosa: para esta camada, também, a espessura é indeterminada devido à dependência com a profundidade das sondagens. As profundidades possíveis de encontrá-la são de 5 a mais de 30 m. Igualmente como o silte argiloso, está dentro das faixas de  $N_{spt}$  média e alta com predomínio da faixa alta.

Ainda segundo OLIVEIRA (1996) o nível d'água na Asa Sul ocorre desde os 5 até os 27 m, com um pico em 13 e outro em 18 m, sendo que no período chuvoso o mesmo ocorre nesse intervalo, enquanto que para o seco, somente é possível encontrá-lo desde os 6 até os 19 m.

## 2.2 O ESPAÇO SUBTERRÂNEO EM MEIO URBANO

Considerando-se a falta de espaço em superfície e as diversas interferências existentes, aumenta a cada dia a ocupação dos subterrâneos das cidades e, portanto, a necessidade de se conhecer técnicas específicas para a escavação e construção em áreas urbanizadas.

O metrô constitui, atualmente, uma das maiores obras já realizadas nos subterrâneos das grandes cidades e para tanto vem apresentando à engenharia e áreas afins uma série de desafios para se construir obras de grande porte sem grandes prejuízos às estruturas de superfície e ao meio ambiente. O traçado das novas linhas e extensões é definido a partir de estudos de demanda, ou seja, as linhas devem estar o mais próximo possível dos centros geradores de demanda. Isto faz com que a engenharia tenha que superar os problemas geológico-geotécnicos, as interferências existentes (infra-estrutura e elementos de fundação) e ainda prover condições para que as escavações sejam feitas sem interferência na vida em superfície, ou melhor, com o mínimo de perturbação em superfície (CAMPOS, *et al.*, 2008).

ASSIS (2006) apresenta as principais características do ambiente urbano que condicionam as obras subterrâneas, e, conseqüentemente, seus riscos associados, as quais estão sumarizadas a seguir:

- Túneis urbanos são geralmente de baixa cobertura, pois existe uma interação contínua do objeto transportado (bens, mercadorias, veículos, passageiros, utilidades públicas etc.) com a superfície.
- As condições geológicas são quase sempre complexas exatamente por causa da baixa profundidade. Nessas condições, principalmente em países tropicais, os maciços tendem a ser

pouco consolidados ou constituídos totalmente por solos, e sujeitos às variações freqüentes e bruscas (presença de lentes, aterro, matacões, descontinuidades e ação mais intensa dos processos de intemperismo). Há também que se considerar que as cidades que prosperaram nos tempos modernos têm suas localizações em planícies e ou nas proximidades de grandes corpos de água (rios, lagos, mares etc.), o que quase sempre contribui para as tais condições geológicas complexas em meios urbanos. Além do mais, existe ainda a possível presença do nível de água acima ou cruzando a seção do túnel, o que sempre requer atenção.

- Existência de inúmeras estruturas na superfície (edificações, sistemas viário e ferroviário, pontes, sítios históricos etc.) e os sistemas de fundações, os quais tendem a ser sensíveis aos deslocamentos induzidos pela obra subterrânea. Essas interferências quase sempre condicionam dificuldades construtivas ao túnel, e, conseqüentemente, impactam no custo final. Por essa razão, é prática comum que o critério de projeto de obras subterrâneas em meios urbanos seja por deslocamentos admissíveis, o que se verifica muito antes de qualquer critério baseado em potenciais modos de ruptura. Disso se conclui a importância da leitura da instrumentação geotécnica e da definição de níveis esperados, de alerta e de emergência em obras subterrâneas em meios urbanos.
- Presença de objetos pré-existentes, a maioria não identificada, no subsolo tais como poços, tirantes, tubulações etc. Alguns são surpresas que, quando descobertos, exigem cuidados especiais e afetam a produção diária da obra ou até mesmo a segurança. Outros objetos, como redes de utilidades públicas têm o mesmo efeito do item anterior, exigindo soluções particularizadas com impacto direto no custo final da obra.
- Restrições de alinhamento (horizontal e vertical), onde preferivelmente buscam se alinhamentos (traçados) abaixo de áreas públicas (ruas, avenidas, parques etc.), mas é inevitável passar abaixo de estruturas de superfície. Se, por um lado, o alinhamento de obras subterrâneas com as grandes avenidas de uma cidade vai ao encontro do principal condicionante de túneis urbanos, que é a demanda, e adicionalmente minimiza as interferências com edificações e outras estruturas de superfície, por outro, basta lembrar que essas grandes vias urbanas, quase sempre, ocupam fundos de vale, onde predominam as tais condições geológicas complexas e estão concentradas as redes de utilidades públicas enterradas, que podem ser afetadas por deslocamentos induzidos.
- Restrições construtivas relacionadas à logística de construção (localização de poços de acesso às frentes de escavação, planejamento de transporte de materiais para a obra e da obra para o bota-fora etc.) e as medidas auxiliares complementares à obra, tais como locais para

executar rebaixamento de lençol freático, melhoria e reforço de maciço, instrumentação etc. Até mesmo a dificuldade para a locação de sondagens para investigação do maciço deve ser considerada como um fator restritivo em túneis urbanos.

- Visibilidade de eventuais acidentes ou danos, já que os acidentes chegam facilmente à superfície do terreno devido à baixa cobertura ou aos deslocamentos induzidos excessivos que causam danos nas estruturas de superfície ou enterradas. Portanto, a visibilidade de quaisquer danos decorrentes de obras subterrâneas em meios urbanos é inevitável, pois de uma forma ou de outra eles chegam à superfície e por isso todos os esforços devem ser feitos para evitá-los. Do contrário, ocorrências indesejáveis freqüentes ou justificativas sem fundamentos podem levar ao descrédito da tecnologia perante a população e até, em último grau, das próprias obras subterrâneas como soluções de engenharia. Todos esses fatores, muitos deles inter-relacionados, apontam para a complexidade de executar túneis em meios urbanos, e, por conseguinte, seus riscos associados. Vale então sumarizar os principais quesitos:

- Obras subterrâneas em meios urbanos têm seus alinhamentos (traçados), quase sempre, regidos por fatores prioritários de demanda e operação e não por condições geológico-geotécnicas de maciços mais favoráveis. Essa decisão é prerrogativa do proprietário e da sociedade, e assim deve ser desde que no processo de licitação estejam claras as condições do maciço e os riscos associados com a escavação do túnel.

- As condições geotécnicas do maciço tendem a ser complexas, pela proximidade entre o túnel e a superfície, pelo seu alinhamento preferencial com fundos de vale, e ainda com variações freqüentes e bruscas das propriedades do maciço, muitas delas dominadas pelo intemperismo.

- O campo de deslocamentos induzidos tende a atingir estruturas do subsolo e também da superfície, portanto, quaisquer danos se tornam visíveis e de grande repercussão.

Esse conjunto de fatores estabelece os riscos de obras subterrâneas em meios urbanos, aos quais devem ser identificados, e rigidamente controlados por um plano de gerenciamento de riscos em todas as fases do empreendimento.

### 2.2.1 A UTILIZAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO

Segundo ASSIS (2007), existe atualmente, um amplo conjunto de aplicações de estruturas subterrâneas utilizadas como soluções para problemas urbanos, sendo elas:

- Túneis para transporte e tráfego (rodoviários, ferroviários, metroviários, passagens de pedestres, transporte de mercadorias, *containeres*, etc.).
- Túneis para utilidades públicas (água, esgoto, gás, cabos elétricos, telefônicos, etc.).
- Cavernas de armazenamento (água, petróleo, gás, depósitos de mercadorias, etc.).
- Cavernas para outros fins (estacionamentos, bibliotecas, museus, recreação e lazer, controle de enchentes etc.).

A Figura 2.12 ilustra as demandas atuais do espaço urbano.

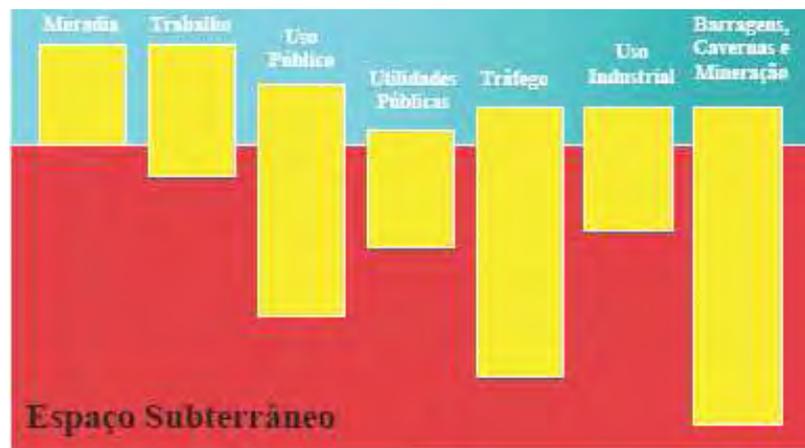


Figura 2.12 – Demanda do espaço urbano (ASSIS, 2007).

Pesquisas como as de SOUZA *et al.* (1997) afirmam que a implantação de garagens subterrâneas é prática corrente na maioria dos países europeus, EUA, Argentina e alguns países asiáticos. O país que sem dúvida deu maior impulso a esta forma de exploração do espaço urbano foi a França, por intermédio das municipalidades, principalmente da cidade de Paris, onde existem dezenas de empreendimentos deste tipo.

Nestas cidades o poder público buscando melhorar as condições de segurança pública, controle da poluição do ar e visual, preservação das áreas históricas, disciplinar o tráfego e estacionamentos nos centros turísticos e comerciais, promoveu amplos programas de parceria com a iniciativa privada, visando a implantação de estacionamentos subterrâneos, sob espaços viários e praças, através de concessão da exploração dos serviços por determinado período de tempo. Os diversos aspectos a considerar para a implantação dos estacionamentos subterrâneos, segundo SOUZA *et al.* (1997), são:

a) Aspectos de localização do empreendimento:

A forma adequada de escolha de um sítio para implantação de garagens subterrâneas é aliar os interesses do poder público em atender determinada área, por razões diversas (demanda reprimidas de vagas, congestionamentos, renovação urbana, poluição, segurança, etc.), com o da iniciativa privada, que é de auferir resultados financeiros positivos para investimentos de capital.

Dois são as práticas mais usuais de localização das áreas. A primeira tem sido por iniciativa da municipalidade que elege e delimita determinada área, estima a ocupação e número mínimo de vagas de estacionamento e promove a licitação. À segunda, muito utilizada na Europa, tem sido a iniciativa privada, através de análise de viabilidade encaminhada ao governo, manifestar interesse por determinada área. O poder público considera então seus próprios interesses e, se coincidentes, promove a licitação da área, salvaguardando os direitos de outros possíveis interessados.

Ambas as metodologias são factíveis desde que haja a adequada análise do local, com relação às demandas e problemas que serão abordados adiante. A delimitação da área de concessão deve ser criteriosamente estudada para permitir flexibilidade ao projeto, principalmente dos acessos. Os limites da área de influência do local escolhido para a concessão devem ser fixados em lei municipal, para evitar futuros problemas com outras concessões em área contígua.

b) Aspectos de Inserção no Meio Urbano

Neste aspecto devem ser consideradas todas as condicionantes locais que podem interferir fisicamente com o empreendimento, podendo em alguns casos levar à sua inviabilização.

- Área disponível: em geral, o subsolo concedido para implantação do estacionamento é sob praças e/ou trechos do sistema viário. Se não houver “a priori”, um criterioso estudo dos possíveis “*lay out*” de vagas, circulação e acessos, podem ser licitadas áreas onde é inexequível a implantação. A área utilizável em planta e o número de vagas desejado irão resultar no número de pavimentos do estacionamento. Quando em geral sob praças, o principal problema enfrentado é quanto à arborização existente. Quando sob sistema viário o maior problema é o relativo às interferências subterrâneas e manutenção do tráfego.

- **Interferências:** são de suma importância que sejam adequadamente localizadas e caracterizadas, principalmente as subterrâneas, desde a fase de estudos de viabilidade, para serem avaliadas quanto aos custos e dificuldades de remanejamento e/ou proteção durante as obras. No caso de arborização, quando localizada sobre o local da obra subterrânea, a decisão possível é entre transplantar, remover ou preservar. A última forma, em geral, pode tornar proibitivo o custo da obra. Um projeto de paisagismo que revitalize, recomponha e amplifique a diversidade vegetal do local após a obra é o indicado e deve ser considerado pelos órgãos responsáveis. Os cuidados com a vegetação remanescente, na lateral devem levar em conta os cortes parciais das raízes nas escavações e a irrigação no eventual rebaixamento dos lençóis freáticos.

- **Meio ambiente:** obras desta natureza apresentam impacto ambiental elevado para as atividades locais de trabalho, serviços, moradia, lazer, estudos e tráfego durante a fase de construção, podendo estender-se pela operação, se não tomados os devidos cuidados. O equacionamento ambiental deve-se dar desde a concepção do projeto, até a escolha do método construtivo e planejamento da obra e da operação.

- **Tráfego:** quanto ao tráfego um conceito importante é que os órgãos públicos tendem a tratar este tipo de obra como um pólo gerador de tráfego, quando na prática ele vem atender um pólo existente, caso contrário não se viabiliza financeiramente. O problema maior se localiza no acesso de entrada que deve ser dimensionado para acomodar o volume de veículos sem interferir com o sistema viário local.

- **Reurbanização:** a implantação de estacionamentos subterrâneos deve ser vista como importante instrumento de revitalização de determinada área. A reurbanização do local deve valorizar o uso do espaço público pelo cidadão e não mais pelo automóvel. Há, entretanto que se considerar que o concessionário não deve ser solicitado a resolver problemas de urbanização no entorno, sob o risco dos custos inviabilizarem o empreendimento.

O uso de túneis oferece inúmeras vantagens pela minimização dos impactos provocados no ambiente urbano que é afetado por estas estruturas e também pela libertação do espaço superficial para outros usos. Além disto, as perturbações ambientais são extremamente reduzidas e evitam-se também os condicionalismos que são impostos ao trânsito quando a realização de outro tipo de obras. Outra vantagem deste tipo de solução está diretamente relacionada com o seu custo. Enquanto que, até a alguns anos atrás o seu custo era bastante elevado, hoje em dia, devido a vários fatores, como: i) desenvolvimento de novos métodos e técnicas construtivas capazes de fazer face a situações geotécnicas particularmente adversas e

de minimizar as deformações no meio envolvente; ii) a melhoria dos projetos, onde a observação e instrumentação desempenha cada vez mais um papel de relevo com vista à otimização da execução da obra e do dimensionamento da estrutura de suporte; iii) a existência de sistemas contratuais mais flexíveis, tem se verificado uma redução apreciável os custos deste tipo de estruturas, tornando-as uma solução bastante atrativa (MARQUES, 2006).

Um exemplo de uso do espaço subterrâneo é a substituição da artéria central de Boston, EUA, onde uma via expressa elevada foi demolida e substituída por vias subterrâneas como forma de revitalizar o centro histórico da cidade, tendo a área anteriormente ocupada sido em grande parte transformada em área verde. O conceito de revitalização de centros urbanos por meio de estruturas subterrâneas está ilustrado na Figura 2.13.

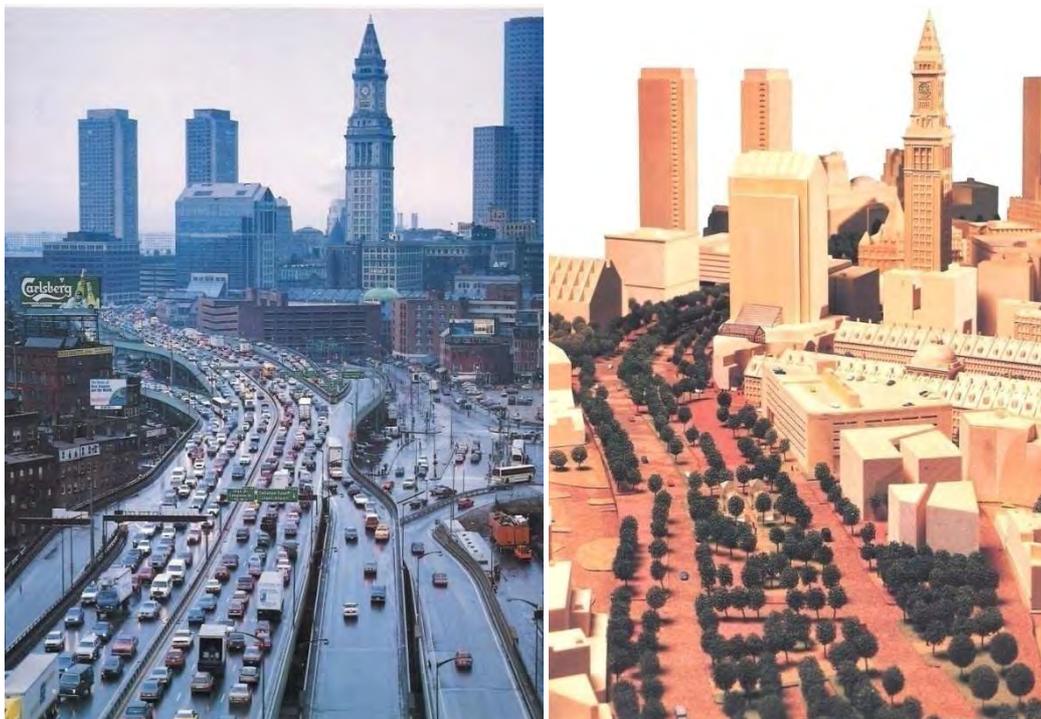


Figura 2.13 – Ilustração do conceito de revitalização de áreas centrais urbanas por meio de estruturas subterrâneas (Artéria Central de Boston, EUA) (ASSIS, 2007).

A ocorrência dos solos porosos beneficia de condições propícias nas regiões tropicais. A estrutura porosa destes solos é geralmente atribuída a um intenso processo de lixiviação de finos horizontes superficiais nas regiões onde se alternam estações de relativa seca e de precipitações intensas. No Brasil, os complexos geológicos de solos porosos abrangem áreas consideráveis das regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, que são regiões com altos índices de urbanização no país (MARQUES, 2006).

Segundo SILVA (2007), no Brasil verificaram-se um notável incremento na execução de obras envolvendo túneis, obras essas relacionadas fundamentalmente com redes de transporte. A construção de variados túneis em solos e rochas proporcionou uma vasta experiência no meio geotécnico brasileiro. No entanto, apenas uma pequena percentagem dos túneis construídos até o momento foi escavada em solos porosos, como as argilas porosas de São Paulo (Metropolitano de São Paulo) e as argilas porosas de Brasília (Metropolitano de Brasília).

## 2.2.2 O PLANEJAMENTO DE OCUPAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO URBANO

O sucesso de uma cidade está na adequação eficiente de sua infra-estrutura de mobilidade com os diversos tipos de estruturas de armazenamento, visando garantir produtividade e eficiência do meio urbano e o bem maior que é a qualidade de vida da população. Nesse sentido, nas últimas décadas, as obras subterrâneas têm emergido como uma solução eficaz para problemas urbanos, tanto em termos de infra-estrutura de transporte quanto de estruturas de armazenamento (principalmente as dedicadas a mercadorias e bens). Portanto, verifica-se hoje, em todo o mundo, um enorme “boom” de obras subterrâneas em meios urbanos, e o Brasil não foge a esta tendência. Mas, se por um lado as obras subterrâneas são realidades em meios urbanos e com demanda crescente e acentuada, por outro, são obras de grande complexidade que requerem padrões elevados de qualidade e engenharia, em todas as fases do empreendimento, desde sua concepção, projeto, contratação, construção até sua operação. A exigência desses padrões elevados se deve aos riscos associados, principalmente, em obras subterrâneas urbanas (IPT, 2008).

Segundo VÄHÄÄHO (1996) um melhor aproveitamento de dados geotécnicos para fins de planejamento exige visualização tridimensional, sendo que um grande número de programas de computador foi desenvolvido de modo a suprir esta necessidade. Para o autor, o ponto de partida do estudo em 3D é a utilização de um banco de dados tipo SIG (Sistema de Informações Geográficas) contendo dados de sondagens, amostras e medidas, com posicionamento georreferenciado. Isso permitirá o mapeamento de camadas com modelos tridimensionais que utilizem sondagens georreferenciadas, e a posterior visualização de superfícies.

Visando a apresentar subsídios para o planejamento e mapeamento do espaço subterrâneo, a *International Tunnelling Association* (ITA, 2000) realizou um levantamento em que apresenta

a preocupação atual com o monitoramento dos níveis d'água, proteção do meio ambiente e de patrimônios históricos, com o desenvolvimento de técnicas para cadastramento das estruturas subterrâneas e com o mapeamento das diferentes condições geológicas do subsolo. Deste levantamento também se evidenciou a carência de planejamentos para obras subterrâneas e a deficiência de regularização destes pelos órgãos governamentais.

Segundo TALAMINI NETO (2001) a caracterização geotécnica de uma cidade para planejamento de ocupação do espaço subterrâneo fundamenta-se nas seguintes atividades básicas:

1. Determinação das principais unidades geotécnicas existentes;
2. Mapeamento tridimensional destas unidades; quando pertinente mapeamento das suas propriedades geotécnicas;
3. Caracterização básica destas unidades em termos de necessidades construtivas e de suporte.

Este último item é talvez o mais importante durante o processo de planejamento do espaço subterrâneo, uma vez que é determinante em vários aspectos, como no posicionamento, dimensionamento, e conseqüentemente, no custo das obras.

Essas atividades devem resultar em documentos que permitam aos profissionais da área de planejamento urbano visualizar e compreender a distribuição espacial das unidades geotécnicas com diferentes favorabilidades para construção de obras subterrâneas. Estes documentos devem, preferencialmente, fornecer uma estimativa de custos envolvidos na construção de obras subterrâneas em diferentes posições, ou dar subsídios, em termos de exigências construtivas, para que estes custos sejam estimados (TALAMINI NETO, 2001).

Uma adequada campanha de investigações geotécnicas é condição determinante na escolha do local da obra e do método construtivo que, conseqüentemente, influem no custo total do empreendimento (SILVA, 2007).

### 2.2.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS PARA OBRAS SUBTERRÂNEAS

As investigações geotécnicas do subsolo constituem pré-requisito para projetos geotécnicos seguros e econômicos, os quais são normalmente executados com base em ensaios de laboratório e/ou campo. As investigações devem permitir uma definição da estratigrafia do subsolo e uma estimativa das propriedades geomecânicas dos materiais envolvidos (VELLOSO & LOPES, 2004).

Ainda segundo VELLOSO & LOPES (2004), o primeiro passo para uma investigação adequada do subsolo é a definição de um programa, que irá definir as etapas da investigação e os objetivos a serem alcançados. As etapas são:

- Investigação preliminar: objetiva-se conhecer as principais características do subsolo. Nesta fase em geral, são executadas apenas sondagens à percussão. O espaçamento de sondagens é geralmente regular (por exemplo, um furo a cada 15 ou 20 m), e a profundidade das sondagens deve procurar caracterizar o embasamento rochoso.
- Investigação complementar ou de projeto: procuram-se esclarecer as feições relevantes do subsolo e caracterizar as propriedades dos solos mais importantes do ponto de vista do comportamento das fundações. Nesta etapa, são realizados alguns ensaios in situ, além do ensaio de penetração dinâmica (SPT) que é executado nas sondagens a percussão, como ensaios de cone (CPT), de placa, etc.
- Investigação para a fase de execução: visa confirmar as condições de projeto em áreas críticas da obra, assim consideradas pela responsabilidade das fundações (exemplo típico: pilares de pontes) ou pela grande variação dos solos na obra.

As sondagens de simples reconhecimento (SPT) podem ser definidas como sendo um tipo de prospecção do subsolo, que tem como objetivo determinar as características do perfil geotécnico, nível d'água e as características de resistência dos solos. Com as sondagens é possível definir as propriedades dos materiais ao longo da linha de perfuração, descrevendo os testemunhos, as variações litológicas e as características geotécnicas.

O ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) é o mais usado e o mais econômico meio de se fazer investigação do subsolo, pelas vantagens que ele apresenta, tais como:

- Simplicidade do método e baixo custo;
- Coleta de amostras do terreno, a diversas profundidades, possibilitando o conhecimento da estratigrafia do mesmo;
- Medição da resistência do solo através do Índice de Resistência à Penetração;
- Determinação do nível d'água.

O ensaio SPT (Figura 2.14) normalizado pela NBR 6484 é realizado a cada metro na sondagem à percussão. O ensaio consiste basicamente na cravação de um amostrador normalizado, chamado originalmente de *Raymond - Terzaghi*, por meio de golpes de um peso de 65 Kg caindo de uma altura de 75 cm. O martelo deve possuir haste guia e ser dotado de

um coxim de madeira. O martelo deve ser erguido manualmente por corda e polia. Quanto a retirada da amostra usa-se um amostrador bi-partido com cinco cm de diâmetro externo, cravando-o até 45 cm abaixo da ponta do tubo de revestimento por meio de um martelo deixado cair de uma altura de 75 cm. Anota-se o número de golpes necessários para cravar os 45 cm do amostrador em três conjuntos de golpes para cada 15 cm. O resultado do ensaio que equivale a resistência à penetração do solo é o número de golpes necessário para cravar os 30 cm finais (desprezando-se, portanto, os primeiros 15 cm, embora o número de golpes para essa penetração seja também fornecido). Ao número de golpes aplicados convencionou-se chamar de  $N_{spt}$ .

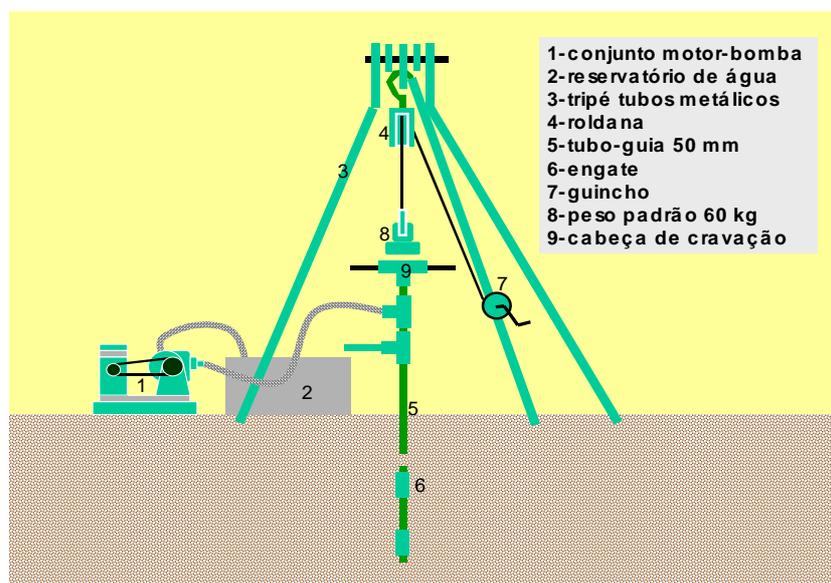


Figura 2.14 – Esquema do ensaio de SPT.

Existem vários fatores que influenciam na precisão do índice  $N_{spt}$ . A energia que é transmitida do martelo para o solo depende principalmente dos seguintes fatores: comprimento da composição, e hastes, tipo de escavação (trado, trépano ou com o próprio amostrador), tipo de roldana (móvel ou fixa), tamanho da cabeça de bater, tipo de martelo e idade dos equipamentos.

MANGOLIM FILHO & OJIMA (1995) ressaltam a importância das sondagens de simples reconhecimento. Segundo eles, em áreas com dados disponíveis obtidos em estudos a partir do histórico de obras, as sondagens a percussão com SPT geralmente fornecem informações suficientes e adequadas ao projeto de túneis, devendo estas serem integradas com o mapeamento de superfície. Destacam ainda a importância da obtenção de dados hidrogeológicos, já que estes, juntamente com as condições geológicas, são fatores

determinantes no grau de dificuldade e custo de uma obra subterrânea. As condições d'água constituem fatores intervenientes na escolha dos métodos construtivos e do revestimento final dos túneis. Tais condições são controladas pela geologia (litologia, estratigrafia, estruturas etc.), pela recarga e relevo. Em áreas intensamente urbanizadas, a ocupação humana altera os processos de recarga e modifica as características hidrogeológicas.

Em túneis urbanos, as incertezas geológico-geotécnicas deverão ser minimizadas sob pena de causarem sérios riscos para a sociedade, tais como recalques que afetem as edificações vizinhas às obras, redes de utilidades públicas e o sistema viário superficial (MANGOLIM FILHO & OJIMA, 1995).

Existem várias sugestões quanto à quantidade de investigações que devem ser realizadas para a execução de uma obra subterrânea. De acordo com VAZ (1999) o comprimento das sondagens executadas deve ser aproximadamente igual ao comprimento do túnel para túneis com menos de 5 km de extensão, diminuindo progressivamente até um limite inferior de 50% do comprimento do túnel para obras muito longas. As normas do U.S. *Committee on tunnelling Technology*, divulgadas em 1985, ainda segundo o autor, são mais exigentes, estabelecendo um comprimento de sondagens equivalente a 1,5 vezes o comprimento do túnel.

Pesquisa como a de TALAMINI NETO (2001) afirma que a prática no acompanhamento da construção de túneis indica que a maior parte dos problemas nas escavações é decorrente da carência de informações dos condicionantes geológicos que não foram previstos antecipadamente.

As investigações geotécnicas para obras subterrâneas, especialmente de túneis urbanos, incluem os aspectos relatados por PARKER (2004a) citado por SILVA (2007), quais sejam:

- A geologia deve ter o papel predominante nas decisões de planejamento, projeto e construção de um túnel e os dados geotécnicos devem ser conceitualmente planejados e obtidos o mais cedo possível;
- Por se tratar de uma obra subterrânea, cercada de incertezas e riscos, cada projeto é único e as investigações geotécnicas devem levar isto em conta e não seguirem “receitas” geométricas pré-estabelecidas;
- O custo das investigações deve ser da ordem de 3% do custo total do empreendimento, diferentemente de 1% usado no passado;

## 2.2.4 ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Para a execução de obras de utilização do subterrâneo, é necessário ter o conhecimento do comportamento do maciço, dos possíveis distúrbios causados pelo processo construtivo, da formação geológica do local, entre outras características. Estes fatores, somados ao custo-benefício, aos requisitos de segurança, de funcionalidade, de estética e à finalidade da obra condicionarão a escolha dos métodos possíveis de escavação e escoramento para a construção destes tipos de obras.

Segundo ASSIS (2007), os principais métodos construtivos aplicados a túneis urbanos podem ser divididos em categorias, a saber: vala recoberta, mini-túneis, método da escavação seqüencial (filosofia NATM), escavação mecanizada através de tuneladora (TBM) e escavação a fogo.

A decisão fundamental em qualquer obra subterrânea é se ela será executada a partir da superfície (vala recoberta) ou por um método tuneleiro (mini-túneis, TBM, a fogo ou NATM). De acordo com ASSIS (2007), no passado esta escolha recaía mais freqüentemente para o método de vala recoberta, meramente por razões de custo. Mais recentemente este quadro tem-se invertido principalmente nos meios urbanos intensamente povoados, dadas as interferências danosas, prejuízos e impactos ambientais durante a construção.

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica dos diferentes métodos construtivos de escavações subterrâneas com ênfase ao método de escavação convencional, com base nos princípios do NATM, já que este será o método construtivo considerado no Projeto Básico para a extensão Asa Norte do Metrô de Brasília. O método convencional a céu aberto também será enfatizado, visto que esta técnica poderá vir a ser considerada para a construção de garagens subterrâneas.

### 2.2.4.1 MÉTODOS MECANIZADOS

Os métodos mecanizados englobam as técnicas construtivas em que a execução da escavação é feita de forma mecanizada, com recurso a máquinas tuneladoras (TBM) que permitem a escavação em secção plena. A escavação é efetuada com frente aberta ou fechada, sob a proteção da couraça. Imediatamente atrás, ainda dentro da couraça (eventualmente fora dela, quando o maciço permitir) é montado o revestimento segmentado pré - moldado de concreto (ou metálico).

O TBM (*Tunnel Boring Machine*), nomenclatura que se aplica aqueles *shields* mecanizados, com alto nível de automatização, controle de contra-pressão para minimização dos recalques e velocidade de avanço. A máquina é dotada de “*roller bits*”, que são cortadores de rocha ou solo, que tem movimento de rotação e ainda translação devido à rotação da frente de escavação. Um exemplo de um TBM é mostrado na Figura 2.15.

Em relação aos métodos mais tradicionais de construção seqüencial, as soluções que utilizam máquinas tuneladoras (TBM) garantem maior segurança e proteção às equipes de trabalho, uma vez que promovem de forma mais eficaz a estabilidade do maciço envolvente e são menos vulneráveis às falhas humanas, falhas estas que são potencializadas no NATM, devido ao grande número de operações e atividades sucessivas que devem ser realizadas seqüencialmente pela equipe de construção, de forma nem sempre padronizada (MARQUES, 2006).



Figura 2.15 – Vista Frontal de um TBM (ASSIS, 2007).

#### 2.2.4.2 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL

Nos métodos de escavação seqüencial o avanço do túnel (escavação e suporte) é feita em etapas com uso de equipamentos móveis, onde a escavação não é aplicada à seção total do túnel e estando a frente de escavação submetida à pressão atmosférica, nestes métodos se enquadra o NATM (*New Austrian Tunnelling Method*) (Figura 2.16).



Figura 2.16 – Túnel em NATM em construção – Linha 4 – Amarela – São Paulo/SP.

Segundo ASSIS (2007) os princípios básicos nos quais se baseia o NATM são denominados *princípios modernos de túneis*, e são estes:

- O maciço é visto como principal elemento estrutural;
- A complementação, quando necessária, da estrutura de sustentação deve ser executada através da instalação de um sistema de suporte otimizado;
- E deve-se promover a instrumentação do túnel.

A grande vantagem deste método é a liberdade de projetar seções transversais de grande diâmetro e em formas e seqüências construtivas variadas.

O método admite uma grande variedade de processos de escavação em fases, alguns deles ilustrados na Figura 2.17. A escolha do tipo de parcialização fica, portanto, ao critério do projetista, devendo essa escolha ser baseada em diversos fatores que, de acordo com MARQUES (2006), são: dimensões da secção transversal, características do terreno, tipo de equipamento utilizado na escavação, aspectos econômicos, tradições locais e interferência com infra-estruturas ou edifícios existentes. Como regra, é de admitir que quanto maior for a área da secção transversal e menos resistente e mais deformável for o maciço, maior deverá ser o número de fases de escavação. O controle das deformações no maciço, particularmente à superfície, e a garantia da estabilidade da frente podem ser conseguidos à custa de um faseamento de escavação adequado.

Deve, no entanto referir-se que uma parcialização excessiva poderá ser mais inconveniente que vantajosa (MARQUES, 2006). As razões para que tal possa acontecer prendem-se com a diminuição da velocidade global de avanço associada à maior complicação do processo construtivo, com o aumento das fases de apoio provisórias e de juntas no suporte e, ainda, com o atraso com que a estrutura de suporte definitiva é colocada em serviço.

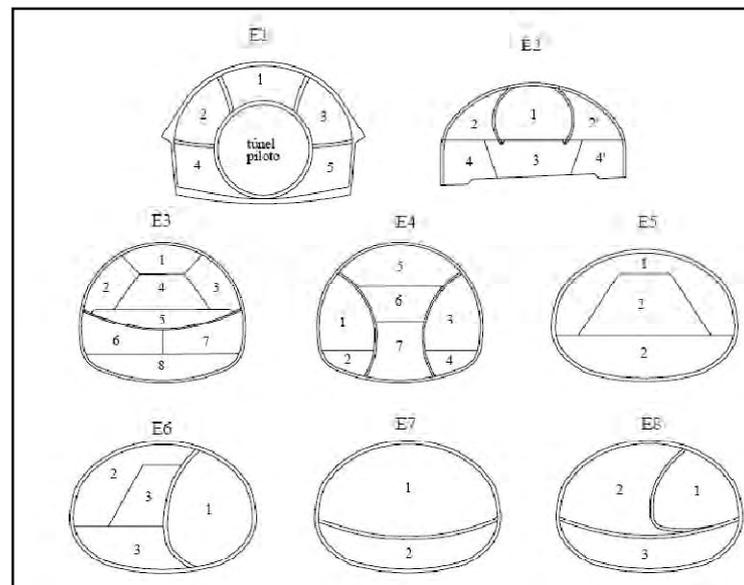


Figura 2.17 – Diferentes seqüências de escavação em seção parcial (ASSIS, 2007).

Assim, é de concluir pela conveniência em proceder, sempre que possível, a uma escavação em seção plena, ou quase plena, podendo reduzir-se os riscos de instabilidade no avanço do túnel deixando um núcleo central que funciona como apoio à frente de escavação (Figura 2.18).

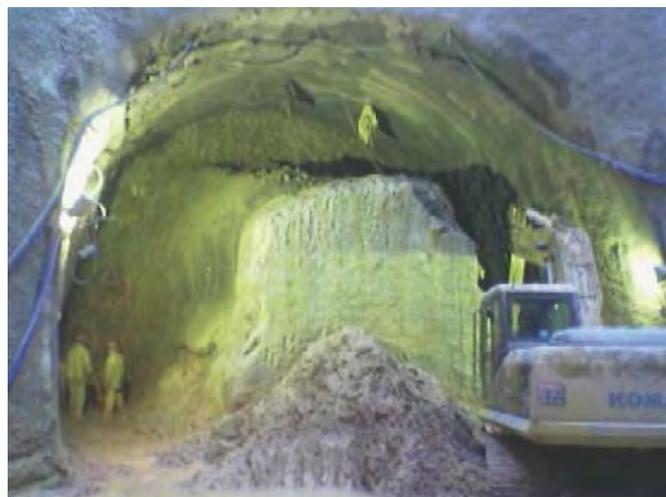


Figura 2.18 – Utilização do núcleo central como proteção da frente de escavação (ASSIS, 2007).

SILVA (2007) destaca que uma escavação em solo muito rasa, a uma profundidade inferior a duas vezes o diâmetro do túnel, é complexa, já que envolve as interferências nas estruturas superficiais que, às vezes, não podem sofrer recalques. Para minimizar este efeito, o limite ideal para propiciar uma estabilização é de uma escavação à profundidade mínima equivalente a quatro vezes o diâmetro do túnel, o que encarece muito no caso das estações de metrô. No caso de túneis em solos, pode-se aumentar a capacidade de suporte reforçando o maciço, por meio de grampeamento, enfilagens cravadas, enfilagens injetadas ou *Jet-grouting*.

#### 2.2.4.3 ESCAVAÇÃO A CÉU ABERTO (VALA RECOBERTA)

Este método não se enquadra nas designações anteriores, já que há a característica de obra executada a céu aberto durante a construção. Conhecido também como "*cut-and-cover*", consiste na abertura de grandes trincheiras ou valas a partir da superfície, onde será implantada uma estrutura de contenção e sustentação, construída toda a estrutura da obra de forma convencional (de baixo para cima), e posteriormente será recoberta liberando o espaço de superfície. Possui utilização limitada por promover sérias perturbações na superfície do terreno acima do túnel e interferências com as redes de utilidades públicas já instaladas, sendo inviável, por exemplo, em áreas industriais ou densamente povoadas.

Normalmente este método possui um menor custo de execução em relação a outros métodos que não causam grandes interferências na superfície, porém esta relação pode não ser sempre favorável a sua implantação, devidos aos transtornos que este tipo de obra pode causar. CARVALHO & PEIXOTO (2006) cita o exemplo do Metrô de Brasília, em alguns locais o custo de construção a céu aberto ficou bem superior ao da execução utilizando o método seqüencial de escavação, isto por causa da grande quantidade de interferências em infra-estruturas existentes, relocações de redes, além de profundidades relativamente elevadas a serem escavadas. Entretanto em locais em que esta interferência não é problemática, como no caso da garagem Trianon em São Paulo (Figura 2.19), este método é imbatível em relação aos outros.



Figura 2.19 – Construção da garagem Trianon – SP (CARVALHO & PEIXOTO, 2006).

#### 2.2.4.4 ESCAVAÇÃO INVERTIDA

Esta metodologia, conhecida também como “*cut-and-cover*” invertido, é equivalente à vala recoberta, contudo com a recomposição da superfície em tempo menor do que a primeira. Ela propõe a remoção de uma pequena cobertura de solo e a pré-instalação da laje do futuro teto da escavação, em concreto, apoiada em uma estrutura também previamente construída que pode ser a própria para contenção. Após a construção da laje, executa-se o re-aterro com o próprio material escavado e libera-se o espaço de superfície, continuando-se a escavação e construção da obra sob condições seguras sob a laje de teto. Este método apresenta-se mais vantajoso em obras onde a interferência longa na superfície não é possível, já que o tempo de paralisação é menor do que na metodologia de vala recoberta. Mais recentemente foi adaptado para túneis, método conhecido como túnel invertido (Figura 2.20).



Figura 2.20 – Instalação da laje de teto do túnel invertido no metrô de Brasília – Túnel Taguatinga (CARVALHO & PEIXOTO, 2006).

### 2.3 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ÁREAS URBANAS

A ocupação humana do meio físico pode trazer interferências que alteram o seu equilíbrio natural. A cartografia geotécnica surgiu ao tentar disponibilizar informações sobre o ambiente geológico, buscando a utilização do terreno com mínima interferência nesse equilíbrio. O entendimento da dinâmica do ambiente geológico permite direcionar formas de ocupação mais harmoniosas, tendo em vista os elementos que as condicionam. Daí a necessidade de se prover engenheiros, planejadores e projetistas com as informações que os auxiliem a minimizar os impactos decorrentes da implantação de obras de engenharia, bem como de outras formas de ocupação e desenvolvimento regional. Assim, a cartografia geotécnica visa subsidiar tanto o planejamento, projeto e construção, como manutenção e segurança de obras de engenharia. As abordagens operacionais da cartografia geotécnica partem da compreensão da interação entre os componentes do meio ambiente, o substrato rochoso; as feições geomorfológicas e a dinâmica superficial; os solos; as condições hidrogeológicas; as condições climáticas; a vegetação; e a utilização atual da terra (UNESCO/IAEG, 1976, citado por ROMÃO, 2006).

Quanto à terminologia utilizada na Cartografia Geotécnica, verifica-se que há documentos denominados “mapas” ou “cartas” geotécnicas. Segundo ZUQUETTE & GANDOLFI (2004) o termo cartografia geotécnica refere-se à elaboração do produto cartográfico e não à obtenção das informações e dados geotécnicos. Assim, mapeamento geotécnico é um

processo que contém em si toda a técnica necessária para obtenção da carta geotécnica. A cartografia geotécnica é uma etapa do processo de mapeamento geotécnico.

Existe uma grande diversidade de métodos e critérios que são utilizados na elaboração das cartas geotécnicas. Para aplicações no âmbito do planejamento e ordenamento do território recomenda-se a representação de um conjunto de fatores (litologia, morfologia, etc.) separadamente em cartas descritivas que se designam de básicas, na medida em que contém os elementos do meio geológico com os quais o Homem vai interagir. Estes mapas são depois combinados e integrados derivando-se então em novas cartas, denominadas cartas derivadas, que interpretam “qualidades significativas”, isto é, relevantes para o planejamento. No conjunto, estas cartas são documentos de diagnóstico que refletem as condições atuais da região e seus recursos. A partir das cartas derivadas obtêm-se as cartas de síntese, que são documentos finais diretamente utilizados por outros profissionais, que avaliam a capacidade, impacto ou aptidão para o desenvolvimento de certas atividades, ou que recomendam ou restringem determinados tipos de usos do solo (UNESCO/IAEG, 1976, citado por SILVA, 2000).

Analisando-se a produção de cartas geotécnicas no Brasil, pode-se verificar que há dois grandes tipos de cartas geotécnicas: as destinadas a subsidiar a implantação de obras de engenharia, dando suporte para o entendimento do meio físico e aquelas voltadas a subsidiar ações de planejamento territorial e gestão do uso e ocupação do solo. No Brasil há um predomínio numérico de cartas destinadas ao planejamento e gestão do uso e ocupação do solo, especialmente o solo urbano (PAULA & CERRI, 2008).

Segundo CARNEIRO (1999) na praticidade de uma carta geotécnica deve estar implícita a adoção de um sistema de classificação de terrenos, baseando em propriedades que sejam cartografáveis e que, simultaneamente, tenham significado geotécnico. Contudo, alerta para o fato de o assunto não ser tão simples quanto parece porque, à medida que as escalas de estudo e de representação aumentam, torna-se mais difícil, por razões óbvias, a determinação das propriedades necessárias à caracterização de terrenos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Relação entre as escalas, critérios de homogeneidade e determinação de unidades geotécnicas da Metodologia IAEG (Modificada - CARNEIRO, 1999).

Escalas	Unidades Geotécnicas	Crítérios de Homogeneidade	Métodos de Identificação	Métodos de Caracterização
1: 100.000	Grupo geotécnico	Argumentos de determinação de complexos litológicos e suas relações estruturais	Interpretação de carta geológica existente.	Inferição do comportamento geotécnico com base na avaliação dos dados existentes.
1: 100.000 a 1: 10:000	Formação Geotécnica	Argumentos de determinação de tipos litológicos geneticamente relacionados e suas estruturas geológicas	Interpretação de cartas geológicas existentes, fotografias aéreas, reconhecimento geológico de superfície.	Determinação do comportamento geotécnico com base na caracterização expedita do material (propriedades - índice).
1: 10.00 a 1: 5.000	Tipo Litológico	Composição, mineralogia, textura e estrutura.	Reconhecimento geológico de superfície, coleta de amostras.	Sondagens mecânicas, ensaios “ <i>in situ</i> ”, e determinação sistemática de propriedades-índice.
1: 5.000	Tipo Geotécnico	Uniformidades do estado físico dentro de cada tipo litológico	Caracterização do estado de alteração, grau de consistência e compacidade.	Determinação sistemática e adensada das propriedades físicas e mecânicas.

A escala de um mapa geotécnico depende da finalidade a qual o estudo se destina e está relacionada com o nível de detalhamento do mesmo. Pode abranger um ambiente urbano (escalas entre 1: 50.000 a 1: 5.000), onde se procuram identificar as áreas potenciais para os riscos geológico-geotécnicos; ou regional (1: 100.000 a 1: 250.000), que são os estudos voltados ao planejamento regional (ROQUE, 2006).

DEARMAN (1991) diz que mapeamento urbano é geralmente feito com escalas médias, ou seja, escala variando de 1/100.000 até 1/10.000, 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 1/2.500 até 1/1.000, e mais severamente pode-se utilizar escalas ainda maiores, na ordem de 1/500 ou até mesmo 1/100.

A cartografia geotécnica torna-se um instrumental tecnológico básico na determinação de diretrizes para o planejamento urbano e regional, ao utilizar diversas ferramentas que fundamentam a análise do meio físico, tais como a investigação de campo e laboratório, associados aos recursos de geoprocessamento no armazenamento e tratamento dos dados de investigação (SOUZA, 1995). Entretanto, a IAEG (1976) citado por ROMÃO (1995) considera muito importante destacar, antes de qualquer utilização do mapeamento geotécnico,

que os mapas são sempre orientativos e não podem substituir uma investigação local, mas podem auxiliar tanto no projeto desta investigação quanto na interpretação dos resultados da mesma.

## 2.4 GEOPROCESSAMENTO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

Segundo CÂMARA *et al.* (1998) 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 georreferenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

Sistemas de informações geográficas são ferramentas que permitem armazenar, analisar, recuperar, manipular e manejar grandes quantidades de dados espaciais. As funções de um SIG estão geralmente automatizadas dentro dos diferentes tipos de *software* que existem no mercado, como *ARC/INFO*®, *ARCVIEW*®, *IDRISI*®, *SPRING*®, etc. (SILVA, 2000).

Os dados utilizados em SIG podem ser divididos em dois grandes grupos:

- dados gráficos, espaciais ou geográficos, que descrevem as características geográficas da superfície (forma e posição) e;
- dados não gráficos, alfanuméricos ou descritivos, que descrevem os atributos destas características.

Existem basicamente duas formas distintas de representar dados espaciais em um SIG: Vetorial (*Vector*) e Matricial (*Raster*).

Segundo CÂMARA & DAVIS (1999), os mapas são compostos de pontos, linhas e polígonos. Internamente, um SIG representa os pontos, linhas e áreas como conjunto de pares de coordenadas (X,Y) ou (LONG/LAT). Os pontos são representados por apenas um par. Linhas e áreas são representadas por seqüências de pares de coordenadas, sendo que nas áreas o ultimo par coincide exatamente com o primeiro. Desta forma, são armazenadas e representadas no SIG as entidades do mundo real que são representáveis graficamente, no modelo vetorial (Figura 2.21).

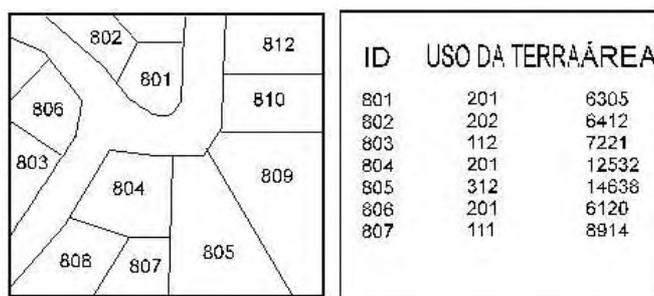


Figura 2.21 - Representação Vetorial com tabela de atributos (CÂMARA & DAVIS, 1999).

O outro formato de armazenamento interno usado pelos sistemas de informações geográficas é o formato matricial ou *raster*. (Figura 2.22). Neste formato, tem-se uma matriz de células, às quais estão associados valores, que permitem reconhecer os objetos sob a forma de imagem digital. Cada uma das células, denominadas *pixel*, endereçável por de suas coordenadas (linha, coluna). É possível associar o par de coordenadas da matriz (coluna, linha) a um par de coordenadas espaciais, (x, y) ou (longitude, latitude). Cada um dos pixels está associado a valores. Estes valores serão sempre números inteiros e limitados, geralmente entre 0 e 255. Os valores são utilizados para definir uma cor para apresentação na tela ou para impressão. Os valores dos pixels representam uma medição de alguma grandeza física, correspondente a um fragmento do mundo real. Por exemplo, em uma imagem obtida por satélite, cada um dos sensores é capaz de captar a intensidade da reflexão de radiação eletromagnética sob a superfície da terra em uma específica faixa de frequências. Quanto mais alta a reflectância, no caso, mais alto será o valor do pixel (CÂMARA & DAVIS, 1999).

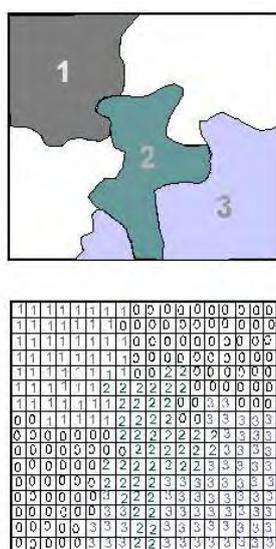


Figura 2.22 - Representação Matricial (CÂMARA & DAVIS, 1999).

Atualmente, os sistemas de informação geográfica (SIG) tornaram-se importantes instrumentos de apoio na elaboração dos trabalhos de mapeamento, principalmente devido a sua eficácia no tratamento e manipulação das informações espaciais e a possibilidade de gerar novos dados a partir da sua integração, organizados em um banco de dados georreferenciado.

#### 2.4.1 BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO

Em geotecnia, mesmo atualmente, pode-se perceber que as informações e ou dados produzidos por pesquisas, muitas vezes, estão armazenados de forma desorganizada, mesmo que eletronicamente (não existe um projeto de armazenamento em bancos de dados). Logo, o que pode resultar em uma não utilização dos dados, por outros profissionais, pois existirá dificuldade na busca, obtenção e visualização dos dados armazenados (BASTOS & ZUQUETTE, 2008).

O banco de dados é uma ferramenta importante para gerir quantidades de informação. As suas potencialidades para armazenar, manipular, editar e selecionar vários tipos e volume de dados, bem como para analisá-los, atualizar ou modificar, constituem instrumentos fundamentais para as tarefas de planejamento e gestão sustentada de um município, bem como para apoiar as atividades de concepção e projeto de engenharia (SILVA, 2000).

Na década de oitenta realizaram-se vários bancos de dados (BD) geotécnicos para algumas áreas urbanas adotando uma estrutura relacional descrita por CODD e que se baseia na teoria dos conjuntos. A estrutura básica dos dados é, neste caso, a relação e a sua materialização é uma tabela (Tabela 2.2). Cada tabela representa uma entidade e cada coluna da tabela corresponde a um atributo e os valores inscritos nas linhas representam o registro da ocorrência daquela entidade. Deste modo, diz-se que estes bancos de dados se baseiam em “valores” (DATE, 2005).

Tabela 2.2– Exemplo de tabela relacional para uma sondagem (DATE, 2005).

ID_Sondagem	ID_Perfil	ID_Relatório	Sond_Relatório	Tipo_Furação	Data_fim	Prof_fim
275	1190	49	Sond.2	Percussão	1967-12	15,40
70	1083	17	S3	Percussão	1994-05	11,00
177	1179	31	A	Percussão	1995-10	23,90
339	1242	69	S-1	Rotativa	1971-10	14,50
341	1241	70	S3	Percussão	1985-05	18,32
342	1240	71	Sond.1	Percussão	1976-08	15,60
346	1221	75	Sond.2	Rotativa	1983-11	19,80

A concepção da estrutura da tabela deve, contudo, obedecer a alguns requisitos, a fim de garantir a viabilidade de execução de operações matemáticas e lógicas sobre as tabelas. As regras para criar uma estrutura relacional (DATE, 2005), são:

- 1- Deve existir apenas uma tabela separada para cada entidade. O nome da relação é o da entidade e os seus atributos são também dos mesmos;
- 2- Cada uma tem exatamente um identificador único, podendo adotar-se números seqüenciais;
- 3- As tabelas devem ser criadas de modo a que os dados que contêm sejam acessíveis, independentemente uns dos outros;
- 4- Não devem ser redundantes, isto é, a mesma relação entre elementos deve estar representada uma só vez. Se esta condição não for respeitada, torna-se muito difícil atualizar e pesquisar os dados, porque eles estão armazenados em mais do que um lugar.

São comercializados vários SGBD relacionais (sistemas de gestão de banco de dados), sendo os mais referidos na bibliografia geotécnica o *ORACLE* da *Oracle Corporation*®, o *INGRES* da *Relational Technology Inc.*® e o *Informix Software Inc.*®. A *Microsoft*® disponibilizou uma versão *ACCESS*®, que permite competir, para banco de dados menores, com os *softwares* anteriormente referidos (SILVA, 2000).

CÂMARA & QUEIROZ (2008) 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.

## 2.4.2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA TRIDIMENSIONAL (3D)

Segundo TURNER (1997), o avanço computacional ocorrido nas duas últimas décadas tem possibilitado o desenvolvimento de aplicações que criam, apresenta e opera 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) (Figura 2.23).

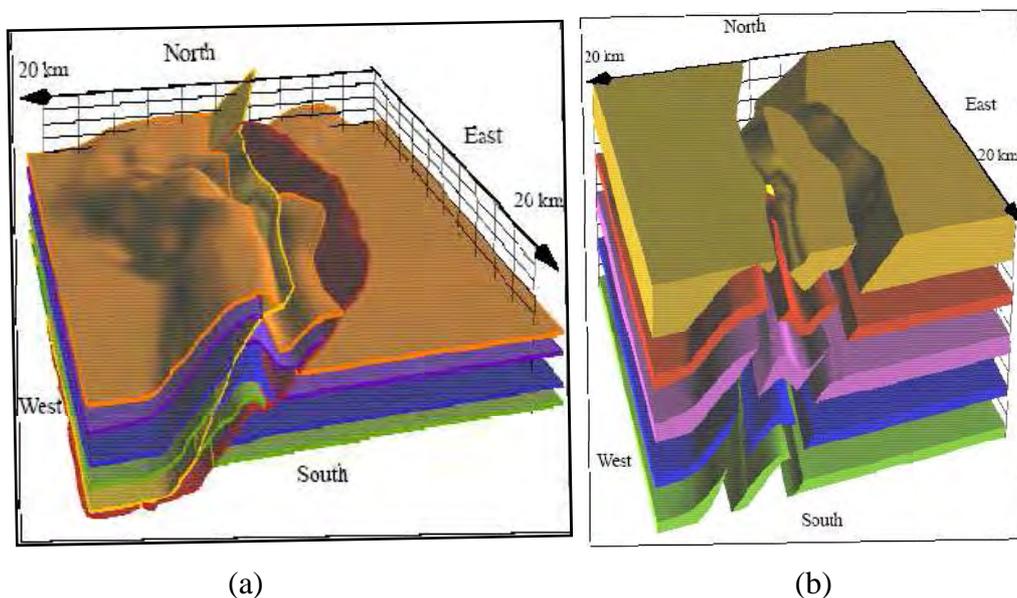


Figura 2.23 – (a) Representação de camadas do subsolo em 2,5D e (b) Representação de dados do subsolo interpolados em 3D.

Um mapa é uma forma de apresentação a duas dimensões (área) da variação de determinados atributos. Contudo, na cartografia das ciências da Terra, a terceira dimensão assume particular importância, tendo em conta as possíveis variações que podem ocorrer em profundidade – desde a constituição litológica e a sua espessura, até as características físicas (teor em água, densidade, permeabilidade, etc.) ou mecânicas (compressibilidade, resistência, etc.) (SILVA, 2000).

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 (SILVA, 2007).

De acordo com SILVA & SOUZA (2008) os sistemas de informações geográficas tradicionais usualmente representam duas dimensões espaciais, permitindo a possibilidade de um atributo do tipo altitude  $z$  para cada posição  $(x, y)$ . Já o SIG 3D tratam as três dimensões  $(x, y, z)$  como atributos espaciais, o que significa que o sistema lida diretamente com a altitude - há um significado semântico para tal informação, não sendo ela um mero atributo. 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. No entanto, os SIGs 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.

Ainda segundo SILVA & SOUZA (2008) os 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. A Figura 2.24 mostra a representação desses objetos. LI (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*.

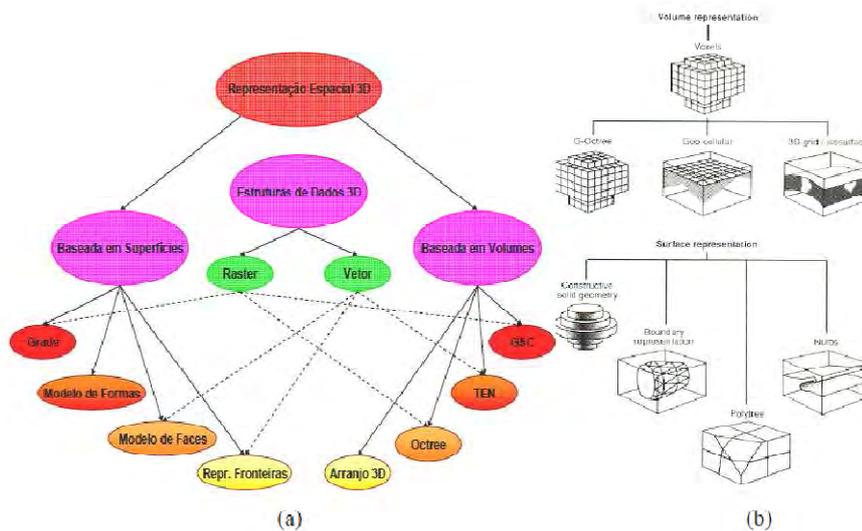


Figura 2.24 – Representação de objetos em ambiente tridimensional (SILVA, 2007). (a) organograma de representação dos objetos 3D e (b) formas de representação dos objetos 3D.

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 2.25 mostra um exemplo da estrutura *raster 3D* e *voxel* (SILVA, 2007).

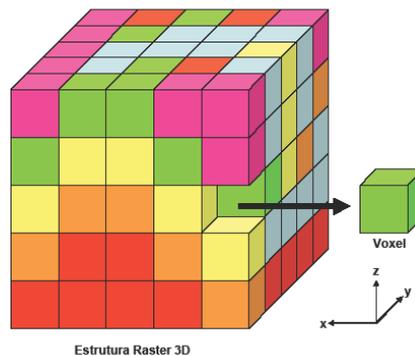


Figura 2.25 – Representação da estrutura raster 3D e voxel (SILVA, 2007).

## 2.5 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO E A GEOESTATÍSTICA

Os métodos de interpolação são usados quando geralmente dispomos de informações pontuais, por exemplo, dados de relatórios de sondagens à percussão, devidamente georreferenciados, em áreas de estudo pré-estabelecidas. A idéia é estimar parâmetros em locais não amostrados na mesma área de estudo.

Sendo necessária em geotecnia a estimativa de valores em locais onde não foram feitos pontos de amostragem, a fase de estimação torna-se um passo importante, visto que a malha de pontos estimada será responsável pela qualidade dos mapas a serem gerados. Os pontos desta malha devem ser estimados de modo a gerar mapas confiáveis podendo, assim, auxiliar nos projetos que requerem estimativas com determinada precisão (STURARO *et al.*, 2000).

Diferentes técnicas podem ser utilizadas para interpolar os valores conhecidos e calcular a grade, sendo que cada uma apresenta suas vantagens e desvantagens. A escolha de uma ou outra técnica irá depender de fatores como a quantidade e a densidade de pontos a serem interpolados, a capacidade de processamento do computador utilizado, o nível de precisão almejado, bem como a disponibilidade de tempo (TALAMINI NETO, 2001).

Os métodos mais comuns de interpolação são: vizinho mais próximo, triangulação de *Delaunay*, inverso da potência da distância (sendo o IQD, inverso do quadrado da distância o mais utilizado) e krigagem.

É mostrada na Tabela 2.3 a seguinte comparação entre métodos, feita por KRAJEWSKI & GIBBS (1996) citado por LANDIM (2000):

Tabela 2.3– Tabela de comparação entre algoritmos.

Algoritmo	Fidelidade as 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
Krigagem	2	3	5	1

1 = melhor; 5 = pior

Ainda segundo LANDIM (2000), os diversos métodos de interpolação podem ser agrupados em duas categorias:

- Funções globais: consideram todos os pontos da área; permite interpolar o valor da função em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais. São enquadradas como interpoladores globais os seguintes: polinômios e equações multiquádricas;
- Funções locais: são definidas para pequenas porções do mapa; alteração de um valor afetará localmente os pontos próximos ao mesmo. Os interpoladores enquadrados nessa categoria são: triangulação, inverso da potência das distâncias e a krigagem.

Ainda segundo o autor, a interpolação ideal é aquela onde:

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

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.

A modelagem geoestatística é um ramo da estatística que lida com problemas associados ao espaço. O uso de procedimentos geoestatísticos baseados em técnicas de krigagem no ambiente de geoprocessamento engloba análise exploratória, geração e modelagem de semivariograma, validação e interpolação por krigagem (LANDIM, 2000).

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.

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. Os métodos de interpolação mais utilizados para o tratamento de dados de solos são: inverso ponderado da distância e krigagem.

STURARO & LANDIM (1996) aplicaram a metodologia geoestatística para verificar o comportamento espacial de 720 sondagens SPT, em Bauru (SP). Mapearam-se nesse trabalho valores médios de índices de SPT para o horizonte superficial do perfil de alteração, por meio da utilização da técnica da krigagem.

TALAMINI NETO (2001) elaborou o mapeamento geotécnico do subsolo de Curitiba, visando a orientação da ocupação subterrânea. Além de dados de sondagens de simples reconhecimento com SPT, foram utilizados dados de poços, de cartas topográficas e de trabalho de campo. As profundidades de camadas litológicas de interesse e o NSPT foram modelados por krigagem.

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 N(SPT) foram espacializados segundo o método de interpolação denominado de método da vizinhança natural. Esse método é mais apropriado em casos em que os pontos amostrados são distribuídos com densidade descontínua.

SILVA (2007) fez a espacialização 3D do subsolo de três áreas em Brasília – DF (Projeto Ilhas do Lago, Universidade de Brasília (UnB) e Setor Sudoeste), com o uso de krigagem, interpolação com o inverso da distância e *voxels*.

Neste trabalho limita-se somente à apresentação da krigagem ordinária e o inverso ponderado da distância, que será a principal ferramenta a se utilizar.

### 2.5.1 KRIGAGEM

Segundo DAVIS (1986) citado por ABEL (2002) o termo krigagem 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. 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, cujo modelamento representa a base de toda a análise geoestatística. Assim, Matheron, durante a década de 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.

Desde os anos 60 até os dias de hoje, a geoestatística tem contribuído para as diversas áreas das geociências, especialmente na pesquisa e avaliação mineral, hidrogeologia, cartografia automática e ciências ambientais.

A krigagem baseia-se na análise e na modelagem da variabilidade espacial do atributo a partir de um conjunto amostral pontual desse atributo. Supõe, ainda, a hipótese de estacionariedade

de segunda ordem para a propriedade que está sendo modelada, ou seja, a média é constante em todas as posições do campo e a covariância só depende da distância entre as amostras (CAMARGO, 1997).

A krigagem é um método de interpolação linear que diferencia dos demais métodos de interpolação por atribuir pesos diferentes às amostras. No caso de interpolação linear simples, os pesos são todos iguais a  $1/n$  ( $n$ =número de amostras) e na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem, 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 krigagem fornece em média estimativas não tendenciosas e com variância mínima (ABEL, 2002).

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

- Krigagem 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.
- Krigagem 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.
- Cokrigagem: 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 krigagem o passo inicial é a construção do semivariograma experimental, no qual em abscissa estão os valores de distância e em ordenada os correspondentes semivariograma  $\gamma(h)$ . Esse gráfico expressa o comportamento espacial das variáveis regionalizadas e mostram as dimensões da zona de influência, aspectos anisotrópicos e presença de eventuais erros de amostragem e ou componentes aleatórios. O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço.

Huijbregts em 1975, citado por ABEL (2002), considera duas variáveis regionalizadas,  $x$  e  $y$ , onde  $x = Z(x)$  e  $y = Z(x+h)$ . Neste caso referem-se ao mesmo atributo medido em duas posições diferentes.

O nível de dependência entre essas duas variáveis regionalizadas,  $x$  e  $y$ , é representado pelo semivariograma, o qual é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os pontos no espaço, separados pelo vetor distância ( $h$ ). A equação (2.1) define a função semivariograma.

$$\gamma(h) = \gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2.1)$$

Onde:

$h$  = vetor distância;

$\gamma(h)$  = semivariograma estimado;

$n$  = número de valores amostrados;

$Z(x_i)$  = variável regionalizada na posição  $x_i$  e;

$Z(x_i+h)$  = variável regionalizada a uma distância  $h$  de  $x_i$ .

Para determinar o semivariograma experimental de um conjunto de amostras que estão irregularmente distribuídos no espaço bidimensional, torna-se necessário inserir uma distância de tolerância para um espaçamento ( $h$ ) e um ângulo de tolerância para a direção. Desta forma, os programas computacionais que calculam os valores semivariográficos, pesquisam os dados em áreas de acordo com essa tolerância para a distância e a direção para o cálculo. Basicamente este procedimento estabelece uma regularização da malha. A Figura 2.26, mostra o esquema de obtenção de valores para semivariograma a partir de rede irregular.

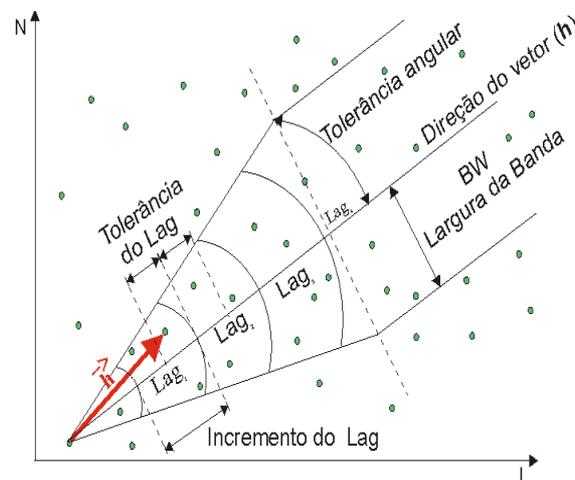


Figura 2.26 – Esquema de obtenção de valores para semivariograma (LANDIM, 1998).

A Figura 2.27 ilustra um semivariograma experimental com características muito próximas do ideal. De acordo com CAMARGO (1997) 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 aleatória muito significativa.

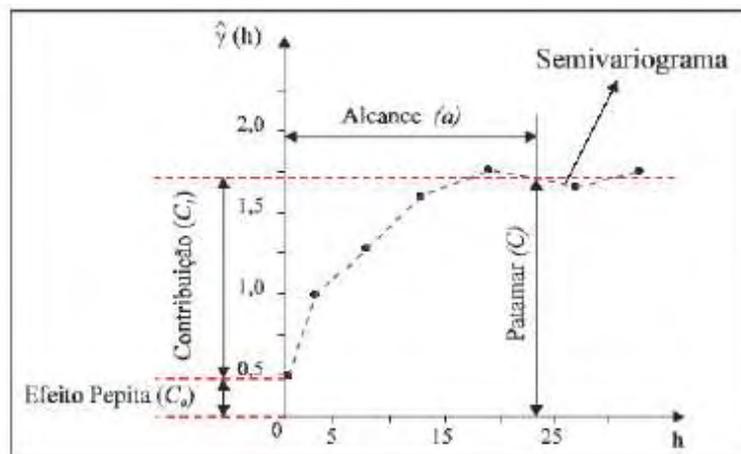


Figura 2.27 – Exemplo de semivariograma experimental (CAMARGO, 1997).

O semivariograma experimental deve ser ajustado por modelos teóricos. Os modelos teóricos existentes estão subdivididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar. Neste trabalho serão referenciados os modelos com patamar, também conhecidos em geoestatística como modelos transitivos. Os modelos transitivos mais utilizados são: modelo esférico, modelo exponencial e modelo gaussiano. A Tabela 2.4 mostra as fórmulas e características de cada modelo e a Figura 2.28 ilustra os gráficos de cada modelo.

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

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

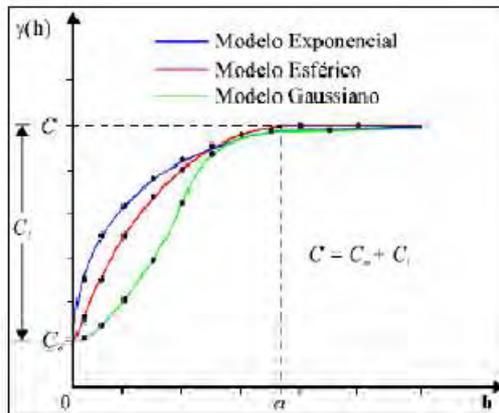


Figura 2.28 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais (CAMARGO, 1997).

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

ABEL (2002) cita que dentre os métodos de estimativas mais empregados, o método geoestatístico 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.

Ainda segundo o autor 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 pode

ser estimado. Dessa forma, pode-se atribuir pesos às amostras utilizadas nas estimativas de tal modo que o erro médio seja zero e a variância dos erros seja mínima.

A estimativa do valor da variável  $\hat{V}(x_0)$  em posição não amostrado  $x_0$  é feita pela combinação linear  $V(x_i)$  para  $i = 1, 2, \dots, n$  por meio da Equação 2.2.

$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i V(x_i) \quad (2.2)$$

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.

$$R(x_0) = \hat{V}(x_0) - V(x_0) \quad (2.3)$$

Onde  $V(x_0)$  representa a modelagem aleatória do valor verdadeiro em  $x_0$ . A variância dos erros pode ser definida pela Equação 2.4.

$$Var\{R(x_0)\} = Var\{\hat{V}(x_0) - V(x_0)\} \quad (2.4)$$

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.

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tilde{C}_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Cuja solução é:

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

$$C_i = C(0)\gamma(h) = C_0 + C_1 - \gamma(h) \quad (2.7)$$

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  $\lambda$  corresponde aos pesos de krigagem e  $\alpha$  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 ( $\sigma_R^2$ ) pode ser calculada pela Equação 2.8.

$$\sigma_R^2 = \sigma^2 - [\lambda]^T x [D] \quad (2.8)$$

### 2.5.2 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:

- Método mais utilizado dentre os métodos de distância ponderada;
- Método utilizado para interpolação e geração de MDT (modelo digital de terreno);
- O peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó da grade a ser estimado;
- Pontos amostrados de localização próxima ao nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distante;
- Ao calcular o valor de um nó, a soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados vizinhos é igual a 1,0, ou seja, é atribuído um peso proporcional à contribuição de cada ponto vizinho;
- Quando a posição de uma observação coincide com um nó, seu valor recebe peso 1,0, enquanto todos os valores vizinhos recebem peso 0,0; o resultado será o nó recebendo o valor exato da observação ali situada.

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  $\geq 10$ : resultam em estimativas "poligonais" (planas);
- Expoente = zero: resulta em estimativas de "média móvel";
- Expoente = 2: inverso do quadrado da distância.

A Equação 2.9 define o processo de cálculo do valor a ser estimado.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (2.9)$$

$Z$  = 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  $Z_i$ ;

$\beta$  = 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.

### ***3. MATERIAIS E MÉTODOS***

---

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Os sistemas de informação geográfica (SIG) são aplicados para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos, esse tratamento será dividido neste trabalho em duas partes principais. A primeira consistirá na checagem e atualização de um sistema de banco de dados digital destinado ao armazenamento e administração dos dados que caracterizam o solo. A outra parte consistirá na modelagem e visualização, usando programas computacionais de SIG.

Do banco de dados de sondagens geotécnicas, delineia-se assim um panorama concernente aos diferentes tipos litológicos da área estudada.

O banco de dados digital existente no programa de pós-graduação em geotecnia da universidade de Brasília foi feito por SILVA (2007). Para a atualização deste banco foram obtidos laudos de 285 furos de sondagens junto às empresas da região. Os relatórios de sondagem destas empresas estão divididos no banco de dados, da seguinte maneira: 1026 relatórios de sondagem pertencentes à empresa EMBRE, 100 à empresa FRANCISCO OLIVEIRA, 128 à empresa INFRASOLO, 72 à empresa MÍSULA, 411 à empresa SONDA e 48 à empresa SOLTEC, totalizando assim 1785 sondagens de simples reconhecimento, do tipo SPT (*Standard Penetration Test*).

A espacialização dos dados de sondagem com o uso de ferramentas de análise geoestatística e interpoladores tridimensionais foi realizada utilizando os programas computacionais *RockWorks 14* e *Spring 4.3.3*. O *Spring 4.3.3* permitiu a visualização e o tratamento integrado de informações como dados de sondagem, modelo digital do terreno, entre outros e a espacialização 2D do banco de dados. O *RockWorks 14* permitiu a construção de modelos tridimensionais (3D).

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 BASE CARTOGRÁFICA

Os dados necessários para a elaboração do banco de dados da área em estudo foram obtidos com a aquisição da base cartográfica do Plano Diretor de Organização Territorial (PDOT) de Brasília de 1998 junto à Codeplan, na escala 1: 2.000 que 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 1 m, e que cobrem toda área de estudo. A Figura 3.1 mostra uma parte da base cartográfica no programa computacional *Spring* 4.3.3.

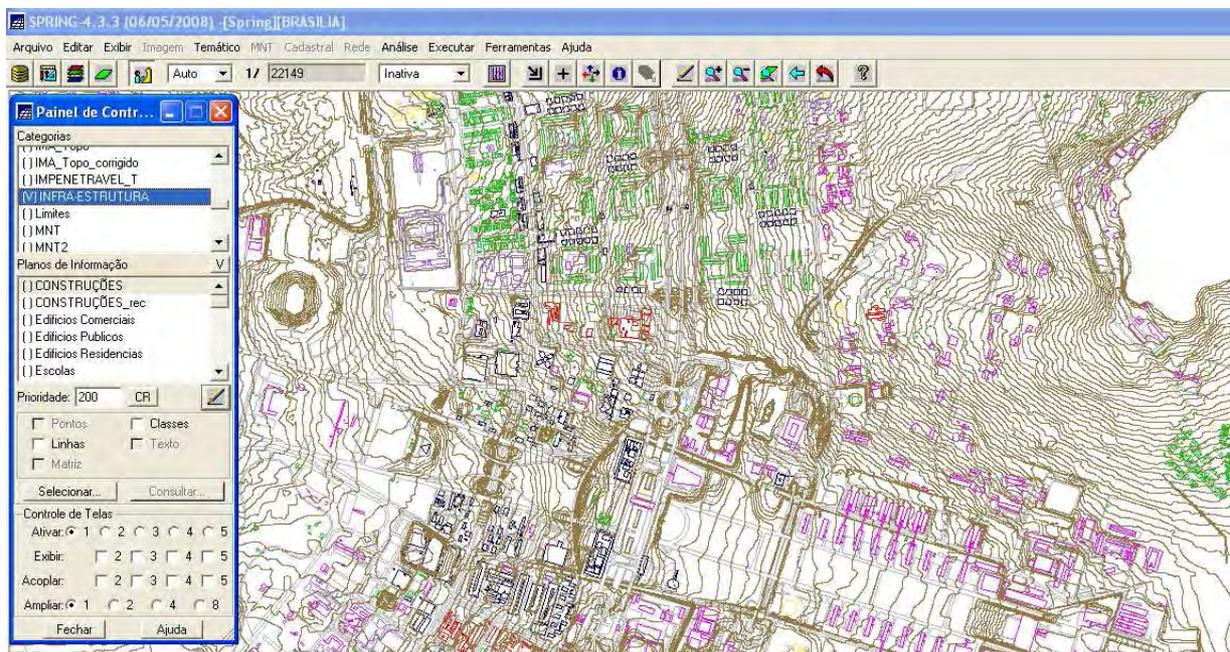


Figura 3.1 – Base cartográfica na escala 1: 2.000 exibida no *Spring* 4.3.3.

### 3.2.3 RELATÓRIOS DE SONDAGEM

Nesta etapa foram realizados os trabalhos com os relatórios de sondagens, visando a sua adequação à pesquisa. Para isso foram estabelecidos determinados padrões, que serão apresentados nos próximos itens, para a descrição dos perfis geotécnicos e atributos de resistência, os quais por fim tornaram possível a espacialização dos dados.

### 3.2.4 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

O programa computacional *Spring* 4.3.3 é um programa de sistemas de informações geográficas (SIG) cedido gratuitamente pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O *Spring* 4.3.3 é um SIG com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais.

Com o *Spring* 4.3.3 foi possível 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.

Outro programa 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 programa *Excel* 2003 da *Microsoft*® é um programa de planilha eletrônica de cálculo, em que permitiu todos os cálculos matemáticos necessários.

E por último foi utilizado o programa computacional *RockWorks* 14, que é 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).

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO

A expansão do banco de dados alfanuméricos na presente pesquisa foi feita a partir de um levantamento de relatórios de sondagens à percussão (ensaio de penetração padronizado - SPT), disponibilizados por empresas de engenharia atuantes na região (EMBRE, MÍSULA, INFRASOLO E SOLTEC) executadas de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001) em diferentes épocas. Foram compilados dados de 275 furos relativos aos boletins dos relatórios de sondagens SPT.

Este tipo de ensaio fornece uma caracterização visual e tátil do solo perfurado, além do parâmetro de resistência  $N_{spt}$  (*Standart Penetracion Test*). Também foram compiladas informações como a profundidade do nível d'água.

O processo de aquisição das informações junto às empresas de fundações foi feita da seguinte maneira: todos os relatórios que estavam em formato analógico foram fotografados e depois as imagens digitais resultantes foram organizadas por ano de realização do ensaio, empresa, e um sistema de endereçamento inserido na própria pasta para facilitar a busca no computador. Os arquivos concedidos pelas empresas em formato digital (arquivos com extensão dxf – AutoCAD), também foram agrupados no mesmo processo de organização: ano de realização do ensaio, empresa e sistema de endereçamento.

Concomitantemente com esse processo de aquisição das informações foi realizada a locação das sondagens em relação à base cartográfica existente. A execução desse procedimento teve caráter eliminatório, pois a incorporação de um relatório de sondagem estava condicionada ao nível mínimo de informação para a sua localização.

O preenchimento do banco de dados envolveu os trabalhos de digitalização dos dados, adequados ao padrão estabelecido, que em conjunto com a localização final dos pontos amostrados, resultou no conjunto de informações ajustadas, possibilitando o desenvolvimento da análise geotécnica coerente dos relatórios de sondagens. Cada ponto inserido na janela de visualização do *Spring* 4.3.3 está relacionado com um código do banco de dados *Access* 2003 da *Microsoft*®, de modo que ao clicar com o identificador, automaticamente abre-se uma janela que contém todas as informações daquele furo de sondagem. Além da atualização do banco de dados, houve a checagem dos dados já existentes.

Os atributos do cadastro georreferenciado dos furos de sondagem foram mantidos sendo eles: 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, descrição do tipo de solo nas camadas, cor do solo nas camadas, valores de  $N_{spt}$  de metro em metro de profundidade.

### 3.2.2 ANÁLISE DAS SONDAGENS

Uma vez atualizado e verificado o banco de dados, como apresentado no item anterior, foram estabelecidos novos critérios a serem adotados na classificação das sondagens. A criação de um padrão teve como objetivo principal ajustar todas as sondagens dentro de um mesmo formato, no que diz respeito à caracterização do material (estratigrafia) e aos limites adotados de  $N_{spt}$ .

A área válida para o trabalho foi definida em função da distância (densidade) das sondagens. Para a caracterização do material (estratigrafia) foram analisadas todas as 1785 sondagens. Estas passaram por um processo de seleção, foram avaliadas as sondagens em blocos separados de acordo com uma malha de 1 x 1 km mostrada na Figura 3.2. Em um conjunto de sondagens com a mesma estratigrafia, foi escolhida apenas uma sondagem representativa. Estas sondagens foram organizadas em uma planilha eletrônica do *Excel* 2003 e então escolhida a sondagem representativa (Figura 3.3). Ao final obteve-se aproximadamente 500 sondagens representativas do total das 1785 sondagens.

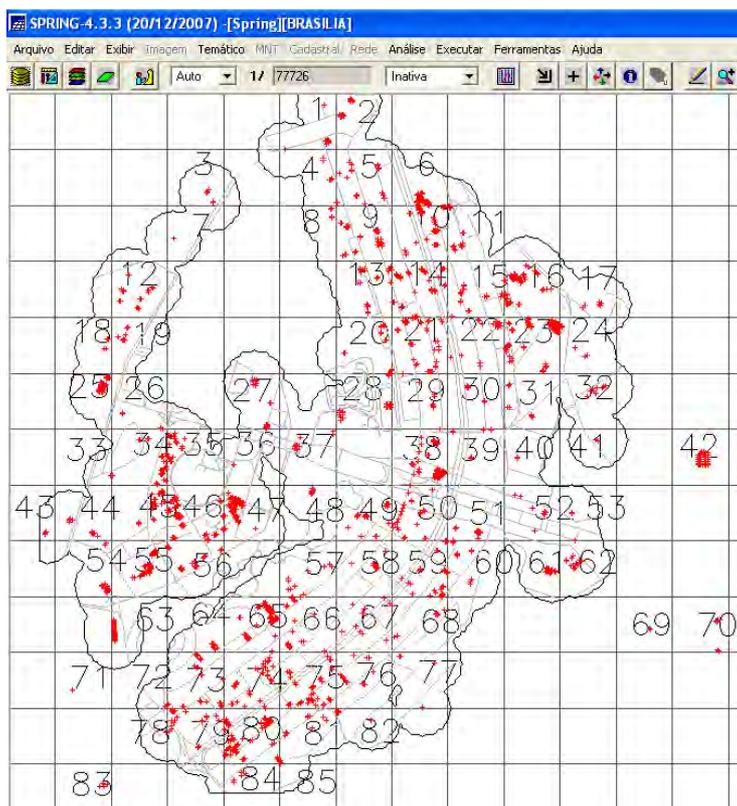


Figura 3.2 - Área de trabalho dividida pela malha de 1 x 1 km para a avaliação das sondagens.

	A	B	C
1			
2	Quadrante	Sondagens	Sondagem-representativa
3	1	1646_1647	SP-1646
4		515-521	SP-517
5	2	1619_1630	SP-1623
6		1711_1717	SP-1716
7	4	1773	SP-1773
8		1365	1365
9		489	489
10		536_538	SP-538
11	5	275-276	
12		1633	SP-1633
13		590_591	SP-590
14		1771-1772	SP-1771
15		1225_1226	SP-1225
16		1546_1547	SP-1547
17		341_343	SP-341
18		1552_1553	SP-1552
19		1468_1469	SP-1468
20		277	
21		264_266	SP-266
22	6	1217_1220	SP-1220
23		996-999	SP-997
24		1142_1146	SP-1144
25		1147_1149	SP-1149
26		919_936	SP-923
27		934	SP-934

Figura 3.3 – Parte da tabela no *Excel 2003* mostrando a sondagem representativa escolhida.

Como não foram utilizadas todas as sondagens para o modelo estratigráfico foram selecionadas aleatoriamente 100 sondagens distribuídas por toda a área de estudo que não foram utilizadas na espacialização para a elaboração de gráficos de dispersão para avaliar a variação do modelo. Estes gráficos estão dispostos no capítulo referente aos resultados. A Figura 3.4 mostra as sondagens representativas, marcadas de preto, e as sondagens escolhidas aleatoriamente para a avaliação da dispersão do modelo, marcadas de vermelho.

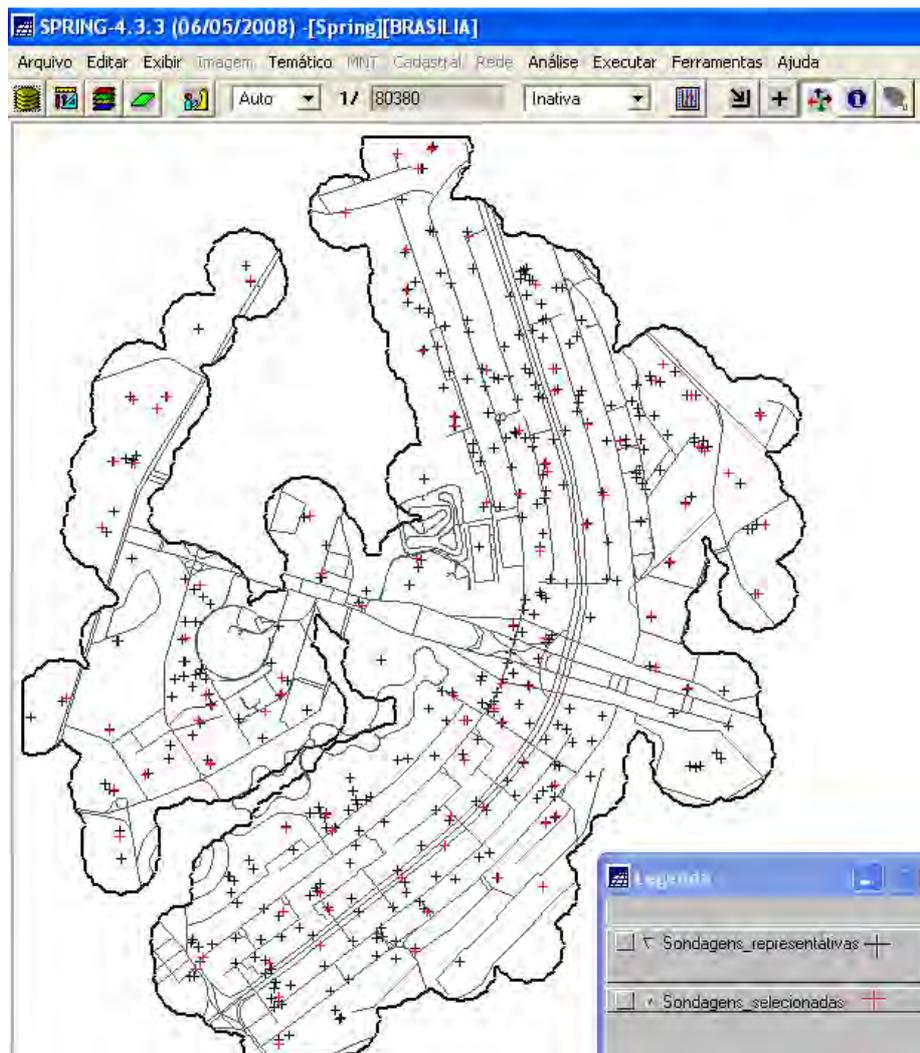


Figura 3.4 – Área de trabalho mostrando as sondagens representativas e as sondagens selecionadas para a avaliação da dispersão do modelo.

A definição de um perfil de solo, foi baseada no perfil geológico proposto por MARTINS (2000) e nos relatórios de sondagem. Convencionou-se a estratigrafia das sondagens, sendo: pedólito, zona ferruginosa, saprólito arenoso e siltoso, respectivamente, obedecendo às unidades deposicionais do grupo geológico Paranoá, em que esta inserida à região. A correlação da descrição da litologia do solo apresentada nos relatórios de sondagem e a estratigrafia considerada aqui, por meio do perfil proposto por MARTINS (2000), é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Descrição da litologia apresentada nos relatórios de sondagem e a estratigrafia correspondente.

<b>Litologia (relatórios de sondagem)</b>	<b>Estratigrafia correspondente</b>
Argila arenosa	<b>Pedólito argiloso</b>
Argila siltosa	
Argila arenosa com pedregulhos	<b>Zona ferruginosa</b>
Argila siltosa com pedregulhos	
Silte arenoso	<b>Saprólito arenoso</b>
Areia	
Arenito	
Quartzito	
Silte argiloso	<b>Saprólito siltoso</b>
Silte roxo	
Silte rosa	

Para observar a predominância de saprólito siltoso ou arenoso na região, foi feita uma espacialização (krigagem) dessas sondagens obtendo como resultado a Figura 3.5, onde o azul indica predominância do saprólito siltoso e o verde do saprólito arenoso.

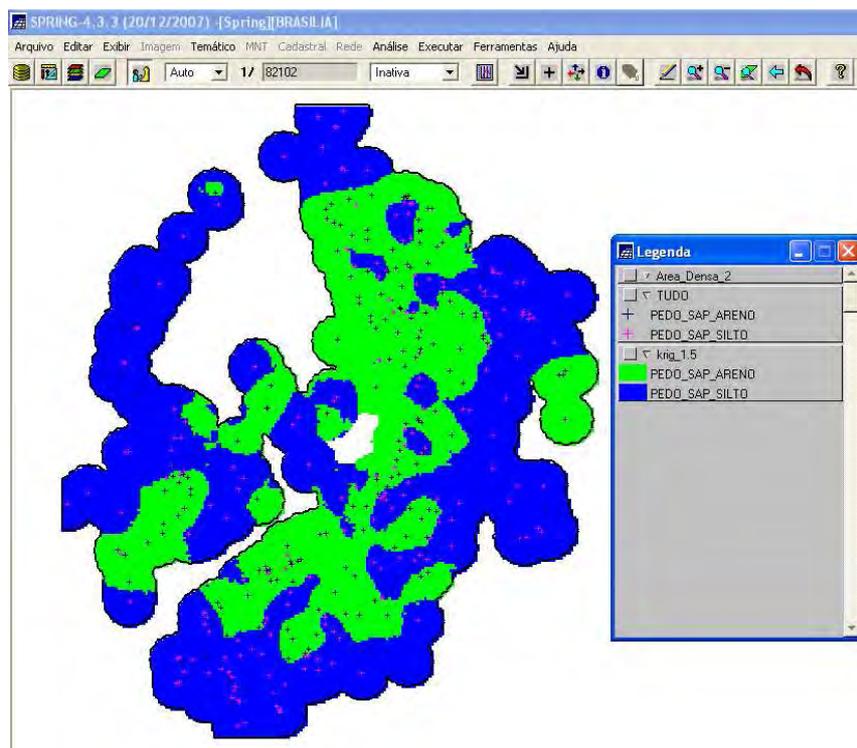


Figura 3.5 – Mapa classificado depois da krigagem mostrando a predominância de cada tipo de saprólito (arenoso/siltoso) na região.

Os valores de  $N_{spt}$  são utilizados para classificar a consistência e compacidade dos solos conforme a Norma NBR - 6484 (ABNT, 2001) mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Classificação do solo de acordo com o valor do N<sub>spt</sub> (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

### 3.2.3 MAPAS BÁSICOS FUNDAMENTAIS

São os mapas que apresentam, em geral, os componentes do meio-físico. Para que sejam considerados fundamentais, os mapas devem possuir atributos essenciais para o estudo. Neste trabalho, consideraram-se fundamentais os seguintes mapas: mapa base topográfico (MNT), e os mapas 3D de N<sub>spt</sub> e da estratigrafia.

#### 3.2.3.1 – MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT)

Um modelo digital de elevação pode ser entendido como uma representação da superfície contínua. Consiste em uma variação ordenada de números que representam a distribuição espacial de elevações acima de um *datum* arbitrário na paisagem. A princípio, um modelo numérico de terreno (MNT) descreve a elevação de qualquer ponto de uma dada área em um formato digital (CÂMARA *et al.*, 1996).

O *Spring* 4.3.3 permitiu gerar uma imagem sombreada a partir do modelo numérico de terreno onde se considera o ângulo azimutal e de elevação de uma fonte luminosa. Essa imagem possibilita visualizar as diferenças de relevo em uma dada região. A imagem sombreada foi gerada a partir de uma grade regular sobre a qual foi aplicado um modelo de iluminação. A Figura 3.6 mostra o modelo numérico de terreno (MNT) no *Spring* 4.3.3, que de uma forma geral é suavemente ondulado, mas que apresenta uma declividade para o sentido leste da área (rumo ao lago Paranoá) e a Figura 3.7 a imagem sombreada gerada a partir do MNT com ângulo azimutal e de elevação de uma fonte luminosa de 45° e exagero vertical igual a 12. Este tipo de visualização possibilitou a comparação das unidades geológicas registradas nos diferentes pontos com a textura do relevo e a possível localização de diversas falhas geológicas existentes na região.

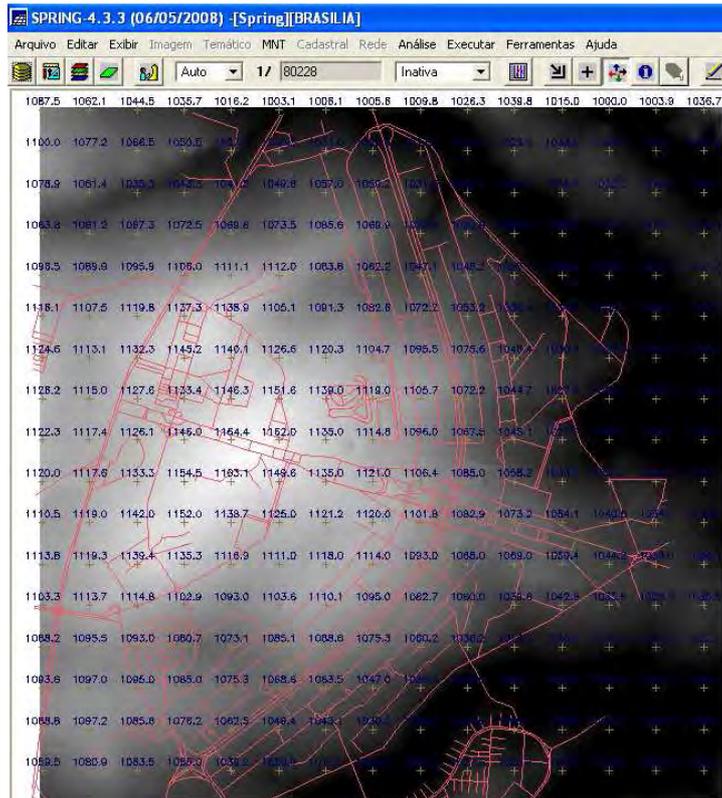


Figura 3.6 – Modelo Numérico do Terreno - MNT.

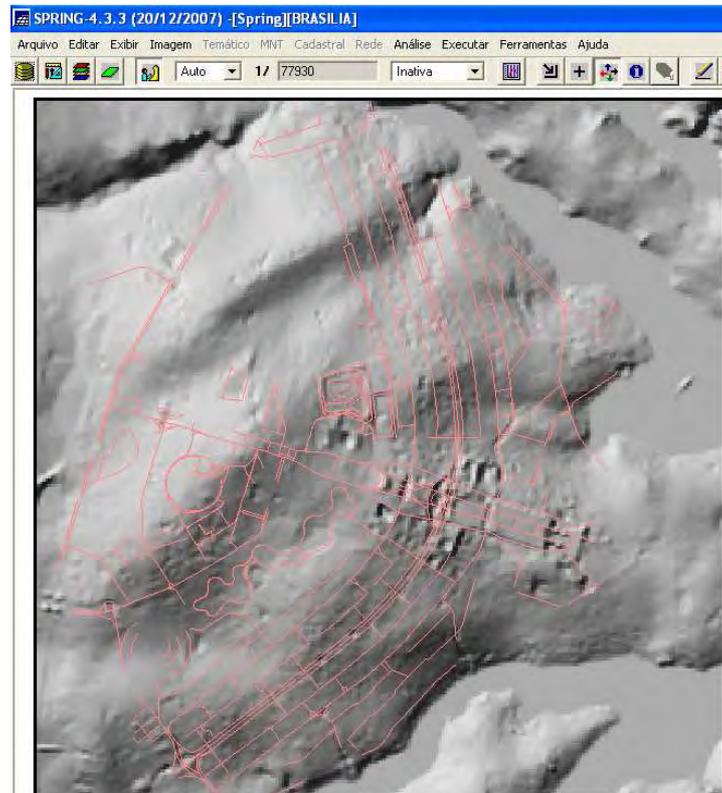


Figura 3.7 – Geração de imagem sombreada no *Spring* 4.3.3.

### 3.2.3.2 GERAÇÃO DOS MODELOS DE SOLO - MODELAGEM 3D

A modelagem 3D do Nspt e da estratigrafia foi realizada a partir dos dados de sondagem utilizando estudo geoestatístico e interpoladores tridimensionais com a geração de grades regulares. Essa etapa consistiu nas seguintes fases:

1) O processo de interpolação tridimensional no *RockWorks 14* começa com a definição da grade 3D (Figura 3.8). As coordenadas UTM que delimitam a área de trabalho (Plano Piloto) são:  $X_{\min} = 183.750$ ,  $X_{\max} = 196.000$ ,  $Y_{\min} = 8.246.500$ ,  $Y_{\max} = 8.259.000$ ,  $Z_{\min} = 970$ ,  $Z_{\max} = 1.170$ , datum Astro-Chuá com meridiano central de  $45^\circ$ .

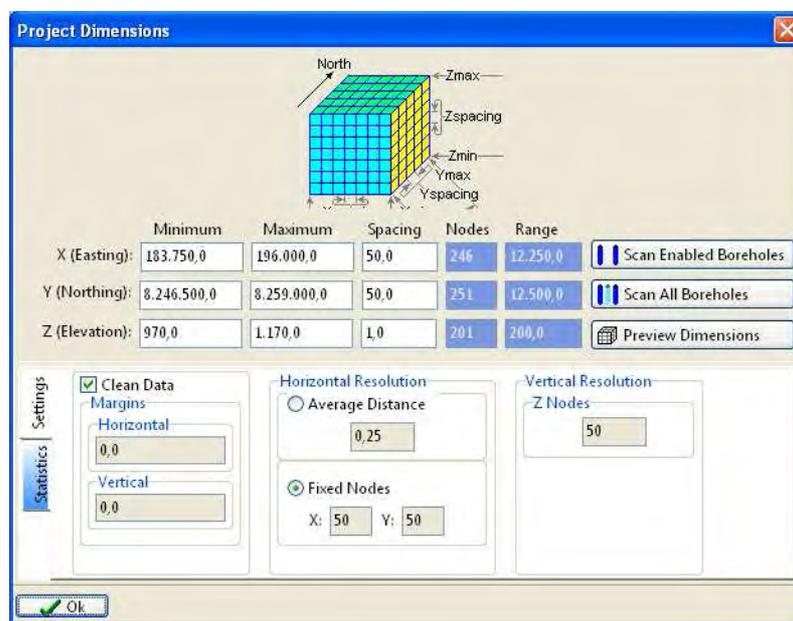


Figura 3.8- Definição da grade 3D no *RockWorks 14* da área de estudo.

2) Definição das coordenadas em (x, y, z) de cada furo de sondagem precedido da profundidade que cada furo atingiu na sondagem (Figura 3.9). A maior profundidade atingida pelas sondagens foi de 44,3 m;

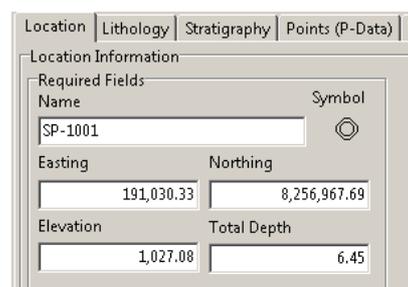


Figura 3.9 – Definição das coordenadas (x, y, z) e a profundidade de cada furo de sondagem no *RockWorks 14*.

3) Definição de um perfil de solo (estratigrafia), baseado no perfil geológico proposto por MARTINS (2000) e com base nos relatórios de sondagem;

4) Definição das faixas de valores de  $N_{spt}$  conforme a Norma NBR - 6484 (ABNT, 2001), classificadas de acordo com a compactidade e consistência do solo;

5) Com todas estas informações o processo de interpolação tridimensional foi feito por meio de interpoladores que tratam de dados em 3D, como a krigagem tridimensional e inverso ponderado da distância;

6) Definição de seções de interesse (2D);

7) Produção de cartas 2D a partir dos modelos 3D.

Os modelos 3D produzidos da estratigrafia e NSPT, e suas seções (2D) de interesse (eixinho norte e W3 norte), estão dispostos no capítulo referente aos resultados.

Foram ainda avaliados três modelos 3D para o estudo de caso de três áreas relevantes para o trabalho. Na Asa Norte a área escolhida foi aquela onde será construída a estação subterrânea e na Asa sul as áreas escolhidas foram as entrequadras mais movimentadas e a área central sul para a construção de garagens subterrâneas. Esses modelos 3D bem como suas seções (2D) de interesse também estão dispostos no capítulo referente aos resultados.

#### 3.2.4 CARTAS DERIVADAS

Os mapas básicos descritos no capítulo anterior são combinados e integrados derivando-se então em novas cartas, denominadas cartas derivadas, que interpretam qualidades significativas, isto é, relevantes para o planejamento. Considera-se neste trabalho relevante para a avaliação da adequabilidade para obras subterrâneas a espessura do material inconsolidado (pedólito, zona ferruginosa e saprólito), a profundidade do impenetrável, a profundidade do nível d' água, os valores de  $N_{spt}$  a diversas profundidades e a distância das construções. Estas cartas são descritas a seguir e mostradas no capítulo referente aos resultados.

O programa *RockWorks* 14 possui sua representação *raster* em coluna enquanto que no *Spring* a representação é em matriz e de forma contrária à representada pelo *RockWorks*, portanto para a representação (2D) no *Spring* foi necessário a conversão dos arquivos GRID gerados

de coluna para matriz, e vice e versa quando necessário, e após a conversão a inversão dessa matriz para a representação *raster* correta no *Spring* 4.3.3. Esses procedimentos foi realizado por meio do programa *Excel* 2003.

A matriz gerada é transformada então em um arquivo em formato ASCII. No *Spring* 4.3.3 o método utilizado para a geração das cartas derivadas foi baseado na análise Legal (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico). Legal é uma linguagem de programação desenvolvida com base no modelo de dados do sistema *Spring*, a qual permite, em uma definição simples, realizar análises e simulações de fenômenos do mundo real sobre os atributos (espaciais e não espaciais) armazenados na base de dados do projeto. As análises e simulações são executadas por meio de operações algébricas, descritas segundo expressões similares às utilizadas na matemática para definição de operações aritméticas. Tais operações, são organizadas segundo regras gramaticais, e envolvem operadores, funções e dados espaciais categorizados segundo modelo de dados do sistema em forma de um arquivo, e utilizado para a álgebra entre os planos de informação.

#### 3.2.4.1 – CARTAS DE NSPT A DIVERSAS PROFUNDIDADES

Foram interpoladas todas as 1785 sondagens existentes no banco de dados para a geração do modelo tridimensional de valores de *Nspt*.

A partir deste modelo tridimensional as cartas derivadas de valores de *Nspt* a determinadas profundidades foram feitas da seguinte maneira:

1) A partir da matriz do modelo numérico do terreno (MNT) gerada no *Spring* 4.3.3 converteu-se para coluna e no *Excel* 2003 foi-se subtraindo as profundidades específicas (3, 6, 9, 12, 15, 20 e 30 m) e então transformado em um arquivo no formato GRD, nomeado, por exemplo, como Topo-3m\_RW.grd;

2) A partir do modelo 3D de *Nspt* e estes arquivos de superfícies foi possível no *RockWorks* 14 gerar um arquivo no formato GRD com valores de *Nspt* a determinadas profundidades (Figura 3.10).

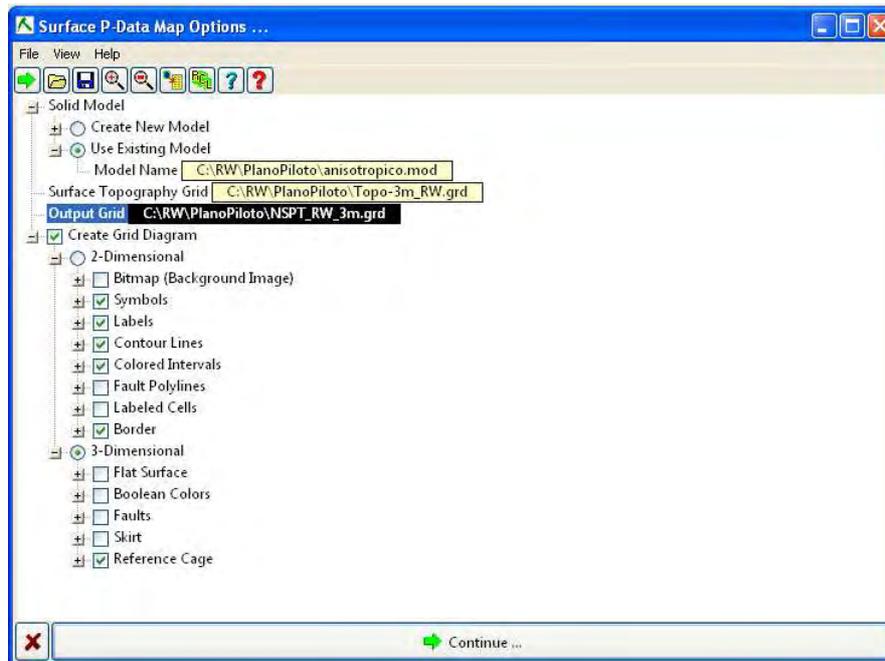


Figura 3.10 – Figura mostrando a janela *Surface P-Data* no *RockWorks 14* para a geração das superfícies de Nspt em determinadas profundidades .

3) Finalmente, a matriz do arquivo no formato GRD gerado no *RockWorks 14* é então invertida, pois o *Spring* lê-se a imagem invertida do *RockWorks*, e gera-se um arquivo em formato ASCII de saída MNT para o *Spring 4.3.3* e então é feito o fatiamento deste MNT nos intervalos de valores desejado.

#### 3.2.4.2 – CARTAS DE ESPESSURAS DOS MATERIAS INCONSOLIDADOS

Foram interpoladas as sondagens representativas (500 sondagens) descritas no item 3.2.2 para a geração do modelo tridimensional da estratigrafia.

As cartas de espessura dos materias inconsolidados (pedólito, zona ferruginosa e saprólitos) foram realizadas a partir deste modelo tridimensional.

A cada modelo 3D de estratigrafia gerado no *RockWorks 14* é gerado simultaneamente arquivos GRID de topo e base para cada camada da estratigrafia. Estes arquivos são transformados para um arquivo ASCII e suas matrizes invertidas. No *Spring 4.3.3* é então realizado a análise com a *Legal* usando operações algébricas de subtração (Topo - Base). Estas operações estão descritas no Apêndice 1.

Para a confecção da carta de espessura dos saprólitos foi mantida a predominância de cada tipo de saprólito (siltoso ou arenoso) na área de estudo conforme Figura 3.4 demonstrada no capítulo anterior.

#### 3.2.4.3 - CARTA DE PROFUNDIDADE DO IMPENETRÁVEL

A espacialização do impenetrável no *RockWorks 14* foi gerada através das sondagens que atingiram o impenetrável (1060 sondagens). E então, a análise no Legal é novamente realizada no *Spring 4.3.3* com uso de operações algébricas de subtração a partir do modelo numérico do terreno (MNT) e do arquivo GRD (topo) do material rochoso do modelo 3D do impenetrável.

#### 3.2.4.4 - CARTAS DE PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA

As cartas de profundidade do nível d'água foram geradas da mesma forma que a carta de profundidade do impenetrável. Foram espacializadas no *RockWorks 14* as sondagens que indicaram o nível d'água, que correspondem no total 400 sondagens.

Foram feitas duas cartas de profundidade do nível d' água:

- uma para o período seco em que foram interpoladas 150 sondagens, datadas de maio até início de setembro;
- e a outra carta para o período chuvoso em que foram interpoladas 250 sondagens, com data de final de setembro até abril.

#### 3.2.5 CARTAS SÍNTESES - ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A partir das cartas derivadas obtêm-se as cartas sínteses, que resultam do cruzamento das cartas derivadas. São documentos finais diretamente utilizados por outros profissionais que avaliam a capacidade, impacto ou aptidão para o desenvolvimento de certas atividades, ou que recomendam ou restringem determinados tipos de uso do solo.

Os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois a dois, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, conforme uma escala pré-definida de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Escala de Valores AHP para Comparação Pareada (CÂMARA *et al.*, 1996).

Intensidade de importância	Definição e Explicação
1	Importância igual - os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada - um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial - um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada - Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema - A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre julgamentos - possibilidade de compromissos adicionais

A partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores, foi possível determinar um conjunto ótimo de pesos que pudessem ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas. A Figura 3.11 mostra a matriz de consistência AHP gerada no *Spring* 4.3.3.

Critério	Peso	Critério	
DISTÂNCIA_CON	2	Um Pouco Melhor	ESTRATIGRAFIA
DISTÂNCIA_CON	2	Um Pouco Melhor	IMPENETRABEL
DISTÂNCIA_CON	3	Algo Melhor	NA_CHUVO
DISTÂNCIA_CON	3	Algo Melhor	NSPT_T
ESTRATIGRAFIA	2	Um Pouco Melhor	IMPENETRABEL
ESTRATIGRAFIA	2	Um Pouco Melhor	NA_CHUVO
ESTRATIGRAFIA	2	Um Pouco Melhor	NSPT_T
IMPENETRABEL	2	Um Pouco Melhor	NA_CHUVO
IMPENETRABEL	2	Um Pouco Melhor	NSPT_T
NSPT_T	2	Um Pouco Melhor	NA_CHUVO

```

// Pesos a ser aplicados
// DISTÂNCIA_CONSTRUÇÕES = 0.298
// ESTRATIGRAFIA_T = 0.219
// IMPENETRABEL_T = 0.208
// NA_CHUVO = 0.097
// NSPT_T = 0.178
    
```

Razão de Consistência: 0.029

Figura 3.11– Matriz de Consistência AHP gerada pelo *Spring* 4.3.3 e os pesos a serem aplicados.

Assim, de acordo com os pesos atribuídos, o procedimento metodológico utilizado para a avaliação dos diferentes atributos para a implantação de obras subterrâneas consistiu em uma análise ponderada destes atributos (Equação 3.1).

$$X = \sum_{i=1}^n (i \times P); \quad i \in \mathbb{R} | 0 \leq i \leq 1,0 \text{ e } \sum P = 1,0 \quad (3.1)$$

Onde:

- X é o valor correspondente a um grau de adequabilidade em uma determinada avaliação.
- i é o índice dado a cada intervalo dos atributos de acordo com o potencial mais favorável à condição que está sendo analisada;

- P é peso atribuído ao atributo analisado de acordo com o nível de importância para a avaliação em questão;
- n é o número de atributos analisados em uma determinada avaliação.

Desta forma são obtidos os valores de X que podem ser associados ao grau de adequabilidade para uma avaliação desejada. Nesta pesquisa foram utilizados os intervalos de valores de X de acordo com o descrito na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Relação entre as classes de adequabilidade e os valores de X.

<b>Grau</b>	<b>Valores de X</b>
Não Adequado	<0,25
Pouco adequado	0,25 a 0,50
Adequado	0,50 a 0,75
Muito Adequado	0,75 a 1,00

Os índices estabelecidos para as classes e os pesos dos atributos podem ser visto na Tabela 3.5.

Um túnel urbano possui comportamento de túnel raso, que tem como ruptura dominante a ruptura de teto, explicando assim os pesos maiores usados para  $N_{spt}$  a pequenas profundidades (até 12 m).

A adequabilidade para obras subterrâneas neste trabalho indica condicionantes em termos de complicações construtivas, implicando custo de construção, que justifica o motivo de um peso maior para o atributo de distância de construções, pois quanto mais perto de construções tem-se um complicador de custo para as obras subterrâneas.

Tabela 3.5– Relação entre os atributos para a determinação da adequabilidade para obras subterrâneas.

Atributos	Classes	Índice das classes			Peso dos Atributos		
		Garagem (1pvt)	Garagem (3pvt)	Metrô	Garagem (1pvt)	Garagem (3pvt)	Metrô
NSPT (3m)	0-3	1	1	0,1	0,1	0,05	0,04
	3-6	0,9	0,9	0,1			
	6-10	0,8	0,8	0,2			
	10-20	0,4	0,4	0,5			
	20-30	0,2	0,2	0,9			
	30-40	0,1	0,1	1			
	>40	0,1	0,1	1			
NSPT (6m)	0-3	0,1	1	0,1	0,08	0,05	0,04
	3-6	0,2	0,9	0,1			
	6-10	0,3	0,8	0,2			
	10-20	0,5	0,4	0,5			
	20-30	0,8	0,2	0,9			
	30-40	1	0,1	1			
	>40	1	0,1	1			
NSPT (9m)	0-3	-	1	0,1	-	0,05	0,04
	3-6	-	0,9	0,1			
	6-10	-	0,8	0,2			
	10-20	-	0,4	0,5			
	20-30	-	0,2	0,9			
	30-40	-	0,1	1			
	>40	-	0,1	1			
NSPT (12m)	0-3	-	0,1	1,0	-	0,03	0,015
	3-6	-	0,2	0,9			
	6-10	-	0,3	0,8			
	10-20	-	0,5	0,5			
	20-30	-	0,8	0,3			
	30-40	-	1	0,2			
	>40	-	1	1			
NSPT (15m)	0-3	-	-	1,0	-	-	0,015
	3-6	-	-	0,9			
	6-10	-	-	0,8			
	10-20	-	-	0,5			
	20-30	-	-	0,3			
	30-40	-	-	0,2			
	>40	-	-	1			
NSPT (20m)	0-3	-	-	1,0	-	-	0,015
	3-6	-	-	0,9			
	6-10	-	-	0,8			
	10-20	-	-	0,5			
	20-30	-	-	0,3			
	30-40	-	-	0,2			
	>40	-	-	1			

Atributos	Classes	Índice das classes			Peso dos Atributos		
		Garagem (1pvt)	Garagem (3pvt)	Metrô	Garagem (1pvt)	Garagem (3pvt)	Metrô
NSPT (30m)	0-3	-	-	0,1	-	-	0,015
	3-6	-	-	0,1			
	6-10	-	-	0,2			
	10-20	-	-	0,5			
	20-30	-	-	0,9			
	30-40	-	-	1			
	>40	-	-	1			
ESPES. PEDO- LITO	0a2m	1	1	0,1	0,08	0,08	0,08
	2a5m	0,8	1	0,2			
	5a10m	0,1	1	0,3			
	10a20m	0,1	0,5	0,9			
	20a30m	0,2	0,4	0,2			
	30a40m	0,3	0,3	0,2			
	>40m	0,4	0,1	0,1			
ESPES. ZONA FERRU- GINOSA	0a2m	0,1	0,1	0,8	0,06	0,06	0,06
	2a5m	0,2	0,2	0,8			
	5a10m	1,0	0,3	0,8			
	10a20m	0,9	0,8	0,6			
	20a30m	0,7	1	1			
	30a40m	0,6	1	1			
	>40m	0,6	1	1			
ESPES. SAPRÓ- LITO (ARE- NOSO/ SILTO- SO)	0a2m	0,1	0,1	0,8	0,08	0,08	0,08
	2a5m	0,2	0,2	0,8			
	5a10m	1,0	0,3	0,8			
	10a20m	0,9	0,8	0,6			
	20a30m	0,7	1	1			
	30a40m	0,6	1	1			
	>40m	0,6	1	1			
PROF. NÍVEL D´ ÁGUA	0a2m	0,1	0,1	0,1	0,10	0,10	0,10
	2a5m	0,1	0,1	0,1			
	5a10m	0,8	0,1	0,1			
	10a20m	0,9	0,8	0,1			
	20a30m	0,9	0,9	0,8			
	30a40m	1	1	1			
	>40m	1	1	1			
PROF. IMPE- NETRA- VEL	0a2m	0,1	0	0,8	0,20	0,20	0,20
	2a5m	0,2	0,1	0,8			
	5a10m	1,0	0,3	0,8			
	10a20m	0,9	1	0,6			
	20a30m	0,7	0,9	1			
	30a40m	0,6	0,7	1			
	>40m	0,6	0,5	1			
DIST. CONS- TRU- ÇÕES	0a5m	0,1	0,1	0,1	0,30	0,30	0,30
	5a10m	0,5	0,1	0,2			
	10a20m	0,8	0,8	0,5			
	20a50m	0,9	0,9	0,9			
	50a100m	1	1	1			
	>100m	1	1	1			

## 4. RESULTADOS

---

### 4.1 BANCO DE DADOS GEORREFERENCIADO E O MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS FUIROS DE SONDAAGEM

Os atributos do cadastro georreferenciado dos furos de sondagem foram mantidos sendo eles: 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, descrição do tipo de solo nas camadas, cor do solo nas camadas, valores de N<sub>spt</sub> de metro em metro de profundidade. Tais atributos podem ser parcialmente visualizados na Figura 4.1 que apresenta um trecho da tabela de consulta do banco de dados no *Spring* 4.3.3.

O banco de dados georreferenciado revelou-se de grande importância, devido à facilidade com que se consulta e se visualiza os dados espacializados, bem como sua descrição. Assim, quando for desejado que as informações sejam visualizadas ou selecionadas em um mapa durante a sua edição, faz-se uso da janela de visualização em conjunto com a janela de tabela, dentro do ambiente *Spring*. A Figura 4.2 mostra o mapa de localização dos furos de sondagem no *Spring* 4.3.3 e a Figura 4.3 mostra o mapa de distância entre estas sondagens, revelando uma boa densidade de dados.

Tabela: PONTOS_COMPLETO_0															
Arquivo Mostrar Ajuda															
	COD_FUR	ANO	EMPRESA	ENDEREÇO	DATA	X	Y	Z	PROF_NA	CT_NA	PROF_IMP	CT_IMP	PROF_SN	CT_SND	E
1726	SP-01	2006	MISULA	SQN 107-BLOCO H	2006107	190900.96770	8254909.118200	1078.629741	0.000000	0.000000	14.150000	1064.479741	14.1500	1064.47974	7.
1727	SP-01	2007	MISULA	SGAN 910- CASA DO	2007701	189431.77430	8255609.489900	1074.057861	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	5.450000	1068.60786	4.
1728	SP-02	2007	MISULA	SGAN 910- CASA DO	2007701	189410.59570	8255617.637500	1073.337207	0.000000	0.000000	5.100000	1068.237207	5.100000	1068.23720	3.
1729	SP-01	2007	MISULA	SHS BLOCO E QUADR	2007128	190352.15120	8251689.489800	1112.314575	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	33.4500	1078.86457	11.
1730	SP-02	2007	MISULA	SHS BLOCO E QUADR	2007128	190358.15110	8251708.568500	1112.000000	0.000000	0.000000	29.450000	1082.550000	29.4500	1082.55000	7.
1731	SP-01	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192417.48310	8254896.699600	1034.303467	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	13.4500	1020.85346	2.
1732	SP-02	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192442.20580	8254913.706400	1031.890137	0.000000	0.000000	9.250000	1022.640137	9.250000	1022.64013	3.
1733	SP-03	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192441.56220	8254888.989100	1033.628174	0.000000	0.000000	11.450000	1022.178174	11.4500	1022.17817	5.
1734	SP-04	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192440.92110	8254864.272400	1034.578369	0.000000	0.000000	12.450000	1022.128369	12.4500	1022.12836	1.
1735	SP-05	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192465.64250	8254881.279300	1032.300049	0.000000	0.000000	14.450000	1017.850049	14.4500	1017.85004	1.
1736	SP-06	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192465.00050	8254856.559700	1034.076904	0.000000	0.000000	13.200000	1020.876904	13.2000	1020.87690	7.
1737	SP-07	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192464.35650	8254831.843400	1035.262695	0.000000	0.000000	13.450000	1021.812695	13.4500	1021.81269	8.
1738	SP-08	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192489.07940	8254848.851000	1032.842407	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	9.450000	1023.39240	6.
1739	SP-09	2008	MISULA	UNB-EDIFICIO DE E	2008514	192488.43630	8254824.133300	1034.655151	0.000000	0.000000	12.450000	1022.205151	12.4500	1022.20515	9.
1740	SP-01	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190027.33900	8251226.473800	1113.619385	0.000000	0.000000	20.450000	1093.169385	20.4500	1093.16938	0.
1741	SP-02	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190063.61750	8251280.954800	1113.649385	0.000000	0.000000	20.450000	1093.199385	20.4500	1093.19938	1.
1742	SP-03	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190096.44780	8251337.185300	1113.769385	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	20.4500	1093.31938	0.
1743	SP-04	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190126.79010	8251394.678200	1113.879385	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	20.4500	1093.42938	1.
1744	SP-05	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190151.28250	8251455.139300	1113.899385	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	20.4500	1093.44938	1.
1745	SP-06	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190176.12940	8251515.420500	1114.099385	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	20.4500	1093.64938	3.
1746	SP-07	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190200.71910	8251575.832200	1114.389385	0.000000	0.000000	15.450000	1098.939385	15.4500	1098.93938	1.
1747	SP-08	2007	SOLTEC	W3 SUL- TRECHO EN	2007119	190222.69430	8251637.570600	1114.809385	0.000000	0.000000	15.000000	1099.809385	16.0700	1098.73938	0.
1748	SP-01	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	185989.19574	8247571.662737	1074.221948	9.080000	1065.14194	18.000000	1056.221948	21.2500	1052.97194	1.
1749	SP-02	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	186039.32955	8247581.431238	1070.521948	5.450000	1065.07194	18.000000	1052.521948	20.0500	1050.47194	1.
1750	SP-03	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	186081.07456	8247630.024722	1075.918335	9.350000	1066.56833	18.000000	1057.918335	21.0800	1054.83833	1.
1751	SP-04	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	186068.93010	8247677.072321	1077.695190	9.670000	1068.02519	18.000000	1059.695190	21.1000	1056.59519	1.
1752	SP-05	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	186112.26570	8247732.135113	1080.000000	12.420000	1067.58000	18.000000	1062.000000	21.3000	1058.70000	1.
1753	SP-06	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	186071.15812	8247782.441264	1080.973511	11.460000	1069.51351	18.000000	1062.973511	19.3000	1061.67351	2.
1754	SP-07	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	186131.28140	8247786.405460	1080.125977	0.000000	0.000000	18.000000	1062.125977	20.4500	1059.67597	1.
1755	SP-08	2007	SOLTEC	FINAL DA ASA SUL/	2007827	186165.88119	8247837.627151	1080.986450	0.000000	0.000000	20.000000	1060.986450	21.3000	1059.68645	1.
1756	SP-01	2008	SOLTEC	W3 NORTE-ENTRE O	2008213	190287.47280	8251843.697100	1108.260010	0.000000	0.000000	14.450000	1093.810010	14.4500	1093.81001	0.
1757	SP-02	2008	SOLTEC	W3 NORTE-ENTRE O	2008213	190334.75610	8251996.551600	1106.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	20.4500	1085.55000	0.
1758	SP-03	2008	SOLTEC	W3 NORTE-ENTRE O	2008213	190390.80890	8252176.001800	1105.470508	0.000000	0.000000	14.000000	1091.470508	15.1000	1090.37050	0.

Figura 4.1 – Tela de consulta do banco de dados georreferenciado dos 1785 furos de sondagens à percussão no *Spring* 4.3.3.

# Mapa de localização dos furos de sondagem

Legenda:

- Igrejas e Templos
- Hospitais
- Escolas
- Edifícios Residenciais
- Edifícios Públicos
- Edifícios Comerciais
- Sondagens

Convenções Cartográficas

- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

1:75.000



Escala gráfica

(Escala original 1:10.000)

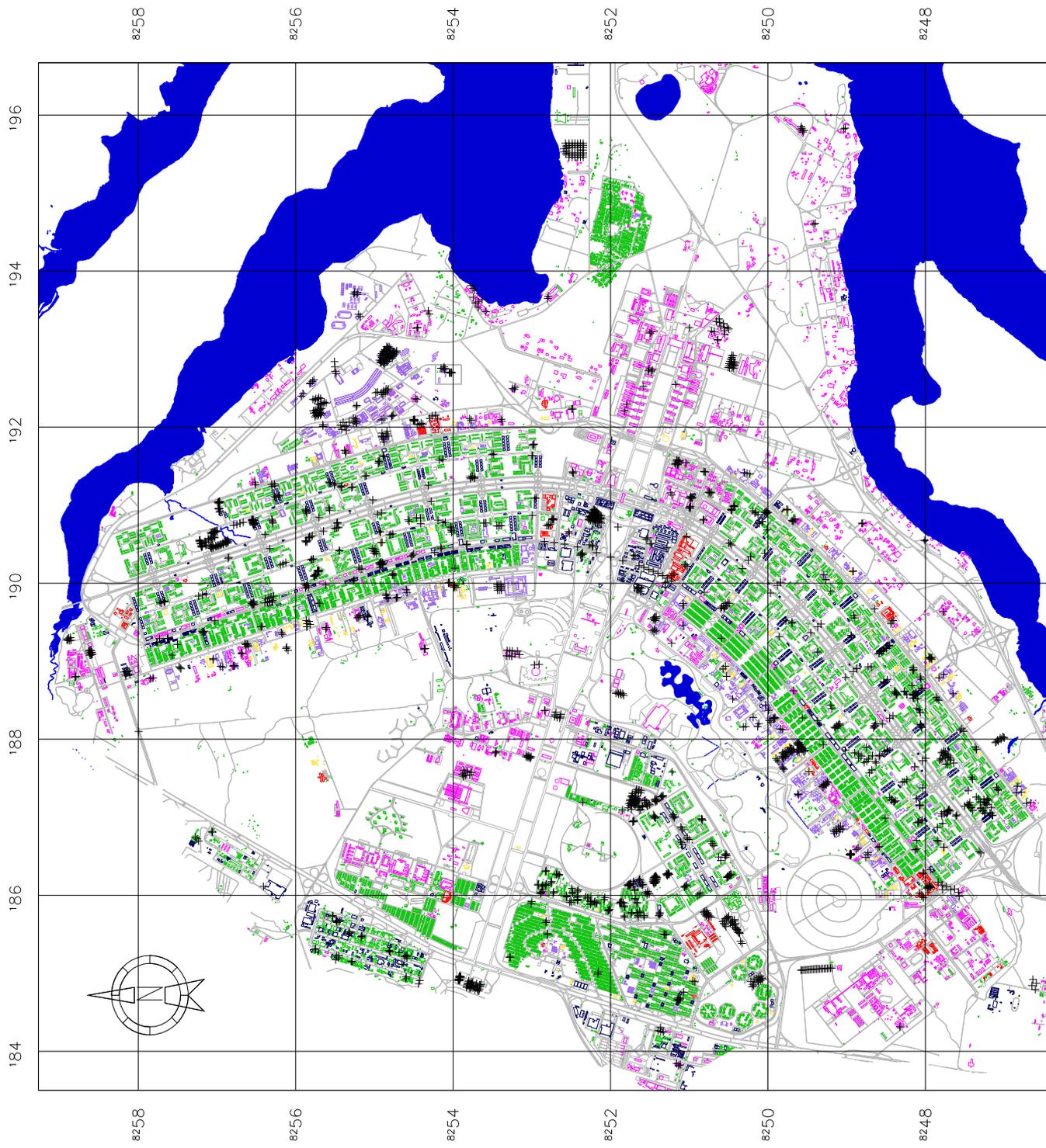


Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.2 – Mapa de localização dos 1785 furos de sondagem à percussão – Brasília-DF.



# Carta de distância entre as sondagens

Legenda:

- 0 a 100 m
- 100 a 250 m
- 250 a 500 m
- 500 a 1000 m
- Sondagens

Convenções Cartográficas:

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

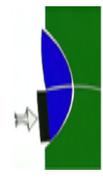
Projeção Transversa de Mercator  
 Datum: Astro-Chuá  
 Meridiano Central 45° WGr

1:75.000



Escala gráfica

(Escala original 1:10.000)



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

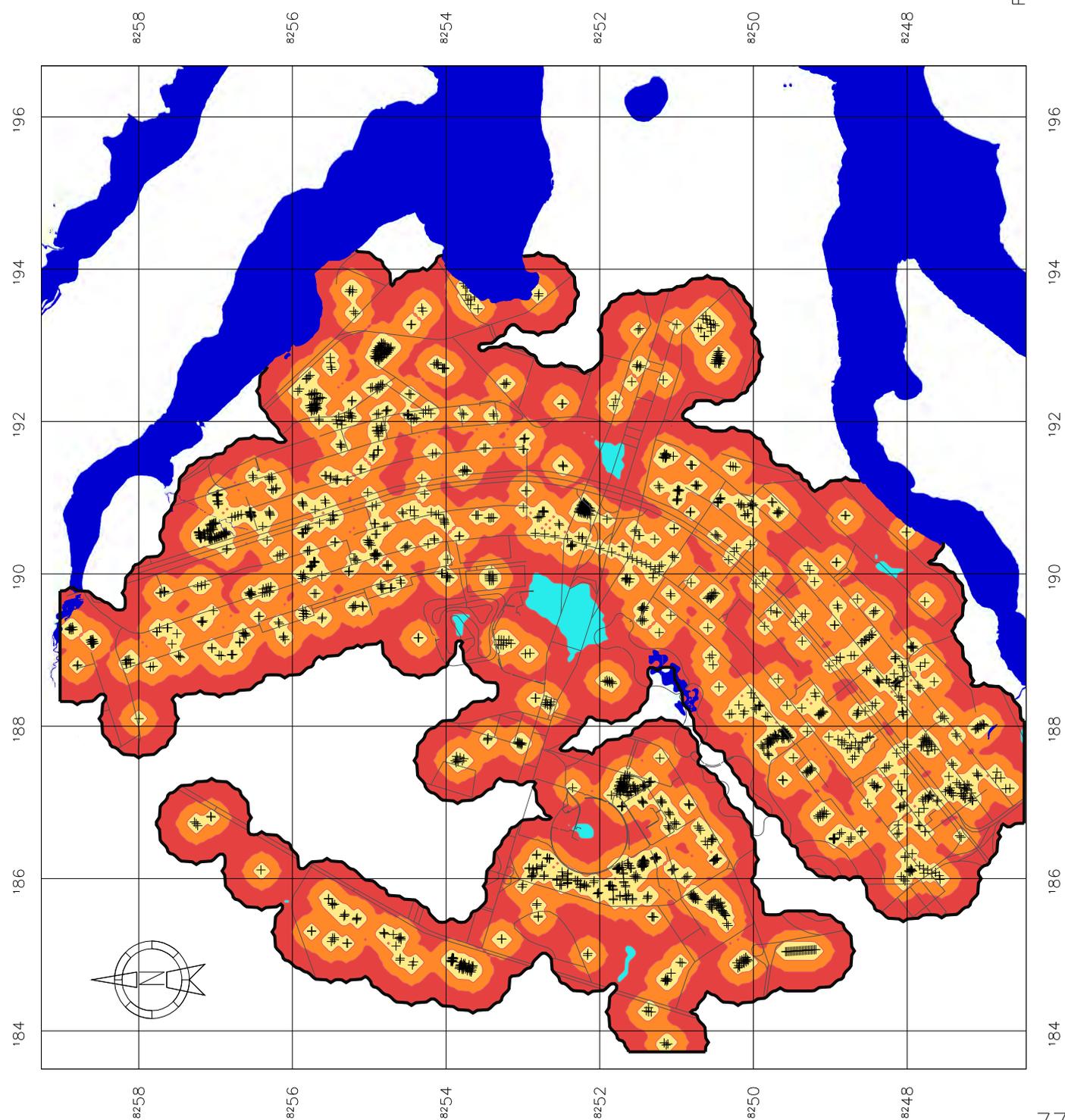


Figura 4.3 – Mapa de distância entre as sondagens.

## 4.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS MODELOS

As cores da estratigrafia visualizadas nos perfis de solo apresentados foram escolhidas para favorecer a visualização, tanto em tela do computador quanto em formato impresso, apesar de que o pedólito argiloso, representado pela argila, cuja cor usada foi a vermelha ser a cor, desse tipo de solo, encontrada efetivamente na região de estudo. E o saprólito siltoso, correlacionado com o saprólito da ardósia, cuja cor usada foi a roxa ser também a cor, desses tipos de solos, encontrada efetivamente na região.

A dimensão horizontal é muito maior que a vertical, obrigando o usuário a aplicar valores de exagero vertical para melhor visualizar o modelo.

Há várias opções para representar graficamente os furos de sondagem no programa *RockWorks 14*, que vão desde a simples representação bidimensional em forma de círculo até a forma tridimensional de representação, chamada de *striplogs*. A Figura 4.4 mostra a representação tridimensional dos dados de estratigrafia (representação de cilindros de mesmo diâmetro) e valores de Nspt (forma de cilindros com diâmetro variável).

Esta forma de representação *striplogs* foi extremamente útil, pois ajudou na avaliação de certos resultados. Pode-se observar na Figura 4.4 o aumento do Nspt quando passa da camada do pedólito e atinge a camada de saprólito ou quando atinge a zona ferruginosa.

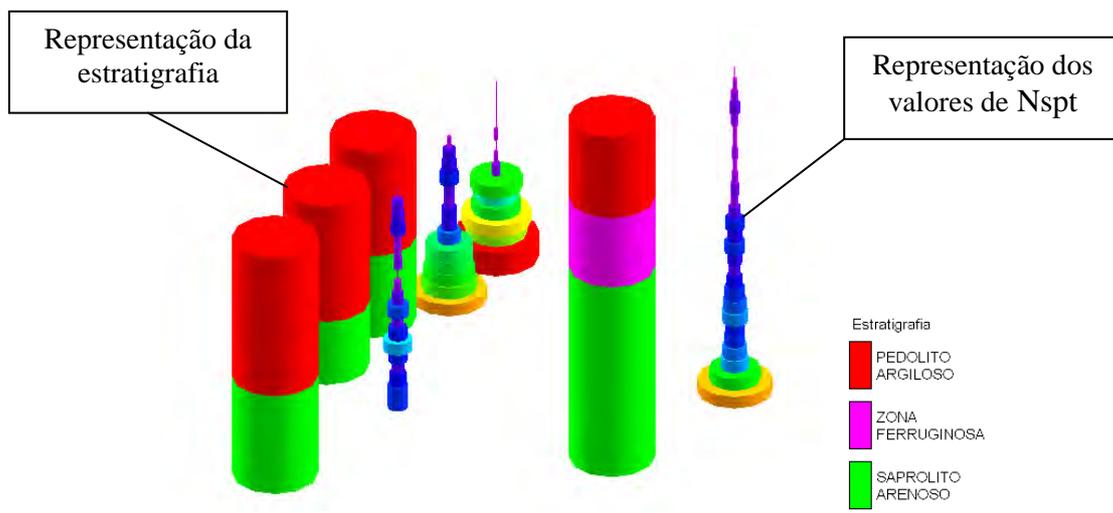


Figura 4.4 – Representação gráfica em 3D dos furos de sondagem no *RockWorks 14*.

### 4.3 MAPAS BÁSICOS - MODELOS 3D

Os mapas básicos são considerados mapas fundamentais por possuírem atributos essenciais para o estudo. Os modelos tridimensionais de N<sub>spt</sub>, da estratigrafia, da superfície do nível d'água, do impenetrável e o mapa 2D do modelo numérico do terreno, são considerados mapas básicos, pois as novas cartas são derivadas destes mapas. Neste capítulo serão apresentados os mapas básicos tridimensionais.

A Figura 4.5 apresenta uma visão geral, da região do Plano Piloto de Brasília, dos níveis de N<sub>spt</sub> interpolados e espacializados volumetricamente.

A Figura 4.6 apresenta uma visão geral 3D dos horizontes de solos identificados na área de estudo. De um modo geral a área compreende quatro camadas de solos, que são o pedólito argiloso, a zona ferruginosa, o saprólito arenoso e o saprólito siltoso. Estas quatro camadas estão posicionadas estratigraficamente do topo para a base.

A Figura 4.7 apresenta o modelo tridimensional do impenetrável gerada no *RockWorks 14* e a Figura 4.8 a superfície interpolada no *RockWorks 14* do nível d'água.

A partir do momento em que a espacialização tridimensional é realizada torna-se possível extrair os valores de N<sub>spt</sub> a diversas profundidades bem como a espessura do material inconsolidado, a profundidade do impenetrável e do nível d'água como mostra as cartas derivadas destes modelos 3D que serão descritas no item a seguir.

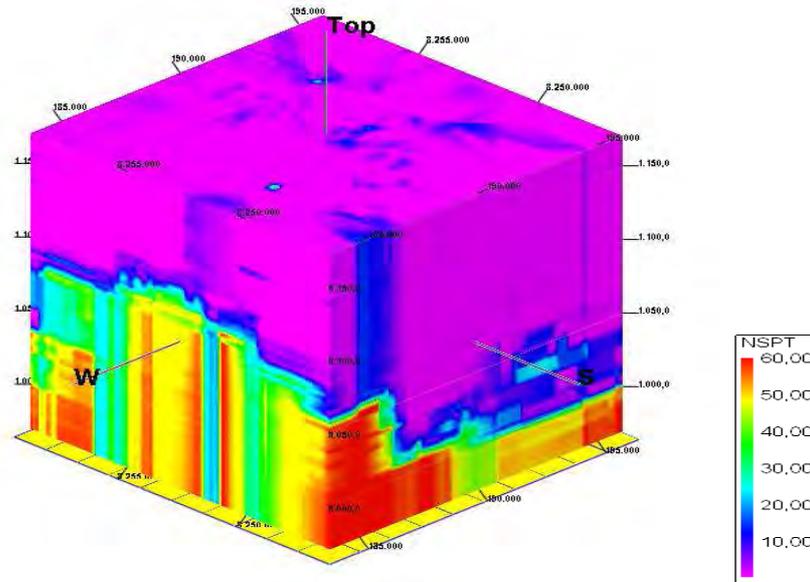


Figura 4.5 - Modelo tridimensional (3D) de N<sub>spt</sub>, com exagero vertical de 35, da região de estudo - Plano Piloto.

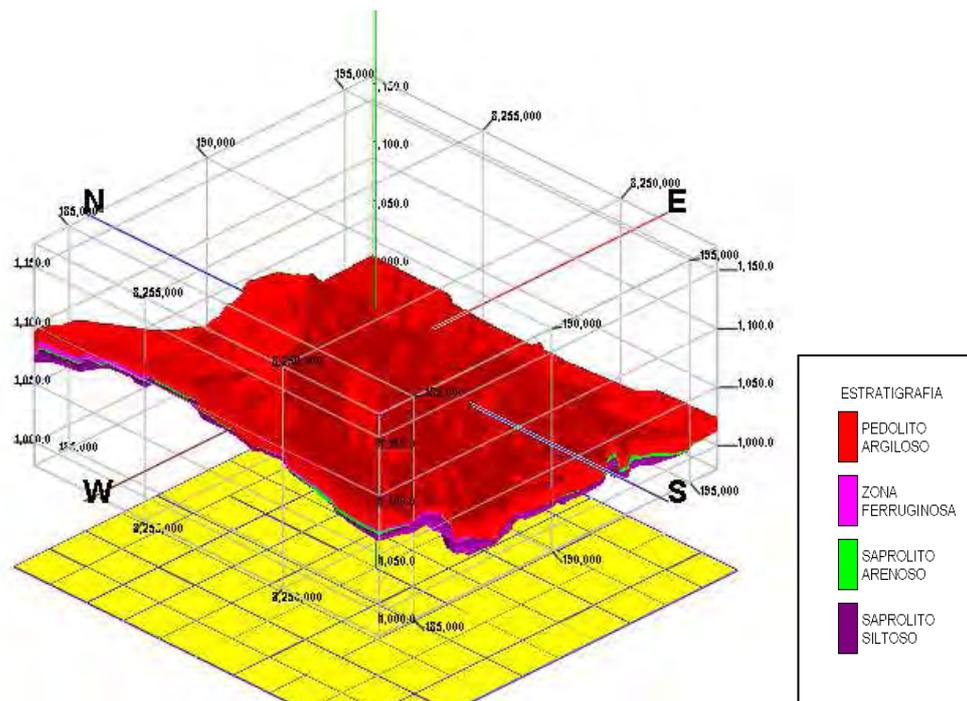


Figura 4.6 – Modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 35, mostrando todas as camadas de solo, da região de estudo - Plano Piloto.

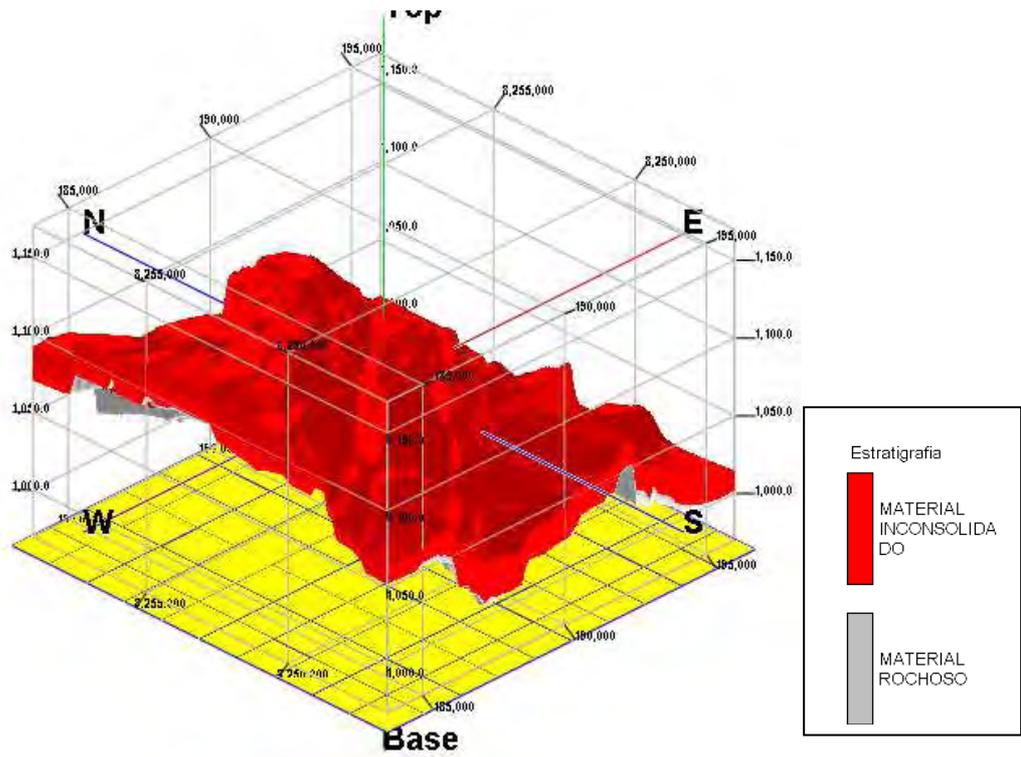


Figura 4.7 - Modelo 3D do impenetrável com exagero vertical de 45.

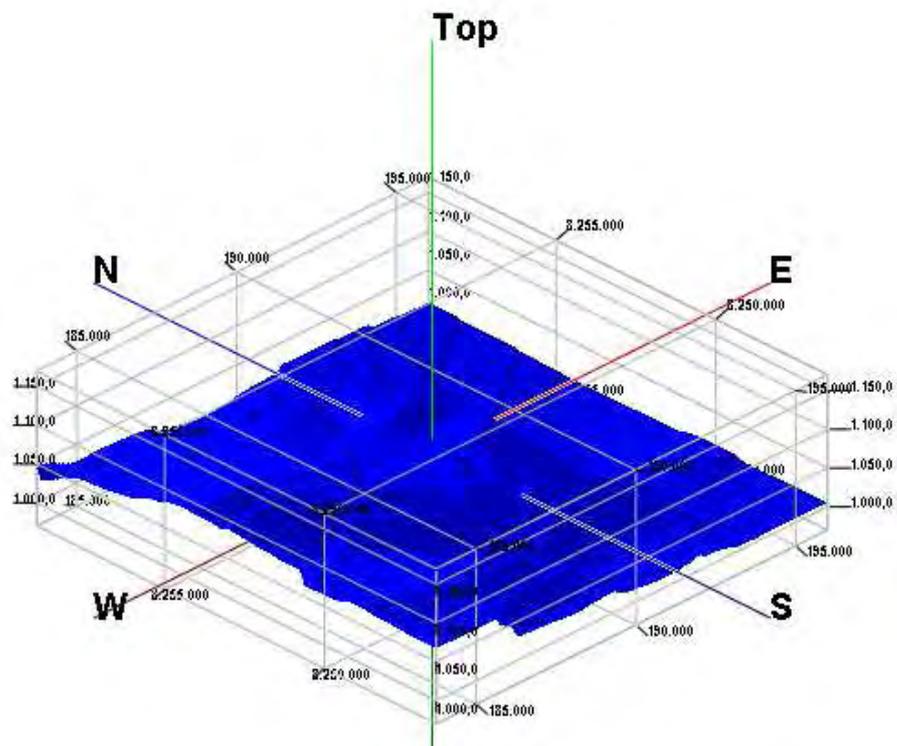


Figura 4.8 - Superfície interpolada do nível d'água gerada no RockWorks 14.

#### 4.4 CARTAS DERIVADAS

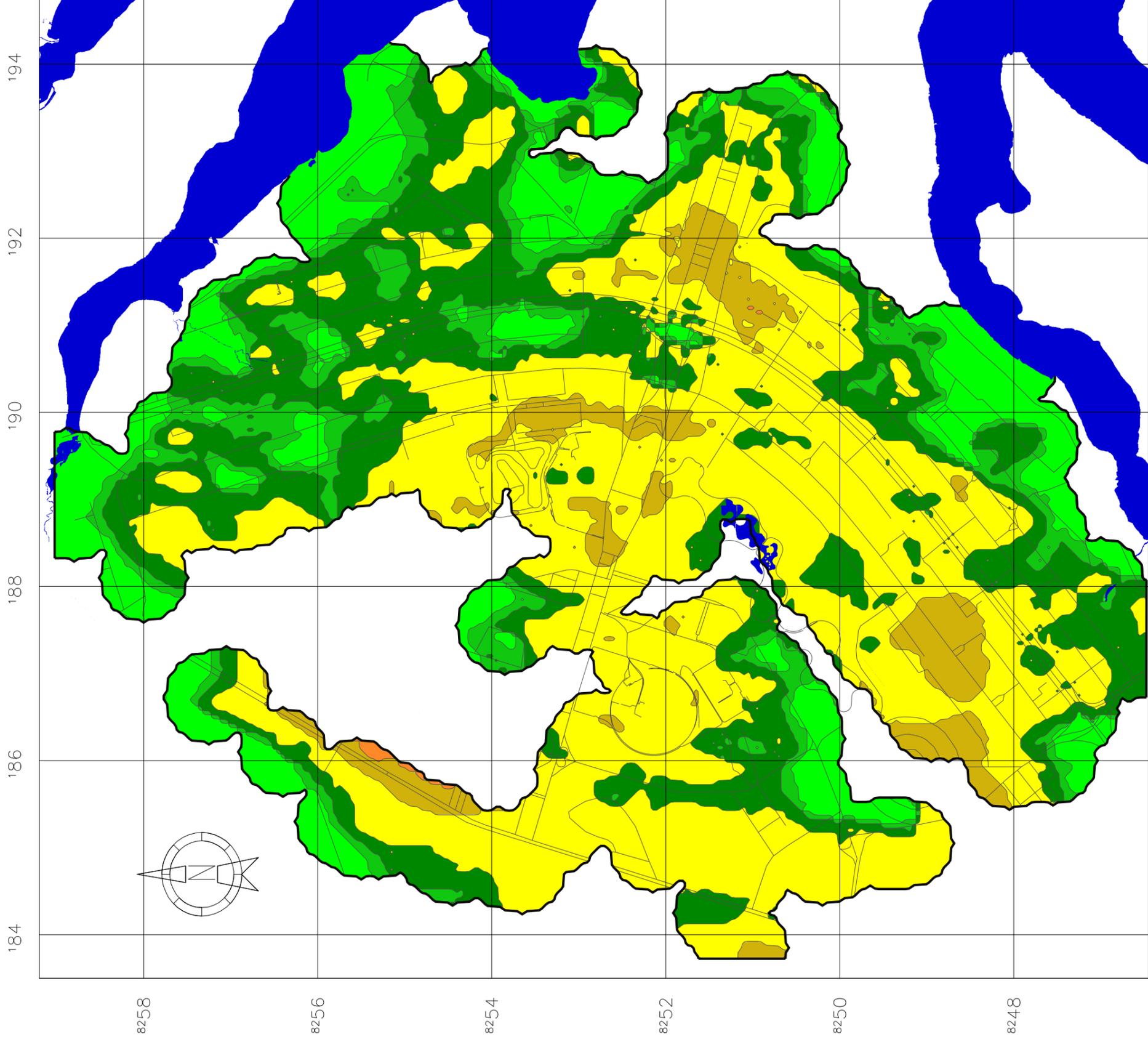
As denominadas cartas derivadas interpretam qualidades significativas, isto é, relevantes para o planejamento. Considera-se neste trabalho relevante para a avaliação da adequabilidade para obras subterrâneas a espessura do material inconsolidado (pedólito, zona ferruginosa e saprólito), a profundidade do impenetrável, a profundidade do nível d' água, os valores de  $N_{spt}$  a diversas profundidades e a distância das construções.

Todo mapeamento geotécnico que objetiva o planejamento urbano deve fornecer documentos que sejam facilmente compreendidos por profissionais de outras áreas técnicas, permitindo a esses visualizarem a distribuição superficial de materiais geotécnicos com diferentes comportamentos.

##### 4.4.1 ESPESSURA DO PEDÓLITO

A Figura 4.9 apresenta a espessura do pedólito argiloso. Este material correlaciona-se com a argila siltosa, a argila arenosa e horizontes de solos argilosos colapsíveis denominados como “argila porosa” encontrados na região. Apresenta-se predominantemente com valores de  $N_{spt}$  baixo e médio. Esta camada é contínua em toda a área, com coloração vermelha variegada. A espessura do pedólito varia de pequenas espessuras (0 a 2 m) até altas espessuras (30 a 40 m). No entanto, ocorrem espessuras de 30 a 40 m em uma pequena área no Setor de Autarquias Sul.

Na maior parte da Asa Norte a espessura do pedólito está entre 0 a 10 m, chamando a atenção para a área do Eixinho-Norte onde será construída a extensão do metrô subterrâneo. Na Asa Sul a maior parte de sua área a espessura do pedólito encontra-se de 10 a 20 m. É importante destacar também o eixo monumental, onde ocorrem espessas camadas de pedólito (10 a 30 m).



# Carta de espessura do Pedólito

8258

Legenda:

- 0 a 2 m
- 2 a 5 m
- 5 a 10 m
- 10 a 20 m
- 20 a 30 m
- 30 a 40 m

8256

Convenções Cartográficas

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

8254

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

8252

1:50.000



Escala Gráfica

(Escala original: 1:10.000)

8250

Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



8248

Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.9 – Carta de espessura do Pedólito

A Tabela 4.1 e a Figura 4.10 mostram a frequência em cada classe da espessura do pedólito na região de estudo. Observa-se uma maior ocorrência na região da classe de 10 a 20m.

Tabela 4.1 – Áreas de classes da espessura do Pedólito.

ÁREA (ESPESSURA PEDÓLITO)	CLASSES (m)					
	0 - 2	2 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40
Km <sup>2</sup>	12,8	6,8	18,3	32,5	4,8	0,1
Por cento (%)	17,1	9,0	24,3	43,1	6,4	0,1

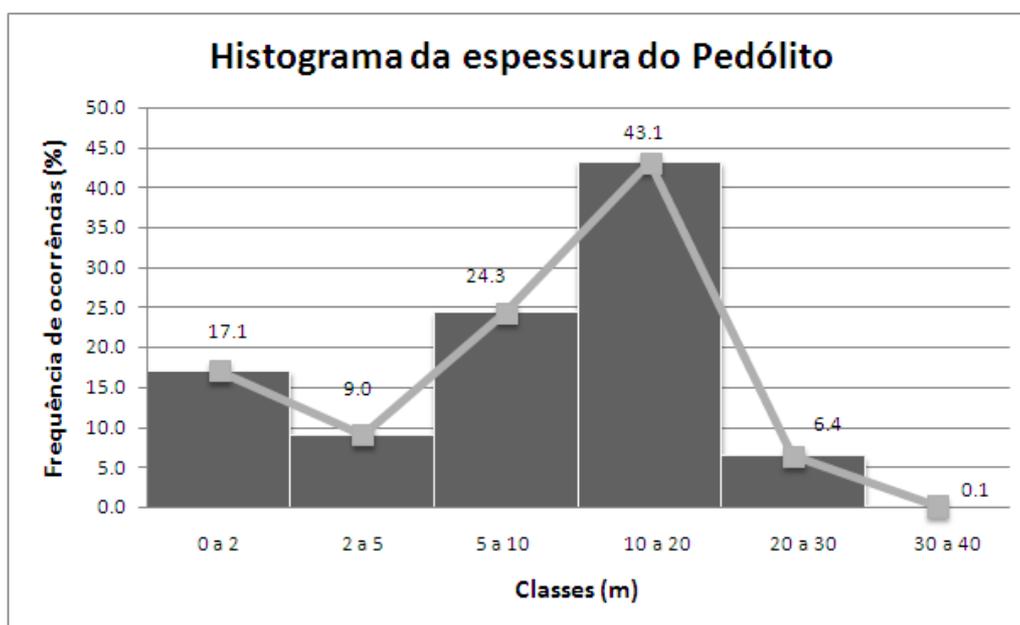


Figura 4.10 – Histograma da espessura do Pedólito.

Como não foram utilizadas todas as sondagens para o modelo estratigráfico foram elaborados gráficos de dispersão para avaliar a variação do modelo com sondagens (100 sondagens) selecionadas aleatoriamente distribuídas por toda a área de estudo que não foram utilizadas em sua espacialização.

A dispersão obtida após correlacionar os resultados da espessura do pedólito com o modelo estratigráfico e com sondagens que não foram utilizadas neste modelo, apresentou valor de R<sup>2</sup> próximo de 0,74, conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.11. Assim pode-se afirmar que 74% da variação total das sondagens que não foram utilizadas no modelo podem ser explicadas por ele.

Percebe-se também na Figura 4.11, comparando a reta de regressão linear com a reta de  $y = x$ , que o modelo superestima para as pequenas espessuras e subestima para as maiores espessuras de pedólito.

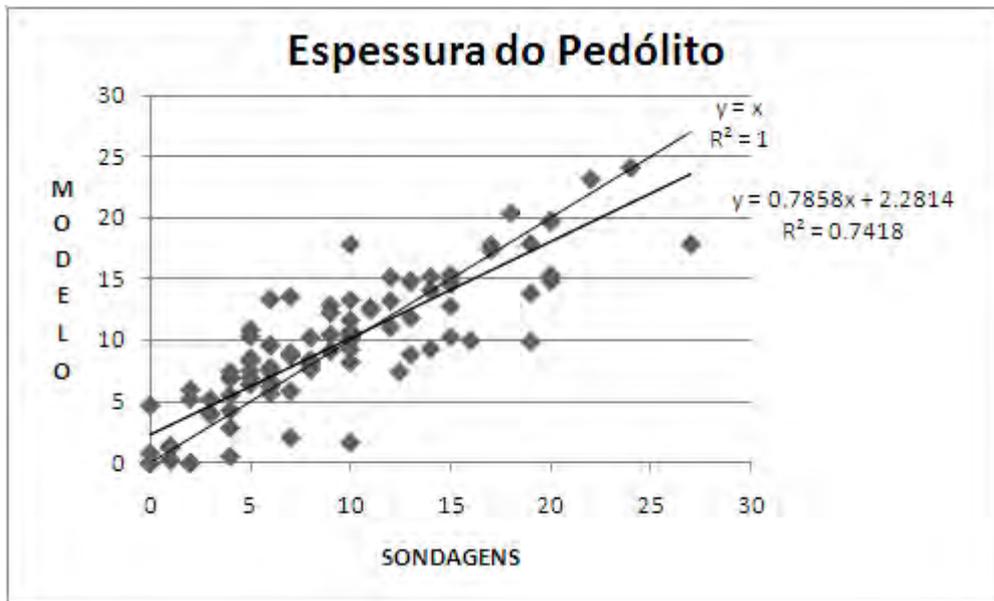


Figura 4.11 - Relação da espessura em metro do Pedólito entre as sondagens e o modelo estratigráfico.

Na Figura 4.12 tem-se o histograma da diferença da espessura entre o modelo e o valor da sondagem para a espessura do pedólito, em que se percebe uma maior frequência de erro do modelo entre as classes de espessuras de -1 a 2 m.

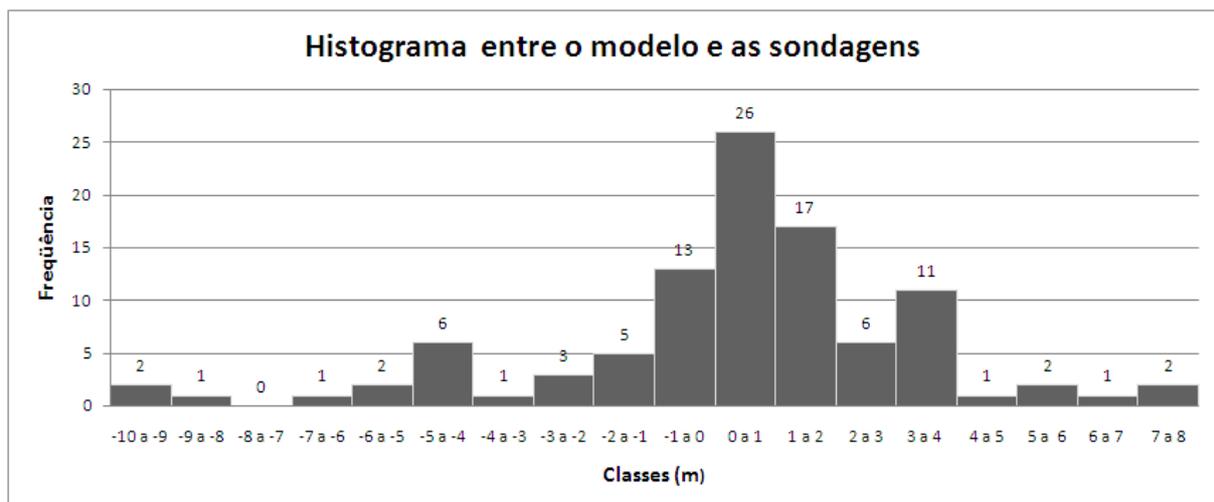


Figura 4.12 – Histograma da diferença da espessura entre o modelo e o valor da sondagem.

#### 4.4.2 ESPESSURA DA ZONA FERRUGINOSA

A Figura 4.13 apresenta a espessura da zona ferruginosa. Este material representa a argila contendo concreções lateríticas encontradas normalmente na região, argila arenosa com pedregulhos e a argila siltosa com pedregulhos. Encontra-se predominantemente com valores de  $N_{spt}$  médio e alto e com coloração vermelha variegada. Esta camada é mais restrita que a primeira, ou seja, não ocorre em toda a área e está sempre em contato inferior com a camada do saprólito e superior com a camada do pedólito. Na maioria da área encontram-se espessuras pequenas de 0 a 5 m, no entanto aparecem em algumas áreas restritas com espessuras maiores variando de 5 a 10 m e 10 a 20 m.

# Carta de espessura da Zona Ferruginosa

Legenda:



Convenções Cartográficas



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chudá

Meridiano Central 45° WGr

1:50.0000



Escala gráfica

(Escala original 1:10.00000)

Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

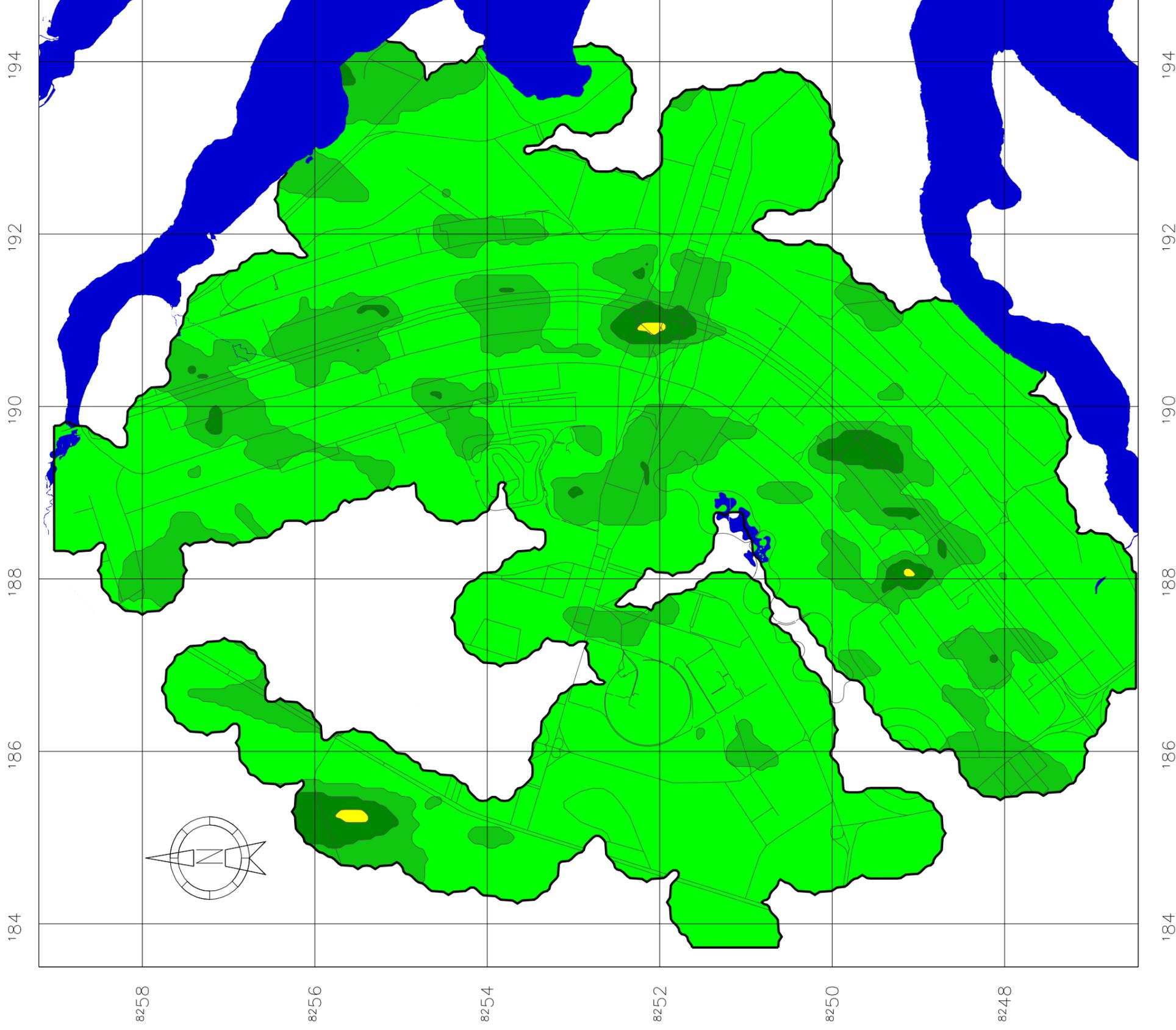


Figura 4.13 – Carta de espessura da Zona Ferruginosa

A Tabela 4.2 e a Figura 4.14 mostram a frequência em cada classe da espessura da zona ferruginosa na região de estudo. Observa-se uma maior ocorrência na região da classe de 0 a 2m.

Tabela 4.2 – Áreas de classe da espessura da Zona Ferruginosa.

ÁREA (ESPES.ZONA FERRUGINOSA)	CLASSES (m)			
	0 - 2	2 -5	5 - 10	10 - 20
Km <sup>2</sup>	58,9	14,62	1,62	0,1
Por cento (%)	78,3	19,4	2,2	0,1

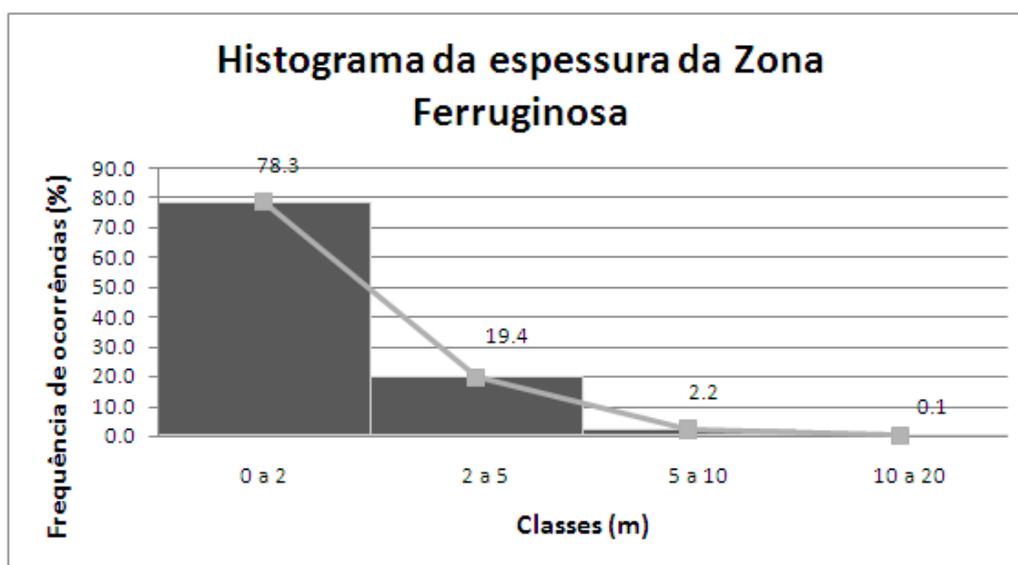


Figura 4.14 – Histograma da espessura da Zona Ferruginosa.

Como analisado para a espessura do pedólito no item anterior, a medida de precisão do modelo ( $R^2$ ) encontrada no gráfico de dispersão dos resultados da espessura da zona ferruginosa foi próxima de 0,85, como mostra a Figura 4.15, indicando uma variação total um pouco maior que a variação da espessura do pedólito, entre as sondagens e o modelo.

Comparando a reta de regressão linear com a reta de  $y = x$ , na Figura 4.15, percebe-se também que existe uma superestimação do modelo para pequenas espessuras e uma subestimação para espessuras maiores.

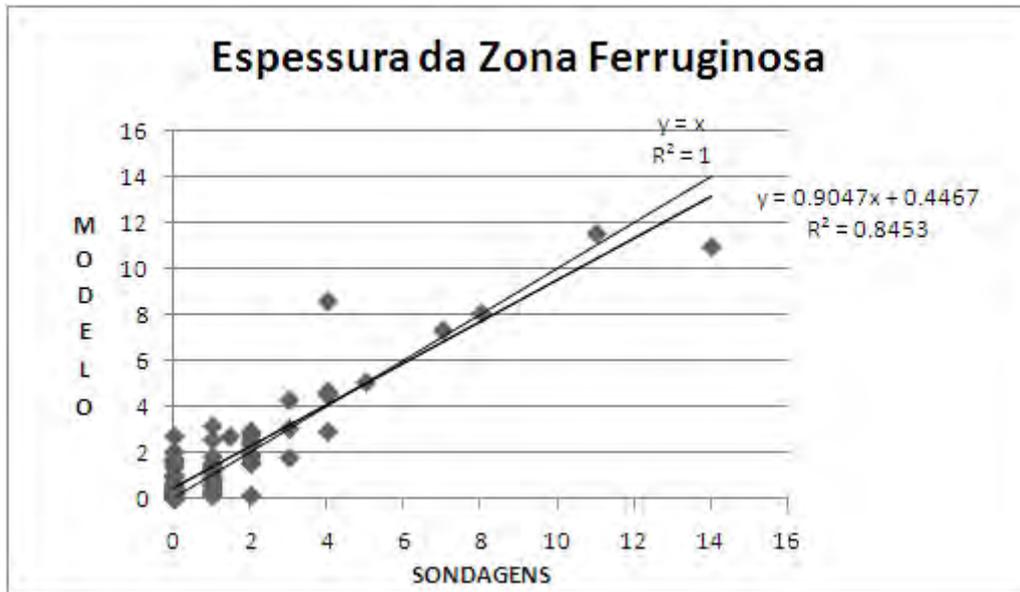


Figura 4.15 – Relação da espessura em metro da Zona Ferruginosa entre as sondagens e o modelo estratigráfico.

Na Figura 4.16 tem-se o histograma da diferença entre o modelo e o valor da sondagem para a espessura da zona ferruginosa, em que se percebe uma maior frequência de erro do modelo também entre as classes de espessuras de -1 a 2 m.

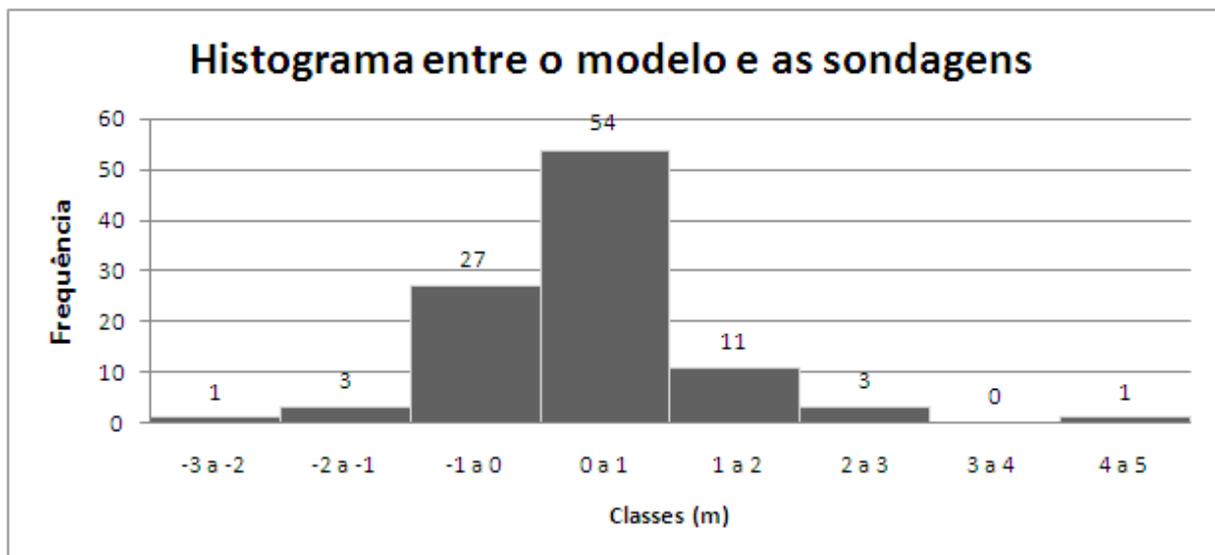


Figura 4.16 – Histograma da diferença entre o modelo e o valor da sondagem.

#### 4.4.3 ESPESSURA DOS SAPRÓLITOS

A Figura 4.17 apresenta a espessura dos saprólitos. O saprólito encontrado na região é dividido em dois grupos: saprólito arenoso (solo residual dos metarritmitos arenosos) e saprólito silteoso (solo residual das ardósias). O saprólito arenoso é representado pelo silte arenoso, areia, arenito e quartzito. Possui cor branca variegada. Este material arenoso pode ser correlacionado com o metarritmito arenoso, no que tange à sua textura e cor. O saprólito silteoso é representado pelo silte argiloso. Possui, em sua maioria, coloração vermelha variegada (variando de rosa a roxa) podendo ocorrer a coloração amarelo. É possível correlacionar este material com o saprólito da ardósia, presente abaixo do metarritmito arenoso, uma vez que, trazem características como cor, textura e estratificação deste.

A seqüência deposicional geológica indica da base para o topo o metassiltito que deve resultar em saprólitos silteosos, depois a ardósia com saprólito silteoso às vezes com veios de quartzo, seguido do metarritmito arenoso com saprólitos variando localmente de arenosos a silteosos e o quartzito com saprólito arenoso. No entanto, ocorrem em determinadas áreas a alternância de saprólito silteoso e arenoso indicando a presença de dobramentos e/ou de falhas geológicas o que torna complexa a modelagem desses saprólitos.

Os saprólitos são bem demarcados em termos de resistência, por apresentar valores elevados de  $N_{spt}$ . Estes valores elevados de  $N_{spt}$  se encontram, na maioria das vezes, nas proximidades do contato superior desta camada com a zona ferruginosa. A sua espessura varia de 0 a 30 m com predominância de até 10 m na maior parte da área de estudo.

# Carta de espessura dos Saprólitos

Legenda:

- 0 a 2 m
- 2 a 5 m
- 5 a 10 m
- 10 a 20 m

Convenções Cartográficas

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

1:50.000



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.17 – Carta de espessura dos Saprólitos

A Tabela 4.3 e a Figura 4.18 mostram a frequência em cada classe da espessura do saprólitos na região de estudo. Observa-se uma maior ocorrência na região da classe de 5 a 10 m.

Tabela 4.3 - Áreas de classes da espessura dos Saprólitos.

ÁREA (ESPES. SAPRÓLITOS)	CLASSES (m)			
	0 - 2	2 -5	5 - 10	10 - 20
Km <sup>2</sup>	4,91	17,99	39,15	13,23
Por cento (%)	6,52	23,89	52,01	17,57

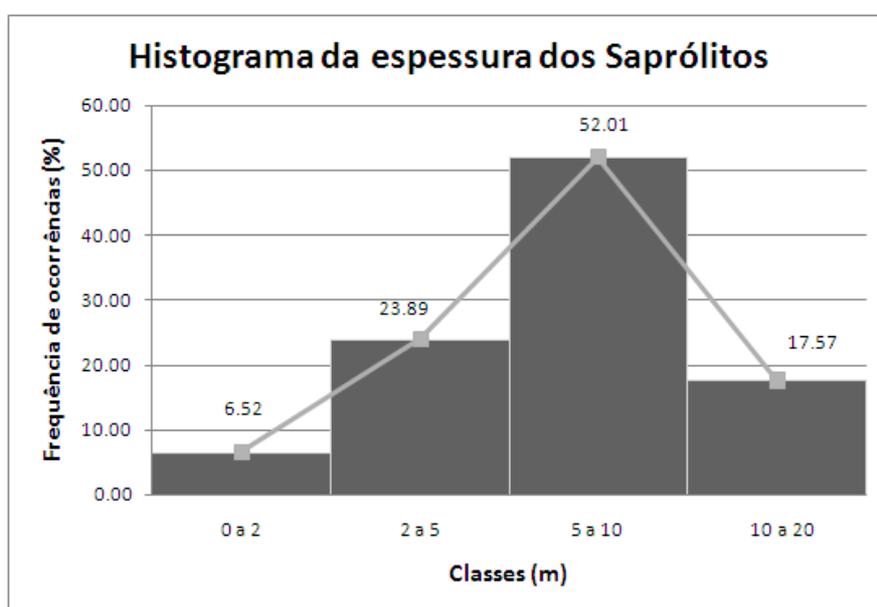


Figura 4.18 – Histograma da espessura dos Saprólitos.

Analisando novamente as sondagens que não foram usadas no modelo percebe-se no gráfico da Figura 4.19 que o valor  $R^2$  é próximo de 0,5, indicando uma precisão menor do modelo para a espessura dos saprólitos. A menor precisão do modelo para a espessura dos saprólitos se deve ao fato da dificuldade ao analisar as áreas de predominância de cada saprólito devido a geologia complexa da região com a presença de dobramentos e/ou de falhas geológicas.

Comparando a reta de regressão linear com a reta de  $y = x$ , na Figura 4.19, percebe-se novamente que existe uma superestimação do modelo para pequenas espessuras e uma subestimação para espessuras maiores.

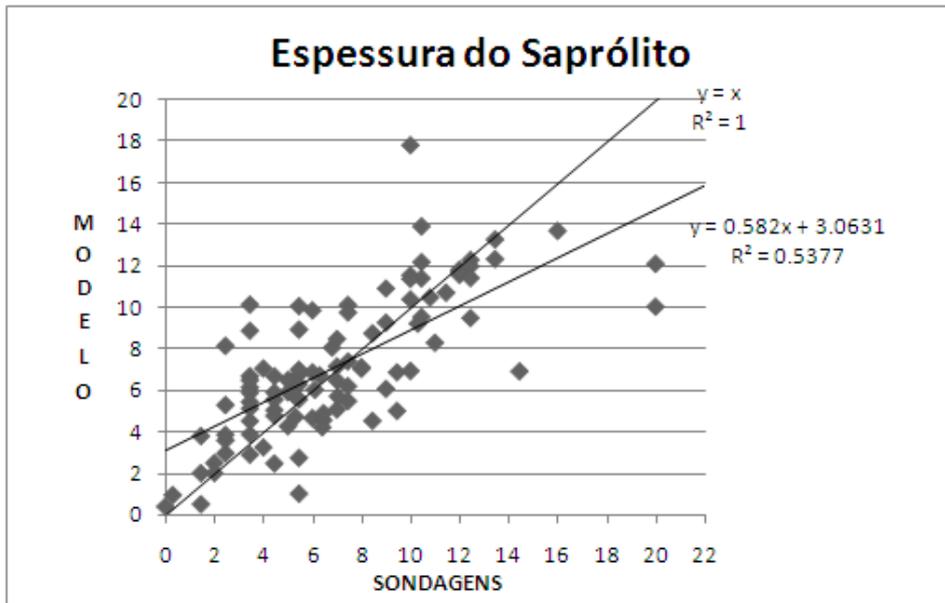


Figura 4.19 – Relação da espessura em metro dos Saprólitos entre as sondagens e o modelo estratigráfico.

Na Figura 4.20 tem-se o histograma da diferença entre o modelo e o valor da sondagem para a espessura do saprólito, em que se percebe uma maior freqüência de erro do modelo entre as classes de espessuras de -3 a 4 m.

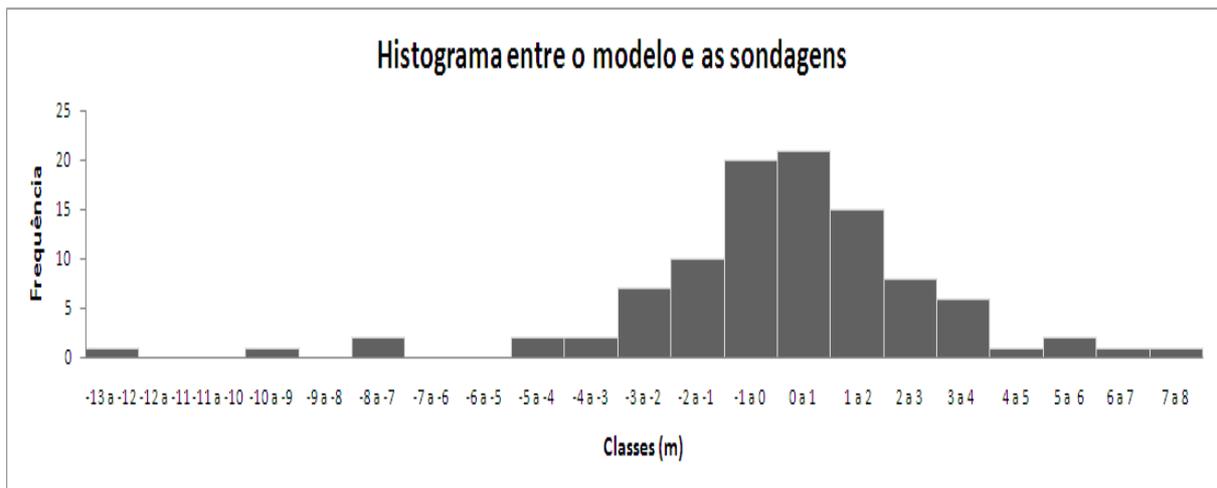


Figura 4.20 - Histograma da diferença entre o modelo e o valor da sondagem.

#### 4.4.4 PROFUNDIDADE DO IMPENETRÁVEL

A Figura 4.21 consiste em um mapa contendo pontos de sondagens de simples reconhecimento classificados pela profundidade do impenetrável ao SPT, que de acordo com a Norma Técnica NBR 6484 - Sondagens de simples reconhecimento com SPT (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 ultrapassarem 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.

A profundidade do impenetrável ao SPT além de separar materiais com diferenças em termos de estabilidade delimitam níveis de escavabilidade diferenciada. Na prática de campo, os valores de  $N_{spt}$  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 possibilidade de ocorrência de camadas menos resistentes no meio de camadas mais resistentes, ou mesmo de se obter falsos valores altos de  $N_{spt}$  devido à presença de concreções lateríticas ou mesmo fragmentos de quartzo de grandes dimensões comparadas à ponta do amostrador.

O impenetrável ocorre desde zero até 40 m de profundidade. Observa-se que nas áreas da Asa Sul, Sudoeste e Eixo Monumental ele encontra-se a maiores profundidades, onde também nestas áreas foram encontradas maiores espessuras de pedólito.

# Carta de profundidade do impenetrável

Legenda:

- 0 a 2 m    ■ 2 a 5 m
- 5 a 10 m    ■ 10 a 20 m
- 20 a 30 m    ■ 30 a 40 m

Convenções Cartográficas:

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

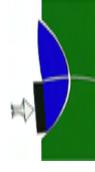
Meridiano Central 45° WGr

1:75.000



Escala Gráfica  
(Escala original 1:10.000)

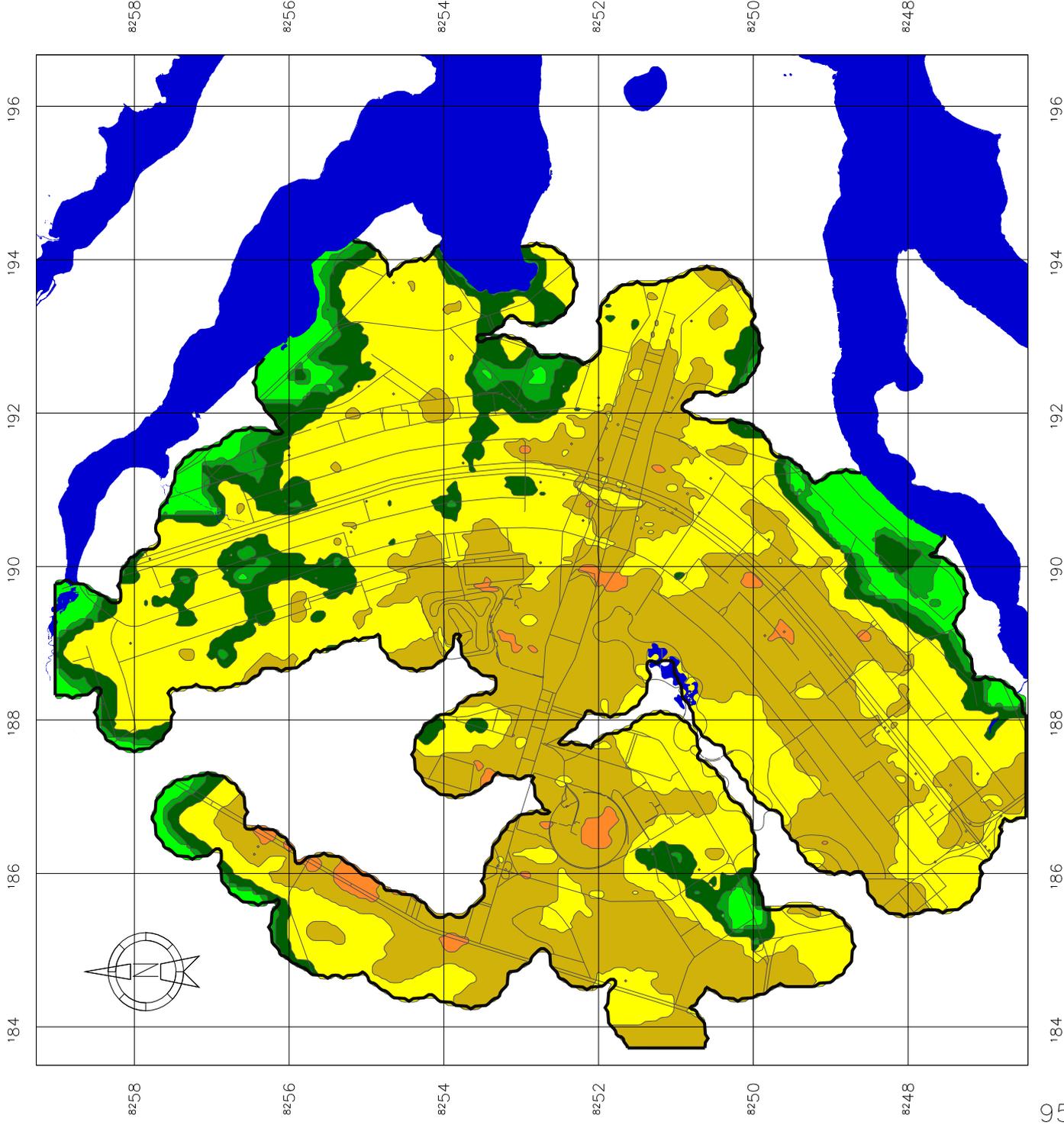
Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves



A Tabela 4.4 e a Figura 4.22 mostram a frequência em cada classe da profundidade do impenetrável na região de estudo. Observa-se uma maior ocorrência na região das classes de 10 a 20 m e de 20 a 30 m.

Tabela 4.4 - Áreas de classes da profundidade do impenetrável.

ÁREA (PROF.IMPENETRÁVEL) Km <sup>2</sup>	CLASSES (m)					
	0 - 2	2 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40
Por cento (%)	5,86	3,86	10,11	41,98	36,82	1,37

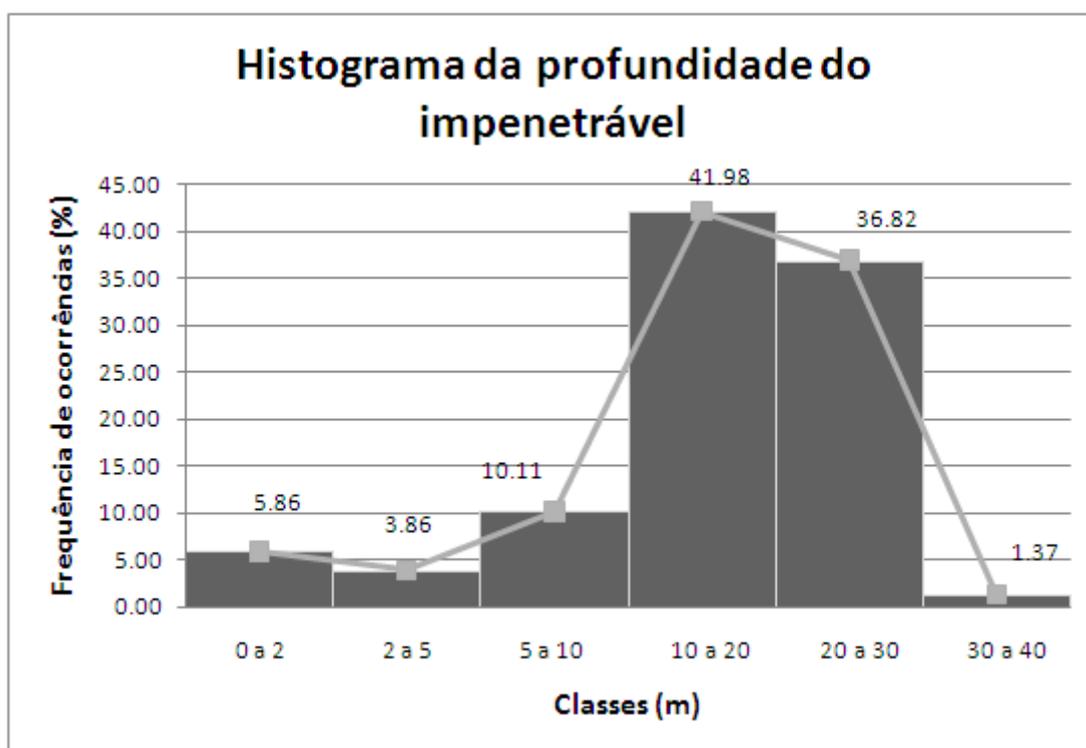


Figura 4.22 – Histograma da profundidade do impenetrável.

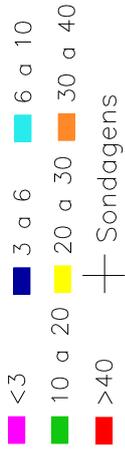
#### 4.4.5 VALORES DE NSPT A DIVERSAS PROFUNDIDADES

A Figura 4.23 à Figura 4.29 apresenta as cartas de Nspt a profundidades de 3, 6, 9, 12, 15, 20 e 30 m. O túnel do metrô da extensão Asa Norte terá aproximadamente 10 m de cobertura e 8 m de diâmetro, semelhante com as características do metrô subterrâneo existente na Asa Sul. Assim, explicam-se os valores de Nspt a estas profundidades (3, 6, 9, 12, 15, 20 e 30 m). A profundidade de 30 m indicará as condições do subsolo para a fundação do metrô.

Pode-se observar na Figura 4.23 que à 3 m de profundidade a Asa norte já possui algumas áreas com valores de Nspt maior que 40. Comparando o mapa da espessura do pedólito (Figura 4.9) com o mapa dos valores de Nspt à 3m de profundidade (Figura 4.23) observa-se que onde se encontra pequenas espessuras de pedólito tem-se maiores valores de Nspt, ou seja, menor a profundidade do impenetrável e menor as espessuras dos saprólitos. Com 12 m de profundidade (Figura 4.26) a Asa Norte encontra-se já em quase toda sua extensão valores de Nspt maiores que 40.

# Carta de NSPT à 3m de profundidade

Legenda:



Convenções Cartográficas:



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

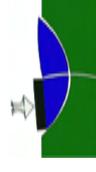
Meridiano Central 45° WGr



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

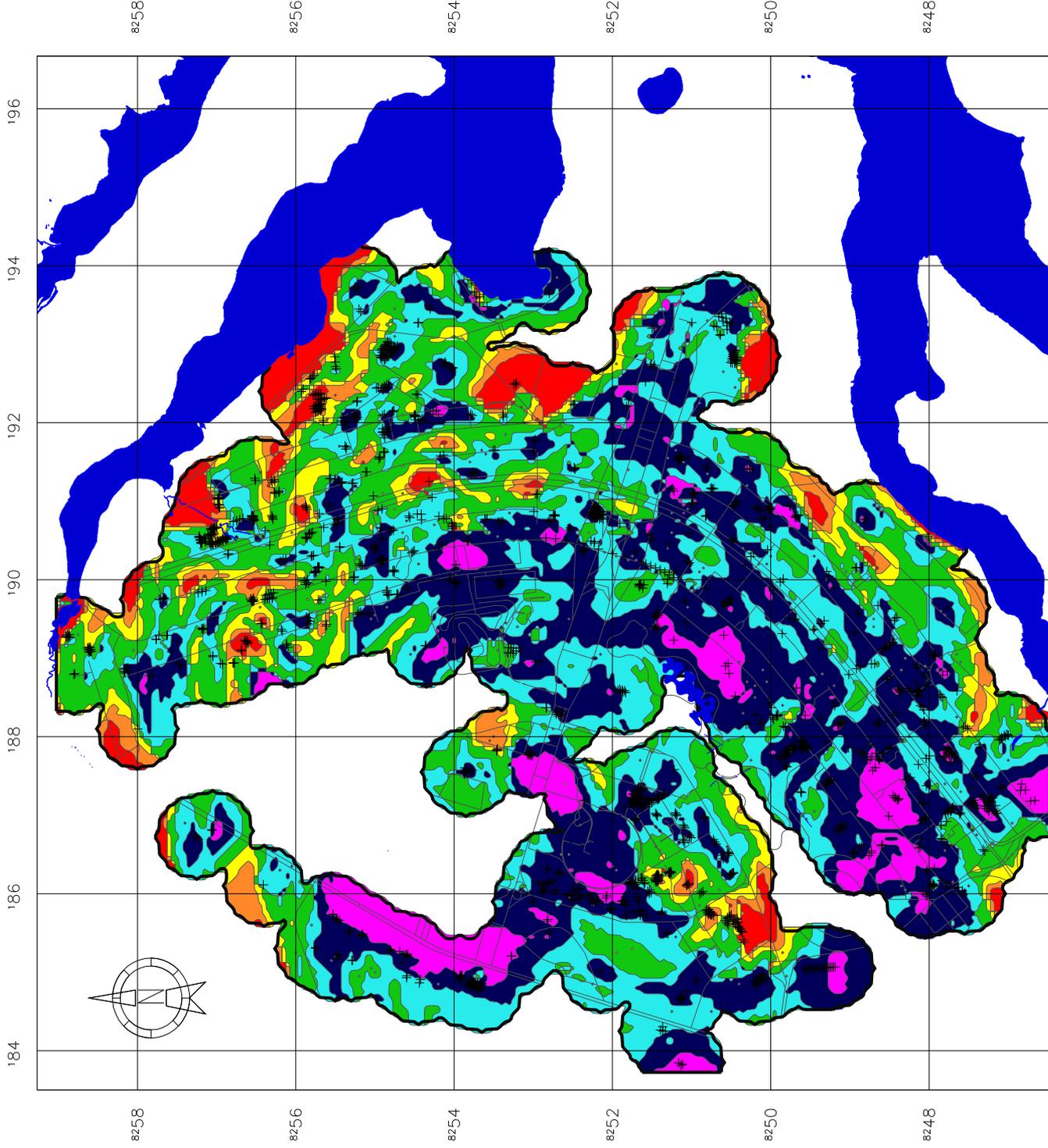
Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

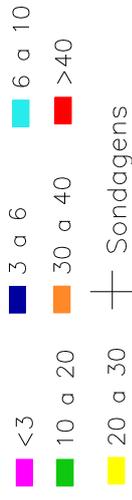
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves



# Carta de NSPT à 6m de profundidade

Legenda:



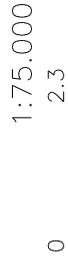
Convenções Cartográficas:



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

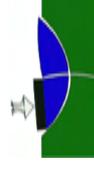
Meridiano Central 45° WGr



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

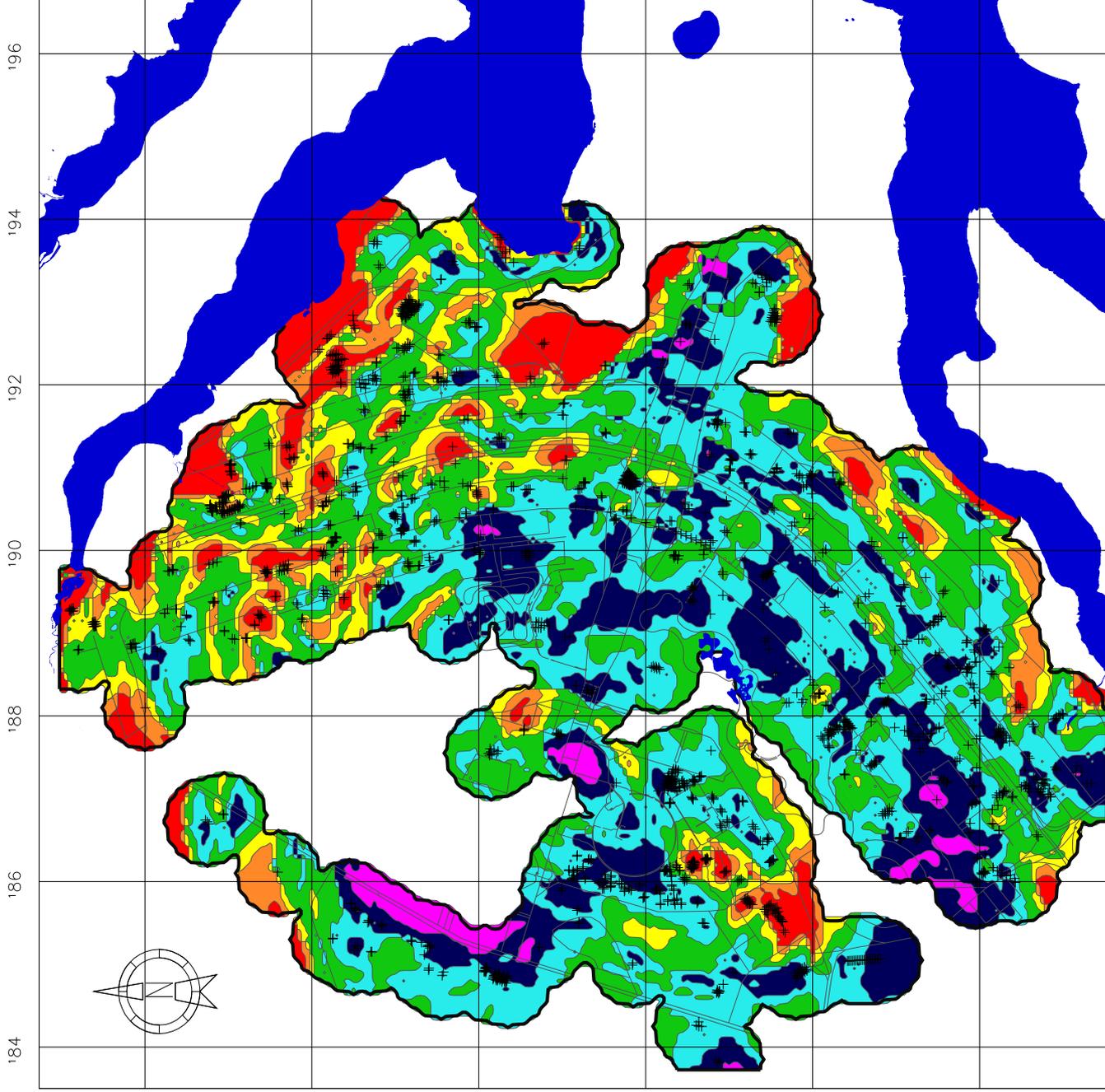
Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

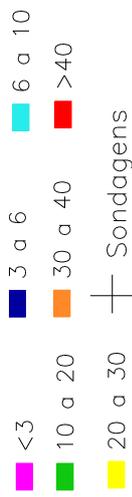
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves



# Carta de NSPT à 9m de profundidade

Legenda:



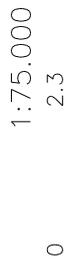
Convenções Cartográficas:



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

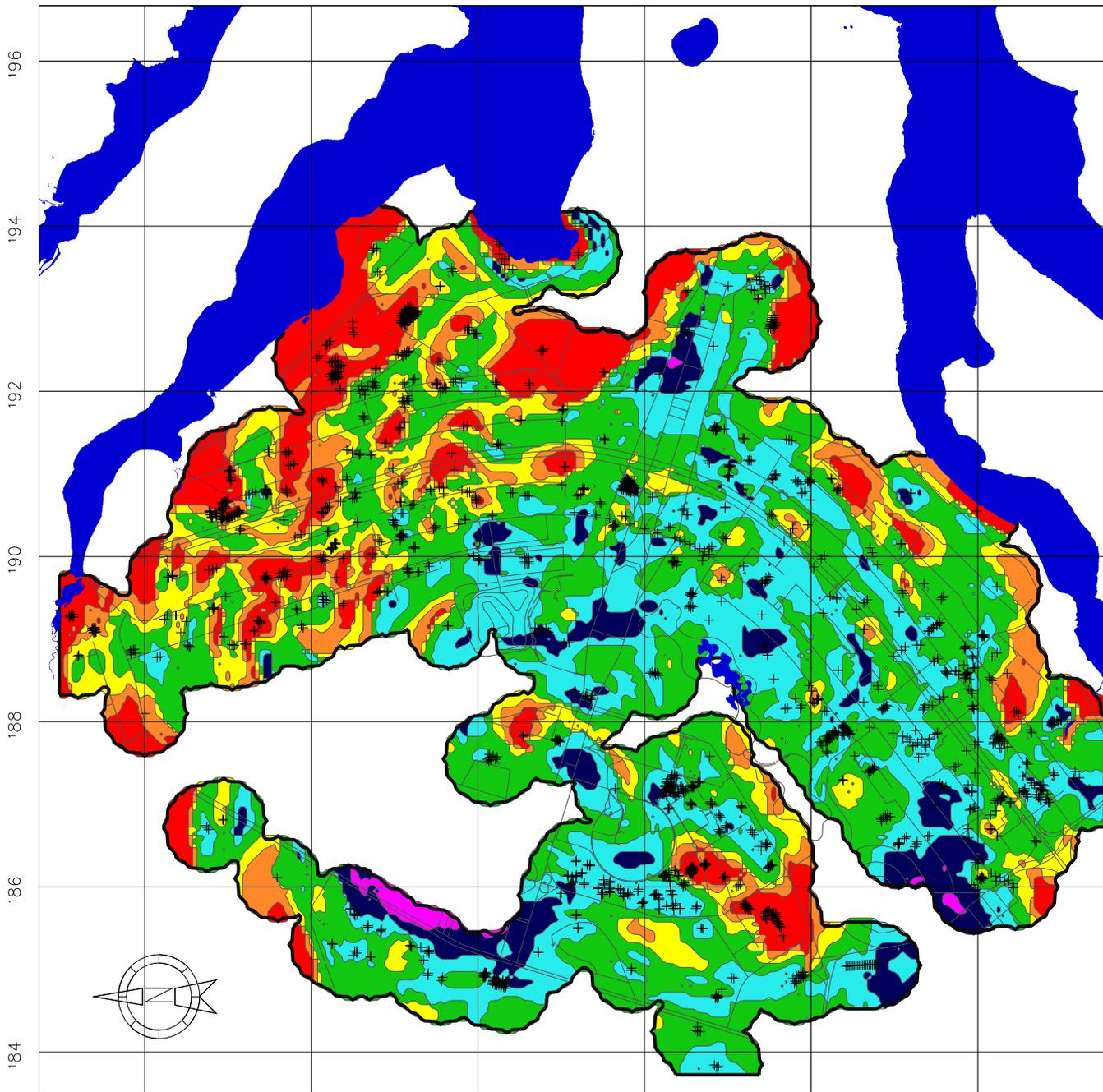
Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

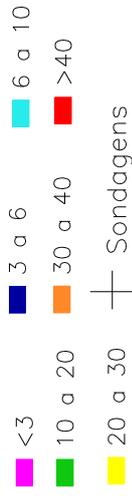
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves



# Carta de NSPT à 12m de profundidade

Legenda:



Convenções Cartográficas:



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

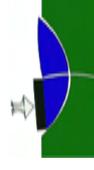
Meridiano Central 45° WGr

1:75.000

Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

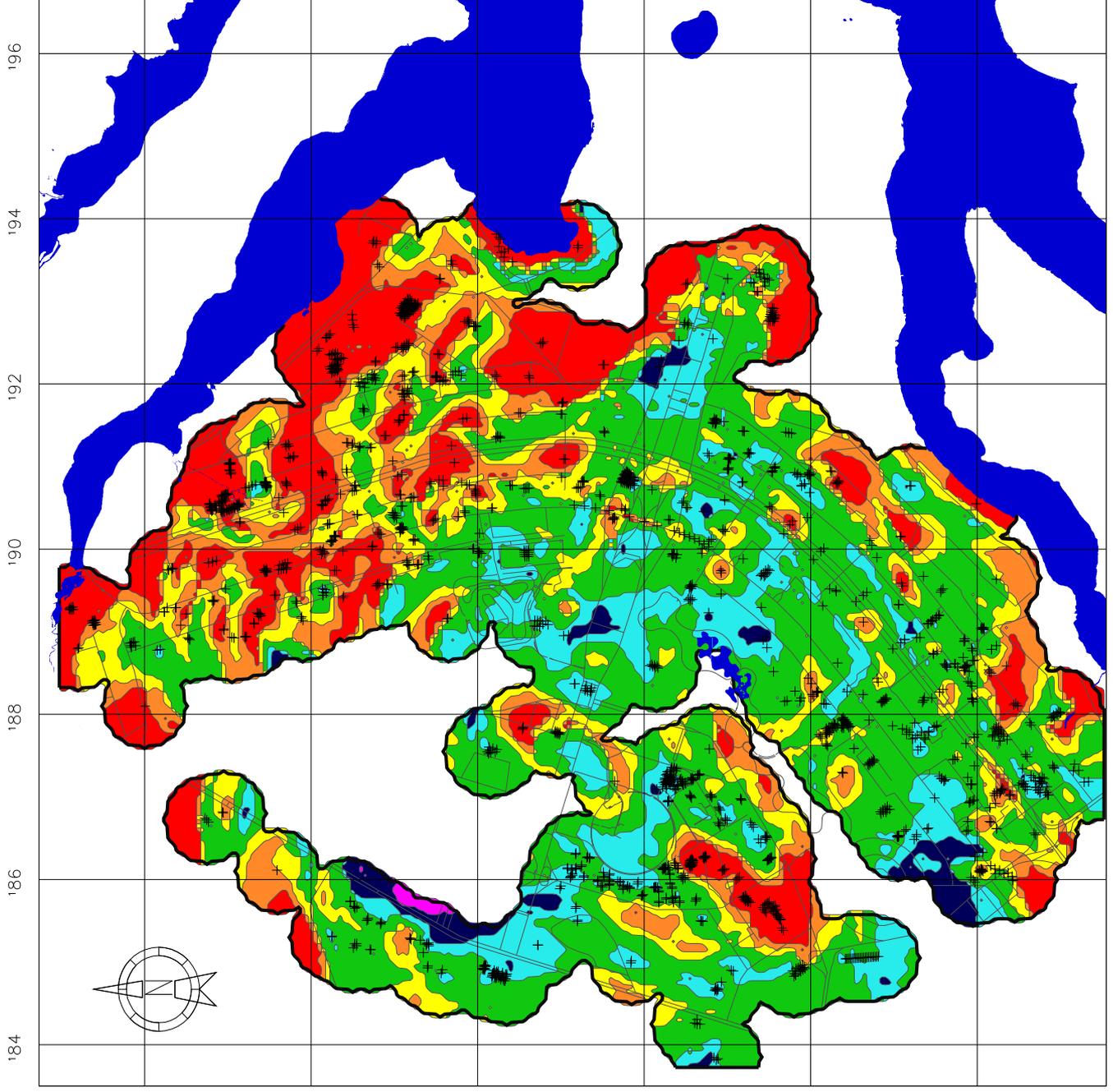
Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

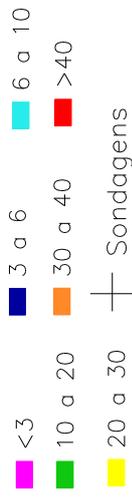
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves



# Carta de NSPT à 15m de profundidade

Legenda:



Convenções Cartográficas:



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

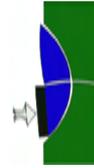
1:75.000



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

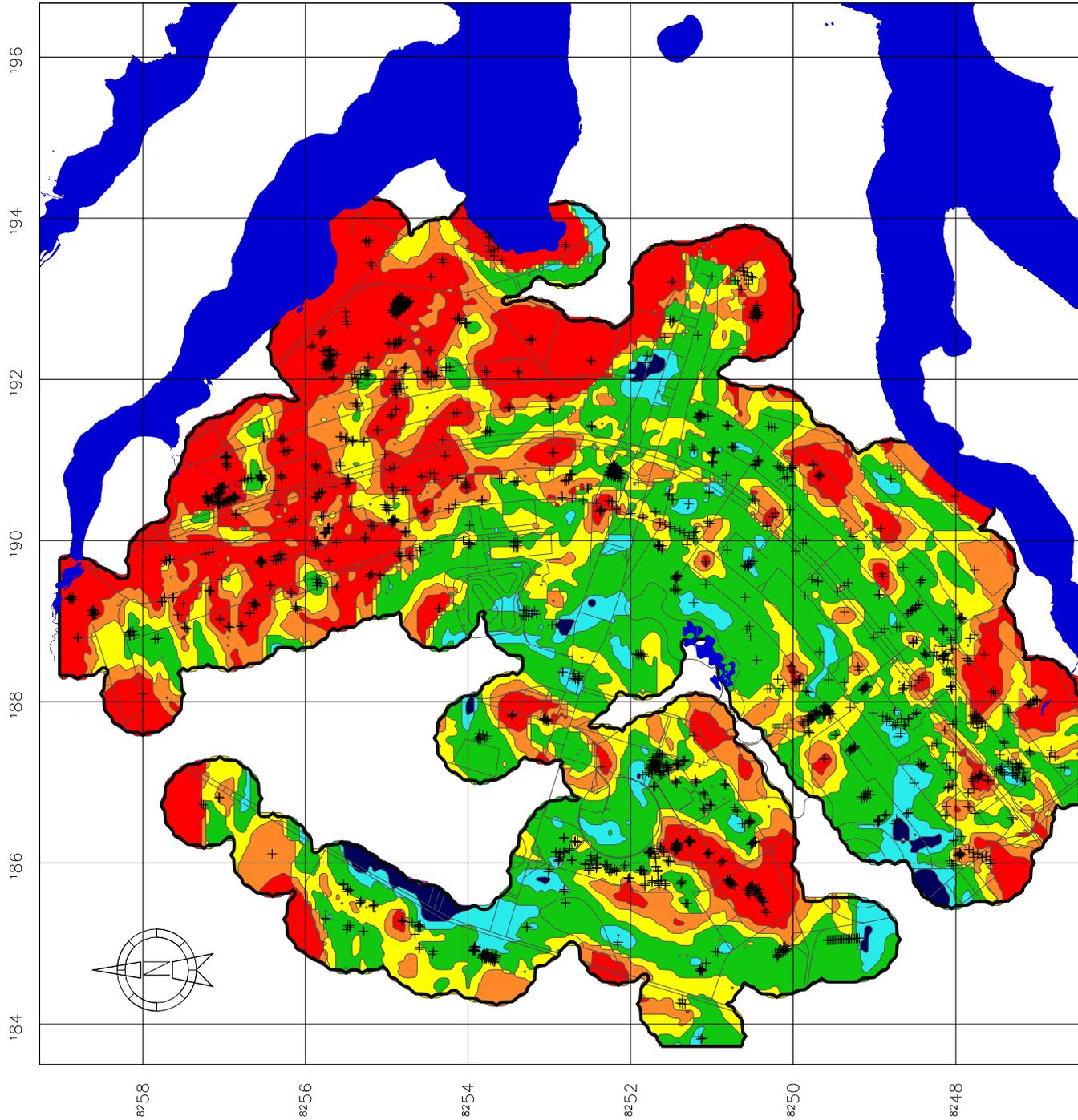
Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

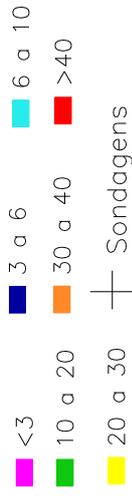
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves



# Carta de NSPT à 20m de profundidade

Legenda:



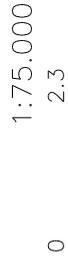
Convenções Cartográficas:



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

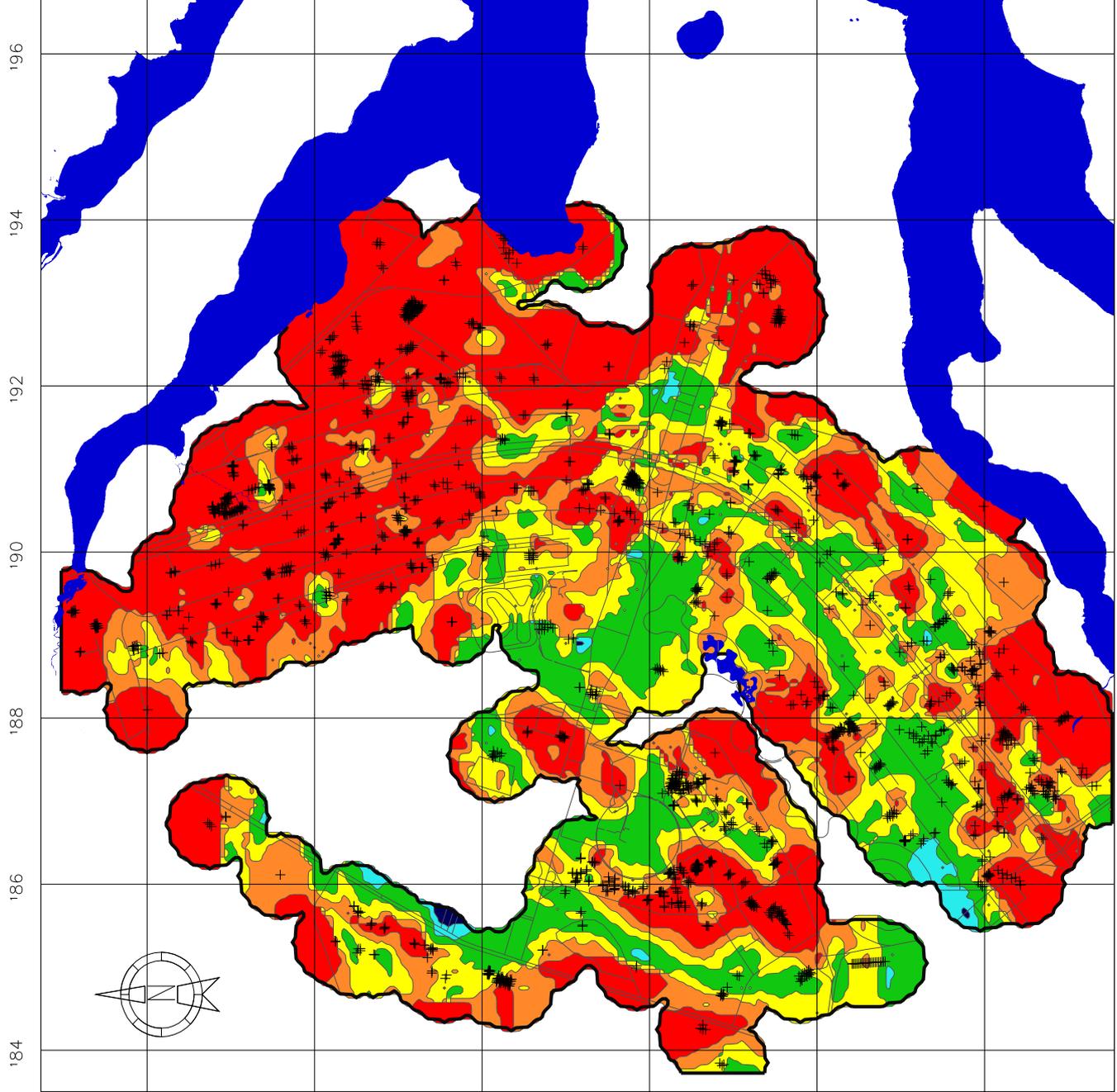
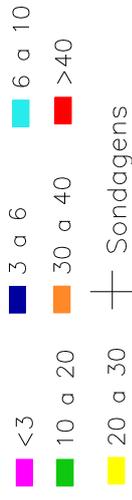


Figura 4.28 – Carta de Nspt à 20m de profundidade

# Carta de NSPT à 30m de profundidade

Legenda:



Convenções Cartográficas:



Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

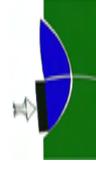
1:75.000



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

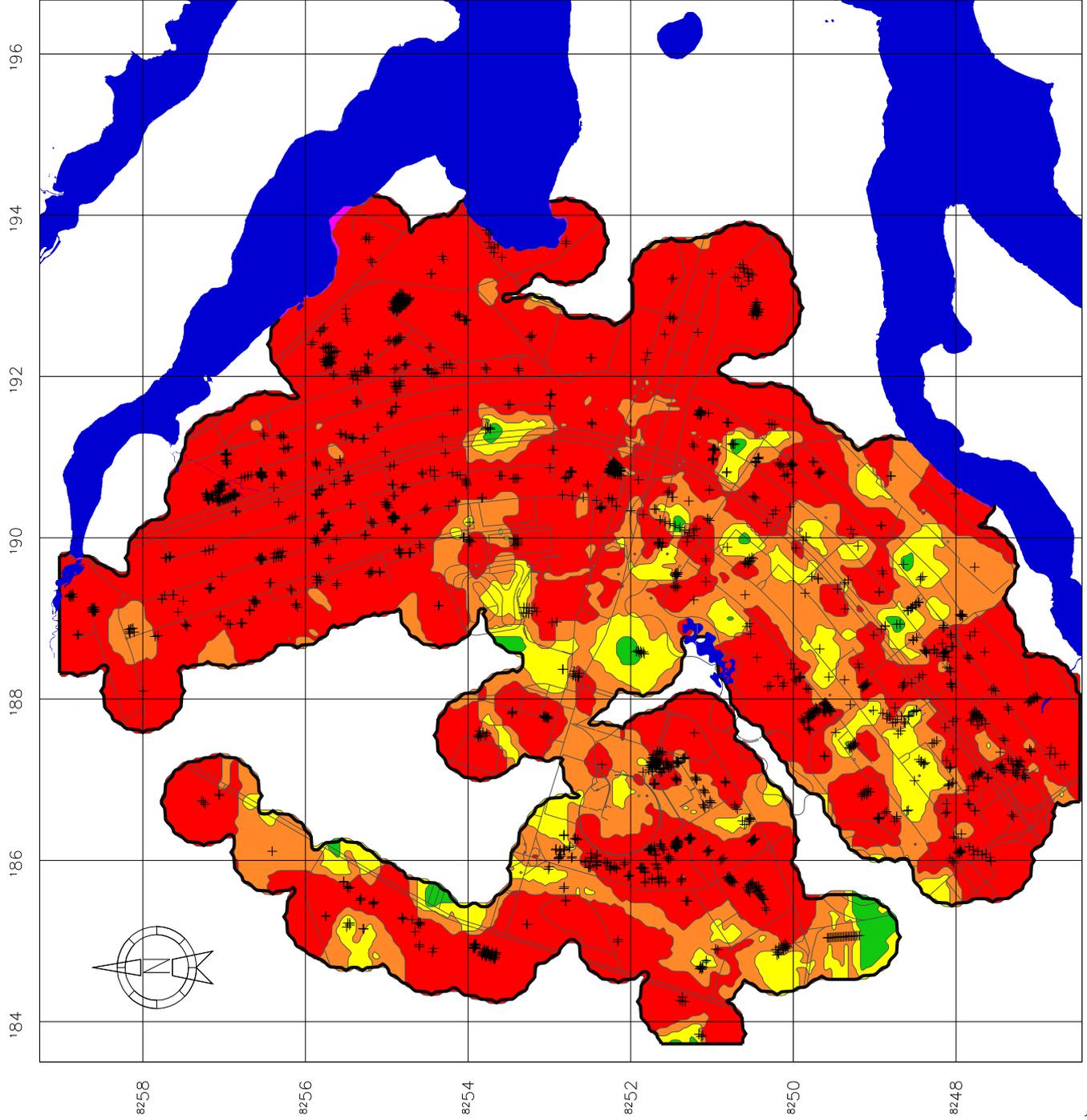
Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves



A Tabela 4.5 e a Figura 4.30 mostram a predominância de cada classe dos valores de N<sub>spt</sub> à 3 m de profundidade. Observa-se uma maior ocorrência na região das classes de valores de N<sub>spt</sub> entre 3 a 20.

Tabela 4.5 - Áreas de classes dos valores de N<sub>spt</sub> à 3 m de profundidade.

ÁREA (NSPT)		CLASSES						
		< 3	3 a 6	6 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	>40
3 m	Km <sup>2</sup>	4,96	21,06	20,27	16,20	5,55	3,25	3,99
	Por cento (%)	6,59	27,98	26,92	21,51	7,37	4,32	5,30

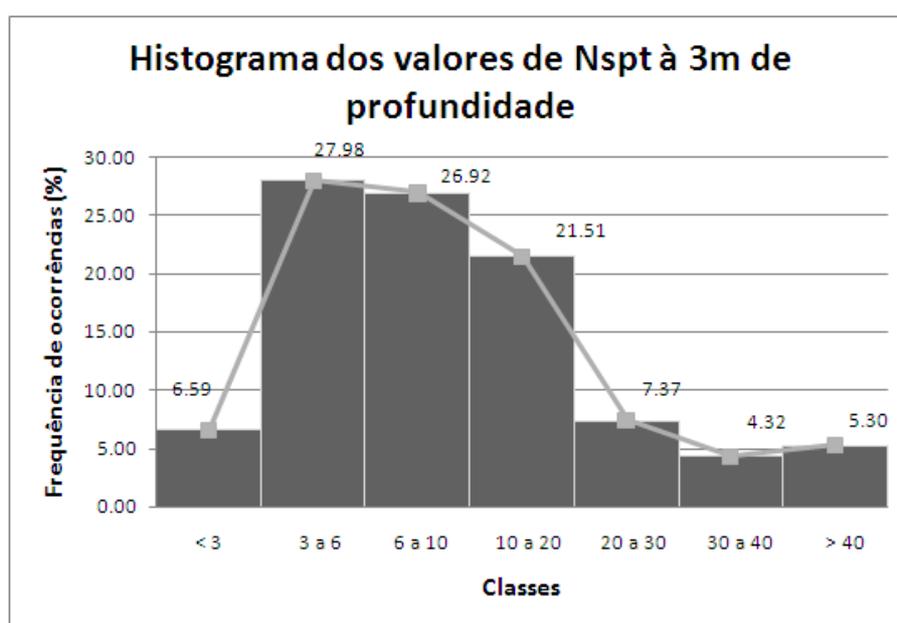


Figura 4.30 – Histograma dos valores de N<sub>spt</sub> à 3 m de profundidade.

A Tabela 4.6 e a Figura 4.31 mostram a frequência em cada classe dos valores de N<sub>spt</sub> à 6 m de profundidade. Observa-se novamente na região uma maior ocorrência das classes de valores de N<sub>spt</sub> entre 3 a 20.

Tabela 4.6 - Áreas de classes dos valores de N<sub>spt</sub> à 6 m de profundidade.

ÁREA (NSPT)		CLASSES						
		< 3	3 a 6	6 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	>40
6 m	Km <sup>2</sup>	1,54	12,14	21,99	20,24	7,65	5,09	6,64
	Por cento (%)	2,05	16,12	29,21	26,88	10,17	6,76	8,82

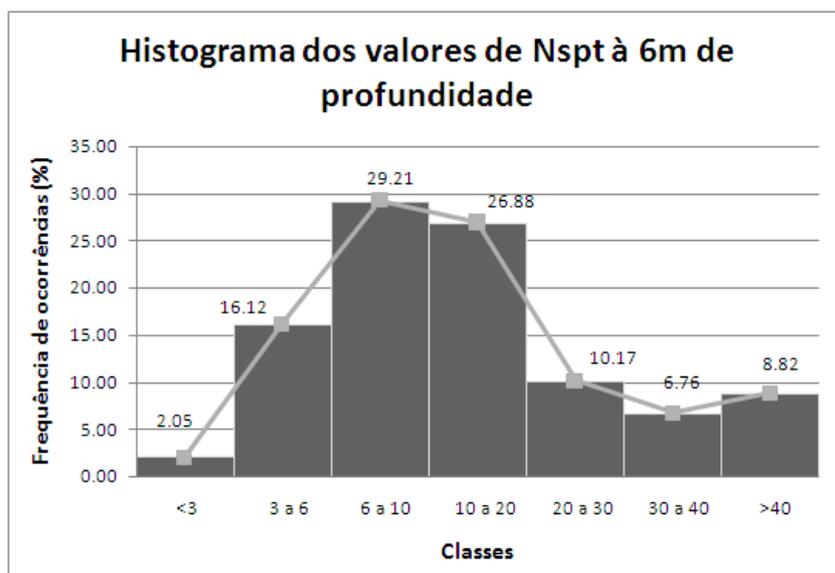


Figura 4.31 - Histograma dos valores de Nspt à 6 m de profundidade.

A Tabela 4.7 e a Figura 4.32 mostram a frequência em cada classe dos valores de Nspt à 9 m de profundidade. Observa-se na região uma maior ocorrência das classes de valores de Nspt entre 6 a 20.

Tabela 4.7 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 9 m de profundidade.

ÁREA (NSPT)		CLASSES						
		< 3	3 a 6	6 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	>40
9 m	Km <sup>2</sup>	0,46	4,55	17,2	26,61	9,3	6,97	10,23
	Por cento (%)	0,60	6,04	22,85	35,35	12,31	9,26	13,59

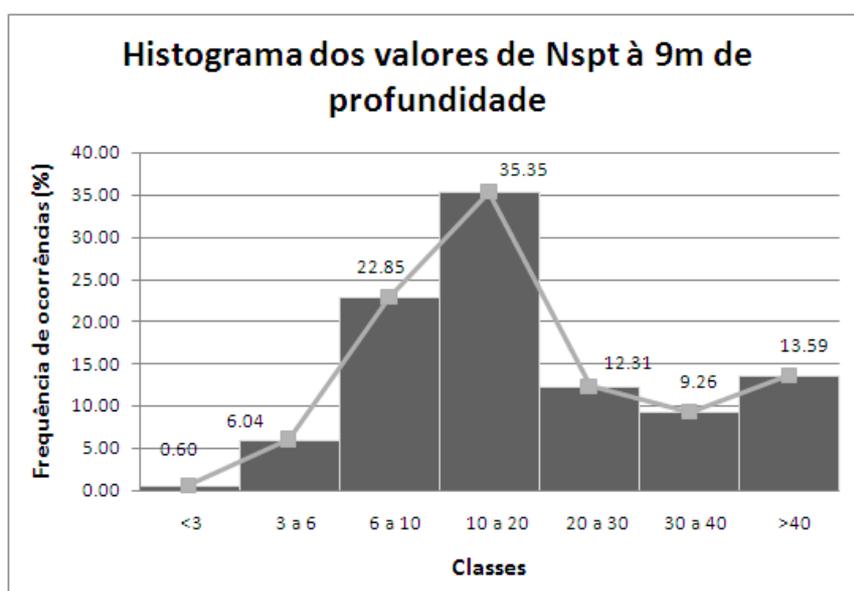


Figura 4.32 - Histograma dos valores de Nspt à 9 m de profundidade

A Tabela 4.8 e a Figura 4.33 mostram a frequência de cada classe dos valores de N<sub>spt</sub> à 12 m de profundidade. Observa-se na região uma maior ocorrência da classe de valores de N<sub>spt</sub> de 10 a 20.

Tabela 4.8 - Áreas de classes dos valores de N<sub>spt</sub> à 12 m de profundidade.

ÁREA (NSPT)		CLASSES						
		< 3	3 a 6	6 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	>40
12m	Km <sup>2</sup>	0,15	1,63	9,95	28,19	12,06	9,14	14,17
	Por cento (%)	0,19	2,17	13,22	37,45	16,02	12,14	18,82

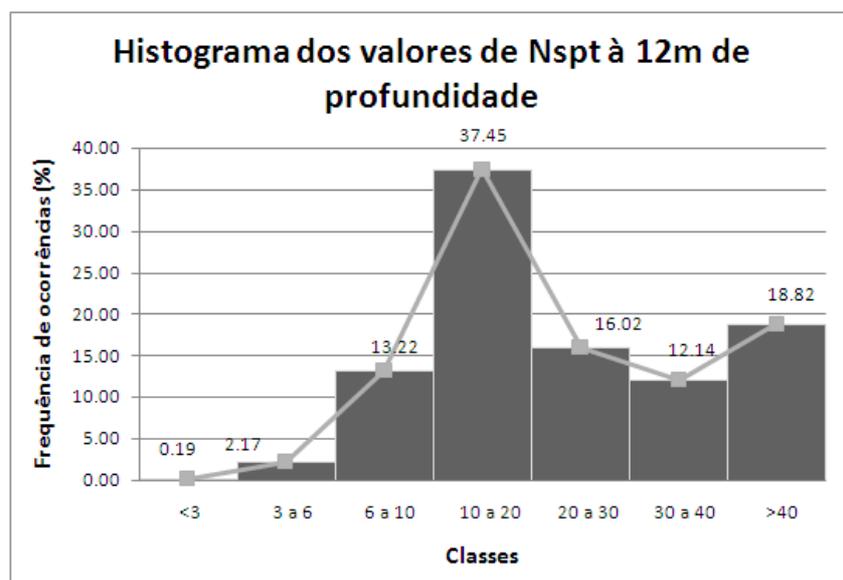


Figura 4.33 - Histograma dos valores de N<sub>spt</sub> à 12 m de profundidade.

A Tabela 4.9 e a Figura 4.34 mostram a frequência de cada classe dos valores de N<sub>spt</sub> à 15 m de profundidade. Observa-se na região uma maior ocorrência das classes de valores de N<sub>spt</sub> entre 10 a maior que 40.

Tabela 4.9 - Áreas de classes dos valores de N<sub>spt</sub> à 15 m de profundidade.

ÁREA (NSPT)		CLASSES						
		< 3	3 a 6	6 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	>40
15m	Km <sup>2</sup>	0,01	0,82	4,11	23,57	14,97	11,41	20,43
	Por cento (%)	0,01	1,09	5,46	31,31	19,89	15,16	27,14

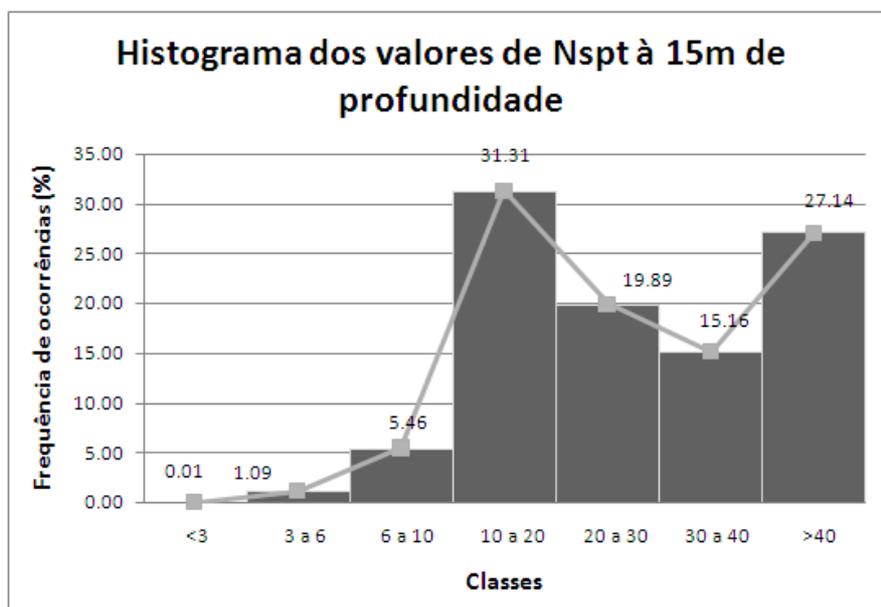


Figura 4.34 - Histograma dos valores de Nspt à 15 m de profundidade.

A Tabela 4.10 e a Figura 4.35 mostram a frequência de cada classe dos valores de Nspt à 20 m de profundidade. Observa-se na região uma maior ocorrência da classe de valores de Nspt maior que 40.

Tabela 4.10 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 20 m de profundidade.

ÁREA (NSPT)		CLASSES						
		< 3	3 a 6	6 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	>40
20 m	Km <sup>2</sup>	0	0,087	0,75	11,44	15,45	15,21	32,36
	Por cento (%)	0	0,11	1	15,2	20,52	20,20	42,99

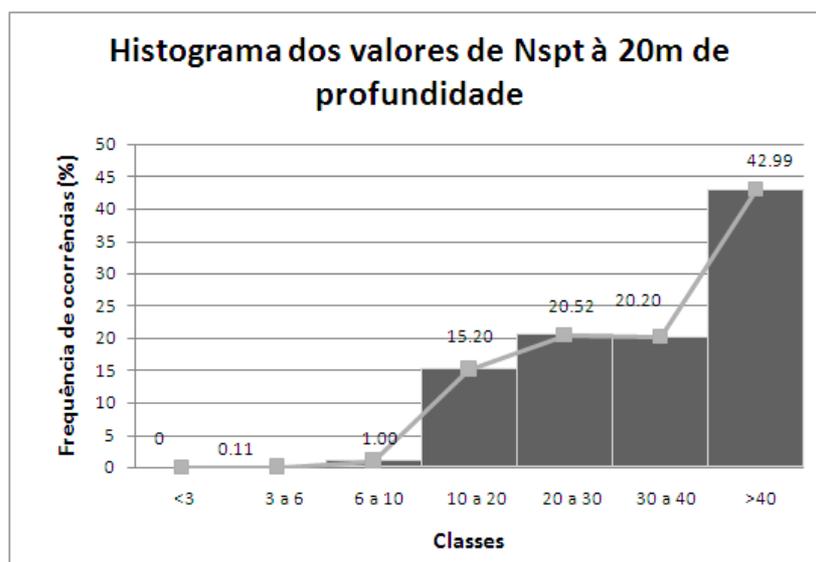


Figura 4.35 - Histograma dos valores de Nspt à 20 m de profundidade.

A Tabela 4.11 e a Figura 4.36 mostram a frequência de cada classe dos valores de Nspt à 30 m de profundidade. Observa-se novamente na região uma maior ocorrência da classe de valores de Nspt maior que 40.

Tabela 4.11 - Áreas de classes dos valores de Nspt à 30 m de profundidade.

ÁREA (NSPT)		CLASSES						
		< 3	3 a 6	6 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	>40
20 m	Km <sup>2</sup>	0	0	0	0,68	6,46	15,99	52,15
	Por cento (%)	0	0	0	0,9	8,58	21,24	69,28

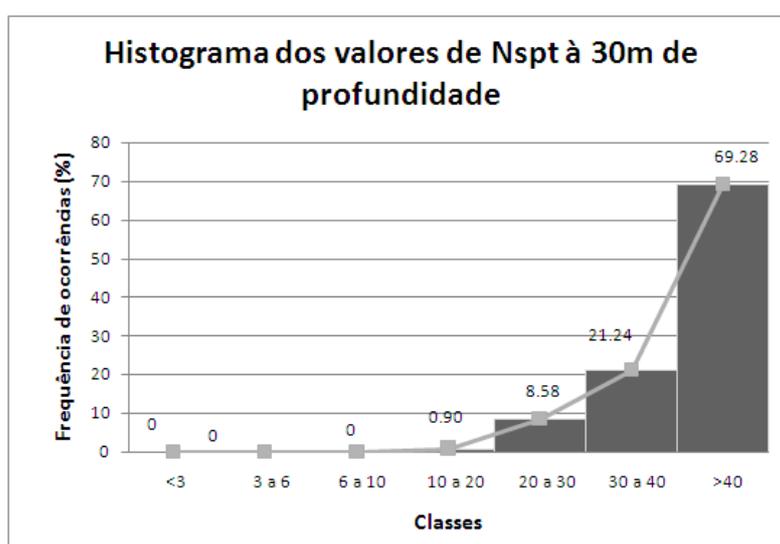


Figura 4.36 - Histograma dos valores de Nspt à 30 m de profundidade.

#### 4.4.6 PROFUNDIDADE DO NÍVEL D' ÁGUA

A Figura 4.37 e a Figura 4.38 mostram a profundidade do nível d'água no período seco e chuvoso, respectivamente. A superfície do nível d'água é resultante do processo de interpolação das sondagens que apresentaram nível d'água, no entanto não foi identificada em muitos relatórios de sondagens a presença do nível d'água.

Pode-se observar que no período chuvoso, que geralmente começa em outubro e termina em abril, no final da Asa sul revela nível d'água próximo à superfície (0 a 2 m), o que é compatível com as sondagens feitas na época da construção do metrô na Asa Sul mostrado no trabalho de BLANCO (1995). No presente trabalho usaremos para a análise de adequabilidade para obras subterrâneas o mapa no período chuvoso, por ser o que possui regiões mais críticas, ou seja, maior número de regiões com níveis d'água próximo da superfície.

# Carta de Nível d'água Período seco

Legenda:

- 0 a 2 m
- 2 a 5 m
- 5 a 10 m
- 10 a 20 m
- 20 a 30 m
- 30 a 40 m
- > 40 m

Convenções Cartográficas:

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

1:75.000

0 2,3 4,5 km

Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.

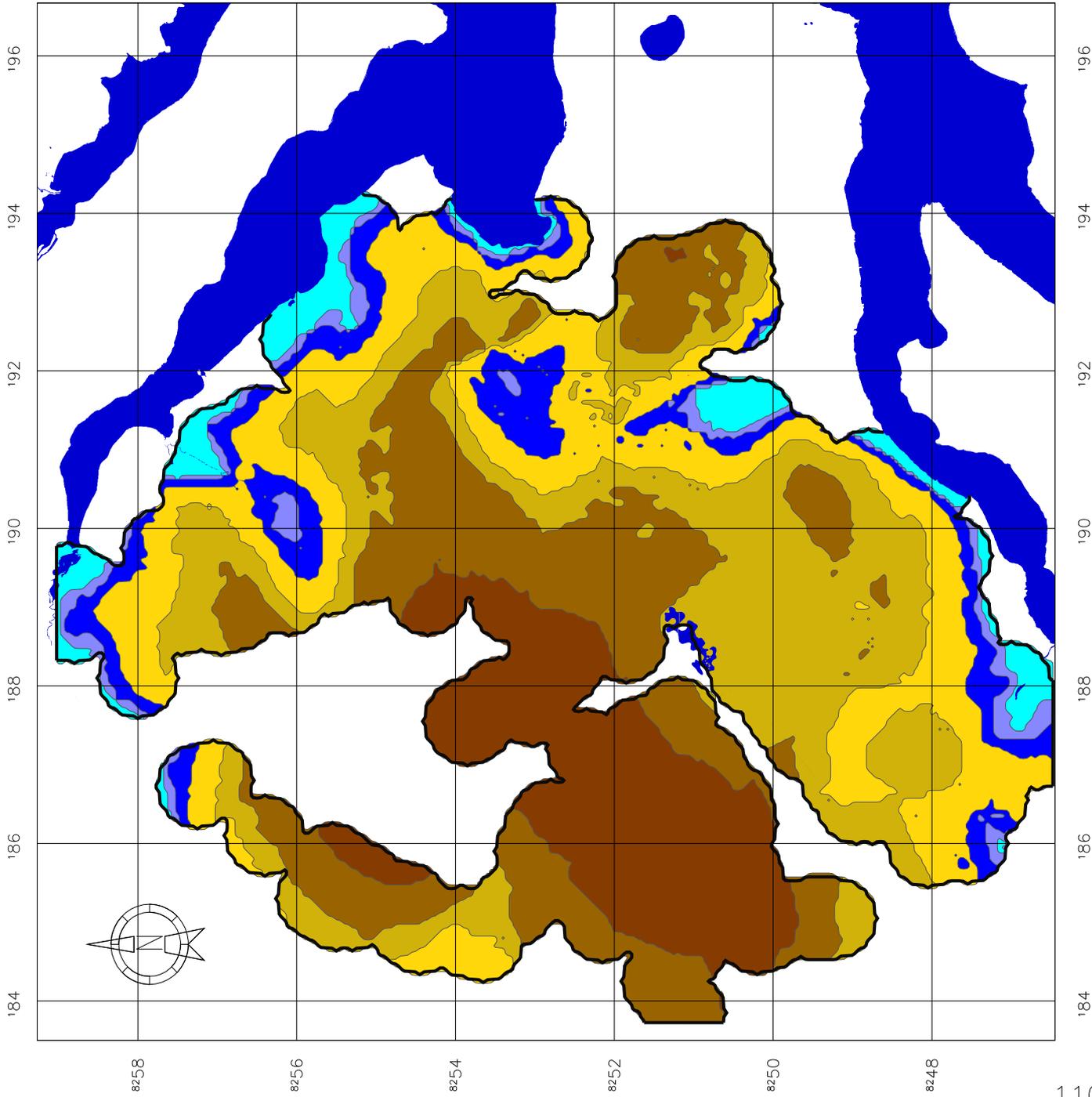


Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.37 – Carta de profundidade do nível d'água – Período seco



# Carta de Nível d'água Período chuvoso

Legenda:

- 0 a 2 m
- 2 a 5 m
- 5 a 10 m
- 10 a 20 m
- 20 a 30 m
- 30 a 40 m
- > 40 m

Convenções Cartográficas:

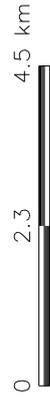
- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

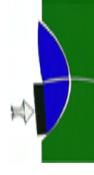
1:75.000



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.

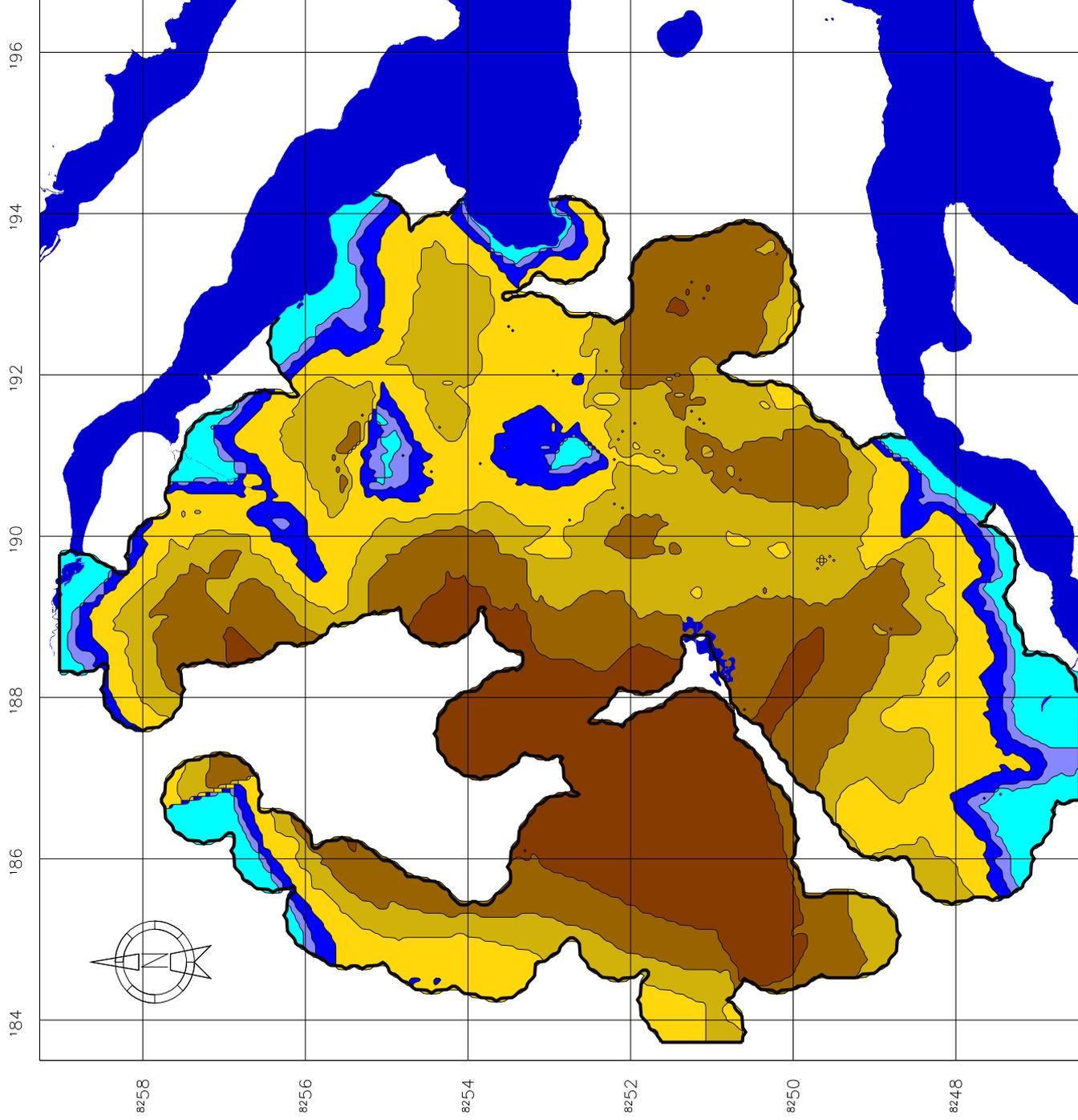


Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.38 – Carta de profundidade do nível d'água – Período chuvoso



A Tabela 4.12 e a Figura 4.39 e a Figura 4.40 mostram a frequência da profundidade do nível d' água em cada classe para o período seco e período chuvoso respectivamente. Observa-se na região uma maior ocorrência da classe de valores de profundidade entre 10 a maior que 40 m.

Tabela 4.12 - Área correspondente na região de estudo de cada classe da profundidade do nível d' água.

ÁREA (PROF. NÍVEL D' ÁGUA)		CLASSES (m)						
		0 - 2	2 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	>40
SECO	Km <sup>2</sup>	4,7	2,21	5,72	15,36	19,68	17,65	11,92
	Por cento (%)	6,22	2,94	7,59	20,4	26,15	22,67	15,83
CHUVOSO	Km <sup>2</sup>	6,12	2,14	5,04	16,55	18,24	15,98	11,22
	Por cento (%)	8,12	2,85	6,69	21,99	24,23	21,23	14,9

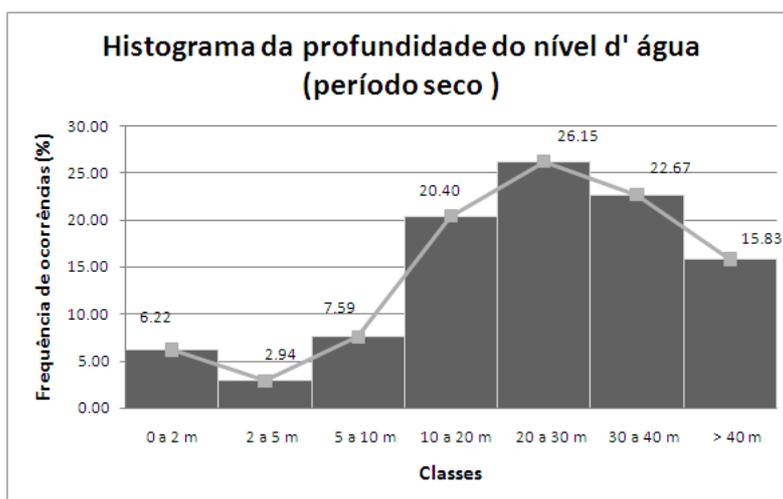


Figura 4.39 - Histograma da profundidade do nível d' água (período seco).

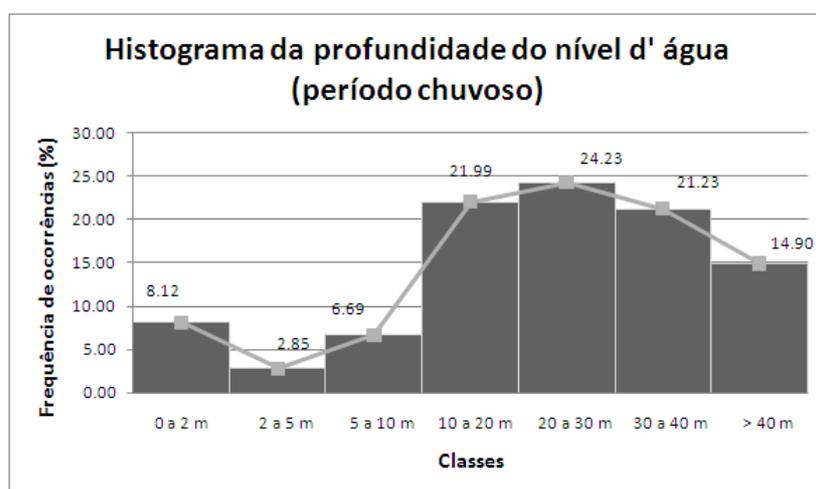


Figura 4.40 – Histograma da profundidade do nível d' água (período chuvoso).

#### 4.4.7 DISTÂNCIA DAS CONSTRUÇÕES

A Tabela 4.13 e a Figura 4.41 mostram a frequência de cada classe para a distância de construções. Observa-se na região uma uniformidade de frequência entre as classes com menor frequência na classe de 5 a 10 m e maior frequência na classe maior que 100 m.

Tabela 4.13 - Área correspondente na região de estudo de cada classe da distância das construções.

ÁREA (ESPES. SAPRÓLITOS)	CLASSES (m)					
	0 - 5	5 -10	10 - 20	20 - 50	50 - 100	>100
Km <sup>2</sup>	12,5	5,75	8,63	15,4	13,35	19,67
Por cento (%)	16,6	7,63	11,47	20,45	17,74	26,14

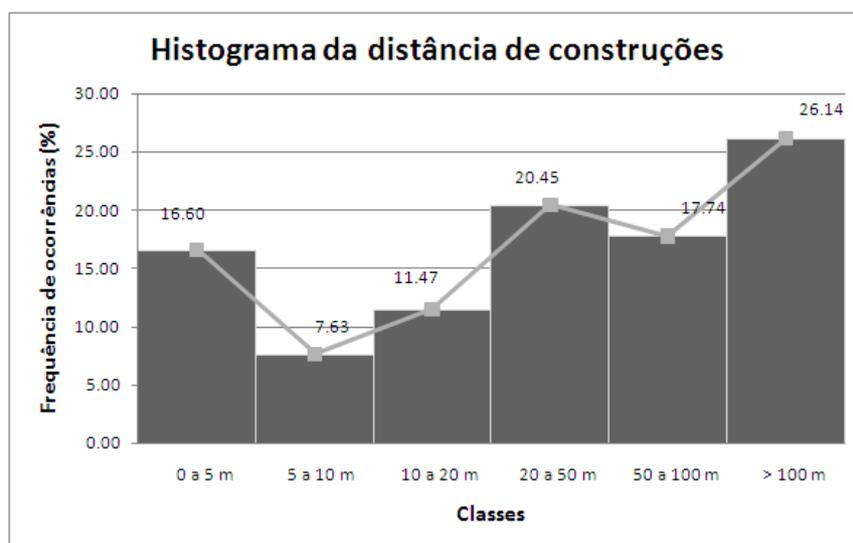


Figura 4.41 - Histograma da distância de construções.

A adequabilidade para obras subterrâneas neste trabalho indica condicionantes em termos de complicações construtivas, implicando custo de construção, assim torna-se de extrema importância o mapa de distância das construções, mostrado na Figura 4.42, pois quanto mais perto de construções tem-se um complicador de custo maior para a construção de obras subterrâneas.

# Carta de distância das construções

Legenda:

- 5 a 10 m
- 10 a 20 m
- 20 a 50 m
- 50 a 100 m
- > 100 m

Convenções Cartográficas:

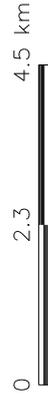
- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro-Chuá

Meridiano Central 45° WGr

1:75.000



Escala Gráfica  
(Escala original 1:10.000)

Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

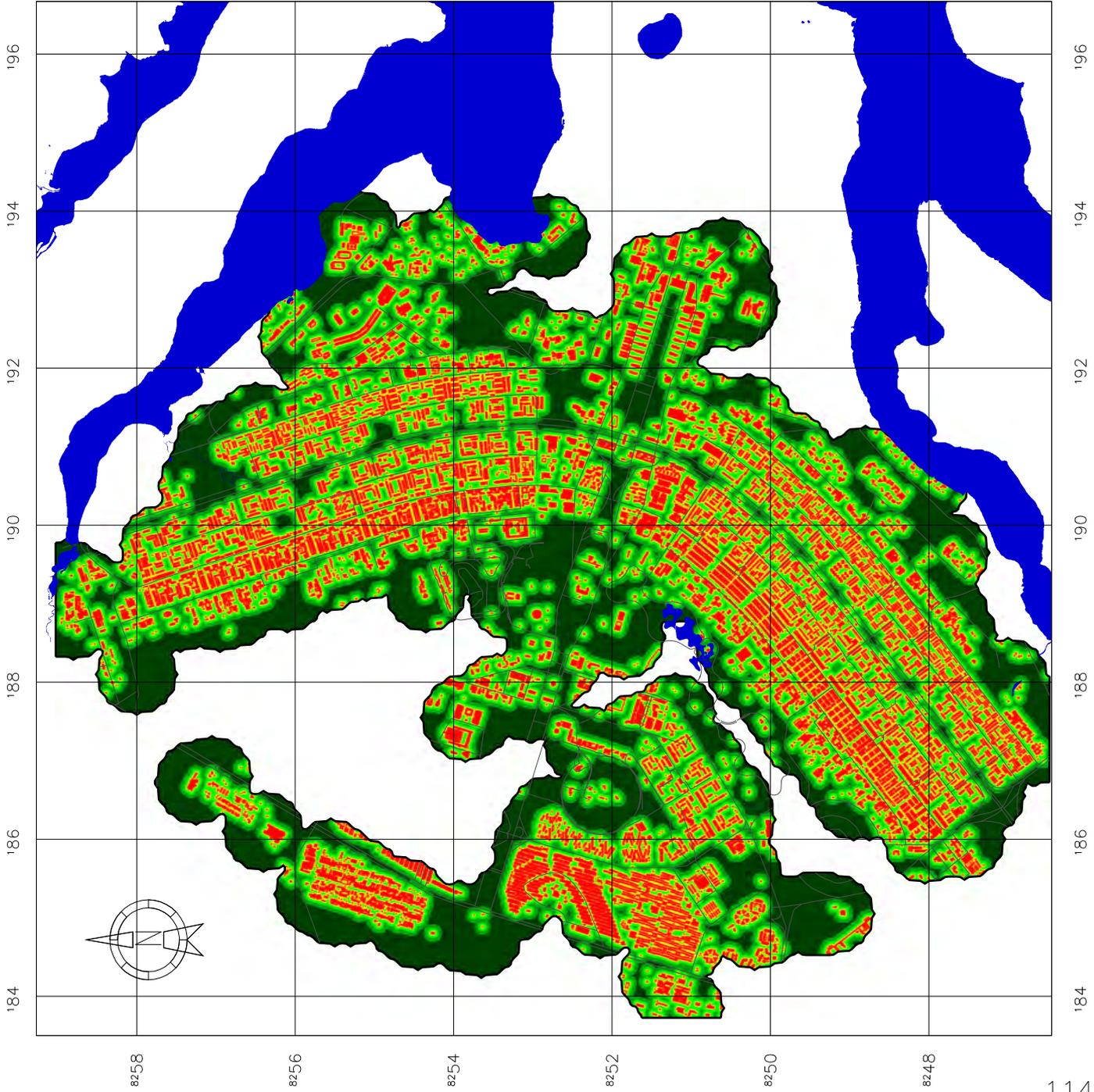


Figura 4.42 – Carta de distância das construções

#### 4.5 SEÇÕES METRÔ SUBTERRÂNEO - ASA NORTE

A partir do momento em que a espacialização tridimensional é realizada, torna-se possível extrair qualquer seção de interesse, bem como obter valores de  $N_{spt}$  ou da seqüência de horizontes do solo em qualquer posição, o que permite que cálculos, como o de estudos para projeto de construção de túneis, sejam realizados com valores mais próximos da realidade.

Neste capítulo serão apresentadas e analisadas três seções de interesse a partir dos modelos tridimensionais de  $N_{spt}$  e da estratigrafia apresentados no Capítulo 4.3. Estas seções são localizadas no Eixinho Norte W, onde, de acordo com o Governo do Distrito Federal (GDF), será construído o metrô subterrâneo - extensão Asa Norte.

##### 4.5.1 SEÇÃO 1 – EIXO RODOVIÁRIO NORTE – 116/113

A Figura 4.43 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da primeira seção de interesse. Esta primeira seção de interesse A-A' localiza-se no canteiro central do Eixo Rodoviário Norte junto ao eixo W ao lado das quadras 116, 115, 114 e 113.

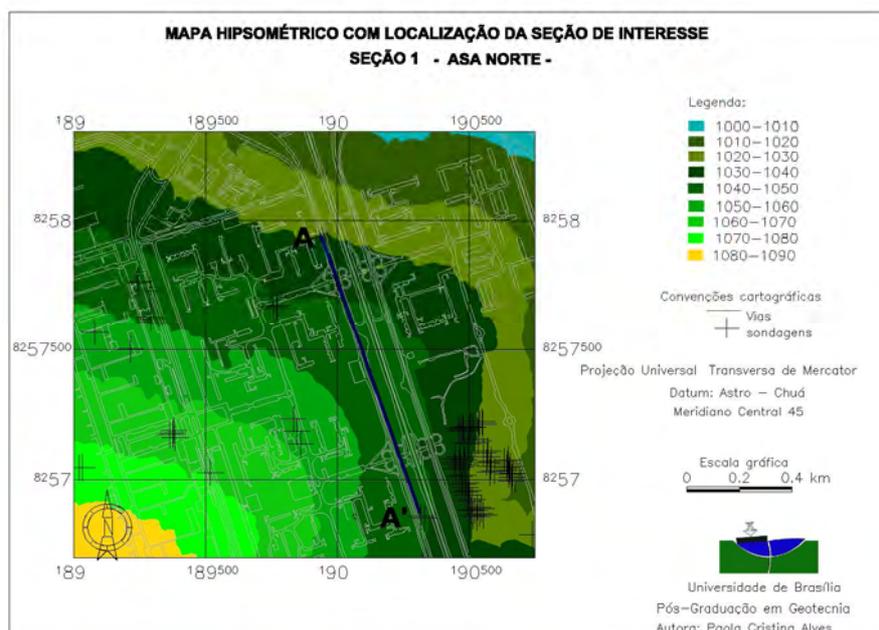


Figura 4.43- Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse.

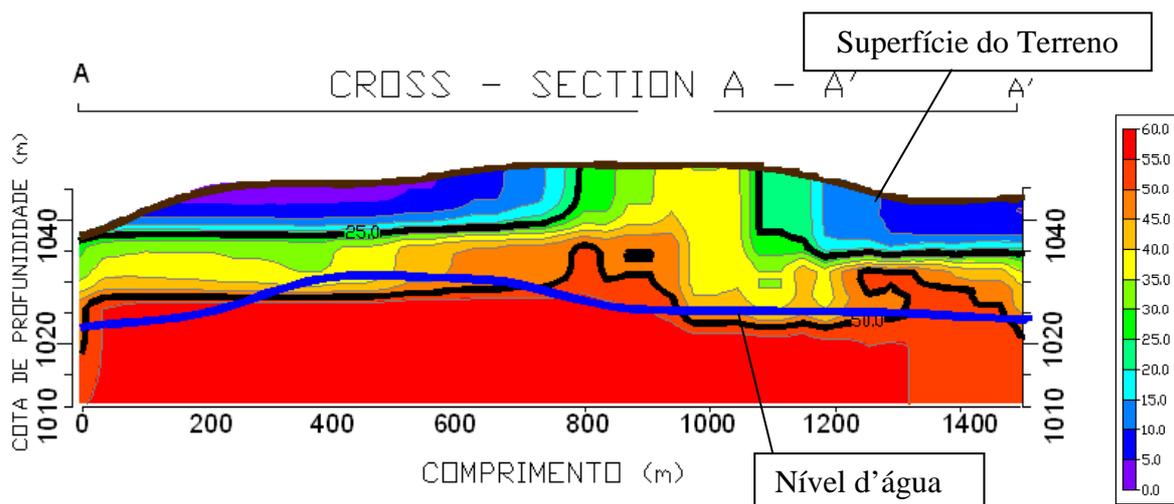


Figura 4.44 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

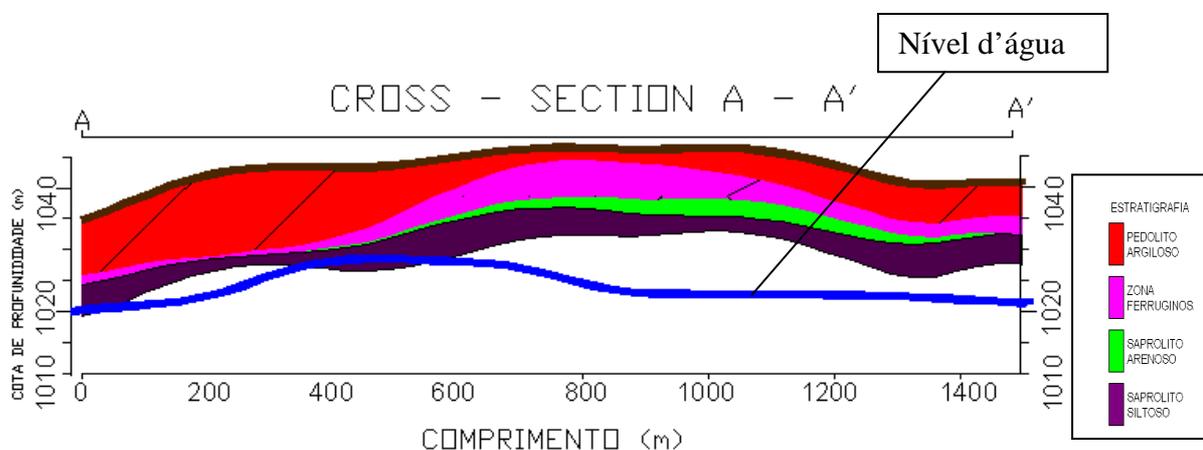


Figura 4.45 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 10.

Nota-se que pelos valores de Nspt mostrados na Figura 4.44, os resultados da espacialização das camadas do solo, mostrando na Figura 4.45, são compatíveis com esses valores. Observe o afloramento da zona ferruginosa, identificado por valores elevados de Nspt na superfície.

Essa porção mais elevada onde se encontra os valores elevados de Nspt é sustentada por camadas de solos mais resistentes (zona ferruginosa, saprólito arenoso e saprólito siltoso), devido provavelmente a geologia complexa existente na região.

De zero a mais ou menos 600 m de comprimento dessa seção de interesse A-A' tem-se uma espessa camada de pedólito e a predominância do saprólito siltoso em seguida aparece o saprólito arenoso acima do siltoso e uma menor camada de pedólito. Esta predominância de

saprólitos deve-se ao fato destas camadas estarem dobradas indicando mais uma vez as evidências de descontinuidades laterais na região.

Nota-se que o nível d' água encontra-se elevado, entre 10 e 20 m de profundidade, situando-se aproximadamente na geratriz inferior e superior do túnel, sendo necessária a realização do rebaixamento do nível d' água.

#### 4.5.2 SEÇÃO 2 – EIXO RODOVIÁRIO NORTE – 112/106

A Figura 4.46 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da segunda seção de interesse. Esta segunda seção de interesse A-A' localiza-se canteiro central do Eixo Rodoviário Norte junto ao eixo W ao lado das quadras 112, 111, 110, 109, 108, 107 e 106.

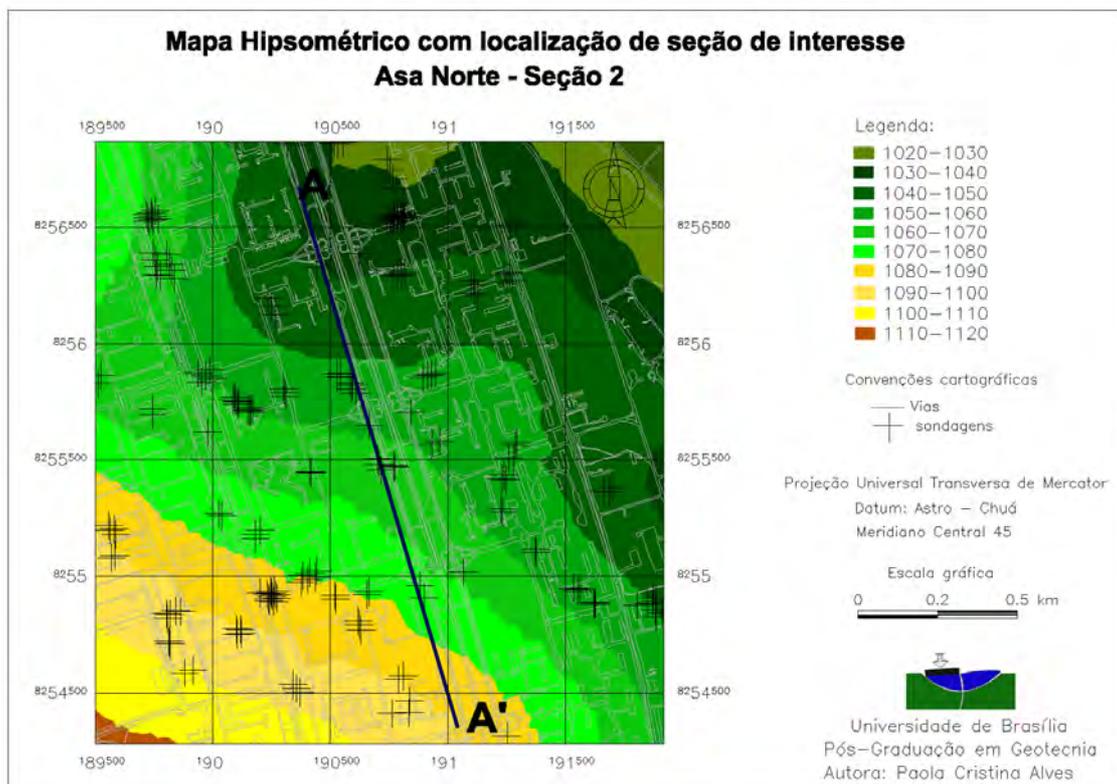


Figura 4.46 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse.

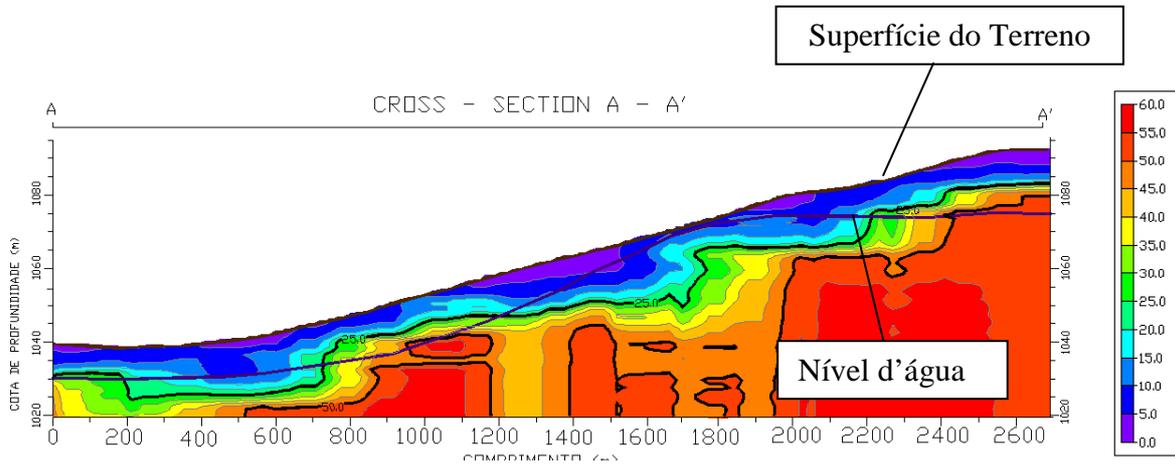


Figura 4.47 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

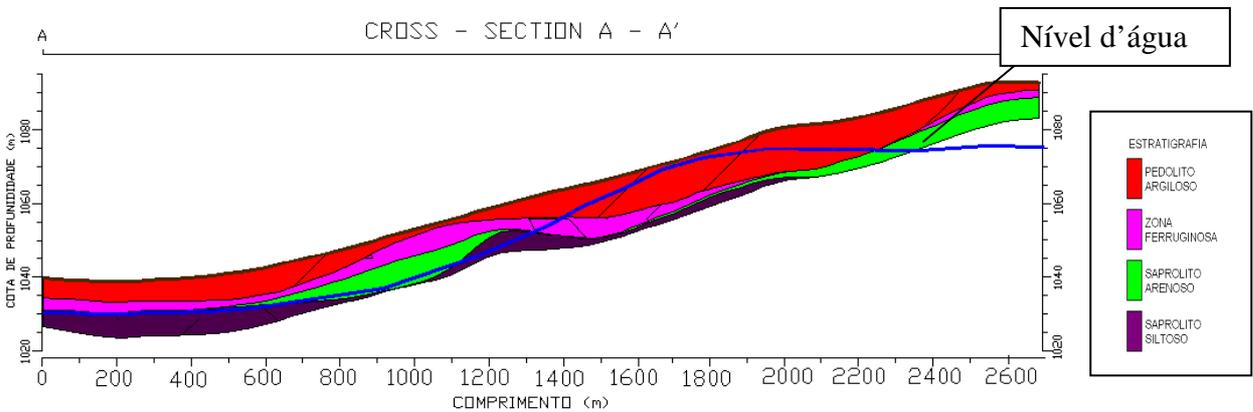


Figura 4.48 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 10.

Percebe-se na Figura 4.47 que ao longo desta região a partir de 10 m da superfície encontram-se valores de Nspt elevados.

A profundidade do nível d'água varia entre zero e 20 m. A Figura 4.48 mostra que na faixa em que se encontra uma espessa camada de solo menos resistente (pedólito) o nível d'água encontra-se aflorante na superfície.

#### 4.5.3 SEÇÃO 3 – EIXO RODOVIÁRIO NORTE – 105/102

A Figura 4.49 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da terceira seção de interesse. Esta terceira seção de interesse A-A' localiza-se canteiro central do Eixo Rodoviário Norte junto ao eixo W ao lado das quadras 105, 104, 103 e 102.

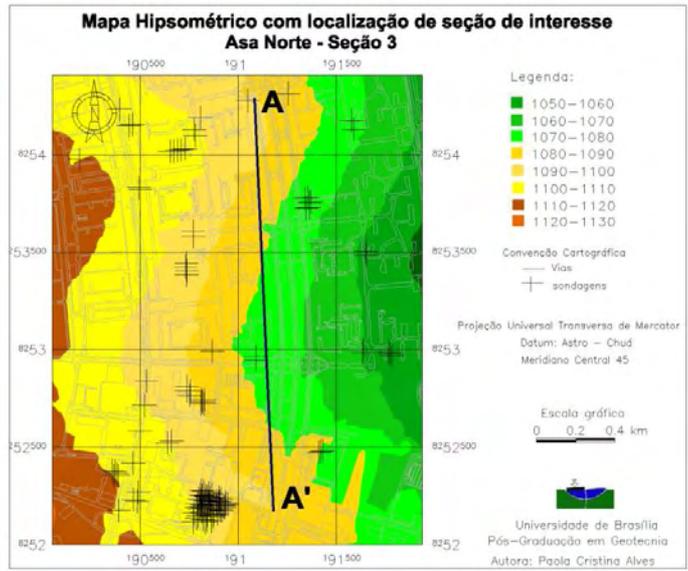


Figura 4.49 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse.

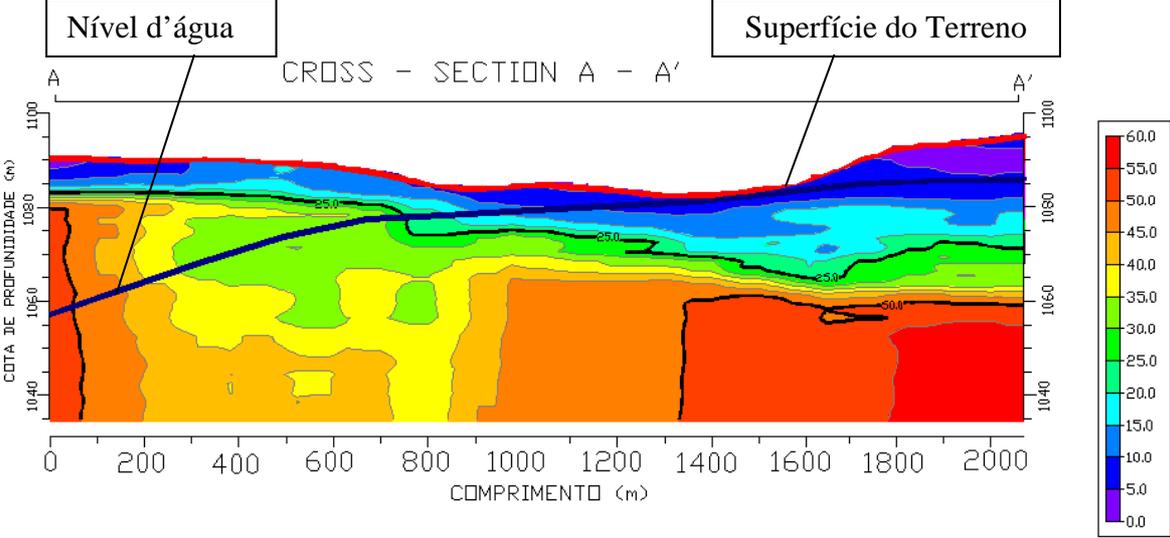


Figura 4.50 - Seção A-A' mostrando os níveis de N<sub>spT</sub>, com exagero vertical de 10.

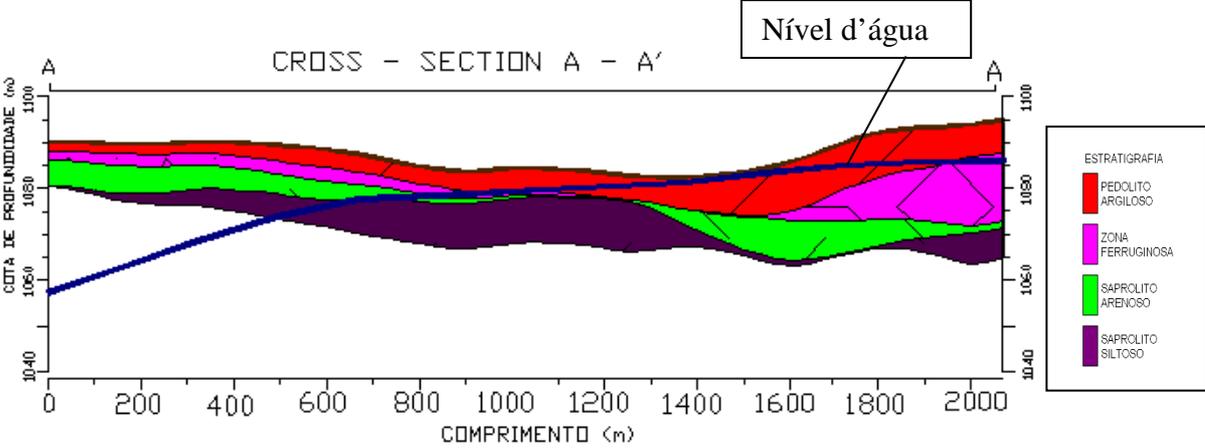


Figura 4.51 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 10.

Pelos valores de  $N_{spt}$  mostrados na Figura 4.50, nota-se que os resultados da espacialização do solo conferem, mostrando na Figura 4.51 a faixa espessa de pedólito, identificado por valores baixos e médios de  $N_{spt}$ .

A profundidade do nível d' água varia entre zero e 40 m. Percebe-se novamente que na faixa em que se encontra uma espessa camada de solo menos resistente (pedólito) o nível d' água encontra-se aflorante na superfície.

#### 4.6 SEÇÕES METRÔ DE SUPERFÍCIE - W3 NORTE

Neste item serão apresentadas e analisadas três seções de interesse, para o Metro de Superfície da W3 Norte, obtidas a partir dos modelos tridimensionais de  $N_{spt}$  e da estratigrafia apresentados no item 4.3. Estas seções são localizadas na W3 Norte, onde, de acordo com o Governo do Distrito Federal (GDF), será construído o metrô de superfície. Assim este estudo possibilitou indicar, com base nas características geológico-geotécnicas do subsolo, a possibilidade de uma alternativa de construção subterrânea ao metrô de superfície na Asa Norte.

##### 4.6.1 SEÇÃO 1 - W3 NORTE - SETOR HOSPITALAR NORTE/513

A Figura 4.52 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da primeira seção de interesse. Esta primeira seção de interesse A-A' inicia próximo ao setor hospitalar norte e segue pela W3 ao lado das quadras 516, 515, 514 e 513.

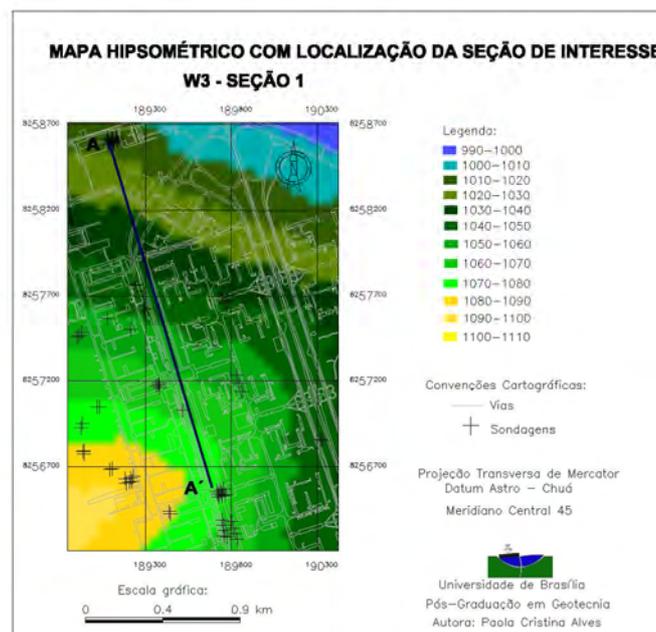


Figura 4.52- Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse.

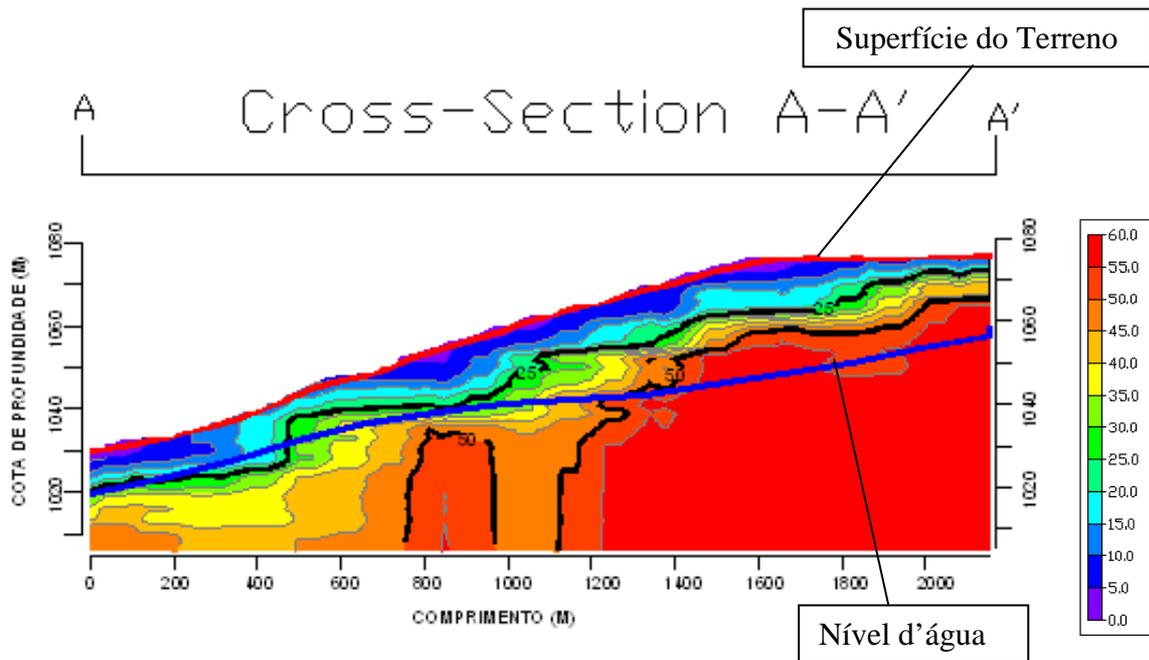


Figura 4.53 -Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

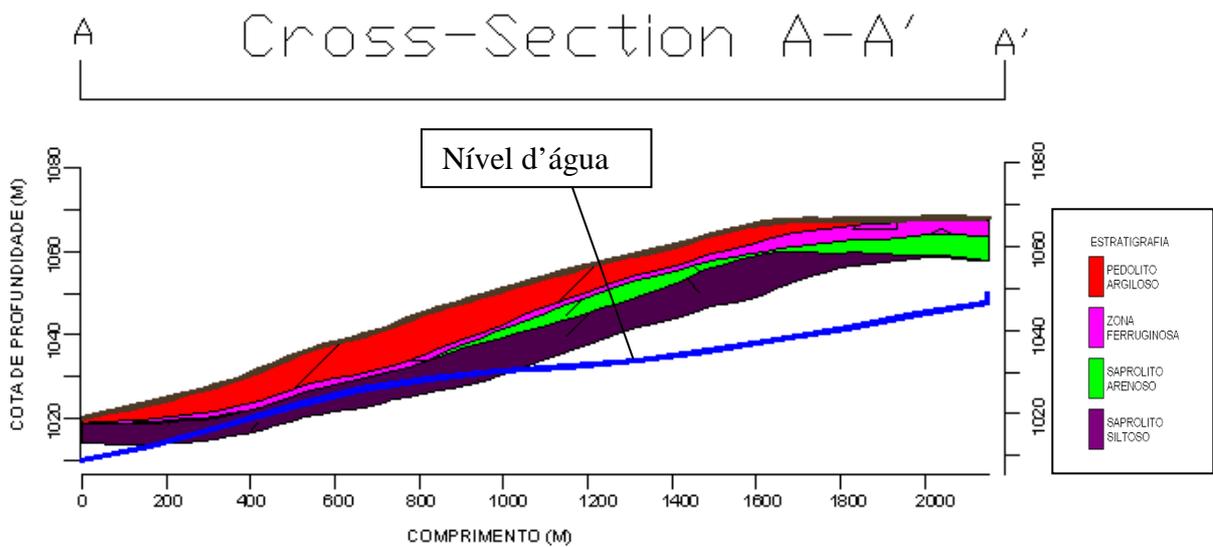


Figura 4.54 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 10.

A Figura 4.53 mostra menores valores de Nspt em locais de menores altitudes. Comparando com a Figura 4.54 notam-se elevados valores de Nspt à medida que vai desaparecendo a espessura do pedólito.

Percebe-se que de zero a aproximadamente 1000 m de comprimento dessa seção de interesse A-A' tem-se a predominância do saprólito siltoso em seguida aparece intercalado entre ele o pedólito o saprólito arenoso. A Zona Ferruginosa apresenta-se ao longo da região com

pequenas espessuras, mas torna-se mais espessa na porção mais elevada da seção, corroborando com a idéia de que as porções elevada e aplainadas são sustentadas por estes horizontes ferruginosos.

A profundidade do nível d' água varia entre 10 e 30 m e está presente no material inconsolidado apenas nas porções mais baixas da seção.

#### 4.6.2 SEÇÃO 2 - W3 NORTE - 512 /506

A Figura 4.55 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da segunda seção de interesse. Esta segunda seção de interesse A-A' inicia ao lado das quadras 512, 511, 510, 509, 508, 507 e 506.

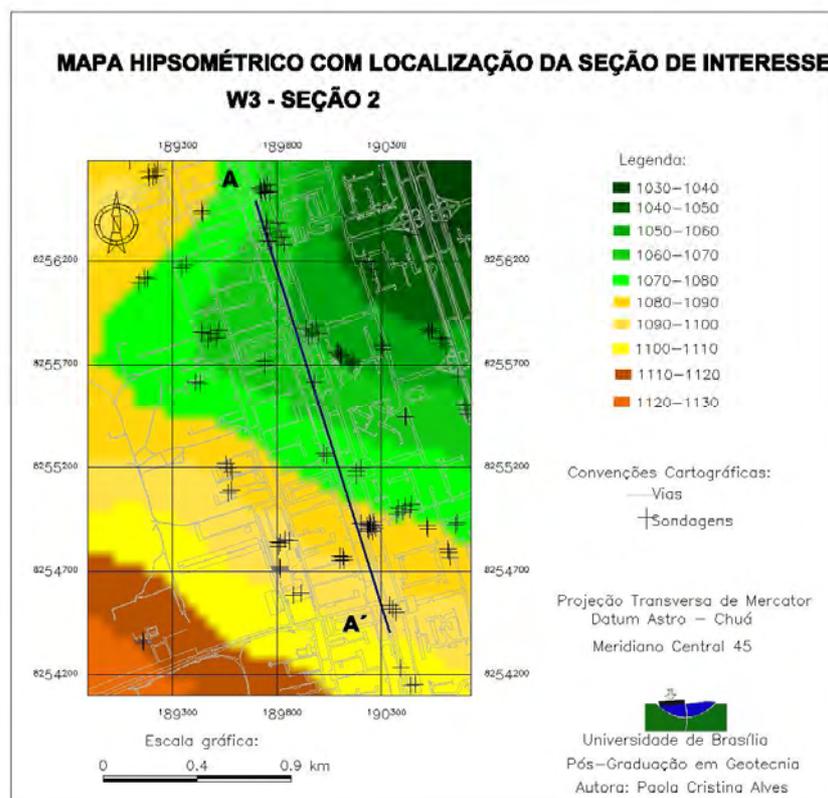


Figura 4.55 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse.

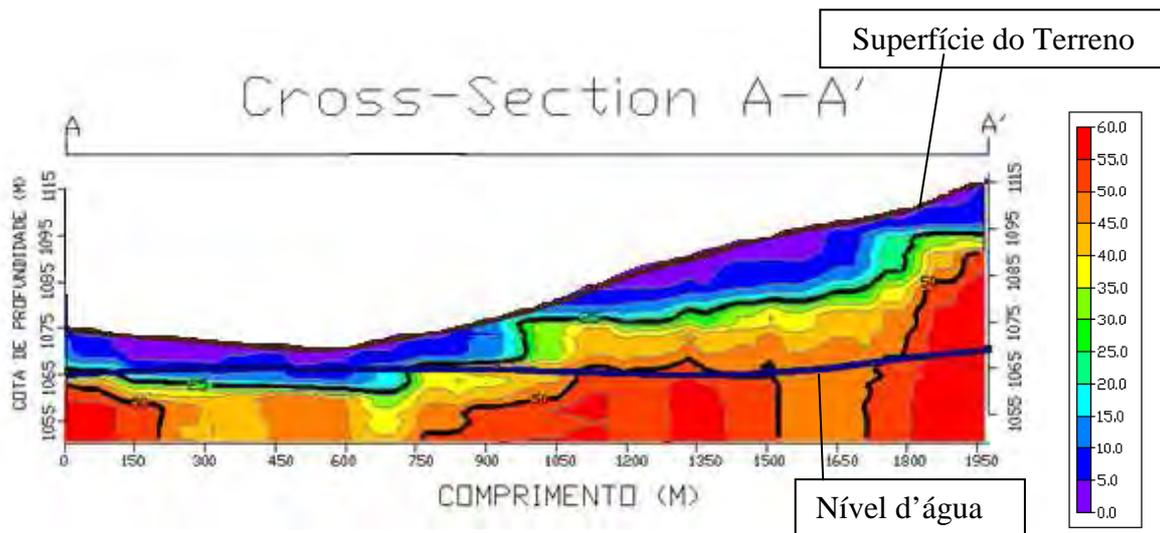


Figura 4.56 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

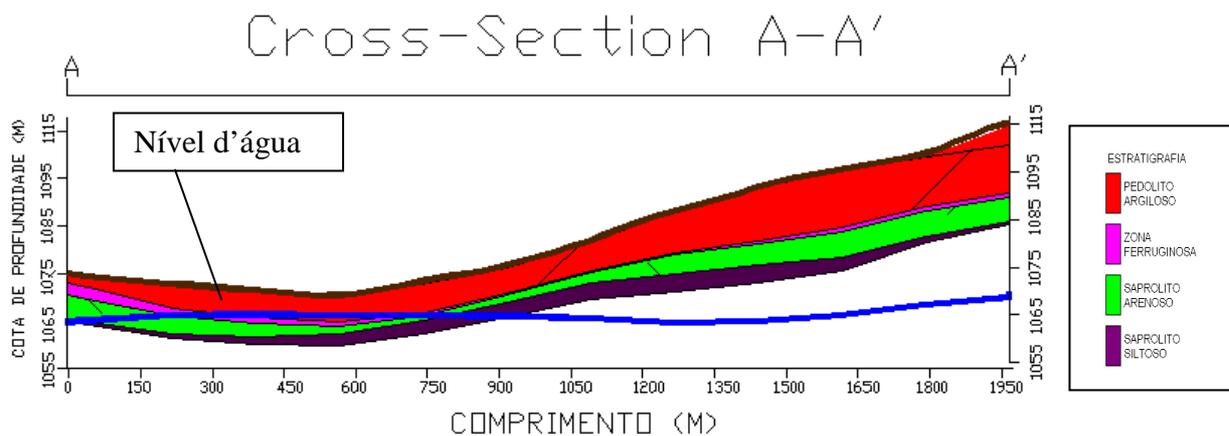


Figura 4.57 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 10.

A Figura 4.56 mostra a variação uniforme dos valores de Nspt ao longo da área. Encontrando-se valores baixos a altos de Nspt. Nota-se, de acordo com a Figura 4.57 que há camadas argilosas superficiais, normalmente menos resistentes, que atingiram Nspt em torno de 25 golpes.

A profundidade do nível d' água varia entre 10 e 30 m. O nível d' água aparece próximo a superfície em altitudes menores e baixos valores de Nspt.

#### 4.6.3 SEÇÃO 3 – W3 NORTE – 505/SETOR COMERCIAL NORTE

A Figura 4.58 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da terceira seção de interesse. Esta terceira seção de interesse A-A' inicia ao lado das quadras 505, 504, 503, 502 e próximo ao Setor Comercial Norte.

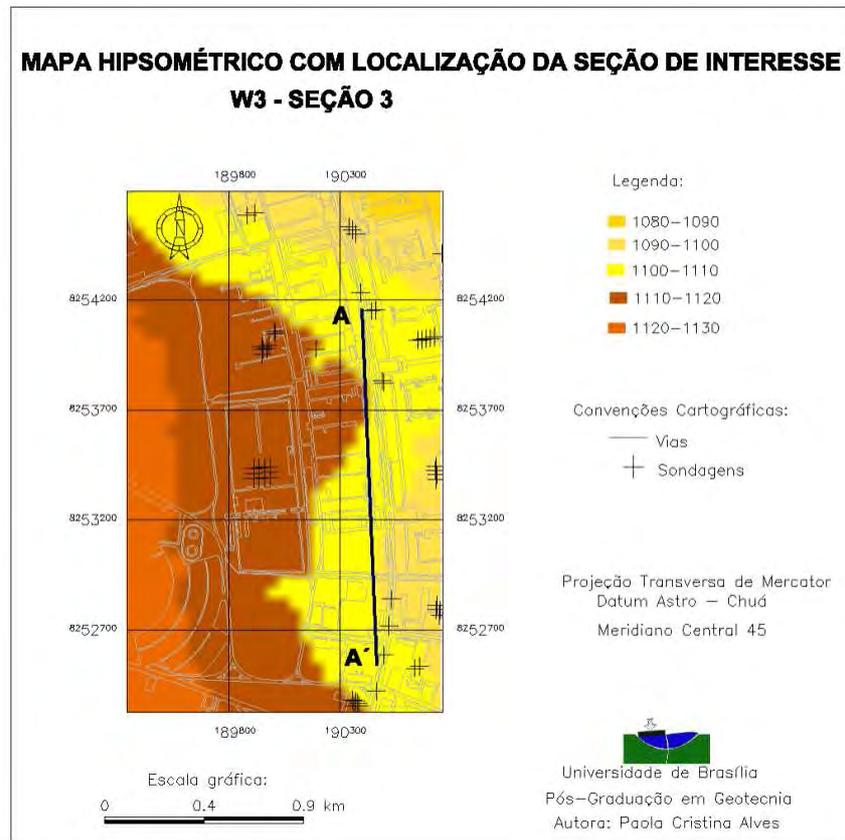


Figura 4.58 - Carta hipsométrica, com localização de seção de interesse.

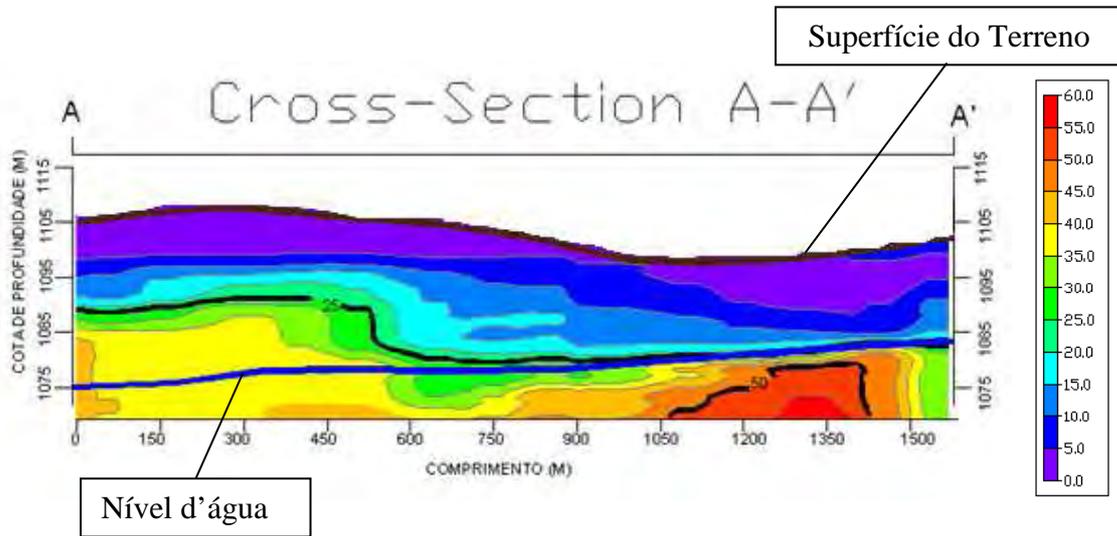


Figura 4.59 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

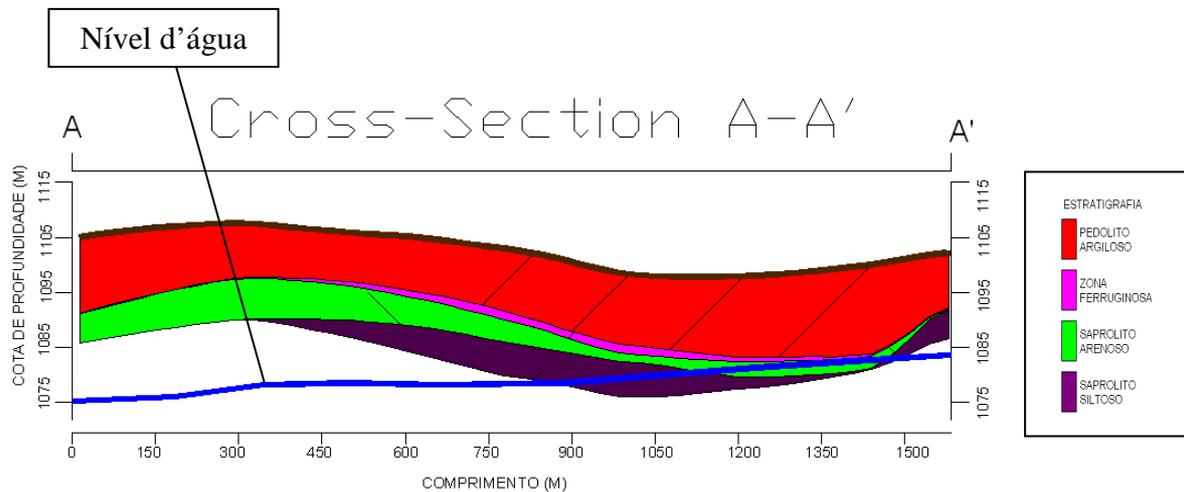


Figura 4.60 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 10.

De acordo com a Figura 4.59, percebe-se ao longo desta área, que em sua maioria há valores de Nspt situados na faixa baixa a média, que comparando com a Figura 4.60 há ao longo de toda a região uma espessa camada de pedólito, camada de solo normalmente menos resistente.

A Zona Ferruginosa apresenta-se apenas em um trecho da região e com pequena espessura.

A profundidade do nível d'água varia de 20 a 30 m não influenciando na geratriz do túnel.

#### 4.7 MODELOS 3D DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: ESTAÇÃO ASA NORTE

Este item apresenta modelos tridimensionais (3D), a partir de 35 sondagens presentes na região. Foram elaborados modelos de Nspt e da estratigrafia, e sua seção de interesse do estudo de caso: estação Asa Norte, área de estudo compreendendo parte das quadras 502, 302 e 102 norte, setor comercial norte (SCN), setor hoteleiro norte (SHN) e setor bancário norte (SBN).

A seção de interesse foi localizada no SCN. A escolha dessa seção foi conveniente, pois é onde será de acordo com o Governo do Distrito Federal (GDF) construído a estação subterrânea do metrô de superfície da Asa Norte.

A Figura 4.61 apresenta uma visão geral dos níveis de Nspt interpolados e espacializados tridimensionalmente.

Na visão geral do modelo tridimensional de solo, apresentada na Figura 4.62, mostra-se além das camadas de solos, o afloramento do nível d' água. As Figuras 4.63, 4.64 e 4.65 são as seqüências de visualização das camadas de solo.

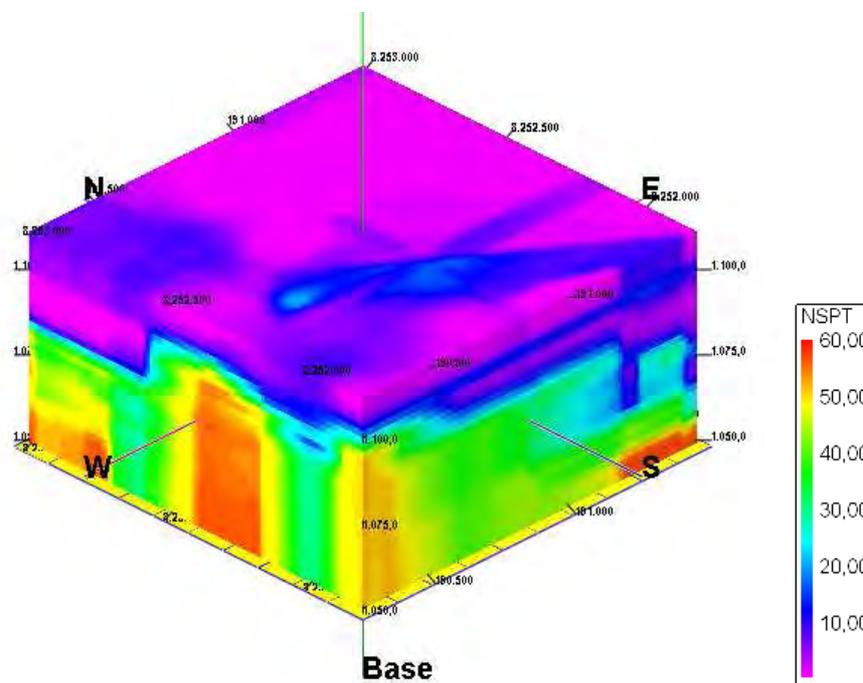


Figura 4.61 – Modelo tridimensional (3D) de Nspt, com exagero vertical de 10, da região do estudo de caso – Estação Asa Norte.

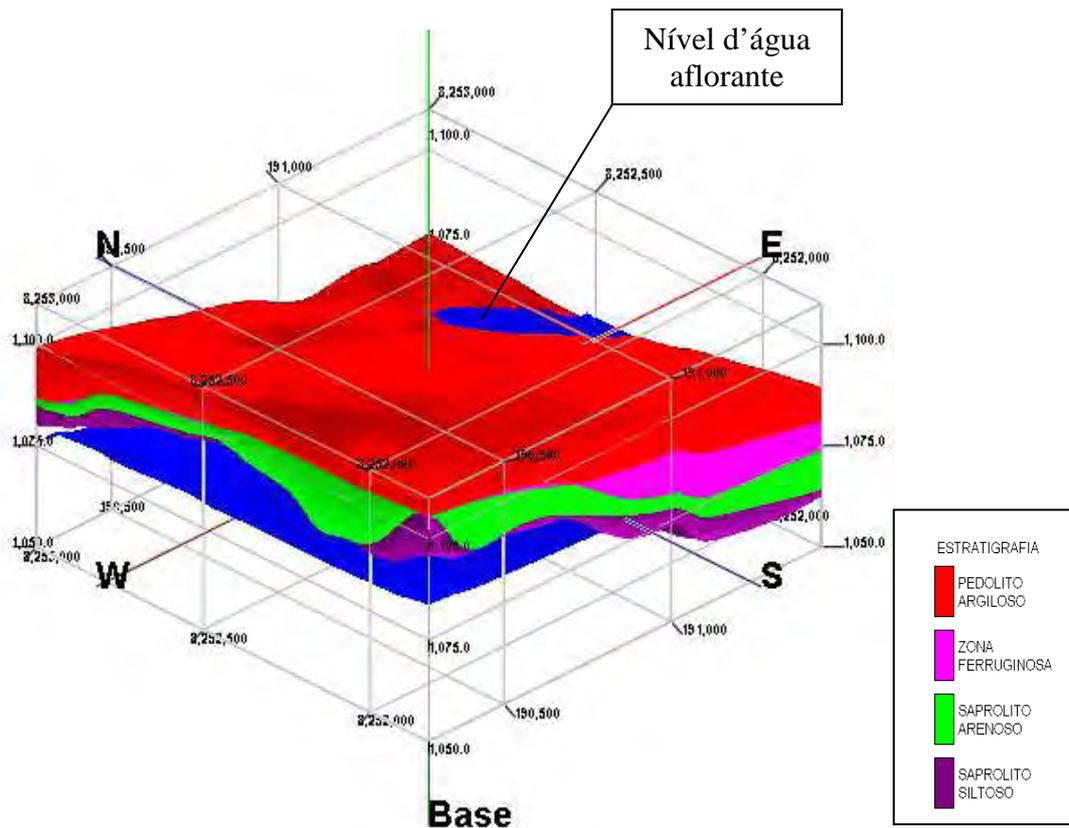


Figura 4.62 - Seqüência 1 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, mostrando todas as camadas de solo, do estudo de caso – Estação Asa Norte.

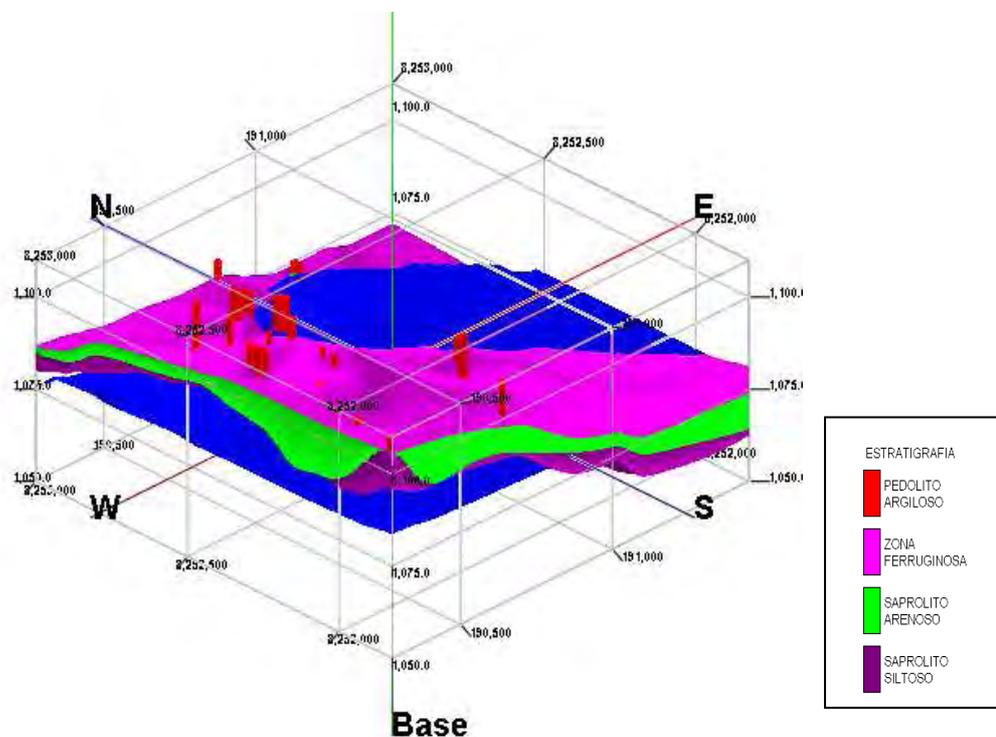


Figura 4.63 - Seqüência 2 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada da zona ferruginosa e a superfície do nível d'água, do estudo de caso – Estação Asa Norte.

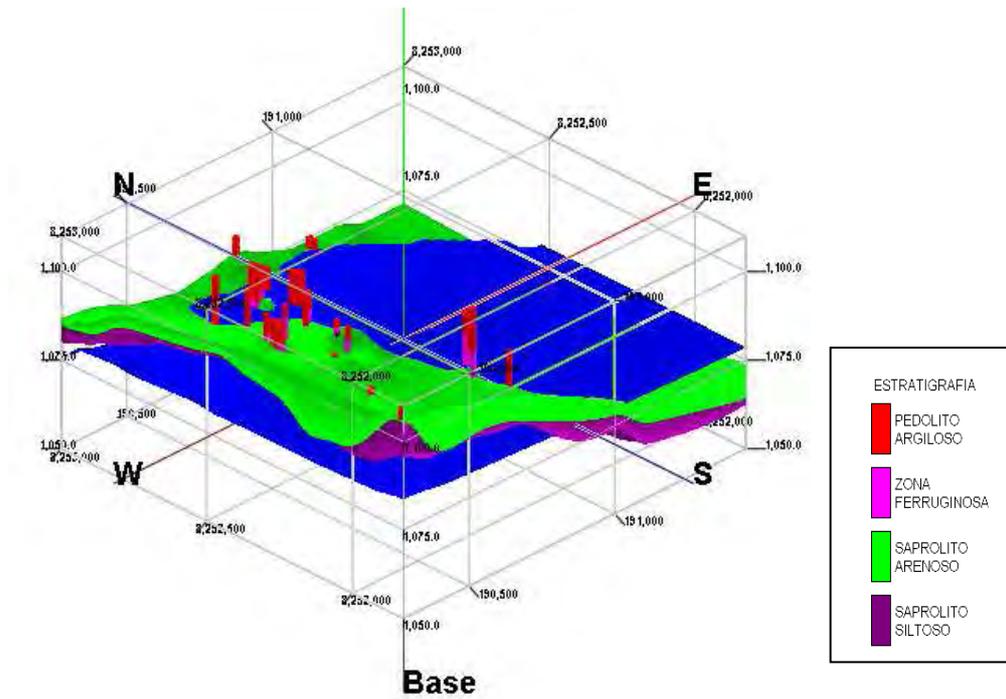


Figura 4.64 - Seqüência 3 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada do saprólito arenoso e a superfície do nível d'água, do estudo de caso – Estação Asa Norte.

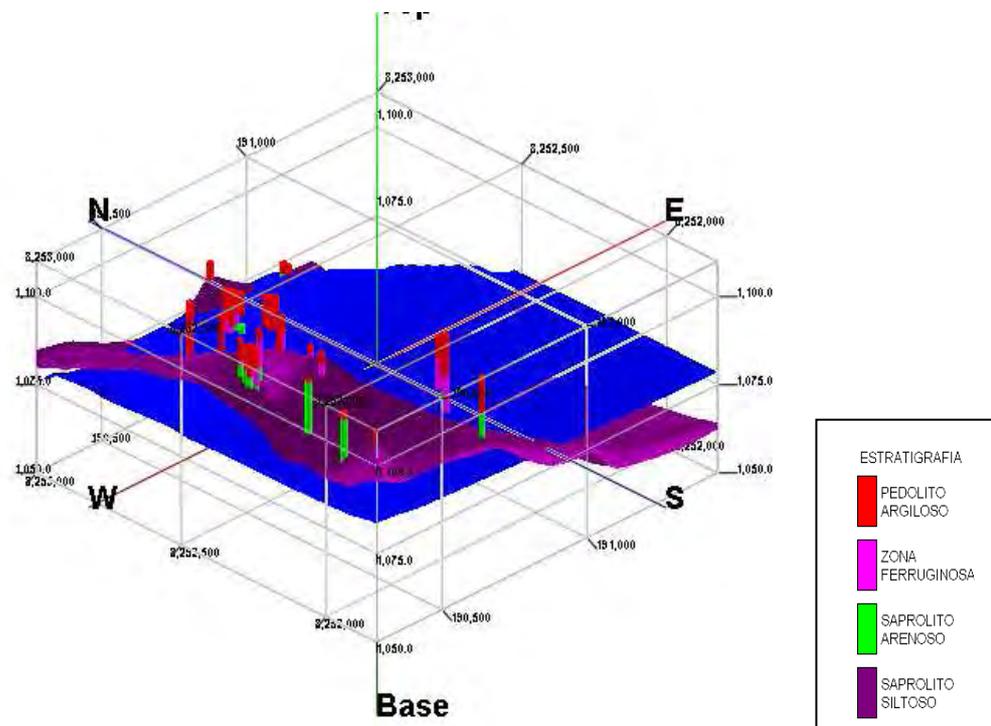


Figura 4.65 - Seqüência 4 do modelo 3D do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada do saprólito silteoso e a superfície do nível d'água, do estudo de caso – Estação Asa Norte.

A Figura 4.66 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação da seção de interesse.

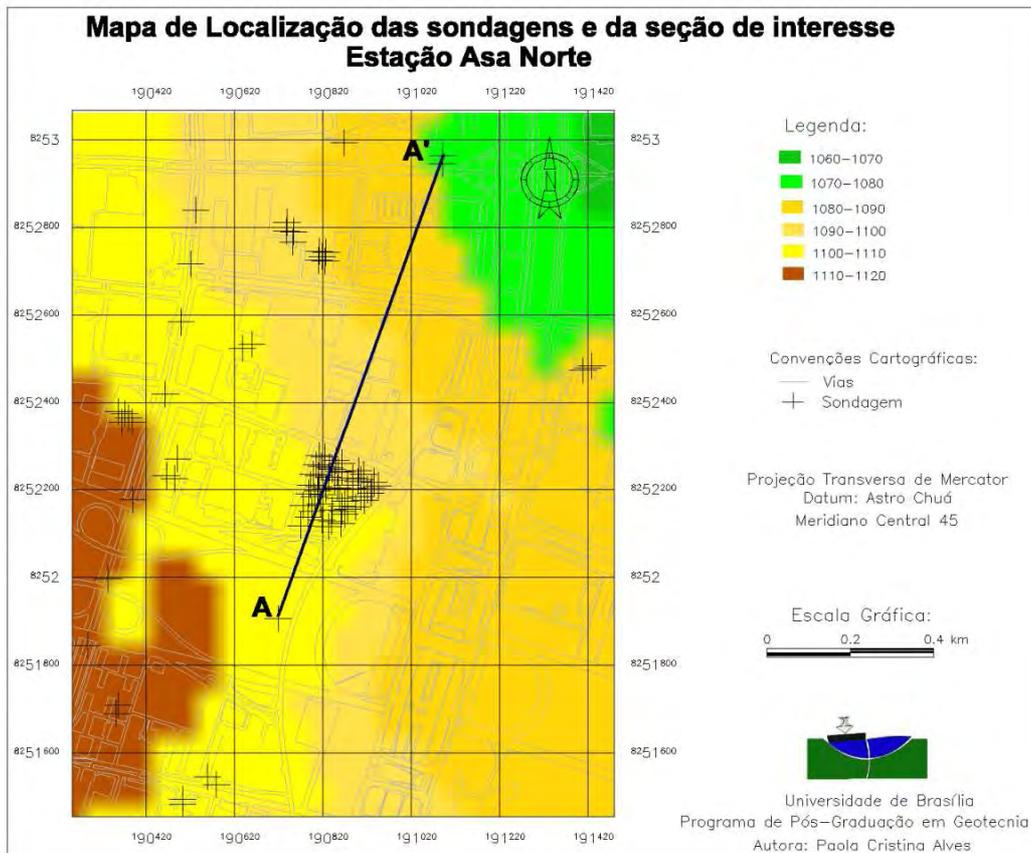


Figura 4.66 - Carta hipsométrica, com localização da seção de interesse.

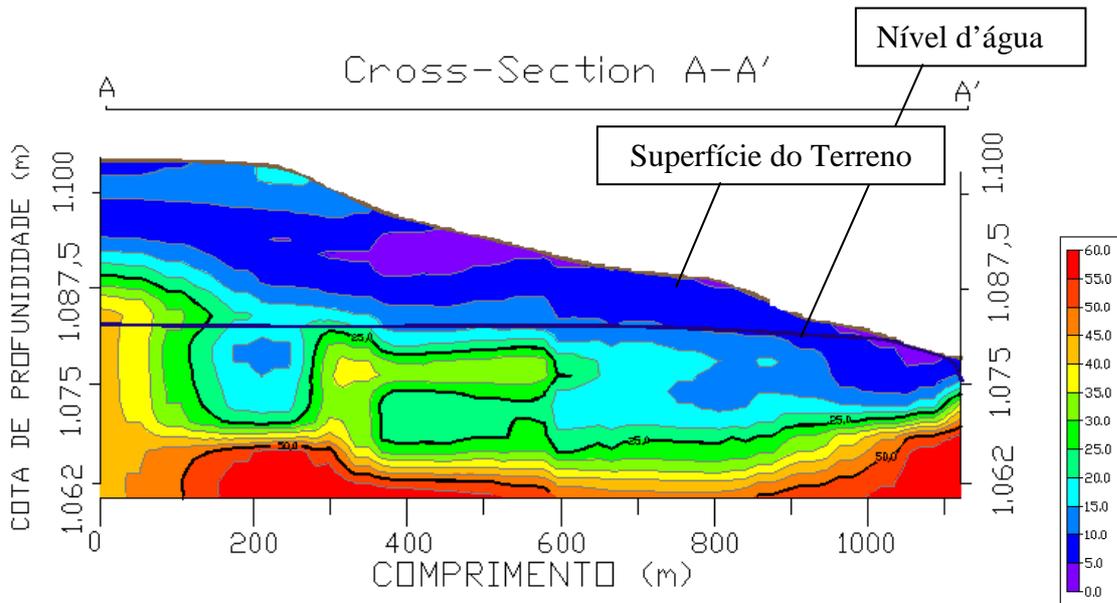


Figura 4.67 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt e o nível d'água, com exagero vertical de 10.

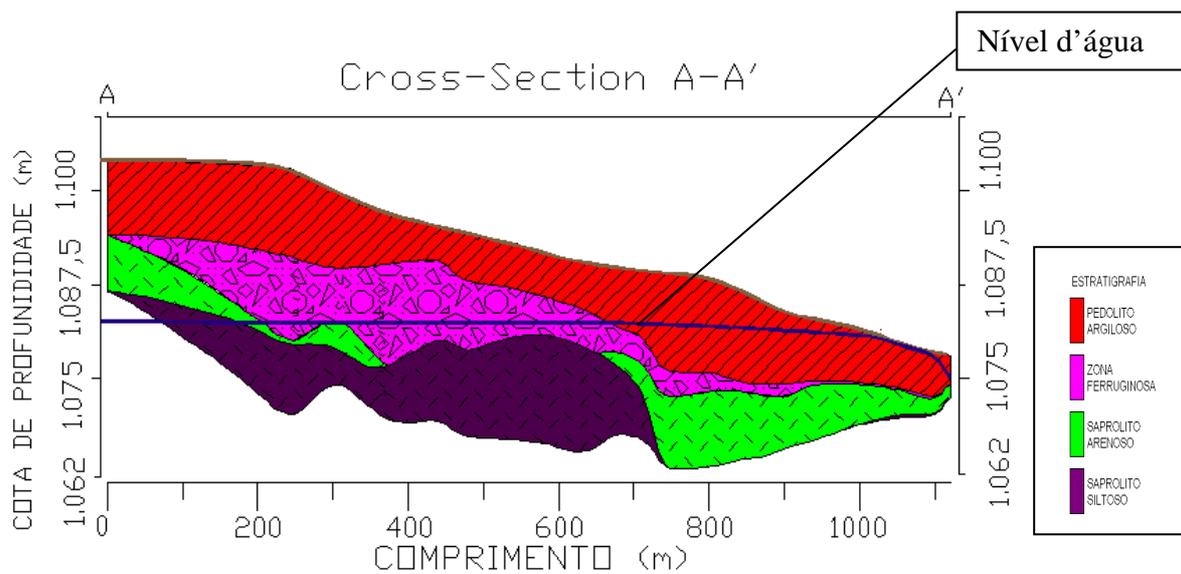


Figura 4.68 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo e nível d'água, com exagero vertical de 10.

Na Figura 4.67 percebem-se picos de Nspt (entre 25 golpes) e comparando com a Figura 4.68 estes picos acontecem ao atingir a espessa camada de zona ferruginosa.

Observa-se que ocorrem em determinadas áreas o saprólito siltoso sob o arenoso e em contato lateral provocando variação lateral condicionada pelas discontinuidades geológicas do mesmo. Isto se deve provavelmente às diversas falhas geológicas existentes na região. Estas variações foram observadas na seção interpolada da estratigrafia e não nas figuras dos

modelos tridimensionais das camadas de solo, pois a superfície do nível d' água aflorante está encobrendo-as.

De acordo com a Figura 4.68 na extensão de 800 a 1000 m tem-se um nível d' água aflorante indicando a necessidade do rebaixamento do lençol freático para a construção de obras subterrâneas. E neste trecho observa-se uma maior espessura de pedólito (solo menos resistente) indicando assim maior custo para a sustentação das paredes e do teto do túnel do metrô.

#### 4.8 MODELOS 3D DE SOLOS - ESTUDO DE CASO: ZONA CENTRAL SUL

Este item apresenta modelos tridimensionais (3D), a partir de 90 sondagens presentes na região, de Nspt e da estratigrafia, e suas seções de interesse do estudo de caso: Zona Central Sul, área de estudo compreendendo as quadras 102, 103, 202, 203, 302, 303, 402, 403, 502, 503, 702, 703 sul, setor comercial sul (SCS), setor hoteleiro sul (SHS) e setor bancário sul (SBS).

As seções foram localizadas nas áreas SCS, SBS e entrequadras 402/403 sul, áreas de intenso fluxo e, portanto consideradas de interesse para o governo do Distrito Federal (GDF) para a construção de estacionamentos subterrâneos.

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 estudos de viabilidade e racionalizar a investigação geotécnica para projetos de construção de garagens subterrâneas.

A Figura 4.69 apresenta uma visão geral dos níveis de Nspt interpolados e espacializados tridimensionalmente.

A Figura 4.70 apresenta uma visão geral 3D da estratigrafia com todas as camadas modeladas.

As Figuras 4.71, 4.72 e 4.73 são as seqüências de visualização retirando cada uma das camadas de solo.

Pode ser observado na Figura 4.72 o afloramento do topo da camada do saprólito siltoso que mostra a alternância de saprólitos siltoso e arenoso devido provavelmente a presença de dobramentos e/ou de falhas geológicas.

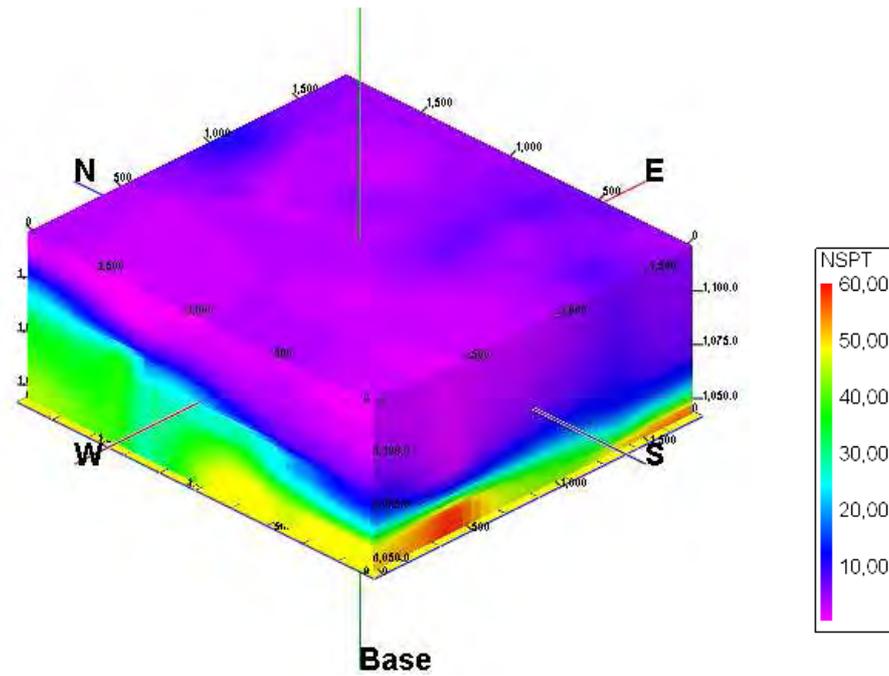


Figura 4.69 – Modelo tridimensional (3D) de Nspt, com exagero vertical de 10, da região do estudo de caso – Região Central Sul.

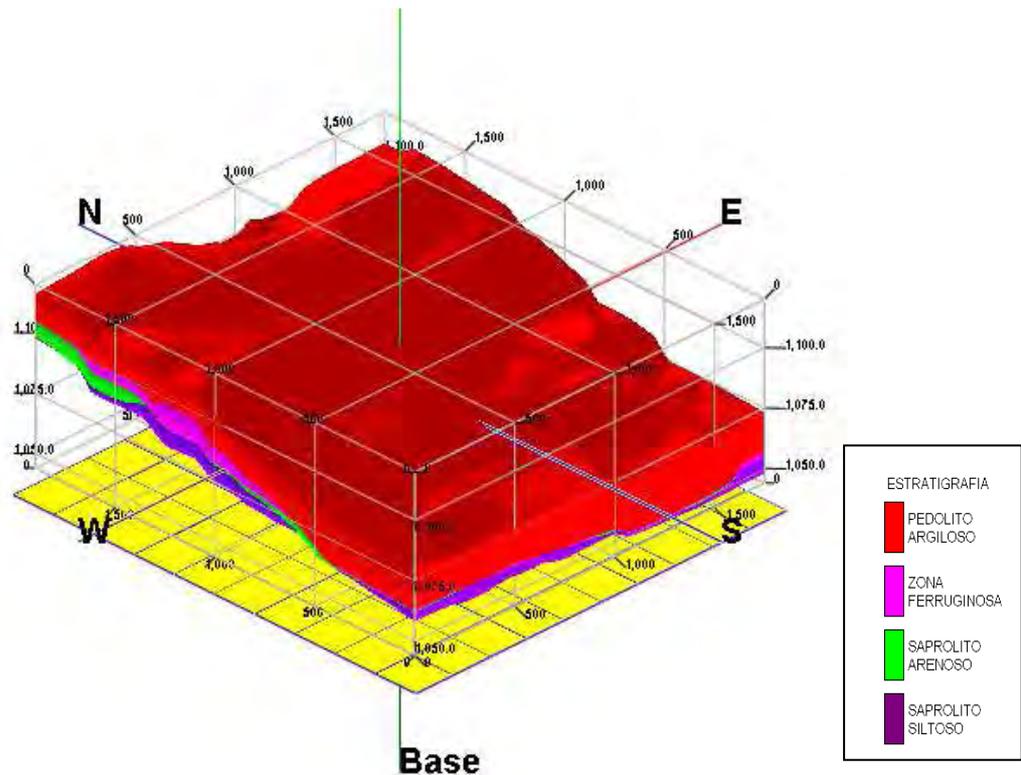


Figura 4.70 - Sequência 1 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, mostrando todas as camadas de solo, da região do estudo de caso – Região Central Sul.

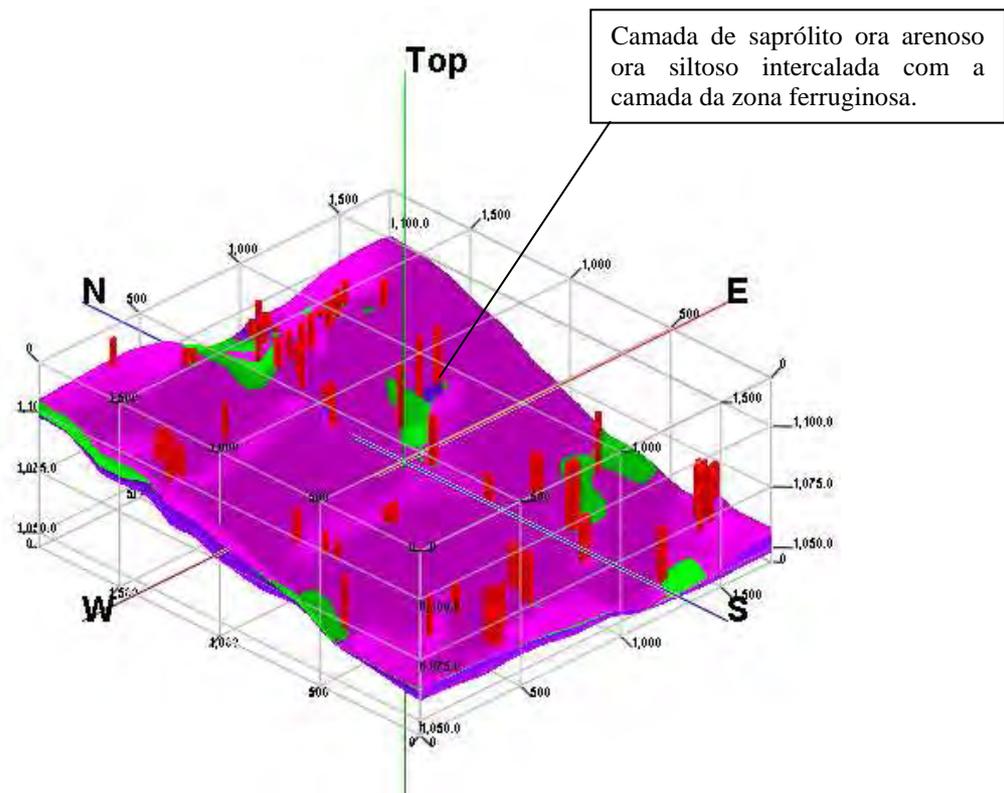


Figura 4.71- Seqüência 2 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada da zona ferruginosa intercalada com os saprólito arenoso e siltooso, da região do estudo de caso – Região Central Sul.

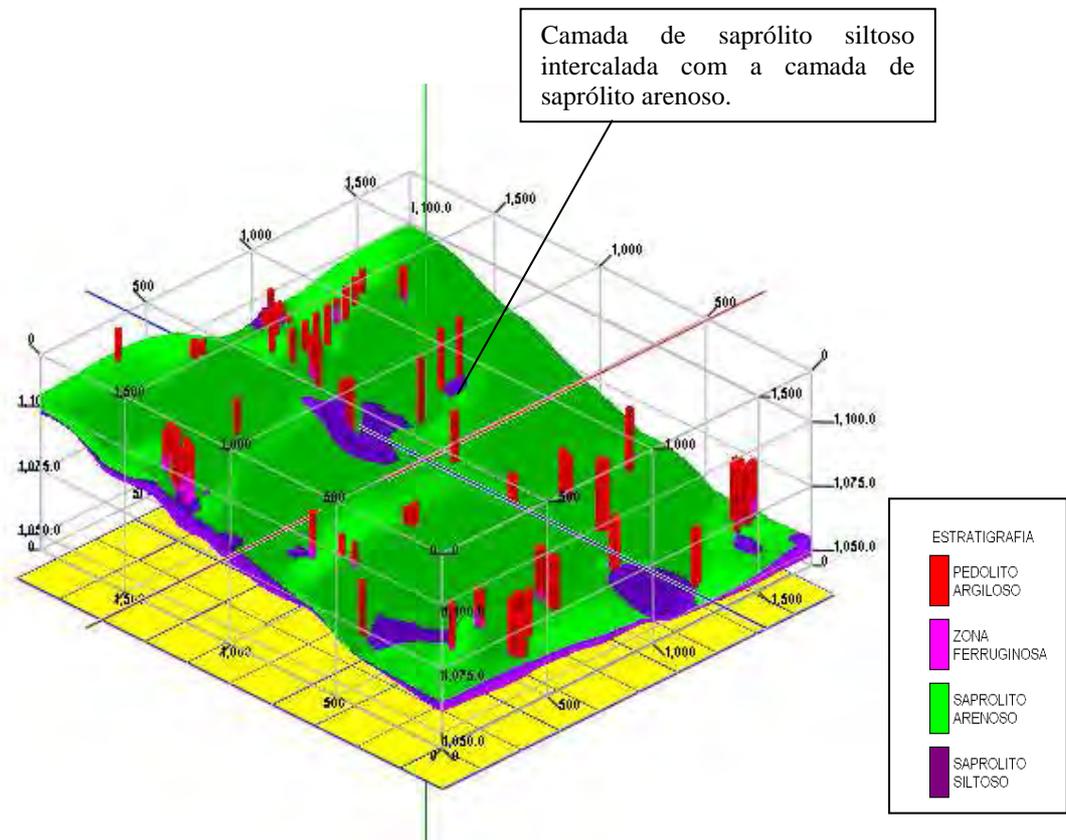


Figura 4.72- Sequência 3 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10, destacando a camada do saprólito arenoso intercalada com o saprólito siltoso, da região do estudo de caso – Região Central Sul.

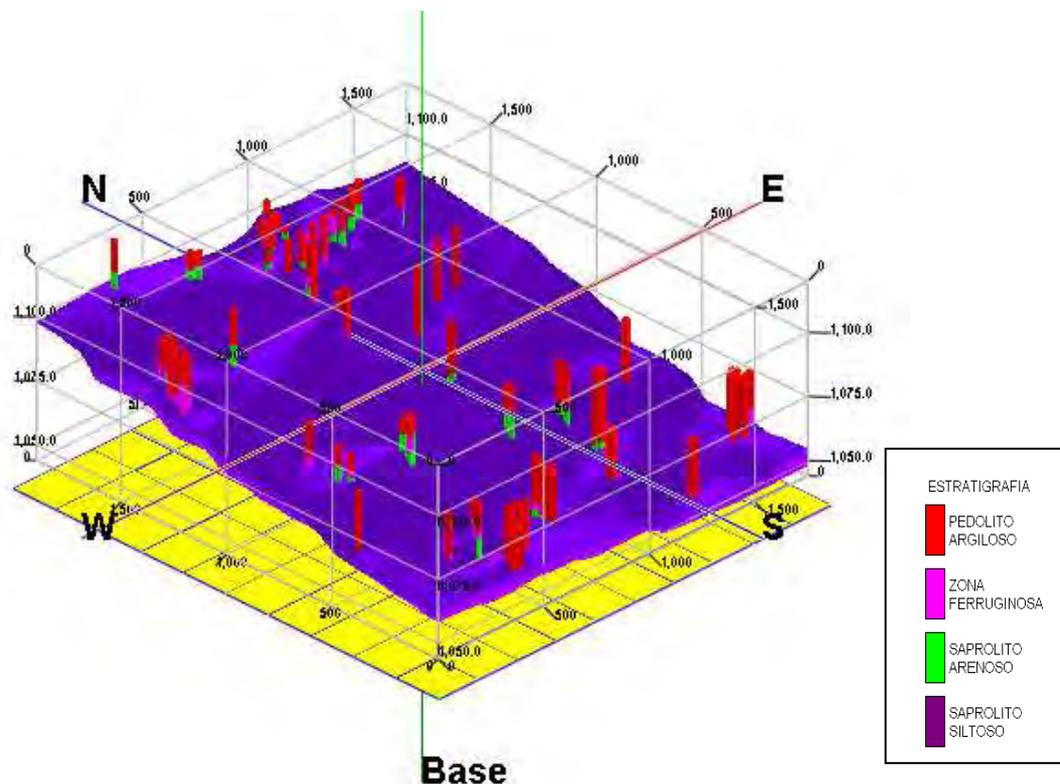


Figura 4.73 - Sequência 4 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada do saprólito siltoso, da região do estudo de caso – Setor Comercial Sul.

A Figura 4.74 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação de três seções de interesse. A seção A-A' localiza-se na entrequadra 402/403 sul, a seção B-B' no SBS e a seção C-C' no SCS.

O nível d' água nesta área de estudo encontra-se em profundidades maiores que 10 m, como pode ser observado na Figura 4.38. Portanto, como esta área de estudo foi analisada para a adequabilidade para a construção de garagens subterrâneas, construídas até três pavimentos (9m), o nível d' água neste item não será analisado.

A Figura 4.75 mostra a seção longitudinal A-A' com a identificação dos valores de Nspt seguida da Figura 4.76 mostrando as camadas de solo obtidas no modelo. A Figura 4.77 mostra a seção longitudinal B-B' com a identificação dos valores de Nspt seguida da Figura 4.78 mostrando as camadas de solo obtidas no modelo. A Figura 4.79 mostra a seção longitudinal C-C' com a identificação dos valores de Nspt seguida da Figura 4.80 mostrando as camadas de solo obtidas no modelo. Em todas as seções citadas percebem-se descrições semelhantes. Valores uniformes, sem picos, de Nspt na faixa de baixo a média, variando para a faixa alta quando, comparado com as seções da estratigrafia, atinge a zona ferruginosa ou o saprólito arenoso ou o siltoso. Percebe-se também em todas as seções A-A', B-B' e C-C' uma espessa camada (aproximadamente de 20 m) de solo menos resistente (pedólito).

Na seção B-B' (Figura 4.78) percebe-se o predomínio, em quase a totalidade de sua área, do saprólito siltoso e na seção C-C' (Figura 4.80) a existência, além do pedólito e da zona ferruginosa, apenas do saprólito siltoso.

Percebe-se uma grande espessura de pedólito (solo menos resistente) em todas as seções apresentadas, indicando uma boa adequabilidade para a construção de garagens subterrâneas nesta área, pois será baixo o custo para a escavação do solo. Contudo, as seções B-B' e C-C' apresentam pequenas espessuras de saprólitos indicando maior custo para as fundações das garagens.

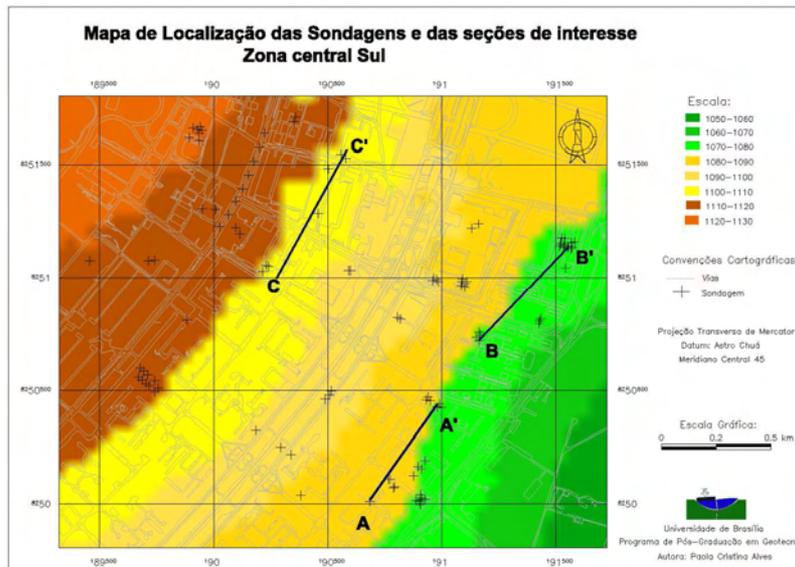


Figura 4.74 - Carta hipsométrica, com localização das seções de interesse.

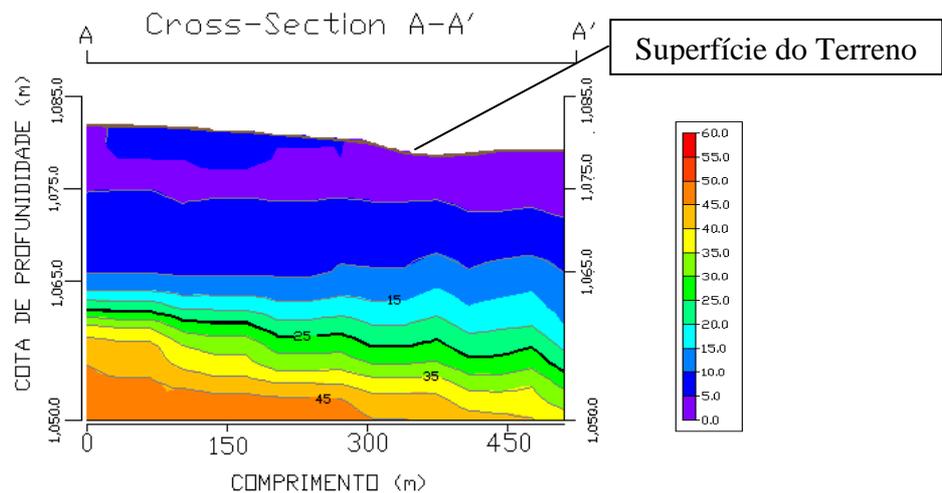


Figura 4.75 - Seção A-A' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

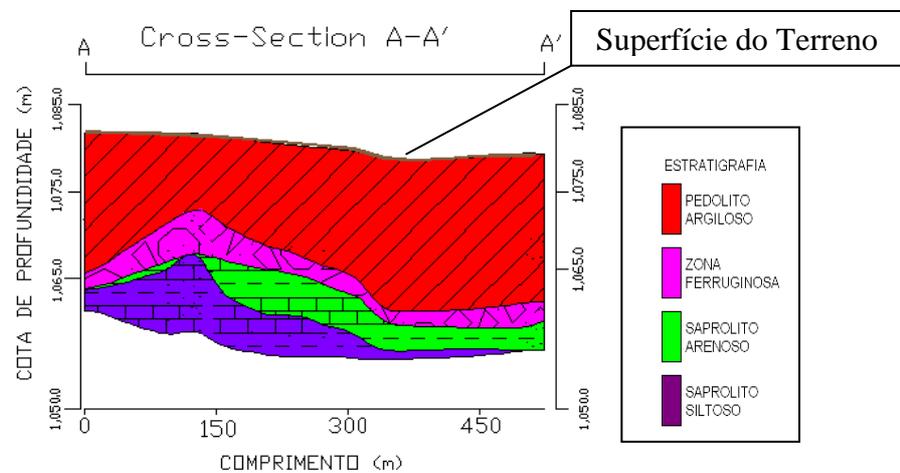


Figura 4.76 - Seção A-A' interpolada, mostrando todas as camadas de solo, com exagero vertical de 10.

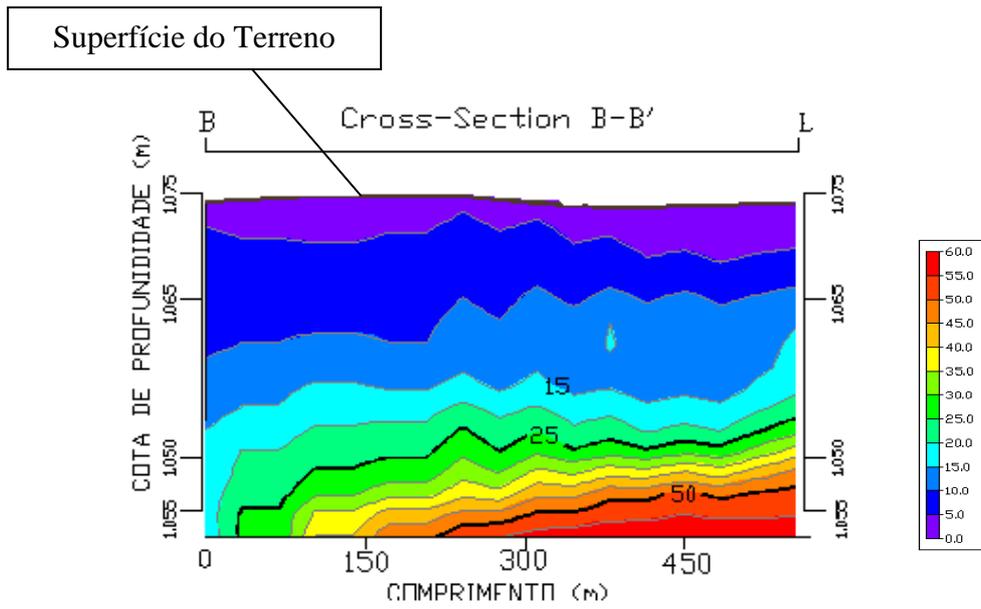


Figura 4.77 - Seção B-B' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

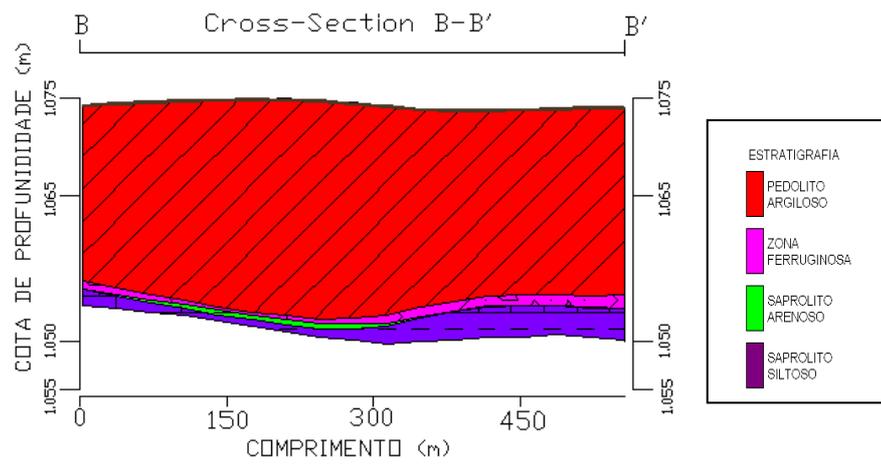


Figura 4.78 - Seção B-B' interpolada, mostrando todas as camadas de solo, com exagero vertical de 10.

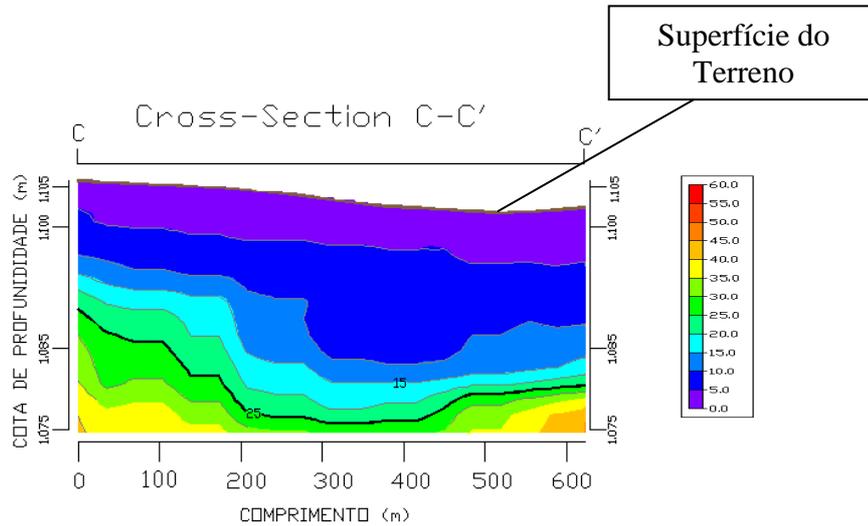


Figura 4.79 - Seção C-C' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

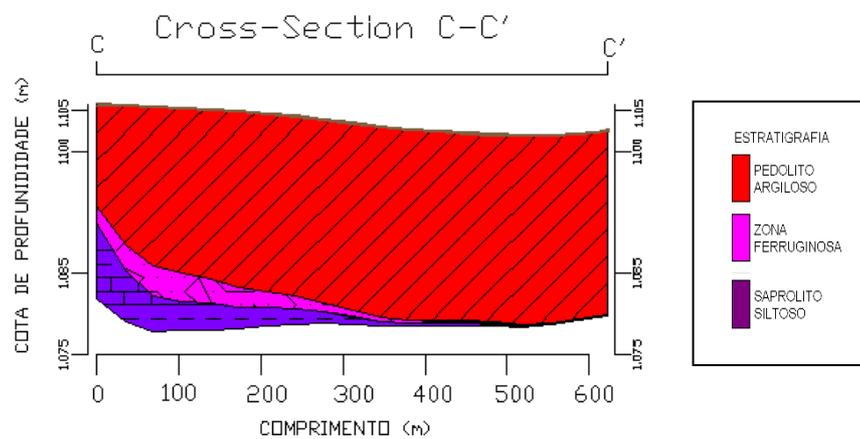


Figura 4.80 - Seção C-C' interpolada, mostrando todas as camadas de solo, com exagero vertical de 10.

#### 4.9 MODELOS 3D DE SOLOS – ESTUDO DE CASO: GARAGENS SUL

Este capítulo apresenta modelos tridimensionais (3D), a partir de 80 sondagens presentes na região, de Nspt e da estratigrafia, e suas seções de interesse do estudo de caso: Garagens Sul, área de estudo compreendendo as quadras 108, 109, 110, 111, 208, 209, 210, 211, 308, 309, 310, 311, 408, 409, 410, 411, 508, 509, 510, 511 sul.

As seções foram localizadas nas entrequadras 110/111 e 209/210, áreas de intenso fluxo e, portanto consideradas de interesse para o governo do Distrito Federal (GDF) para a construção de estacionamentos subterrâneos.

A Figura 4.81 apresenta uma visão geral dos níveis de Nspt interpolados e espacializados tridimensionalmente.



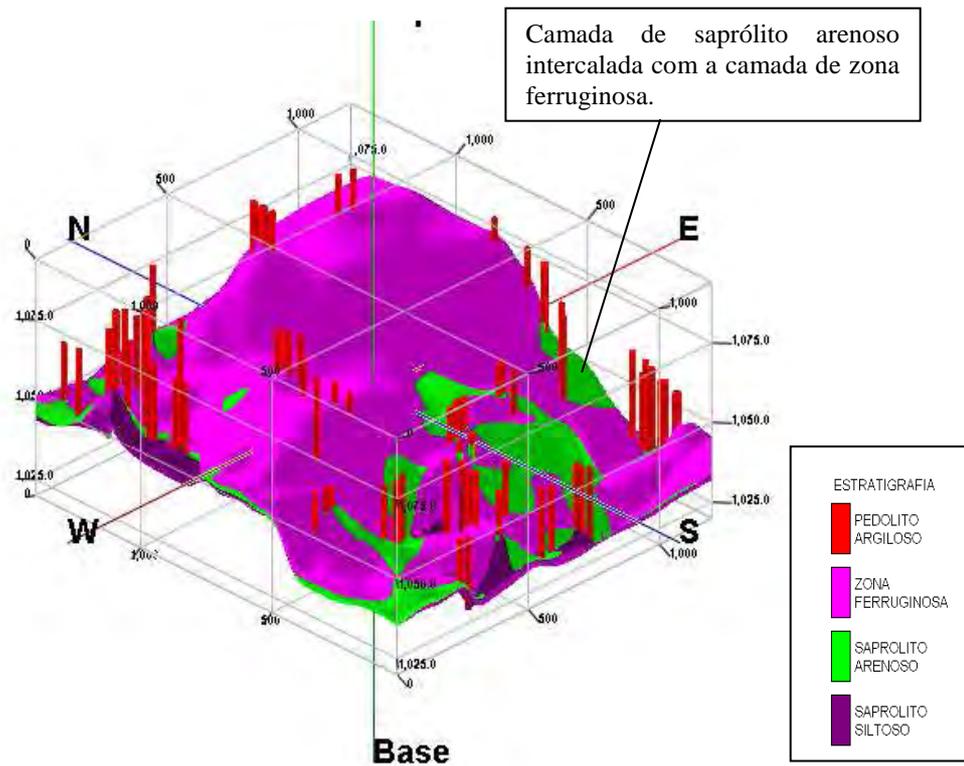


Figura 4.83- Seqüência 2 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada da zona ferruginosa intercalada com a camada do saprólito arenoso, da região do estudo de caso – Garagens Sul.

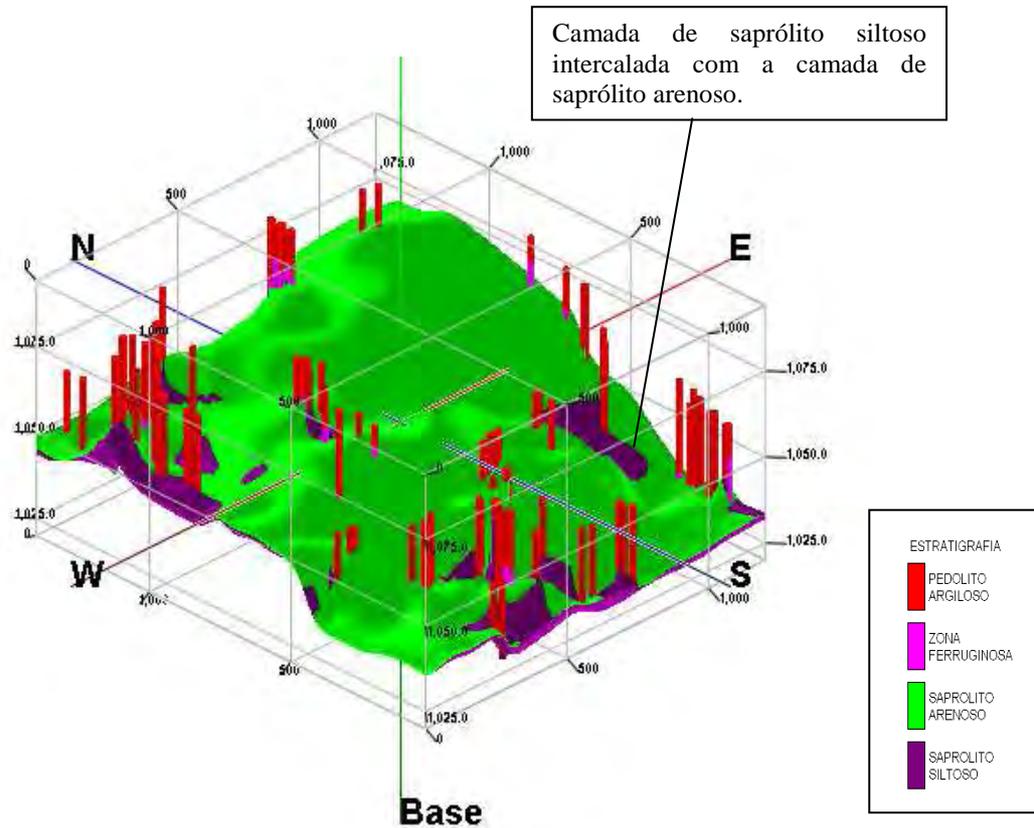


Figura 4.84 - Sequência 3 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada do saprólito arenoso intercalada com a camada do saprólito silteoso, da região do estudo de caso – Garagens Sul.

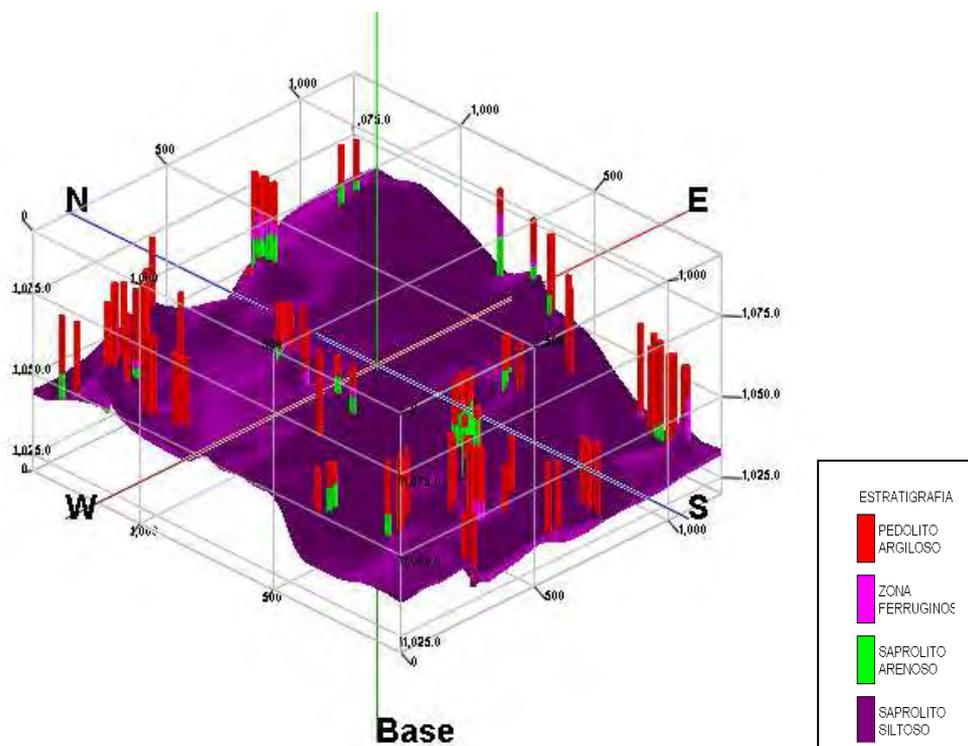


Figura 4.85 - Sequência 4 do modelo tridimensional (3D) do solo, com exagero vertical de 10 destacando a camada do saprólito silteoso, da região do estudo de caso – Garagens Sul.

A Figura 4.86 mostra a topografia da área de estudo por meio de valores hipsométricos, com a marcação de duas seções de interesse. A seção A-A' localiza-se na entrequadra 209/210 sul e a seção B-B' na entrequadra 109/110 sul.

O nível d' água nesta área de estudo encontra-se em profundidades maiores que 10 m, como pode ser observado na Figura 4.38. Portanto, como esta área de estudo também foi analisada para a adequabilidade para a construção de garagens subterrâneas, construídas até três pavimentos (9m), o nível d' água também não será analisado neste capítulo.

A Figura 4.87 mostra a seção longitudinal A-A' com a identificação dos valores de Nspt seguida da Figura 4.88 mostrando as camadas de solo interpoladas. Comparando as duas seções percebe-se uma queda dos valores de Nspt quando a camada do pedólito se torna mais espessa. E um pico de Nspt ao aparecer o saprólito siltoso intercalado com o arenoso. A seção da estratigrafia não aparece a camada de zona ferruginosa.

A Figura 4.89 mostra a seção longitudinal B-B' com a identificação dos valores de Nspt seguida da Figura 4.90 mostrando as camadas de solo interpoladas. A partir de aproximadamente 450 m há o predomínio do saprólito arenoso.

Nas duas seções A-A' e B-B' percebem-se a camada de pedólito com espessura de aproximadamente 10 m.

Percebe-se uma espessa camada de pedólito (solo menos resistente) e uma espessura mediana de saprólitos nas duas seções apresentadas, indicando uma boa adequabilidade para a construção de garagens subterrâneas nesta área.

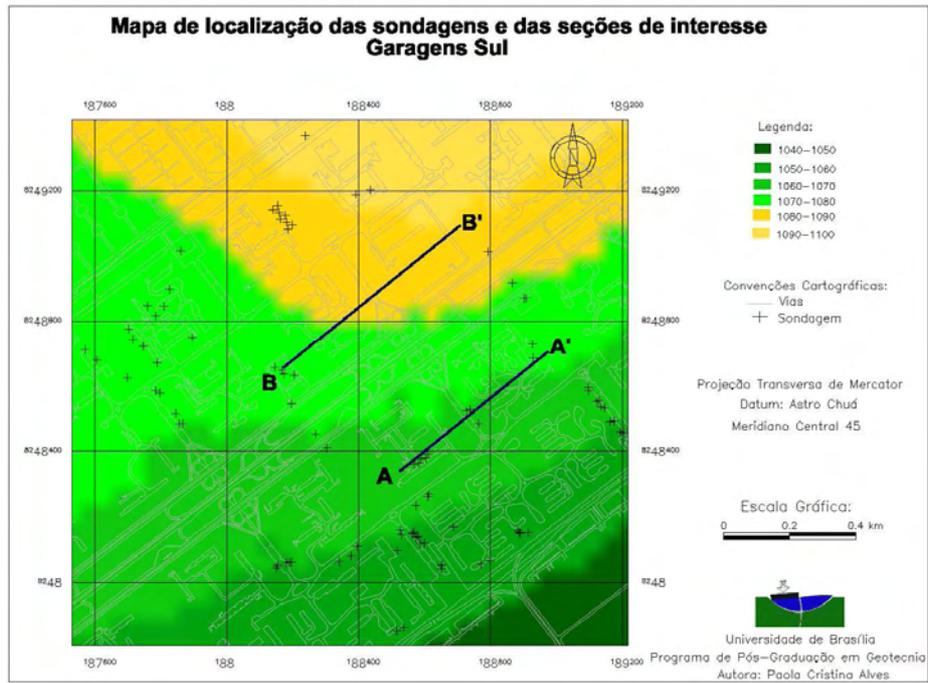


Figura 4.86- Carta hipsométrica com localização das seções de interesse.

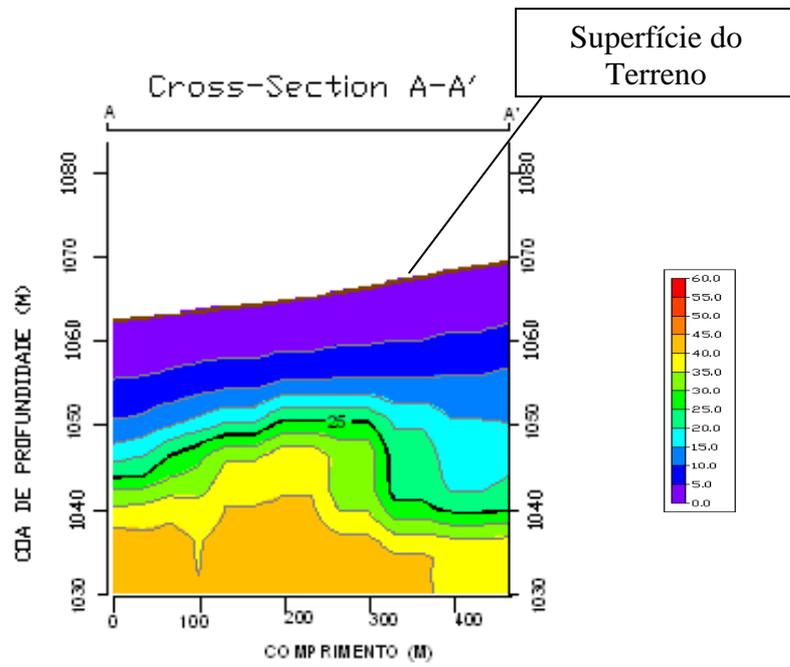


Figura 4.87 - Seção A-A' mostrando os níveis de  $N_{spt}$ , com exagero vertical de 10.

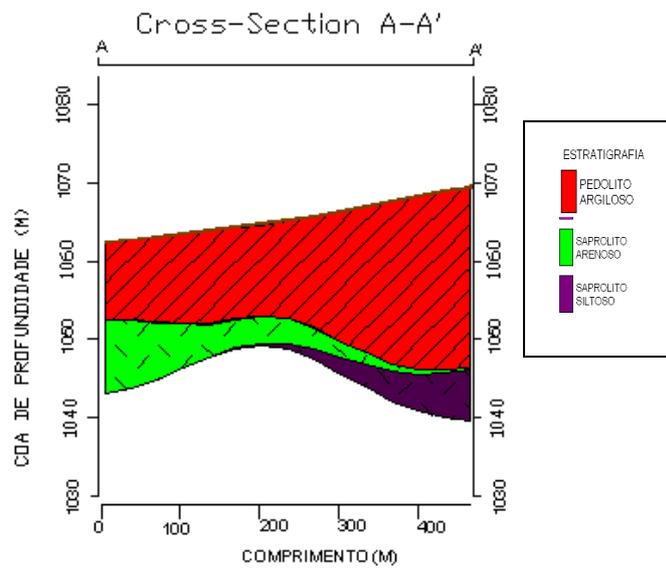


Figura 4.88 - Seção A-A' interpolada, mostrando as camadas de solo, com exagero vertical de 10.

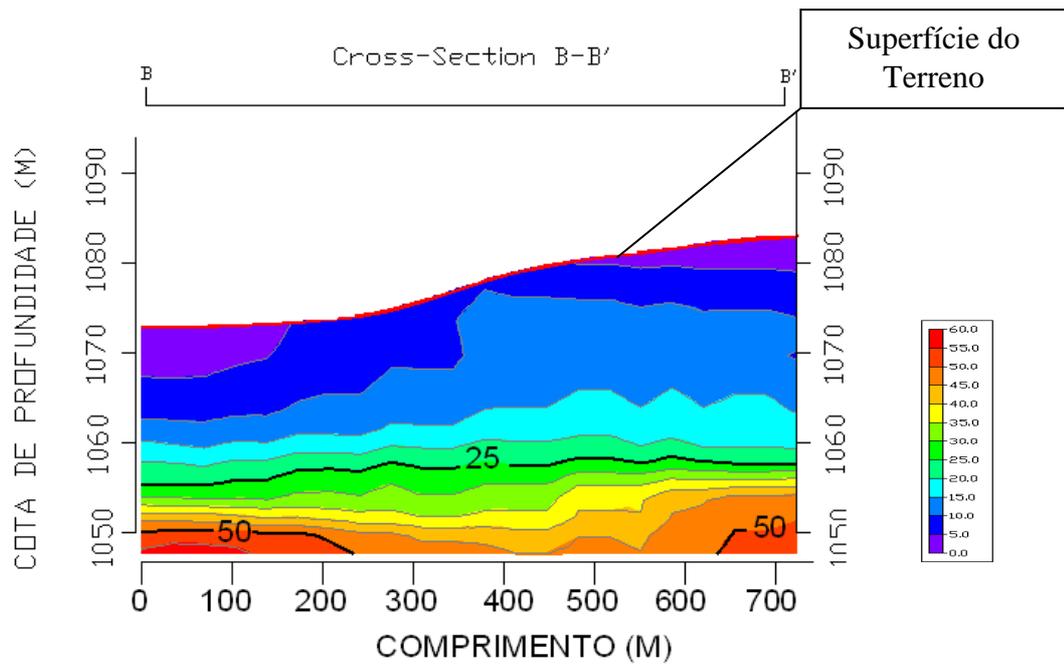


Figura 4.89 - Seção B-B' mostrando os níveis de Nspt, com exagero vertical de 10.

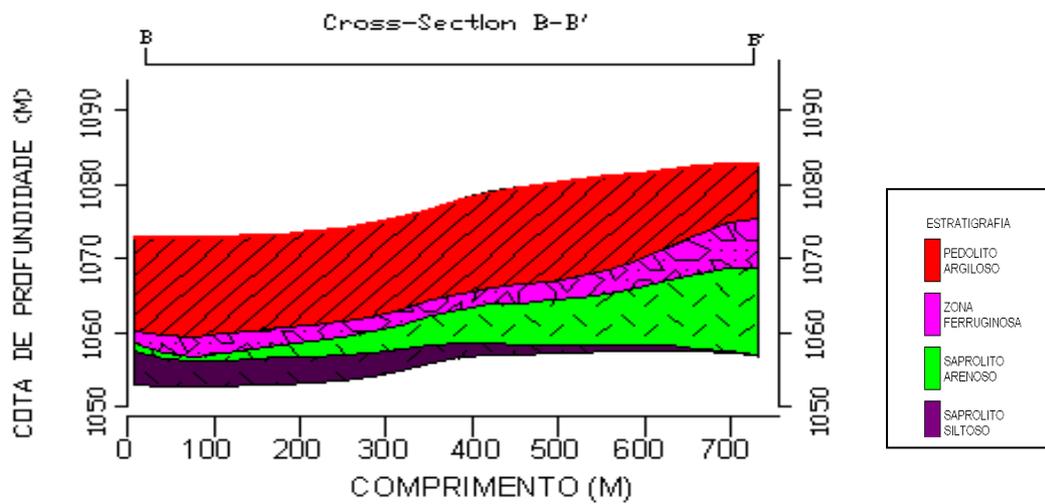


Figura 4.90 - Seção B-B' interpolada, mostrando as camadas de solo, com exagero vertical de

10.

#### 4.10 CARTAS SÍNTESES

A partir das cartas derivadas apresentadas no capítulo anterior obtêm-se as cartas sínteses, que são os documentos finais deste trabalho que serão diretamente utilizados por outros profissionais que planejam a ocupação de Brasília, que poderão utilizar as cartas de adequabilidade para obras subterrâneas.

A adequabilidade para obras subterrâneas neste trabalho esta baseada em condicionantes em termos de complicações construtivas, implicando custo de construção.

Uma classe muito adequada apresenta áreas onde os recursos necessários à implantação sejam os mais simples e baratos. A classe pouco adequada requer o maior cuidado, é considerada problemática em termos de construções de obras subterrâneas, pois exigirá recursos construtivos complexos e onerosos.

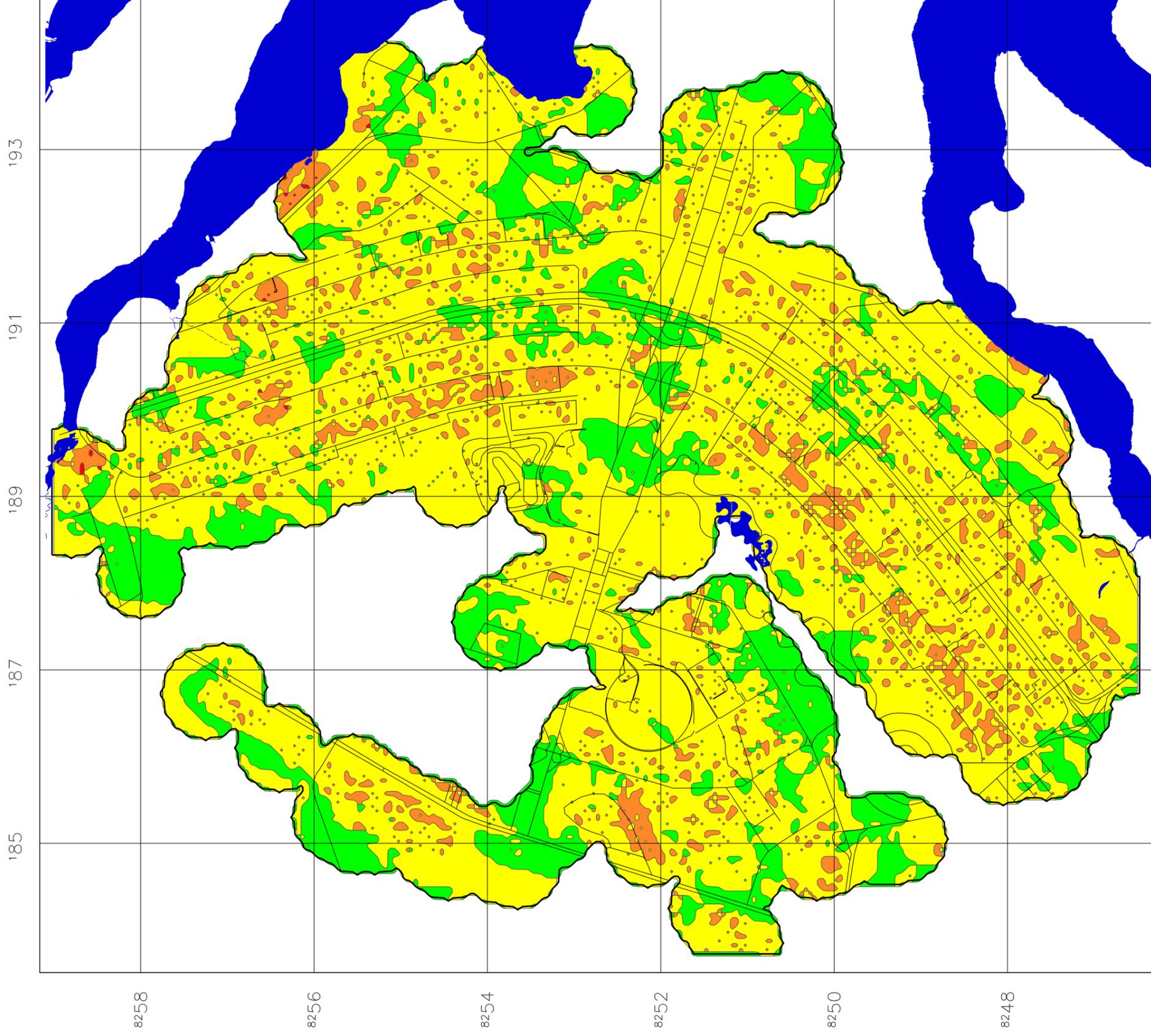
Pode-se observar que em todos os mapas de adequabilidade não é classificada nenhuma área como não adequada. A classe pouco adequada aparece apenas em torno das construções.

De acordo com os mapas de adequabilidade para garagens de 1 pavimento (Figura 4.91) e de 3 pavimentos (Figura 4.92), percebe-se uma maior área classificada como muito adequado para a construção de garagens de três pavimentos, pois essas áreas possuem uma maior espessura de solo menos resistente (pedólito). Uma espessa camada de pedólito é ruim para a construção de garagens de um pavimento pelo fato de se ter maiores gastos com a fundação.

Na avaliação do mapa de adequabilidade para a construção do metrô (Figura 4.93), em sua maioria encontram-se áreas classificadas como adequadas, com apenas algumas áreas muito adequadas.

De modo geral percebe-se em todos os mapas de adequabilidade que a região do Plano Piloto de Brasília encontra-se em sua maioria com áreas adequadas para a construção de obras subterrâneas.

# CARTA DE ADEQUABILIDADE PARA OBRAS SUBTERRÂNEAS - GARAGENS 1 PAVIMENTO



Legenda:

- Muito Adequado
- Adequado
- Pouco Adequado

Convenções Cartográficas:

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro Chuá

Meridiano Central 45° WGr

1:50.000



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

**Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.**



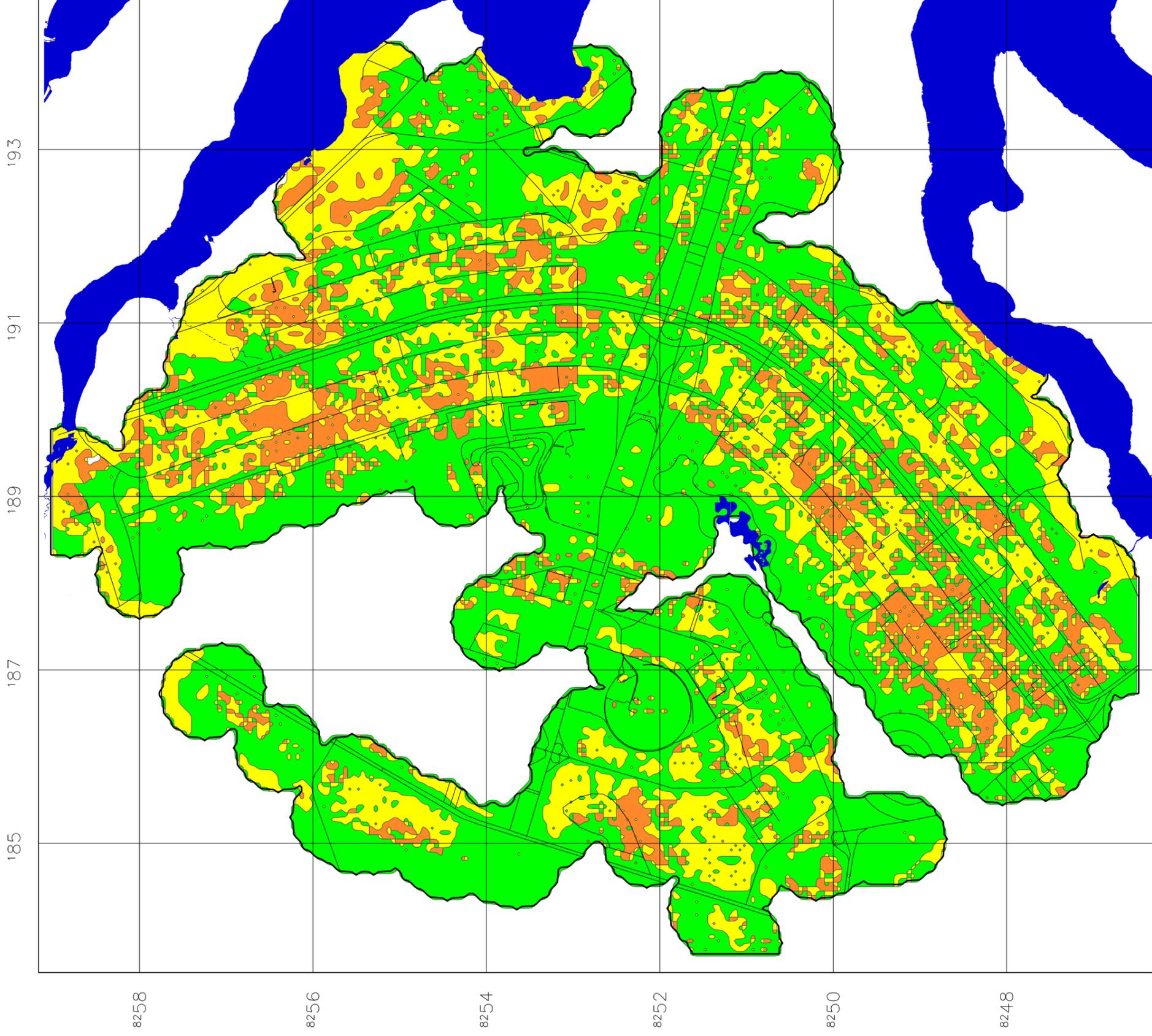
Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.91 – Carta geotécnica orientativa para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília–DF

# CARTA DE ADEQUABILIDADE PARA OBRAS SUBTERRÂNEAS - GARAGENS 3 PAVIMENTOS



Legenda:

- Muito Adequado
- Adequado
- Pouco Adequado

Convenções Cartográficas:

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro Chuá

Meridiano Central 45° WGr

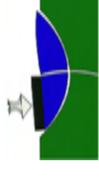
1:50.000



Escala Gráfica

(Escala original 1:10.000)

**Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.**



Universidade de Brasília

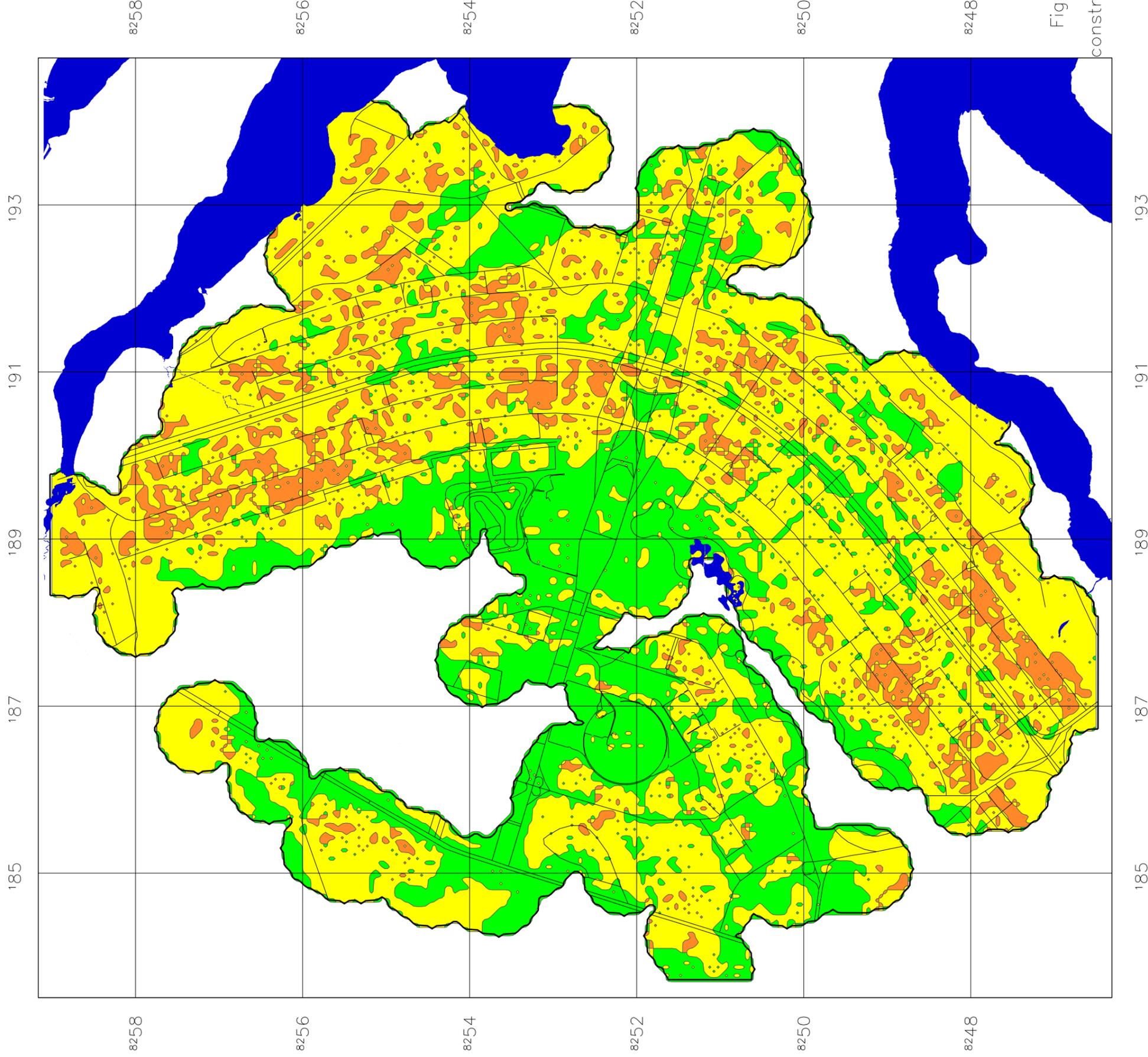
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

8248

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.92 – Carta geotécnica orientativa para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília –DF  
GARAGENS SUBTERRÂNEAS-3 pavimentos.

# CARTA DE ADEQUABILIDADE PARA OBRAS SUBTERRÂNEAS - METRÔ



Legenda:

- Muito Adequado
- Adequado
- Pouco Adequado

Convenções Cartográficas:

- Limite da área de trabalho
- Vias
- Drenagem

Projeção Transversa de Mercator

Datum: Astro Chudá

Meridiano Central 45° WGr

1:50.000



Escala Gráfica

(Escala Original 1:10.000)

**Este documento não deve ser usado para obtenção de parâmetros de projeto. Ele tem caráter orientativo e não deve substituir a investigação local.**



Universidade de Brasília

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Autora: Paola Cristina Alves

Figura 4.93 – Carta geotécnica orientativa para a construção de obras subterrâneas na cidade de Brasília–DF

## 5. CONCLUSÕES

---

### 5.1 CONCLUSÕES

Pelo exposto no Capítulo 4, as conclusões que se podem apresentar são as seguintes:

- Quanto à metodologia utilizada:

- Sobre a utilização de recursos de geoprocessamento neste trabalho pode-se concluir que a utilização destes recursos esteve presente em todas as fases do mapeamento, e mostrou-se importante na confecção de todos os mapas e cartas.
- A classificação dos perfis de solo apresentado nos relatórios de sondagem para uma estratigrafia definida baseada no perfil proposto por MARTINS (2000) foi importante e essencial para a modelagem dos solos da região, pois os relatórios continham inúmeras formas de apresentar a tipologia do solo, variando de empresa por empresa. Fato este que também influenciou para a espacialização da estratigrafia com as sondagens representativas.
- A menor precisão apresentada do modelo para a espessura dos saprólitos se deve ao fato da dificuldade ao analisar as áreas de predominância de cada saprólito devido a complexidade geológica existente na região.
- O uso de interpoladores, como a krigagem e o inverso ponderado da distância, mostrou-se uma valiosa ferramenta. Vale ressaltar que a krigagem 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.
- Um cuidado que deve ser tomado para a espacialização tridimensional de grandes áreas é quanto ao ajuste da grade 3D para a 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.

- Quanto aos solos encontrados na região:

- O perfil proposto por MARTINS (2000) deve ser analisado com critério, pois o perfil truncado, em que raramente são observados todos os horizontes num mesmo perfil, ou mesmo em toposeqüência, foi observado nas espacializações, fato ocorrido provavelmente

devido a presença de dobramentos e/ou de falhas geológicas o que torna complexa a modelagem da geologia da região.

- Com relação à textura do material inconsolidado destaca-se a ocorrência, em toda a área de estudo, do horizonte de solo pedólito argiloso, sendo que localmente ocorre a zona ferruginosa, sendo esta mais restrita que a primeira, ou seja, não ocorre em toda a região. O pedólito argiloso classificado normalmente como solos menos resistentes encontra-se em profundidades variando de poucos metros a até 40 metros.
- A presença ou não da zona ferruginosa (cascalho laterítico, couraça, carapaça e zona mosqueada) podem ou não ser detectadas nos ensaios de SPT. Os principais fatores para a não detecção dessas camadas intermediárias é o uso da água durante o processo de ensaio e a força dinâmica despreendida pelos golpes do martelo, o que pode destruir a estrutura de tais camadas, que muitas vezes apresentam pouca espessura em campo.
- Os saprólitos que são solos residuais silto-arenosos (formados pela alteração da rocha que se encontra abaixo deles) são favoráveis para a construção de túneis devido a sua maior resistência, tendo assim um menor custo para a sustentação das paredes e do teto.
- Quanto às características dos solos que serão escavados deve-se considerar o fato de uma desagregabilidade maior destes solos em presença de água, portanto é preferível que as obras de escavação sejam executadas durante os meses de maio a setembro, que possuem os níveis do lençol freáticos mais baixos, já que a partir do início do período chuvoso (outubro a abril) este nível é afetado pela ocorrência das precipitações. Vale destacar que embora as precipitações se iniciem em outubro, não é efetivamente neste mês que estas começam a produzir efeitos sobre o lençol freático.
- Nos trechos em que as seções aqui apresentadas indicaram uma posição do nível d' água próxima à superfície haverá a necessidade da elaboração de um cronograma de planejamento da obra, prevendo os trabalhos de rebaixamento do lençol freático, incluindo a verificação da possibilidade de ocorrência de recalques nas edificações vizinhas.
- Embora aqui tenham sido feitas correlações dos diferentes horizontes de solos com o índice de resistência à penetração,  $N_{spt}$ , deve-se tomar cuidado ao padronizarem valores únicos de resistências para cada horizonte, dada à variabilidade das condições do subsolo. Isto porque houve casos do pedólito argiloso, normalmente menos resistente, que atingiram  $N_{spt}$  em torno de 25 golpes, como pode ser visto na segunda seção do item 4.5.

- Quanto aos documentos cartográficos resultantes:

- Os mapas básicos foram considerados essenciais para a confecção das cartas derivadas e conseqüentemente para a confecção das cartas sínteses finais.
- O modelo tridimensional no *RockWorks* 14 foi melhor visualizado para pequenas áreas, como pode ser visto nos estudos de caso apresentados. Na espacialização tridimensional para a área de estudo do Plano Piloto, que possui cerca de 154 km<sup>2</sup>, não foi possível uma boa visualização 3D dos resultados. Porém, ao passar os resultados para o *Spring* 4.3.3 foi possível um melhor entendimento do modelo 3D. Assim a interligação do programa *RockWorks* com o programa *Spring* mostrou-se essencial e importante para o trabalho.
- 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. No entanto, torna-se fácil produzir mapas bidimensionais e seções de interesse a partir do modelo 3D.
- A superfície do nível d' água é resultante do processo de interpolação das sondagens que apresentaram nível d' água, no entanto não foi identificada em muitos relatórios de sondagens a presença do nível d' água. Isto se deve ao fato que muitas vezes o sondador, para um conjunto de sondagens numa mesma obra, anota apenas em um relatório de sondagem a profundidade do nível d' água encontrada, permitindo assim neste trabalho a geração de uma superfície interpolada com poucos dados.
- As seções apresentadas no item 4.6 permitiram o conhecimento geológico-geotécnico do subsolo e indicou a possibilidade de uma alternativa de construção subterrânea ao metrô de superfície na Asa Norte.
- As seções dos modelos 3D de solos, dos dois estudos de caso para a construção de estacionamentos subterrâneos na Asa Sul, apresentaram grandes espessuras de pedólito e nível da água profundo, portanto favorável para a construção de garagens subterrâneas.
- Na avaliação dos mapas de adequabilidade para garagens subterrâneas mostrou-se mais vantajoso a construção de garagens de três pavimentos, pois exigirá recursos simples e barato.
- De modo geral, pode-se dizer que as condições do subsolo do Plano Piloto de Brasília para a execução de obras subterrâneas são boas.
- Os documentos cartográficos resultantes deste trabalho são de finalidade orientativa, não devendo substituir a investigação local.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para dar continuidade a esta pesquisa sugere-se os seguintes tópicos:

- 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 para propor métodos possíveis de escavação, paramento e escoramento para a construção das garagens subterrâneas e metrô, em áreas urbanas;
- Elaboração de um estudo de viabilidade financeira para a construção do metrô totalmente subterrâneo na avenida W3. Para esta composição de custos, além dos aspectos geológico-geotécnicos e de construção civil, outras variáveis deverão ser consideradas. Dentre estas se destacam: os aspectos sociais, ambientais, econômicos, urbanísticos e os demais concernentes à qualidade de vida da população e do desenvolvimento sustentável da cidade.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

- ABEL, L. S. (2002). Caracterização Geológica - Geotécnica do Solo de Laulane para Fundações de Edifícios. Dissertação de Mestrado, publicação nº G.DM-090A/2002. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.
- ABNT (2001). Norma Técnica NBR 6484. Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 17 p.
- ASSIS, A. P. (2007). Notas de aula da disciplina Mecânica das Rochas: Obras Subterrâneas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
- ASSIS, A.P. (2006). General aspects of tunneling in soft ground. ITA Training Session (ppt presentation), Seoul, South Korea (www.ita-aites.org).
- BASTOS, G. & ZUQUETTE, L. (2008). Estruturação de bancos de dados a partir do mapeamento geotécnico da região de Ribeirão Preto (SP). IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia e o XI Congresso Nacional de Geotecnia. Coimbra, Portugal.
- BLANCO, S. B. (1995). Aspectos de Geologia de Engenharia da Escavação do Metrô de Brasília – Trecho Asa Sul. Dissertação de Mestrado, publicação nº G.DM 019/95. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & MORTARI, D. (1994). Caracterização geotécnica de solos porosos do Distrito Federal. 3º Simpósio Brasileiro de Escavação Subterrânea. Brasília, DF. v: 1, p:109-122.
- CÂMARA G. & DAVIS C. (1999). Fundamentos de Geoprocessamento, cap. 1, p. 1.
- CÂMARA, G. & QUEIROZ, G. (2008). Banco de Dados Geográficos – Introdução aos Sistemas de Bancos de Dados – Parte I e II. Página Web: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser303>>. Acesso em: março de 2008.
- 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: Fev. 2008.
- 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.
- CAMARGO, E. C. G. (1997). Desenvolvimento, Implantação e Teste de Procedimentos Geoestatísticos (krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciados (SPRING). Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP, 105 p.
- CAMPOS, G. C.; IYOMASA, W. S. & GRAMANI, M. F. (2008). Ocupação do Espaço Subterrâneo Urbano: O caso da Cidade de São Paulo, Brasil. XIV Congresso Brasileiro de

- Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, III Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, III Simpósio Brasileiro de Investigação de Campo. Búzios, RJ.
- 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 nº G.TD-001A/99. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 209 p.
- CARVALHO, M. A. & PEIXOTO, B. A. M. (2006). Proposta de Garagem Subterrânea como Ferramenta de Otimização do Espaço Urbano no Centro de Brasília. Monografia de Projeto Final, publicação nº G. PF-AA003/06. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 74 p.
- CORREIO BRAZILIENSE (2008). Página da Web: [www.correiobraziliense.com.br](http://www.correiobraziliense.com.br). Acessado em 06/12/2008.
- DATE, C. J. (2005). Introdução a Sistemas de Bancos de Dados. Editora Campus, 8ª Edição, 896 p.
- DEARMAN, W. R. (1991). Engineering Geological Mapping. British Library Cataloguing Publication Data. Butterworth & Heinemann, London, UK, 415 p.
- DETRAN-DF (2008). Estatística de Frota de Veículos. <http://www.detran.df.gov.br/>. Acessado em novembro/2008.
- GDF (2008). Página da Web: [www.df.gov.br](http://www.df.gov.br). Acessado em 01/04/2008.
- IBGE (2007). Página da Web: [www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007). Acessado em 12/01/2009.
- IPDF (1998). Normas de Edificação, Uso e Gabarito – NGB 144/98.
- IPT (2008). Relatório técnico final nº 99.642-205. Investigação e análise do colapso da Estação Pinheiros da linha 4 do metrô de São Paulo.
- 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.
- ITA (2000). Planning and Mapping of Underground Space – an Overview (official report, Working Group 4). Tunneling and Underground Space Technology, v.15, n.3, p. 271-286.
- 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 Estimativa Especial para Confecção de Mapas. Fundação Editora da UNESP, São Paulo, SP, 226 p.
- MANGOLIN FILHO & OJIMA, L. M. (1995). Planejamento de investigações. In: TURB – Simpósio sobre túneis urbanos. São Paulo, SP, p. 11-20.

- MARQUES, F. E. R. (2006). Comportamento de túneis superficiais escavados em solos porosos, O caso do metrô de Brasília/DF. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 462 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.
- MARTINS, E. S., REATTO, A., CARVALHO, O. A. & GUIMARÃES, R. F. (2004). Evolução Geomorfológica do Distrito Federal. Planaltina, DF. Documentos/Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, nº122, 57 p.
- MARTINS, E. S.; CARDOSO, F. B. F & GASPAR, J.C (1994). Dados preliminares da geologia de perfis de intemperismo em cortes do metrô, Águas Claras - DF. 4º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Brasília, DF, 202-205.
- METRÔ-DF (2008). Página da Web: [www.metro.df.gov.br](http://www.metro.df.gov.br).
- OLIVEIRA, M. G. (1996). Mapeamento Geotécnico da Asa Sul – Brasília – DF. Dissertação de mestrado. Dissertação de Mestrado, publicação nº G.DM-036/96. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.
- PAULA, B. L. & CERRI, L. E. S. (2008). Proposta de Representação Cartográfica para Cartas Geotécnicas. Revista Luso Brasileira de Geotecnia, n. 112, p. 111-126.
- ROCKWARE (2008). RockWorks 14. 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. (1995). Mapeamento Geotécnico da Região e Águas Claras (DF): Utilização de Recursos de Geoprocessamento e de Novos Métodos de Ensaio para Caracterização de Solos Tropicais. Dissertação de Mestrado, publicação nº G.DM-019A/95. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.
- ROMÃO, P. A. (2006). Modelagem de Terreno com Base na Morfometria e em Sondagens Geotécnicas – Região de Goiânia - GO. Tese de Doutorado, publicação nº G.TD-034/06. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 166 p.
- ROQUE, W. V. (2006). Mapeamento Geoambiental da Área Urbana de Manaus - AM. Dissertação de Mestrado, publicação nº G.DM-145/06, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 162 p.
- SILVA, A. P. F. (2000). Cartografia Geotécnica do concelho de Almada e o Sistema de Informação Geo-Almada. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, Lisboa, 343 p.

- SILVA, C. A. R. (2007). Perfil Geológico-Geotécnico do Subsolo ao Longo do Traçado do Metrô de Goiânia. Dissertação de Mestrado, publicação G. DM-160/07. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 205 p.
- SILVA, C. P. L. (2007). Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Brasília - Área Tombada pela UNESCO. Dissertação de Mestrado, publicação n° G. DM-153/07. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.
- SILVA, G. Z. & SOUZA, J. M. (2008). Futuras Direções em SIGs: O Que os Usuários Devem Esperar dos Novos Sistemas. Página Web: <<http://www.carto.eng.uerj.br/fgeorj/segeo1996/122/index.htm>>. Acesso em: abril de 2008. 11 p.
- SOUZA, G. J. T., MACEDO, C. & RIANI, R. (1997). Garagens subterrâneas – uma solução privatizada. 2º Simpósio de túneis urbanos. São Paulo, SP.
- SOUZA, N. M. (1995). A Cartografia Geotécnica como Instrumental da Geografia Física para Estudos Urbanos. VI Simpósio Nacional de Geografia Física Aplicada, UFG, Goiânia, GO, v.1, p. 9-20.
- STURARO, J. R. & LANDIM, P. M. B. (1996). Mapeamento Geoestatístico de Ensaios de Penetração Padronizada (SPT). Solos e Rochas, v.19, n.1, p. 3-14.
- STURARO, J. R.; LANDIM, P. M. B. & RIEDEL, P. S. (2000). O Emprego da Técnica da Geoestatística da Krigagem Indicativa em Geotecnia Ambiental. Solos e Rochas, v.23, n.1, p. 157-164.
- TALAMINI NETO, E. (2001). Caracterização Geotécnica do Subsolo de Curitiba para o Planejamento de Ocupação do Espaço Subterrâneo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 223 p.
- TURNER, A. K. (1997). What's the difference among 2-D, 2.5-D, 3-D and 4-D? GIS World, p. 54.
- VÄHÄÄHO, I. (1996). From Geotechnical Maps to Three-dimensional Models. Tunneling and Underground Space Technology, v.13, n.1, p. 51-56.
- VAZ, L.F. (1999). O efeito das condições geológicas na economia das obras subterrâneas. In: TURB – Simpósio sobre túneis urbanos. Anais. São Paulo, ABGE. P. 89-110.
- VELLOSO, D. A. & LOPES, F. R. (2004). Fundações, volume 1: Critérios de projeto: Investigação de Subsolo: Fundações Superficiais. Oficina de textos, São Paulo, SP, 228p.
- ZUQUETTE, L. V. & GANDOLFI, N. (2004). Cartografia Geotécnica. Oficina de textos. São Paulo, SP, 190 p.

**APÊNDICE**  
**- LISTAGEM DOS PROGRAMAS ELABORADOS EM LEGAL-**

## **Programa em Legal para gerar as cartas de profundidade:**

### **Profundidade do Nível d' água**

```
{  
Numerico TOPO ("TOPO_CORRIGIDO");  
Numerico NA ("NA_MNT");  
Numerico PROF ("PROF_NA");  
TOPO= Recuper (Nome="Grade_50_rw");  
NA=Recupere (Nome="NA_MNT");  
PROF= Novo (Nome="Profundidade_NA_RW_KRIG", ResX=50, ResY=50, Escala=10000,  
Min=0, Max=100);  
PROF=TOPO-NA;  
}
```

### **Profundidade do Impenetrável**

```
{  
Numerico IMPEN ("MODELOS_IMPEN");  
Numerico TOPO ("TOPO_CORRIGIDO");  
Numerico PROF ("MODELOS_IMPEN");  
IMPEN= Recuper (Nome = "SUP_IMP_RW");  
TOPO=Recupere (Nome= "TOPO_RW");  
PROF= Novo (Nome= "IMPEN_TOPO_RW", ResX=50, ResY=50, Escala=10000, Min=0,  
Max=100);  
PROF = TOPO-IMPEN;  
}
```

## **Programa em Legal para gerar as cartas de espessura dos materiais inconsolidáveis:**

### **Espessura Pedólito**

```
{  
Numerico PEDO ("ESTRATIGRAFIA_MNT");  
Numerico TOPO ("TOPO_CORRIGIDO");  
Numerico ESPES ("ESPES_ESTRATIGRAFIA_MNT");  
PEDO= Recuper (Nome = "BASE_PEDO_ARG");  
TOPO=Recupere (Nome= "Grade_50_rw");  
PROF= Novo (Nome= "ESPES_PEDO_ARG", ResX=50, ResY=50, Escala=10000, Min=0,  
Max=100);  
ESPES=TOPO-PEDO;  
}
```

### **Espessura Zona Ferruginosa**

```
{  
Numerico TOPO ("ESTRATIGRAFIA_MNT");  
Numerico BASE ("ESTRATIGRAFIA_MNT");  
Numerico ESPES ("ESPES_ESTRATIGRAFIA_MNT");  
TOPO= Recuperar (Nome = "TOPO_ZONA");  
BASE=Recuperar (Nome= "BASE_ZONA");  
ESPES= Novo (Nome= "ESPES_ZONA", ResX=50, ResY=50, Escala=10000, Min=0,  
Max=100);  
ESPES=TOPO-BASE;  
}
```

### **Espessura Saprólito Arenoso**

```
{  
Numerico TOPO ("ESTRATIGRAFIA_MNT");  
Numerico BASE ("ESTRATIGRAFIA_MNT");  
Numerico ESPES ("ESPES_ESTRATIGRAFIA_MNT");  
TOPO= Recuperar (Nome = "TOPO_SAP_ARENO");  
BASE=Recuperar (Nome= "BASE_SAP_ARENO");  
ESPES= Novo (Nome= "ESPES_SAP_ARENO", ResX=50, ResY=50, Escala=10000,  
Min=0, Max=100);  
ESPES=TOPO-BASE;  
}
```

### **Espessura Saprólito Siltoso**

```
{  
Numerico TOPO ("ESTRATIGRAFIA_MNT");  
Numerico BASE ("ESTRATIGRAFIA_MNT");  
Numerico ESPES ("ESPES_ESTRATIGRAFIA_MNT");  
TOPO= Recuperar (Nome = "TOPO_SAP_SILTO");  
BASE=Recuperar (Nome= "BASE_SAP_SILTO");  
ESPES= Novo (Nome= "ESPES_SAP_SILTO", ResX=50, ResY=50, Escala=10000, Min=0,  
Max=100);  
ESPES=TOPO-BASE;  
}
```

### **Programa em Legal para gerar as cartas de adequabilidade para obras subterrâneas –**

#### **Garagem 1 pavimento:**

```
{  
// Definição dos dados de entrada  
Temático var1 ("NSPT_3m");  
Temático var2 ("NSPT_6m");  
Temático var3 ("PEDOLITO_T");
```

Tematico var4 ("ZONA\_FERRUGINOSA\_T");  
 Tematico var5 ("SAPROLITO\_T");  
 Tematico var6 ("NA\_CHUVO");  
 Tematico var7 ("IMPENETRAVEL\_T");  
 Tematico var8 ("DISTÂNCIA\_CONSTRUÇÕES");  
 Tabela tab1 (Ponderacao);  
 tab1 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_3m",  
           "<3":1.00,  
           "3 a 6":0.90,  
           "6 a 10":0.80,  
           "10 a 20":0.40,  
           "20 a 30":0.20,  
           "30 a 40":0.10,  
           ">40":0.10);  
 Tabela tab2 (Ponderacao);  
 tab2 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_6m",  
           "<3":0.10,  
           "3 a 6":0.20,  
           "6 a 10":0.30,  
           "10 a 20":0.50,  
           "20 a 30":0.80,  
           "30 a 40":1.00,  
           ">40":1.00);  
 Tabela tab3 (Ponderacao);  
 tab3 = Novo (CategoriaIni = "PEDOLITO\_T",  
           "0 a 2 m":1.00,  
           "2 a 5 m":0.9,  
           "5 a 10 m":0.20,  
           "10 a 20 m":0.20,  
           "20 a 30 m":0.10,  
           "30 a 40 m":0.10,  
           "> 40 m":0.10);  
 Tabela tab4 (Ponderacao);  
 tab4 = Novo (CategoriaIni = "ZONA\_FERRUGINOSA\_T",  
           "0 a 2 m":0.10,  
           "2 a 5 m":0.20,  
           "5 a 10 m":1.00,  
           "10 a 20 m":0.90,  
           "20 a 30 m":0.70,  
           "30 a 40 m":0.60,  
           "> 40 m":0.60);  
 Tabela tab5 (Ponderacao);  
 tab5 = Novo (CategoriaIni = "SAPROLITO\_T",  
           "0 a 2 m":0.10,  
           "2 a 5 m":0.10,  
           "5 a 10 m":0.20,  
           "10 a 20 m":1.00,  
           "20 a 30 m":0.90,  
           "30 a 40 m":0.70,  
           "> 40 m":0.60);

```

Tabela tab6(Ponderacao);
tab6 = Novo (CategoriaIni = "NA_CHUVO",
            "0 a 2 m":0.10,
            "2 a 5 m":0.10,
            "5 a 10 m":0.80,
            "10 a 20 m":0.90,
            "20 a 30 m":0.90,
            "30 a 40 m":1.00,
            "> 40 m":1.00);
Tabela tab7 (Ponderacao);
tab7 = Novo (CategoriaIni = "IMPENETRABEL_T",
            "0 a 2 m":0.10,
            "2 a 5 m":0.10,
            "5 a 10 m":1.00,
            "10 a 20 m":1.00,
            "20 a 30 m":0.90,
            "30 a 40 m":0.70,
            "> 40 m":0.50);
Tabela tab8 (Ponderacao);
tab8 = Novo (CategoriaIni = "DISTÂNCIA_CONSTRUÇÕES",
            "0 a 5 m":0.10,
            "5 a 10 m":0.50,
            "10 a 20 m":0.80,
            "20 a 50 m":0.90,
            "50 a 100 m":1.00,
            "> 100 m":1.00);
// Definicao do dado de saida

Numerico var9 ("CARTA_FINAL_mnt");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="Nspt_3m");
var2 = Recupere (Nome="Nspt_6m");
var3 = Recupere (Nome="Espessura_pedo");
var4 = Recupere (Nome="Espessura_zona_ferruginosa");
var5 = Recupere (Nome="Espessura_sapro");
var6 = Recupere (Nome="Prof_NA");
var7 = Recupere (Nome="Prof_impenetravel");
var8 = Recupere (Nome="Distância");
// Criacao do dado de saída
var9 = Novo (Nome="carta_adequabilidade_garagem1pvt", ResX=50, ResY=50,
            Escala=10000,Min=0, Max=1);
// Geracao da media ponderada

var9 = 0.1*(Pondere(var1, tab1)) + 0.08*(Pondere(var2, tab2))+ 0.08*(Pondere(var3, tab3)) +
0.06*(Pondere(var4, tab4)) + 0.08*(Pondere(var5, tab5)) + 0.1*(Pondere(var6, tab6)) +
0.20*(Pondere(var7, tab7)) + 0.30*(Pondere(var8, tab8));
}

```

## Programa em Legal para gerar as cartas de adequabilidade para obras subterrâneas -

### Garagem 3 pavimentos:

```
{
// Definicao dos dados de entrada
Tematico var1 ("NSPT_3m");
Tematico var2 ("NSPT_6m");
Tematico var3 ("NSPT_9m");
Tematico var4 ("NSPT_12m");
Tematico var5 ("PEDOLITO_T");
Tematico var6 ("ZONA_FERRUGINOSA_T");
Tematico var7 ("SAPROLITO_T");
Tematico var8 ("NA_CHUVO");
Tematico var9 ("IMPENETRAVEL_T");
Tematico var10 ("DISTÂNCIA_CONSTRUÇÕES");
Tabela tab1 (Ponderacao);
tab1 = Novo (CategoriaIni = "NSPT_3m",
            "<3":1.00,
            "3 a 6":0.90,
            "6 a 10":0.80,
            "10 a 20":0.40,
            "20 a 30":0.20,
            "30 a 40":0.10,
            ">40":0.10);
Tabela tab2 (Ponderacao);
tab2 = Novo (CategoriaIni = "NSPT_6m",
            "<3":1.00,
            "3 a 6":0.90,
            "6 a 10":0.80,
            "10 a 20":0.40,
            "20 a 30":0.20,
            "30 a 40":0.10,
            ">40":0.10);
Tabela tab3 (Ponderacao);
tab3 = Novo (CategoriaIni = "NSPT_9m",
            "<3":1.00,
            "3 a 6":0.90,
            "6 a 10":0.80,
            "10 a 20":0.40,
            "20 a 30":0.20,
            "30 a 40":0.10,
            ">40":0.10);
Tabela tab4 (Ponderacao);
tab4 = Novo (CategoriaIni = "NSPT_12m",
            "<3":0.10,
            "3 a 6":0.20,
            "6 a 10":0.30,
            "10 a 20":0.50,
            "20 a 30":0.80,
            "30 a 40":1.00,
```

```

">40":1.00);
Tabela tab5 (Ponderacao);
tab5 = Novo (CategoriaIni = "PEDOLITO_T",
    "0 a 2 m":1.00,
    "2 a 5 m":1.00,
    "5 a 10 m":1.00,
    "10 a 20 m":0.20,
    "20 a 30 m":0.20,
    "30 a 40 m":0.10,
    "> 40 m":0.10);
Tabela tab6 (Ponderacao);
tab6 = Novo (CategoriaIni = "ZONA_FERRUGINOSA_T",
    "0 a 2 m":0.10,
    "2 a 5 m":0.10,
    "5 a 10 m":0.20,
    "10 a 20 m":1.00,
    "20 a 30 m":0.90,
    "30 a 40 m":0.70,
    "> 40 m":0.50);
Tabela tab7 (Ponderacao);
tab7 = Novo (CategoriaIni = "SAPROLITO_T",
    "0 a 2 m":0.10,
    "2 a 5 m":0.10,
    "5 a 10 m":0.20,
    "10 a 20 m":1.00,
    "20 a 30 m":0.90,
    "30 a 40 m":0.70,
    "> 40 m":0.50);
Tabela tab8(Ponderacao);
tab8 = Novo (CategoriaIni = "NA_CHUVO",
    "0 a 2 m":0.10,
    "2 a 5 m":0.10,
    "5 a 10 m":0.10,
    "10 a 20 m":0.80,
    "20 a 30 m":0.90,
    "30 a 40 m":1.00,
    "> 40 m":1.00);
Tabela tab9 (Ponderacao);
tab9 = Novo (CategoriaIni = "IMPENETRavel_T",
    "0 a 2 m":0.10,
    "2 a 5 m":0.10,
    "5 a 10 m":0.20,
    "10 a 20 m":1.00,
    "20 a 30 m":0.90,
    "30 a 40 m":0.70,
    "> 40 m":0.50);
Tabela tab10 (Ponderacao);
tab10 = Novo (CategoriaIni = "DISTÂNCIA_CONSTRUÇÕES",
    "0 a 5 m":0.10,
    "5 a 10 m":0.10,

```

```
"10 a 20 m":0.50,  
"20 a 50 m":0.80,  
"50 a 100 m":0.90,  
"> 100 m":1.00);
```

```
// Definicao do dado de saida
```

```
Numerico var11 ("CARTA_FINAL_mnt");
```

```
// Recuperacao dos dados de entrada
```

```
var1 = Recupere (Nome="Nspt_3m");  
var2 = Recupere (Nome="Nspt_6m");  
var3 = Recupere (Nome="Nspt_9m");  
var4 = Recupere (Nome="Nspt_12m");  
var5 = Recupere (Nome="Espessura_pedo");  
var6 = Recupere (Nome="Espessura_zona_ferruginosa");  
var7 = Recupere (Nome="Espessura_sapro");  
var8 = Recupere (Nome="Prof_NA");  
var9 = Recupere (Nome="Prof_impenetravel");  
var10 = Recupere (Nome="Distância");  
// Criacao do dado de saída  
var11 = Novo (Nome="carta_adequabilidade_garagem3pvt", ResX=50, ResY=50,  
Escala=10000,Min=0, Max=1);  
// Geracao da media ponderada  
  
var11 = 0.05*(Pondere(var1, tab1)) + 0.05*(Pondere(var2, tab2))+ 0.05*(Pondere(var3, tab3))  
+ 0.03*(Pondere(var4, tab4)) + 0.08*(Pondere(var5, tab5)) + 0.06*(Pondere(var6, tab6)) +  
0.08*(Pondere(var7, tab7)) + 0.1*(Pondere(var8, tab8)) + 0.2*(Pondere(var9, tab9)) +  
0.5*(Pondere(var10, tab10));  
}
```

**Programa em Legal para gerar as cartas de adequabilidade para obras subterrâneas –**

**Metrô:**

```
{  
// Definicao dos dados de entrada  
Tematico var1 ("NSPT_3m");  
Tematico var2 ("NSPT_6m");  
Tematico var3 ("NSPT_9m");  
Tematico var4 ("NSPT_12m");  
Tematico var5 ("NSPT_15m");  
Tematico var6 ("NSPT_20m");  
Tematico var7 ("NSPT_30m");  
Tematico var8 ("PEDOLITO_T");  
Tematico var9 ("ZONA_FERRUGINOSA_T");  
Tematico var10 ("SAPROLITO_T");  
Tematico var11 ("NA_CHUVO");  
Tematico var12 ("IMPENETRABEL_T");  
Tematico var13 ("DISTÂNCIA_CONSTRUÇÕES");
```

Tabela tab1 (Ponderacao);  
tab1 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_3m",  
"<3":0.1,  
"3 a 6":0.10,  
"6 a 10":0.20,  
"10 a 20":0.50,  
"20 a 30":0.90,  
"30 a 40":1.00,  
">40":1.00);

Tabela tab2 (Ponderacao);  
tab2 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_6m",  
"<3":0.1,  
"3 a 6":0.10,  
"6 a 10":0.20,  
"10 a 20":0.50,  
"20 a 30":0.90,  
"30 a 40":1.00,  
">40":1.00);

Tabela tab3 (Ponderacao);  
tab3 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_9m",  
"<3":0.1,  
"3 a 6":0.10,  
"6 a 10":0.20,  
"10 a 20":0.50,  
"20 a 30":0.90,  
"30 a 40":1.00,  
">40":1.00);

Tabela tab4 (Ponderacao);  
tab4 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_12m",  
"<3":1.00,  
"3 a 6":0.90,  
"6 a 10":0.80,  
"10 a 20":0.50,  
"20 a 30":0.30,  
"30 a 40":0.20,  
">40":0.10);

Tabela tab5 (Ponderacao);  
tab5 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_15m",  
"<3":1.00,  
"3 a 6":0.90,  
"6 a 10":0.80,  
"10 a 20":0.50,  
"20 a 30":0.30,  
"30 a 40":0.20,  
">40":0.10);

Tabela tab6 (Ponderacao);  
tab6 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_20m",  
"<3":1.00,  
"3 a 6":0.90,  
"6 a 10":0.80,

"10 a 20":0.50,  
"20 a 30":0.30,  
"30 a 40":0.20,  
">40":0.10);

Tabela tab7 (Ponderacao);

tab7 = Novo (CategoriaIni = "NSPT\_30m",  
"<3":0.1,  
"3 a 6":0.10,  
"6 a 10":0.20,  
"10 a 20":0.50,  
"20 a 30":0.90,  
"30 a 40":1.00,  
">40":1.00);

Tabela tab8 (Ponderacao);

tab8 = Novo (CategoriaIni = "PEDOLITO\_T",  
"0 a 2 m":0.10,  
"2 a 5 m":0.20,  
"5 a 10 m":0.30,  
"10 a 20 m":0.90,  
"20 a 30 m":0.20,  
"30 a 40 m":0.20,  
"> 40 m":0.10);

Tabela tab9 (Ponderacao);

tab9 = Novo (CategoriaIni = "ZONA\_FERRUGINOSA\_T",  
"0 a 2 m":0.80,  
"2 a 5 m":0.80,  
"5 a 10 m":0.80,  
"10 a 20 m":0.60,  
"20 a 30 m":1.00,  
"30 a 40 m":1.00,  
"> 40 m":1.00);

Tabela tab10 (Ponderacao);

tab10 = Novo (CategoriaIni = "SAPROLITO\_T",  
"0 a 2 m":0.80,  
"2 a 5 m":0.80,  
"5 a 10 m":0.80,  
"10 a 20 m":0.60,  
"20 a 30 m":1.00,  
"30 a 40 m":1.00,  
"> 40 m":1.00);

Tabela tab11(Ponderacao);

tab11 = Novo (CategoriaIni = "NA\_CHUVO",  
"0 a 2 m":0.10,  
"2 a 5 m":0.10,  
"5 a 10 m":0.10,  
"10 a 20 m":0.10,  
"20 a 30 m":0.80,  
"30 a 40 m":1.00,  
"> 40 m":1.00);

Tabela tab12 (Ponderacao);

```

tab12 = Novo (CategoriaIni = "IMPENETRABEL_T",
             "0 a 2 m":0.80,
             "2 a 5 m":0.80,
             "5 a 10 m":0.80,
             "10 a 20 m":0.60,
             "20 a 30 m":1.00,
             "30 a 40 m":1.00,
             "> 40 m":1.00);
Tabela tab13 (Ponderacao);
tab13 = Novo (CategoriaIni = "DISTÂNCIA_CONSTRUÇÕES",
             "0 a 5 m":0.10,
             "5 a 10 m":0.20,
             "10 a 20 m":0.50,
             "20 a 50 m":0.90,
             "50 a 100 m":1.00,
             "> 100 m":1.00);
// Definicao do dado de saida

Numerico var14 ("CARTA_FINAL_mnt");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recuperar (Nome="Nspt_3m");
var2 = Recuperar (Nome="Nspt_6m");
var3 = Recuperar (Nome="Nspt_9m");
var4 = Recuperar (Nome="Nspt_12m");
var5 = Recuperar (Nome="Nspt_15m");
var6 = Recuperar (Nome="Nspt_20m");
var7 = Recuperar (Nome="Nspt_30m");
var8 = Recuperar (Nome="Espessura_pedo");
var9 = Recuperar (Nome="Espessura_zona_ferruginosa");
var10 = Recuperar (Nome="Espessura_sapro");
var11 = Recuperar (Nome="Prof_NA");
var12 = Recuperar (Nome="Prof_impenetravel");
var13 = Recuperar (Nome="Distância");
// Criacao do dado de saída
var14 = Novo (Nome="carta_adequabilidade_metrô", ResX=50, ResY=50, Escala=10000,
             Min=0, Max=1);
// Geracao da media ponderada

var14 = 0.04*(Pondere(var1, tab1)) + 0.04*(Pondere(var2, tab2))+ 0.04*(Pondere(var3, tab3))
+ 0.015*(Pondere(var4, tab4)) + 0.015*(Pondere(var5, tab5)) + 0.015*(Pondere(var6, tab6))
+ 0.015*(Pondere(var7, tab7)) + 0.08*(Pondere(var8, tab8)) + 0.06*(Pondere(var9, tab9)) +
0.08*(Pondere(var10, tab10)) + 0.1*(Pondere(var11, tab11)) + 0.20*(Pondere(var12, tab12))
+ 0.30*(Pondere(var13, tab13));
}

```