

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e
Materiais
PPGEM

O ESTUDO GEOESTATÍSTICO DE SONDAGENS SPT PARA
GERAÇÃO DE MAPAS AUXILIARES EM OBRAS DE
ENGENHARIA

Daiane Folle

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, RS
2002

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e
Materiais

PPGEM

O ESTUDO GEOESTATÍSTICO DE SONDAGENS SPT PARA
GERAÇÃO DE MAPAS AUXILIARES EM OBRAS DE
ENGENHARIA

Daiane Folle

Eng^a. Civil

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre, RS
2002

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Regina Davidson Dias – ECV/UFSC

Prof. PhD. Fernando Schnaid – PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe
Coordenador do PPGEM

...."Se por um instante Deus me presenteasse com mais um pouco de vida, possivelmente não diria tudo o que penso, mas definitivamente pensaria em tudo o que digo. Daria valor às pequenas coisas, não pelo que valem, mas sim, pelo que significam...

Dormiria pouco e sonharia mais. Andaria quando os demais se deteriam, despertaria quando os demais dormem.

Escutaria quando os demais falariam.

Se eu tivesse um coração, escreveria meu horror ao frio, e esperaria que saísse o sol.

Regaria com minhas lágrimas as rosas, para sentir a dor de seus espinhos, e o beijo vermelho de suas pétalas.

À uma criança, daria asas, mas deixaria que ela sozinha aprendesse a voar e aos idosos, ensinaria que a morte não chega com a velhice, mas sim, com o esquecimento.

Tantas coisas aprendi com vocês homens...

Aprendi que quando um recém-nascido aperta com seu pequeno punho, pela primeira vez, o dedo de seu pai, o tem conquistado para sempre.

Sempre diga o que sentes e faça o que pensas.

Se soubesse que hoje seria a última vez que te veria dormir, te abraçaria fortemente e rezaria ao Senhor para poder ser o guardião de tua alma.

O amanhã é incerto.

Hoje pode ser a última vez que você verá as pessoas que ama.

Por isso não espere mais para demonstrar amor.

Faça-o hoje, já que o amanhã nunca chega.

Mantém a todos que amas perto de ti.

Tome tempo para dizer-lhes "sinto muito", "perdoe-me",

"obrigado", e todas as palavras de amor que você conhece.

Lembre-se sempre:

Viva hoje intensamente!

Coloque em prática os seus sonhos.

O momento é este!..."

GABRIEL GARCIA MARQUES
(Adaptado)

Aos meus queridos pais
Ademar e Naira, por todo
apoio, incentivo,
confiança, e pelo
eterno **amor**.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor **João Felipe Costa**, por ter acreditado na minha capacidade desde a primeira conversa, ainda na Universidade de Passo Fundo. Por sua formidável orientação, que me fez crescer e admirar sua competência e espírito engrandecedor. Por sua amizade e incentivo.

Ao Professor **Fernando Schnaid**, por toda motivação, amizade, e pelos momentos de ensinamentos, demonstrando sua grande sabedoria.

Ao Professor **Jair Carlos Koppe**, por suas idéias e correções em artigos, pelos empréstimos de livros e pela amizade.

Ao Professor da Universidade de Passo Fundo, **Ivo André Schneider** pelo grande apoio para a realização deste mestrado, pois por seu intermédio conheci o meu orientador.

Ao Professor Geólogo **Roberto Naime** por seu apoio, e pela grande força nos textos a respeito da geologia da área em estudo.

De forma muito especial, ao Eng. Civil **Luizmar Lopes** (empresa de Sondagens e Estaqueamentos – Multisolos), por disponibilizar o banco de dados desse estudo. Ainda, pela sua amizade e constantes trocas de idéias.

À **UFRGS**, em especial ao Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (**LPM**), por propiciar condições adequadas para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa. Assim como à todos os colegas do laboratório, professores do DEMIN e funcionários, pela amizade que com certeza jamais será apagada de minha memória. Às amigas **Keli, Carla, Simone, Vanessa e Margareth**. Ao companheirismo, à constante troca de

idéias e pelos almoços de confraternização com meus colegas **Fernando Boff, Márcio, Jairo, Danielle e Firmino**. Pela amizade dos meus amigos **Mário, Leandro, Sérgio Buffon, Alex, Paul, Gian, André, Telmo, Adelir, Enrique, Fernando Gambim, Anderson Weiss, Sérgio Klein, Rodrigo Peroni, Gustavo** e ao **José Antônio**. Em especial ao amigo **Roger** por sua incansável paciência em nossas discussões geoestatísticas.

Com amor, ao meu namorado **Adriano C. Teixeira**, por todo seu carinho, companheirismo e paciência principalmente durante esses dois anos. Pelo constante incentivo durante o mestrado e pela motivação para seguir ao doutorado.

A toda minha família que sempre torceu por mim, pela minha realização e felicidade. Ao meu irmão, pelos fins de semana que me fez companhia aqui em Porto Alegre, e por todo seu carinho.

À família de meu namorado, que sempre me apoiou nessa etapa tão difícil, mas recompensadora.

À **Deus**, pois devemos a ele a nossa existência, a possibilidade de ter fé para acreditar que o caminho que traçamos é possível de ser percorrido.

Ao **CNPq** pela bolsa concedida, o que tornou possível minha vinda à Porto Alegre através de seus recursos financeiros.

Muito Obrigado !!!

Índice

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS.....	XVI
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 <i>Estado-da-Arte</i>	3
1.2 <i>Objetivo Geral</i>	6
1.3 <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.4 <i>Metodologia</i>	7
1.5 <i>Organização da Dissertação</i>	8
CAPÍTULO 2.....	9
APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E O ENSAIO SPT	9
2.1 <i>A área de Estudo</i>	9
2.1.2 Banco de Dados	11
2.2 <i>Geologia da Região</i>	11
2.2.1 Solos de Passo Fundo	14
2.3 <i>O ensaio SPT</i>	15
2.3.1 História do SPT no Brasil	18
2.3.2 História da Padronização	22
2.4 <i>Medida de Energia do Ensaio SPT</i>	24
CAPÍTULO 3.....	27
DEFINIÇÃO DOS DOMÍNIOS GEOESTATÍSTICOS E A KRIGAGEM	27
3.1 <i>Considerações Preliminares</i>	27
3.2 <i>Subdivisão do Banco de Dados</i>	30
3.3 <i>Modelamento da Continuidade Espacial</i>	35
3.4 <i>Krigagem Ordinária</i>	42

3.4.1 Krigagem Ordinária em Blocos	45
3.5 Resultados Obtidos.....	47
CAPÍTULO 4.....	75
SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA.....	75
4.1 <i>Simulação Condicional</i>	75
4.1.1 Simulação Seqüencial Gaussiana.....	77
4.1.2 Normalização dos Dados	79
4.1.3 Verificação da Multinormalidade	81
4.2 <i>Simulação Seqüencial Gaussiana no espaço normal</i>	82
4.2.1 Validação dos Resultados.....	85
4.3 <i>Mudança de Suporte a Posteriori</i>	86
4.4 <i>Imagens Equiprováveis</i>	89
4.4.1 Variabilidade do N_{spt}	153
CAPÍTULO 5	168
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	168
5.1 <i>Resumo dos Resultados Obtidos</i>	168
5.2 <i>Proposta Metodológica</i>	169
5.3 <i>Avaliação dos Objetivos Específicos</i>	169
5.4 <i>Recomendações</i>	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	172
APÊNDICE A.....	180
APÊNDICE B.....	182
APÊNDICE C.....	184
APÊNDICE D.....	188
APÊNDICE E.....	196

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Seqüência metodológica adotada.....	7
Figura 2.1 – Localização da Área de estudo. Mapa do Brasil extraído de http://www.guianet.com.br/guiacidades	10
Figura 2.2 – Distribuição das sondagens SPT (escala de cores referentes a valores de N_{spt} da cota –1m).....	11
Figura 2.3 – Mapa Geológico da região de Passo Fundo, destacando a área de estudo (Modificado de Carraro <i>et al.</i> , 1974). Compilado do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, UFRGS/FAPERGS, 1974), obtido de Naime (2001), adaptado.	13
Figura 2.4 – Sondagem SPT executada na área de estudo pela empresa de sondagens e estaqueamentos – Multisolos (Passo Fundo/RS).	20
Figura 2.5 – Amostrador padrão bipartido do ensaio SPT.....	21
Figura 2.6 – Esquema de instrumentação utilizada em trabalhos no IPT, quando do uso de instrumentação importada e células de carga IPT [Odebrecht <i>et al.</i> , (2000) <i>apud</i> Belincanta (1985)].....	25
Figura 3.1 – Histograma geral de todos os dados de SPT.	31
Figura 3.2 – Correlação entre SPT x profundidade e segmentação dos níveis de estudo em domínios geoestatísticos.....	32
Figura 3.3 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada I.	33

Figura 3.4 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada II.	33
Figura 3.5 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada III.	34
Figura 3.6 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada IV.	34
Figura 3.7 – Comportamento das medidas de correlação $\tilde{C}(h), \tilde{\rho}(h), \tilde{\gamma}(h)$, de uma variável aleatória $V(x)$	37
Figura 3.8 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90° , correspondentes à camada I.	40
Figura 3.9 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90° , correspondentes à camada II.	40
Figura 3.10 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90° , correspondentes à camada III.	41
Figura 3.11 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90° , correspondentes à camada IV.	41
Figura 3.12 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	51
Figura 3.12 (b) – Locação dos dados de SPT da camada I.	52
Figura 3.12 (c) – Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada I.	53
Figura 3.13 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	54
Figura 3.13 (b) – Locação dos dados de SPT da camada II.	55
Figura 3.13 (c) – Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada II.	56
Figura 3.14 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	57
Figura 3.14 (b) – Locação dos dados de SPT da camada III.	58
Figura 3.14 (c) – Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada III.	59
Figura 3.15 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	60
Figura 3.15 (b) – Locação dos dados de SPT da camada IV.	61
Figura 3.15 (c) – Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada IV.	62

Figura 3.16 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	63
Figura 3.16 (b) – Locação dos dados de SPT da camada I.	64
Figura 3.16 (c) – Variância de Estimativa dos valores krigados da camada I.	65
Figura 3.17 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	66
Figura 3.17 (b) – Locação dos dados de SPT da camada II.	67
Figura 3.17 (c) – Variância de Estimativa dos valores krigados da camada II.	68
Figura 3.18 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	69
Figura 3.18 (b) – Locação dos dados de SPT da camada III.	70
Figura 3.18 (c) – Variância de Estimativa dos valores krigados da camada III.	71
Figura 3.19 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	72
Figura 3.19 (b) – Locação dos dados de SPT da camada IV.	73
Figura 3.19 (c) – Variância de Estimativa dos valores krigados da camada IV.	74
Figura 4.1 – Exemplo da transformação da distribuição original em normalizada. (Fonte: Goovaerts, 1997 p.268).	79
Figura 4.2 – Histograma dos dados normalizados da camada III (a). Histograma dos dados cumulativos desta mesma camada (b).	81
Figura 4.3 – Variograma direcional dos dados normalizados da camada de III a 0° (a), e 90° (b).	81
Figura 4.4 – Histograma de cinco simulações selecionadas aleatoriamente representativas da camada III, dos dados normalizados [3 (a), 18 (b), 24 (c), 39 (d) e 43 (e)].	84
Figura 4.5 – Flutuações nas direções de maior e menor continuidade espacial dos dados normalizados da camada III (suporte pontual – 5x5m).	86
Figura 4.6 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	93
Figura 4.6 (b) – Locação dos dados de SPT da camada I.	94
Figura 4.6 (c) – Realização n° 03, para dados de SPT da camada I.	95
Figura 4.7 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	96

Figura 4.7 (b) – Locação dos dados de SPT da camada I.....	97
Figura 4.7 (c) – Realização n° 18, para dados de SPT da camada I.	98
Figura 4.8 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	99
Figura 4.8 (b) – Locação dos dados de SPT da camada I.....	100
Figura 4.8 (c) – Realização n° 24, para dados de SPT da camada I.	101
Figura 4.9 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	102
Figura 4.9 (b) – Locação dos dados de SPT da camada I.....	103
Figura 4.9 (c) - Realização n° 39, para dados de SPT da camada I.....	104
Figura 4.10 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	105
Figura 4.10 (b) – Locação dos dados de SPT da camada I.....	106
Figura 4.10 (c) - Realização n° 43, para dados de SPT da camada I.....	107
Figura 4.11 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	108
Figura 4.11 (b) – Locação dos dados de SPT da camada II.....	109
Figura 4.11 (c) – Realização n° 03, para dados de SPT da camada II.	110
Figura 4.12 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	111
Figura 4.12 (b) – Locação dos dados de SPT da camada II.....	112
Figura 4.12 (c) – Realização n° 18, para dados de SPT da camada II.	113
Figura 4.13 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	114
Figura 4.13 (b) – Locação dos dados de SPT da camada II.....	115
Figura 4.13 (c) – Realização n° 24, para dados de SPT da camada II.	116
Figura 4.14 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	117
Figura 4.14 (b) – Locação dos dados de SPT da camada II.....	118
Figura 4.14 (c) – Realização n° 39, para dados de SPT da camada II.	119
Figura 4.15 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	120
Figura 4.15 (b) – Locação dos dados de SPT da camada II.....	121
Figura 4.15 (c) – Realização n° 43, para dados de SPT da camada II.	122
Figura 4.16 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	123
Figura 4.16 (b) – Locação dos dados de SPT da camada III.....	124
Figura 4.16 (c) – Realização n° 03, para dados de SPT da camada III.	125
Figura 4.17 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	126
Figura 4.17 (b) – Locação dos dados de SPT da camada III.....	127
Figura 4.17 (c) – Realização n° 18, para dados de SPT da camada III.	128
Figura 4.18 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	129

Figura 4.18 (b) – Locação dos dados de SPT da camada III.	130
Figura 4.18 (c) – Realização n° 24, para dados de SPT da camada III.	131
Figura 4.19 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	132
Figura 4.19 (b) – Locação dos dados de SPT da camada III.	133
Figura 4.19 (c) – Realização n° 39, para dados de SPT da camada III.	134
Figura 4.20 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	135
Figura 4.20 (b) – Locação dos dados de SPT da camada III.	136
Figura 4.20 (c) – Realização n° 43, para dados de SPT da camada III.	137
Figura 4.21 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	138
Figura 4.21 (b) – Locação dos dados de SPT da camada IV.	139
Figura 4.21 (c) – Realização n° 03, para dados de SPT da camada IV.	140
Figura 4.22 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	141
Figura 4.22 (b) – Locação dos dados de SPT da camada IV.	142
Figura 4.22 (c) – Realização n° 18, para dados de SPT da camada IV.	143
Figura 4.23 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	144
Figura 4.23 (b) – Locação dos dados de SPT da camada IV.	145
Figura 4.23 (c) – Realização n° 24, para dados de SPT da camada IV.	146
Figura 4.24 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	147
Figura 4.24 (b) – Locação dos dados de SPT da camada IV.	148
Figura 4.24 (c) – Realização n° 39, para dados de SPT da camada IV.	149
Figura 4.25 (a) – Mapa de localização das ruas na área de estudo.	150
Figura 4.25 (b) – Locação dos dados de SPT da camada IV.	151
Figura 4.25 (c) – Realização n° 43, para dados de SPT da camada IV.	152
Figura 4.26 – Imagem mostrando os valores de N_{spt} considerando 50 realizações, para a camada I, média de cada bloco.	156
Figura 4.27 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} , da camada I.	157
Figura 4.28 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} , da camada I.	158
Figura 4.29 – Imagem mostrando os valores de N_{spt} considerando 50 realizações, para a camada II, média de cada bloco.	159

Figura 4.30 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} , da camada II.	160
Figura 4.31 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} , da camada II.	161
Figura 4.32 – Imagem mostrando os valores de N_{spt} considerando 50 realizações, para a camada III, média de cada bloco.	162
Figura 4.33 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} , da camada III.	163
Figura 4.34 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} , da camada III.	164
Figura 4.35 – Imagem mostrando os valores de N_{spt} considerando 50 realizações, para a camada IV, média de cada bloco.....	165
Figura 4.36 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} , da camada IV.	166
Figura 4.37 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} , da camada IV.....	167

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Correlações entre a resistência à penetração e a compacidade ou a consistência, para amostradores existentes no Brasil até 1970 e para o Raymond americano [extraído de Belicanta & Cintra (1998)].	22
--	----

Resumo

A sondagem com SPT ("Standard Penetration Test") é o método de investigação com mais frequência empregado na caracterização geotécnica de solos. Devido a relevância desse tipo de ensaio, desenvolveu-se um procedimento para geração de mapas de SPT com base em métodos geoestatísticos. Esses mapas devem conter a estimativa do índice de penetração (SPT) em diferentes posições no terreno em estudo, partindo de ensaios pré-existentes, objetivando auxiliar de maneira mais efetiva o planejamento de obras de engenharia. O trabalho foi baseado em um banco de dados com 141 sondagens realizadas na cidade de Passo Fundo/RS, compreendendo uma área total de 4,16km². O banco de dados compreende sondagens de uma única empresa (o que minimiza os erros decorrentes da própria sondagem SPT) e uma única unidade geotécnica. Essas informações foram utilizadas para a avaliação do comportamento espacial dos parâmetros modelados e, posteriormente, construção de mapas de SPT. As estimativas foram efetuadas por krigagem ordinária em blocos com dimensões de 100mx100m, em quatro níveis distintos definidos de acordo com a variação média do índice de penetração com a profundidade. Os mapas resultantes da krigagem ordinária revelaram-se satisfatórios para o fim a que se destina esse trabalho. Para a avaliação desses mapas, é relevante que se quantifiquem as incertezas associadas a essas estimativas. A metodologia para tal é baseada em Simulação Geoestatística, onde foram efetuadas simulações seqüenciais Gaussianas (ssG), em blocos de mesma dimensão que a utilizada na krigagem. Os resultados positivos mostraram ser adequado o emprego da simulação seqüencial Gaussiana, para geração de mapas auxiliares de valores de SPT a serem empregados no planejamento de investigações geotécnicas complementares.

Abstract

Standard Penetration Test (SPT) is frequently used for investigation in geotechnical evaluation of soil resistance. Due to the relevance this test, a geostatistics-based procedure to map SPT values was developed. These maps include the estimation of SPT at different positions covering an area of interest and are used to help in planning engineering projects. The methodology is illustrated on data set with 141 holes drilled in Passo Fundo/RS, covering an area of 4,16 km². The information obtained was used to define the SPT values spatial continuity and subsequently interpolate to generate the maps. The estimation was performed using ordinary kriging at 100m x 100m blocks. Four different levels of material were defined according to the average soil resistance at different depths. The resulting maps were validated. Afterward, the uncertainty associated with these estimations were quantified. A methodology based on geostatistic simulation of the sequential gaussian simulation was used. Blocks were defined at the same size as those used for ordinary kriging. The results showed that sequential gaussian simulation of SPT provided complementary information about the risk in geotechnical investigation.

Capítulo 1

Introdução

O conhecimento do comportamento e condições do solo em subsuperfície é imprescindível para fim de projetos seguros e econômicos em obras civis. Esse tipo de informação é utilizado no planejamento urbano, gerenciamento ambiental, estruturas de contenção, estabilidade de taludes, fundações, entre outras. As informações utilizadas são oriundas de ensaios de campo, que resultam na definição das propriedades e da estratigrafia do solo.

A formação do subsolo é complexa, complexidade esta causada por fenômenos naturais que envolvem processos físicos e químicos interagindo simultaneamente. Parte-se deste fato, a necessidade de conhecer a geologia básica de formação do solo da região em que se pretende estudar. Como auxiliar para essa compreensão insere-se a execução ou análise de sondagens existentes na área de interesse.

No caso de um estudo do subsolo de uma cidade (área urbanizada), se dispõe das sondagens executadas por empresas de investigações geotécnicas, o que facilita a organização de um banco de dados a respeito do subsolo da região. Dentre os ensaios de investigação de solo *in situ*, o mais consagrado por várias décadas no Brasil tem sido o SPT (*Standard Penetration Test*), pois apenas em obras de grande porte existe a

possibilidade de testar e desenvolver outros métodos geotécnicos de investigação de solo.

O ensaio SPT é considerado um método direto de investigação, sendo suas medidas aplicadas às estimativas de recalques e determinação da capacidade de carga de fundações. A partir da década de 70, foi incorporado ao ensaio um fator de correção no valor do SPT que leva em consideração a energia efetivamente transferida à haste. Essa medida pode ser realizada através de vários mecanismos adaptados ao equipamento de SPT, assim como: células de carga, transdutores de deformação e acelerômetros. A importância dessa correção é hoje reconhecida e tem sido incorporada à prática de engenharia.

Nas obras civis em geral, se estima que o custo de investigações de solo gira em torno de 0,5 e 1% do total da construção da estrutura. Caso o projetista se defronte com informações insuficientes ou inadequadas a respeito do solo, cabe a ele, por segurança, superdimensionar a obra. Com isso, nota-se a importância e a necessidade de uma investigação adequada do solo, por meio de ensaios executados de acordo com a norma específica, e contando ainda com o acompanhamento do campo, por um técnico conhecedor de solos e procedimentos de sondagens.

É de conhecimento que nem todas as obras possuem a investigação do subsolo adequada que deveriam ter, nem mesmo há recursos financeiros disponíveis por parte do empreendedor para tal. Desta forma, cada vez mais são inseridas no meio geotécnico, metodologias matemáticas que possam auxiliar no conhecimento do comportamento do solo de forma contínua.

A literatura aponta a existência de vários métodos matemáticos de interpolação para geração de modelos numéricos, entre os quais, o método dos polígonos, da triangularização, das curvas de isovalores, dos inversos das distâncias ponderadas, entre outros. Esses métodos são limitados na avaliação da variabilidade espacial das amostras e omissos quanto à quantificação dos erros que inevitavelmente existem no processo de interpolação.

Há várias décadas se utilizam métodos geoestatísticos para estimativas e interpolação. Esses métodos foram desenvolvidos na década

de 60 (Matheron, 1962), para o estudo de variáveis regionalizadas, onde considerações sobre a continuidade espacial são essenciais para o sucesso das estimativas.

Essa metodologia geoestatística, foi inicialmente aplicada em áreas da Engenharia de Minas e Geologia, é hoje amplamente empregada em diversos outros campos de conhecimento como o Petróleo, Engenharia Ambiental, e em particular, em Geotecnia, como mostra a aplicação considerada neste trabalho.

Por meio de um estudo de caso, a metodologia geoestatística é proposta neste trabalho, para geração de mapas de SPT em uma área urbana, baseando-se em ensaios de penetração padronizada pré-existentes. A partir de métodos geoestatísticos, são apresentadas as estimativas dos valores dos ensaios SPT em blocos pré-definidos, abrangendo toda a área de estudo. A incorporação de incertezas nestas estimativas é aplicada através de simulações estocásticas.

1.1 Estado-da-Arte

O conceito a respeito de estimativas teve sua origem a centenas de anos quando eram emitidas opiniões a respeito da distribuição de minérios em jazidas partindo de conjecturas baseadas em aspectos físicos (cor, brilho, peso, etc.) e outras medidas empíricas. Com a evolução matemática e química, a estimativa de jazidas minerais passa a ser quantitativa, dando origem a vários métodos clássicos de avaliação que são aplicados até hoje, como o método da poligonal, da triangularização, entre outros. Mas, quaisquer desses métodos clássicos são limitados na avaliação da variabilidade espacial das amostras bem como omissos quanto à quantificação dos erros.

Um método adequado para analisar a questão de variabilidade espacial dos dados de amostragem deveria satisfazer algumas condições como: (i) o valor esperado do erro em qualquer ponto seja nulo; (ii) a dispersão dos erros cometidos deve ser a menor possível, isto é, as variâncias dos erros considerados devem ser mínimas.

Essas considerações levaram Matheron (1962, 1970), influenciado pelo trabalho de Krige (1951) e Sichel (1966) nas minas de ouro da África do Sul, a estabelecer a teoria das variáveis regionalizadas e sua evolução até hoje chamada Geoestatística. A aplicação das técnicas geoestatísticas se tornou desde então popular na indústria mineira. Atualmente, essas técnicas são também utilizadas em diversas outras áreas, como geociências, petróleo e meio ambiente. Algumas de aplicação mais recente envolvem a indústria pesqueira e florestal.

Encontra-se na literatura várias publicações referentes à utilização de métodos geoestatísticos em geotecnia. Como exemplo, apresenta-se Hegazi *et al.* (1996) os quais abordam a variabilidade espacial do ensaio de campo CPT (Piezocone Penetration Test), utilizado para determinação da previsão da capacidade de carga de fundações em depósitos de argilas moles. A aplicação de métodos geoestatísticos em fundações, visando a estimativa de resistência à cravação de estacas é apresentada em Yoon & O'Neill (1999).

A caracterização de propriedades geotécnicas de materiais rochosos, e o modelamento da variabilidade espacial dos parâmetros e propriedades do solo são abordados em Soulie (1984), Soulie *et al.* (1990), Cromer (1996), Calle (1987). Cromer *et al.* (1996), registram a aplicabilidade de simulação geoestatística no meio geotécnico, para designação da qualidade de rochas.

Poucos trabalhos têm sido publicados com aplicações de geoestatística em informações de sondagens de penetração padronizada (SPT), o que aponta como sendo uma área promissora para novas investigações. O uso de krigagem ordinária em informações de sondagens de SPT é recente, podendo-se citar alguns trabalhos como Mackean & Rosenbaum (1990), Sturaro & Landim (1996), Xavier (1999), Romanel & Xavier (2000), Carvalho & Cavalheiro (2000), Folle *et al.* (2001), entre outros. Ainda explorando a aplicabilidade dos resultados de ensaios de penetração dinâmica SPT, Xavier (1999) mostra o uso de cokrigagem para estimar as cotas do lençol freático e do substrato rochoso em função das cotas do relevo topográfico, e a krigagem da indicatriz para determinar a probabilidade do número de golpes do ensaio SPT situar-se acima ou abaixo de um determinado nível de corte (cutoff). Sturaro *et al.* (2000) aplica a krigagem

indicativa em geotecnia ambiental, integrando dois mapas probabilísticos das variáveis espessura do solo e profundidade do lençol freático, cujas informações foram também obtidas a partir de ensaios de SPT, objetivando subsidiar os locais mais favoráveis para a locação de aterros sanitários.

Dentro da metodologia geoestatística de ampla aplicabilidade à geotecnia, como o apresentado acima, inserem-se as teorias de krigagem e simulações estocásticas, cujo embasamento teórico é discutido em inúmeros artigos, assim como diversos livros textos. A base teórica a respeito da krigagem é reportada em Matheron (1963, p.1246-1266), David (1977), Journel & Huijbregts (1978), David (1988), Isaaks & Srivastava (1989), Goovaerts (1997), Armstrong (1998) e Olea (1999).

As principais diferenças existentes entre estimativas e simulações, assim como os princípios básicos de simulações condicionais, são apresentados em Journel & Huijbregts (1978, cap. 7). A simulação em suporte de blocos é abordada nesta mesma obra, p.511-517. Os métodos de modelamento de incertezas globais e locais, utilizando simulações condicionais são discutidos em Goovaerts (1997, caps. 7 e 8).

Os principais algoritmos de simulação condicional, com ênfase de aplicação ao método de simulação seqüencial Gaussiana, são apresentados em Isaaks (1990), Goovaerts (1997, p.374-436) e Deutsch & Journel (1998, cap. 5). A aplicação de simulações estocásticas e a quantificação de incertezas e intervalos de confiabilidade são apresentados em Olea (1999).

Existem vários métodos e medidas de avaliar e visualizar as incertezas locais utilizando os resultados das simulações condicionais (Goovaerts, 1997 p.333-340). Pilger (2000) usa efeitos de animação para a visualização desse tipo de incertezas; sua aplicação se dá em informações georeferenciadas, indicando as melhores áreas para locação amostral, a fim de reduzir a variabilidade das estimativas, inserindo novas amostras e avaliando seu benefício na redução dessas incertezas.

Entretanto, a abordagem aqui proposta, incorporando simultaneamente a estimativa de valores de consistência de solos em locais não amostrados, a partir de informações de SPT, e a quantificação de

incertezas a respeito dessas estimativas, é praticamente inexistente na literatura relacionada.

1.2 Objetivo Geral

De acordo como o exposto, essa dissertação pretende partir de um estudo de caso, analisar as possibilidades de geração de mapas de informações de SPT a partir da metodologia geoestatística, avaliando as incertezas relacionadas utilizando simulação estocástica. Não se tem a intenção de dispensar a execução de sondagens de campo, pois de acordo com a norma NBR 8.036/89, existe um número mínimo de sondagens a serem realizadas dependendo das dimensões da obra. Contudo, pretende-se avaliar o uso de uma prática já consagrada de avaliação de comportamento espacial de dados georeferenciados, a fim de gerar mapas que auxiliem o conhecimento prévio do solo em subsuperfície.

1.3 Objetivos Específicos

Por meio do estudo de caso de um banco de dados composto por informações de sondagens SPT na área urbana de Passo Fundo/RS, pretende-se atingir o objetivo acima proposto cumprindo os seguintes objetivos específicos:

- (i) apontar uma metodologia para definição dos domínios geoestatísticos;
- (ii) caracterizar a variabilidade espacial das informações SPT e realizar as estimativas nos locais não amostrados;
- (iii) avaliar as estimativas obtidas e quantificar as suas incertezas;
- (iv) gerar mapas de valores de N_{spt} e suas respectivas incertezas.

1.4 Metodologia

Baseado nos objetivos propostos, desenvolveu-se alguns procedimentos e etapas que se apresentam discriminados na Figura 1.1.

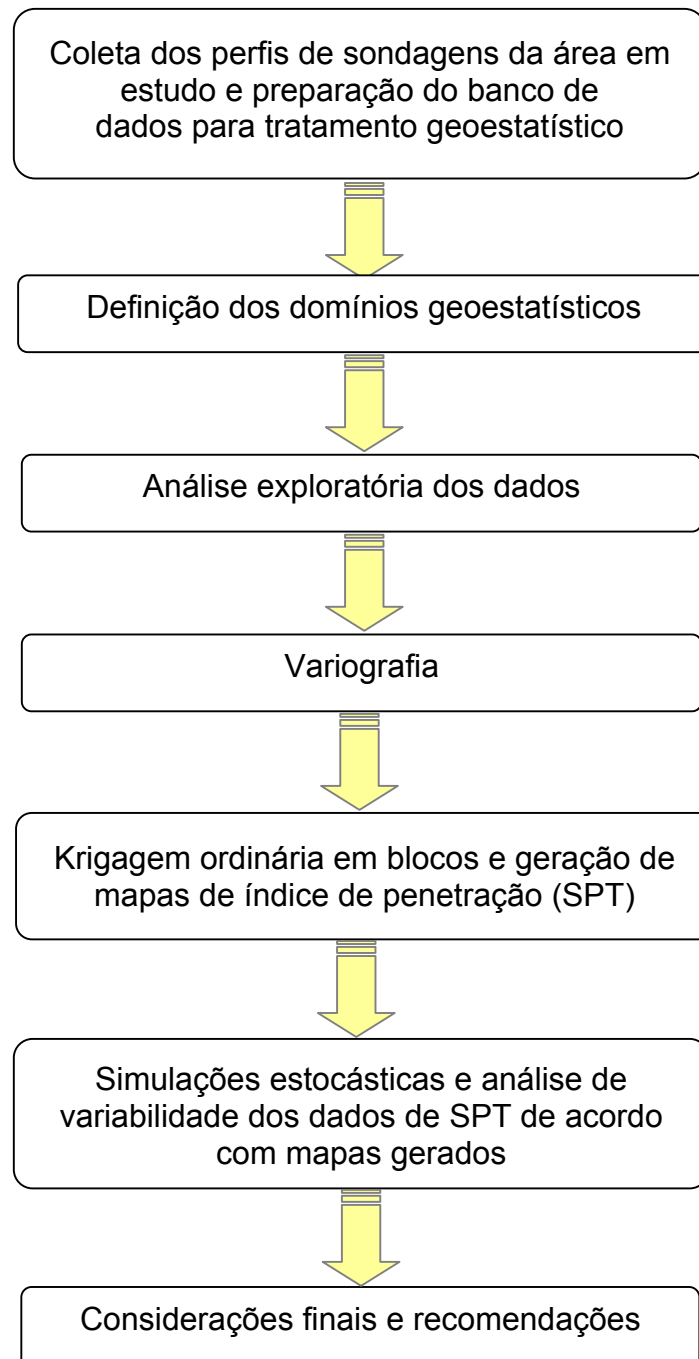


Figura 1.1 – Seqüência metodológica adotada.

1.5 Organização da Dissertação

Essa dissertação está estruturada em cinco capítulos, que estão organizados da seguinte forma:

- (i) o capítulo 2 apresenta a área em estudo, descrevendo seus aspectos geológicos, bem como as informações disponíveis. Revisa os conceitos a respeito do ensaio SPT e as medidas de energia desse ensaio.
- (ii) o capítulo 3 analisa as informações de SPT por meio da estatística básica. Também é apresentada a análise de continuidade espacial, resultando no ajuste dos modelos variográficos a serem utilizados nas estimativas e simulações posteriores. Desenvolve-se assim a krigagem ordinária no suporte de blocos, que gerará mapas de valores estimados de SPT para cada nível.
- (iii) o capítulo 4 revisa os princípios de simulações estocásticas, enfatizando o método de simulação seqüencial Gaussiana (ssG), utilizado no presente estudo. Apresenta a seqüência das simulações realizadas, incluindo a análise de incertezas associadas às estimativas dos índices de penetração (N_{spt}) para cada estrato.
- (iv) o capítulo 5 encerra a dissertação, apresentando o sumário da metodologia proposta inicialmente, cumprindo os objetivos estabelecidos no item 1.3. Incluem-se as considerações finais e as recomendações para os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Apresentação da Área de Estudo e o Ensaio SPT

Neste capítulo será apresentada a área de estudo e brevemente a sua geologia. Serão também abordados a conceituação básica e o histórico a respeito do ensaio SPT, assim como a medida de energia do mesmo.

2.1 A área de Estudo

A área analisada no presente estudo é composta por amostras oriundas de sondagem a percussão, mais especificamente sondagens de SPT (*Standard Penetration Test*). Esta se localiza na Região Sul do Brasil, ao Norte do Estado do Rio Grande do Sul, no Município de Passo Fundo (Figura 2.1). O acesso ao município se dá pelas BR-285 (Lagoa Vermelha/Carazinho), RS-135 (Erechim), RS-153 (Soledade/Porto Alegre) e RS-324 (Marau/Bento Gonçalves). A cidade limita-se ao Norte por Coxilha e Pontão, ao Sul por Ernestina e Marau, à Leste por Mato Castelhano e a Oeste pelo município de Carazinho. Referente à distância, situa-se a 291Km da capital Porto Alegre. Encontra-se à latitude 28°15'39" e longitude de 52°24'32". A região correspondente ao banco de dados possui uma área de 4,16Km² dentro da área urbana do município de Passo Fundo.

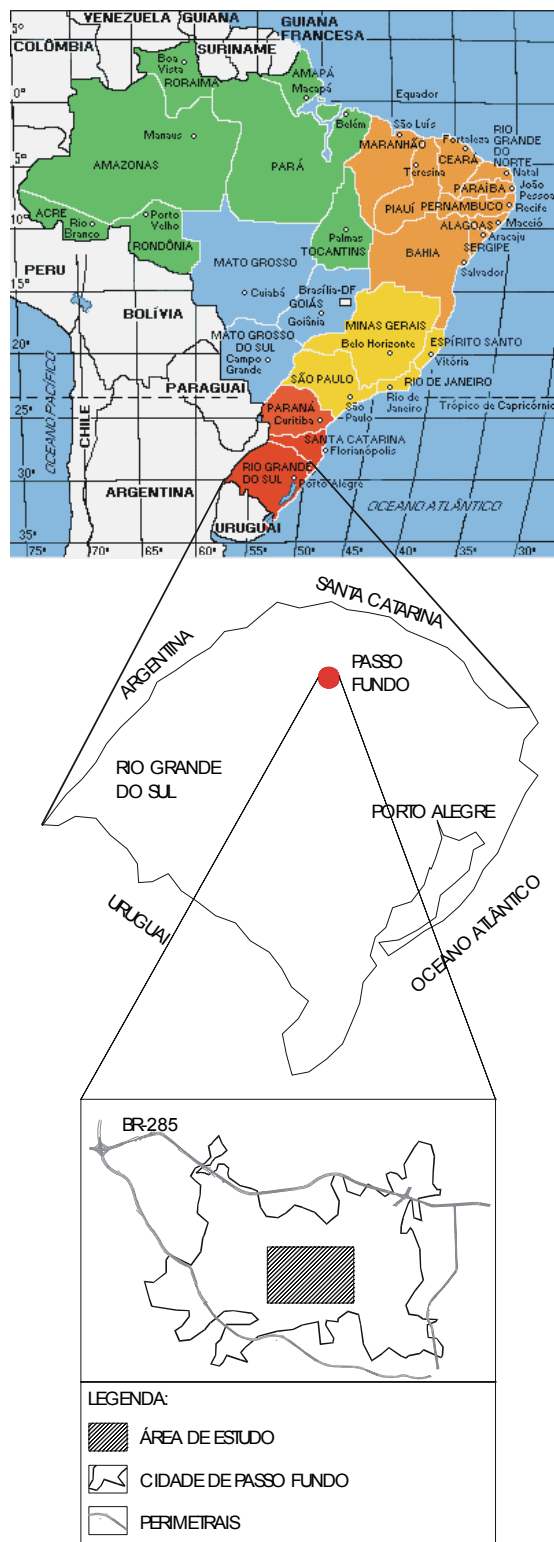


Figura 2.1 – Localização da Área de estudo. Mapa do Brasil extraído de <http://www.guianet.com.br/guiacidades>.

psamitos associados da Formação Tupanciretã (Tt), sendo ambas unidades incluídas na Bacia Gondwânica do Paraná.

As altitudes médias em relação ao nível do mar são de 600 a 800 m em média. A morfologia regional é composta por pequenas ondulações com encostas pouco íngremes, localmente com maiores gradientes.

As espessuras de solos apresentam relação íntima e direta com a morfologia. As maiores acumulações de terrenos residuais encontram-se nas partes mais elevadas e planas. Nas partes mais deprimidas dos terrenos, a espessura de solos é menor, fato esse comprovado na análise dos perfis de SPT das regiões mais baixas da cidade.

O relevo de planalto formando colinas arredondadas, com aspecto ondulado, é relativamente monótono, sofrendo pequenas influências localizadas devido às bacias de drenagens. A modificação mais saliente é o aumento na declividade da encosta dos vales (Naime, 2001).

Os mapas geológicos existentes da região apresentam um conjunto de unidades litoestratigráficas conforme Figura 2.3. Observa-se que a área de estudo encontra-se em totalidade dentro da Formação Serra Geral. Segundo Naime (2001) *apud* Comin-Chiaramonti *et al.* (1988), as associações litológicas de Passo Fundo e região, são representadas por 65% de rochas vulcânicas básicas na parte inferior do pacote extrusivo, e 22% de rochas intermediárias intercaladas entre os termos básicos, finalizando com 13% de rochas ácidas diferenciadas nas porções superiores ou de topo dos derrames.

A Formação Serra Geral (JKsg), é composta por efusivas básicas continentais toleíticas, comumente basaltos e fenobasaltos, com diques e corpos tubulares de diabásio. Ocasionalmente, entre as lavas, ocorrem lentes e camadas de arenitos interderrames; eólicos, finos a médios, róseos com estratificação cruzada tangencial e brechas constituídas por fragmentos de basalto e arenitos cimentados por lava basáltica. Normalmente capeando as efusivas básicas, ocorre uma seqüência de rochas de composição ácida, riolito; constituída por riolitos felsíticos, riodacitos felsíticos, dacitos felsíticos e seus componentes termos vítreos (RadamBrasil, 1986).

A Formação Tupanciretã (Tt) que recobre parte das rochas vulcânicas basálticas nas regiões a norte e leste de Passo Fundo é constituída

predominantemente por arenitos. São, via de regra, de cor avermelhada, às vezes amarelo-esverdeados, com granulação variável de fina a média, mal classificados, eventualmente conglomeráticos e constituídos essencialmente de quartzo e, subordinadamente, feldspato alterado a caulinita (RadamBrasil, 1986). A estrutura predominante é a estratificação cruzada tabular, com mergulhos principalmente para NE e E, e esporadicamente ocorrendo o tipo acanalado.

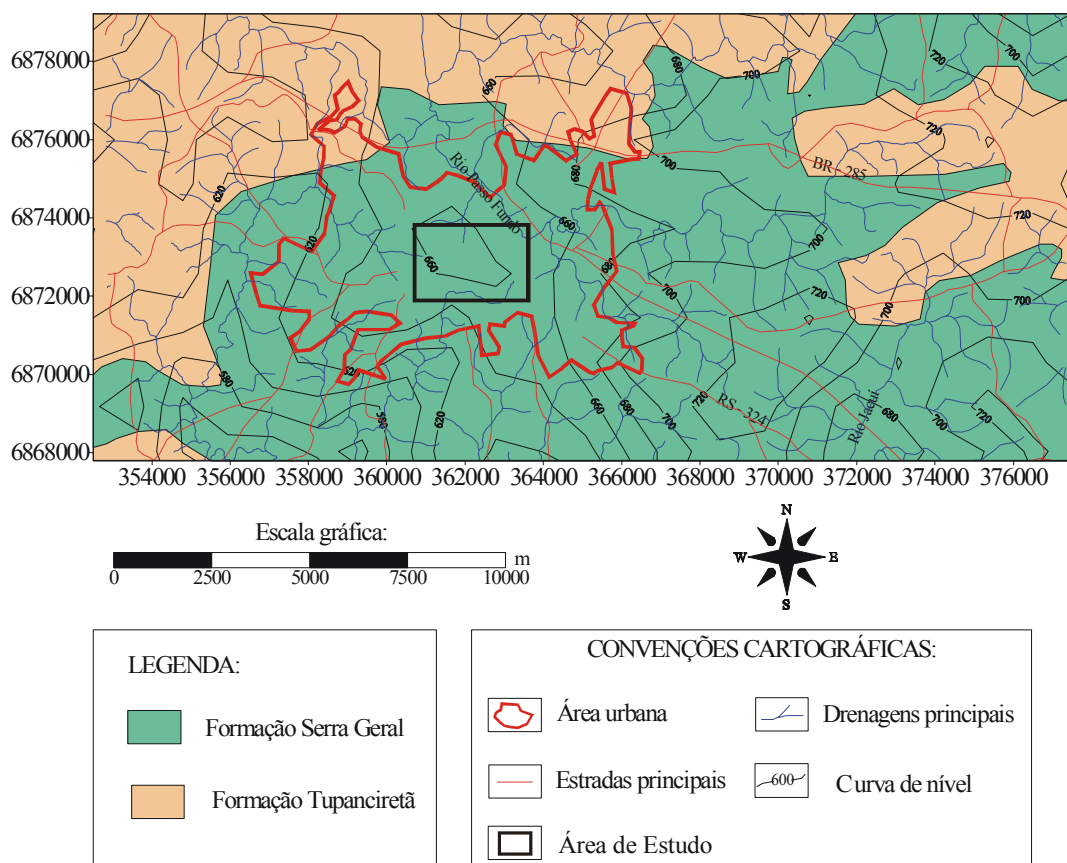


Figura 2.3 – Mapa Geológico da região de Passo Fundo, destacando a área de estudo (Modificado de Carraro *et al.*, 1974). Compilado do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, UFRGS/FAPERGS, 1974), obtido de Naime (2001), adaptado.

Conforme será abordado no Capítulo 3, foram realizadas subdivisões das camadas do subsolo, observando-se paralelamente a geologia local. Os níveis foram definidos de forma simples como será visto, mostrando a continuidade do solo em subsuperfície e posteriormente a sua continuidade lateral através da variografia dos dados.

2.2.1 Solos de Passo Fundo

Os solos da região de Passo Fundo são definidos da seguinte forma pelo Projeto RadamBrasil (1986), a parte central e norte da área em estudo é composta pelo solo LEHa, ou seja, um latossolo vermelho-escuro húmico álico e proeminente textura argilosa com relevo suavemente ondulado. Já a parte sul desta área compreende o solo LBRa 3, ou seja, latossolo bruno intermediário para latossolo roxo álico proeminente textura muito argilosa mais terra bruna estruturada e terra roxa álica com proeminente textura muito argilosa e relevo suavemente ondulado e ondulado.

A morfologia principal dos horizontes é assim descrita:

- (i) horizonte **A** proeminente, subdividido, de cor bruno avermelhada escura, com textura argilosa, por vezes granular; poroso, duro quando seco e friável quando úmido, quando também se apresenta plástico e pegajoso, com transição gradual para o horizonte sotoposto;
- (ii) horizonte **B** espesso, subdividido, de coloração vermelha escura, com textura argilosa, e localmente com estrutura em blocos subangulares, com cerosidade moderada;
- (iii) horizonte **C** muito profundo, formado por basalto intemperizado.

Quanto à área em estudo, esta apresenta solos bastante homogêneos com pequenas variações morfológicas e poucas inclusões, originados de rochas basálticas, exibindo relevo ondulado formado por elevações curtas com pendentes em dezenas de metros e declividades de 8 a 10%, localmente exibindo relevos mais acentuados. De acordo com os horizontes, verificou-se a predominância dos horizontes B e C, conforme os perfis de sondagens obtidos.

A seguir apresenta-se mais detalhadamente o ensaio SPT referido no decorrer do texto, mostrando sua evolução e novidades recentes a respeito de medidas de energia deste ensaio.

2.3 O ensaio SPT

A sondagem de simples reconhecimento (SPT) teve seu primeiro relato no ano de 1902, onde o engenheiro Charles R. Gow, objetivando melhorar o processo de reconhecimento do subsolo para aplicação à engenharia de fundações, até então executado pelo processo de circulação d'água ou lavagem, introduziu o método de amostragem a seco. Desenvolveu e empregou o primeiro amostrador de 1" (25,4mm) de diâmetro e 12" (30cm) de comprimento, com ponta biselada. Esse amostrador era cravado no solo dinamicamente com auxílio de um peso de 50Kg de massa.

Em 1927, L. Hart & F. A. Fletcher, da empresa The Gow Co., subsidiária da Raymond Concrete Pile Co., Estados Unidos, desenvolveram o amostrador tubular de 2" (51mm) e 1 3/8" (35mm) de diâmetro externo e interno, respectivamente, composto por três partes (cabeça, corpo e sapata biselada) rosqueadas e justapostas longitudinalmente, denominado amostrador tipo Raymond. O corpo do amostrador era composto por um tubo bi-partido, que permitia após a sua abertura a visualização da coluna da amostra colhida e facilitando a sua retirada.

No ano de 1930, segundo Teixeira (1977), H. A. Mohr, também da The Gow Co., introduziu a técnica de utilização de um peso de bater de 63,5Kg em queda livre de 76,2cm. Apresentou junto com F. A. Fletcher as primeiras especificações da sondagem, passando a ser interpretada como um ensaio, onde o resultado era o número de golpes necessários para fazer penetrar o amostrador no terreno em um segmento de 30cm após uma penetração inicial de 15cm, tal como é feito hoje.

Segundo Fletcher (1965), ocorreram muitas discussões sobre a fragilidade das hastes de 25,4mm de diâmetro nominal interno pesando 3,23Kg/m. Ainda, o engenheiro Cummings, demonstrou que as perdas de energia em movimentos transversais dessas hastes eram insignificantes quando comparadas com a energia total aplicada a cada golpe de martelo. Mesmo assim, em 1945 começaram as substituições por hastes mais pesadas como as do tipo "A" (5,6Kg/m) de rotativa, de fácil manuseio e adequadas às fortes tendências de mecanização nos Estados Unidos, manifestadas principalmente nos processos de avanço da perfuração.

A grande divulgação do amostrador desenvolvido pela Raymond foi obtida após a publicação do livro “Soil Mechanics in Engineering Practice” de Terzaghi & Peck no ano de 1948. Esses autores propõem o procedimento de execução da sondagem com perfuração por circulação d’água, utilizando um revestimento de 63,5mm de diâmetro, hastes de 25,4mm e amostrador do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo e 35mm de diâmetro interno. Apresentam inclusive correlações do índice de resistência à penetração dinâmica N com a consistência das argilas, com a compacidade das areias e com a capacidade de carga de fundações rasas. Ressaltam que uma maneira simples de se estimar o grau de compacidade *in situ* do solo seria o de contar o número de golpes necessários para cravar o amostrador 305mm após um assentamento inicial de 152mm. A este procedimento foi dado o nome de “Standard Penetration Test” (SPT). Como o procedimento inicial utilizava o amostrador Raymond o mesmo passou a ser também conhecido como amostrador do tipo Terzaghi & Peck (ano de 1948). Talvez, seja em função disto, que Kovacs *et al.* (1981) dêem como meados de cinquenta a época da aceitação generalizada da definição do índice de resistência à penetração dinâmica N, como é hoje conhecida.

Apesar dessa publicação de Terzaghi & Peck, Hvorslev (1949) ressaltou a falta de padronização do ensaio SPT como sendo a sua principal restrição. Ressalta a permanência da utilização de amostradores diferentes do Raymond de 51mm, e ainda aponta a falta de normalização referente à contagem do número de golpes, que iniciava a partir do ponto de apoio do amostrador e não a partir da cravação dos 152mm iniciais.

De acordo com Broms e Flodin (1988), o termo “Standard Penetration Test” foi provavelmente utilizado pela primeira vez por Terzaghi em 1947 em um artigo “Recent Trends in Subsoil Exploration” que foi apresentado no 7th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

A primeira normalização na ASTM (*American Society for Testing and Materials*) ocorreu em 1958 com a D1586-58T, a qual especifica a cravação do amostrador com o assentamento inicial de 152mm, não definindo claramente o que seria a resistência à penetração. Apenas indica que se registre os golpes necessários à cravação dos segundo e terceiro segmentos de 152mm. Já a norma D1586-63T, que sucede a de 1958, passou a definir

com mais clareza a resistência à penetração, como sendo a soma do número de golpes para cravação dos segundo e terceiro segmentos de 152mm. A D1586-67, de 1967, passa a ser norma definitiva.

Existe o relato de uma série de fatores intervenientes nos resultados do SPT, que pode ser visto em Fletcher (1965), complementados por Mohr (1966). Ainda sob este aspecto, apresentam e discutem tais fatores Teixeira (1974), Teixeira (1977), Belicanta *et al.* (1994), Belicanta & Cintra (1998), entre outros.

Mello (1971) apresenta o ensaio SPT passível de correlações entre o N_{spt} e o ângulo de atrito interno das areias (ϕ), bem como apresenta um estudo a respeito da energia transferida às hastes de perfuração. Parte-se na década de 70 e início de 80, a uma conscientização da importância das medidas de energia transferida ao amostrador. Os principais trabalhos que demarcaram esta nova etapa foram, Palacios (1977), Schertmann e Palacios (1979), Kovacs *et al.* (1977, 1981 e 1982), Kovacs (1979). Tais trabalhos mostraram que existem diferenças consideráveis no valor do N_{spt} atribuídos ao tipo de equipamento, seu estado de conservação, forma de utilização, tipo de martelo utilizado, a forma que este martelo é liberado, a geometria do amostrador, o uso do “liner”, etc.

Hoje, é internacionalmente aceita a importância da energia dinâmica contida na primeira onda longitudinal de compressão incidente, na padronização de resultados do SPT. O *Technical Committee on Penetration Test of Soils* (ISSMFE, 1989) é enfático ao recomendar a calibração dos equipamentos de SPT em termos de transferência de energia às hastes, principalmente em situações onde comparações entre os resultados são importantes. Os ajustes dos valores de SPT devem ser feitos tomando-se como base de referência a energia correspondente a 60% da energia nominal E^* , contida no martelo de 63,5Kg quando de uma queda livre de 760mm ($E^* = 474\text{joules}$) (Belicanta *et al.*, 1994).

Os estudos de determinação da transferência de energia, para os equipamentos utilizados nos Estados Unidos, apontam como energia média transferida às hastes o valor de 55% comparando-se com a energia nominal (massa do martelo 63,5Kg caindo de uma altura de 762mm). De acordo com

Seed *et al.* (1985), o valor de 60% é o mais adequado, visto que nos Estados Unidos a maior parte dos martelos utilizados para os ensaios é o do tipo “*Safety Hammer*”. Em outras regiões do mundo adota-se também de 60% da energia teórica. A partir disso é sugerida a correção do valor medido de N_{SPT} em um valor de referência N_{60} (Skempton, 1986).

Existem vários trabalhos que enfocam a necessidade da medida de energia no SPT bem como os equipamentos utilizados para as medidas e suas evoluções utilizando acelerômetros, podendo-se destacar alguns como Kovacs (1979), Schmertmann & Palácios (1979), Kovacs *et al.* (1982), Broms & Flodin (1988), Matsumoto *et al.* (1992), Belicanta *et al.* (1994), Belicanta & Cintra (1998) entre outros.

2.3.1 História do SPT no Brasil

No Brasil, as sondagens de simples reconhecimento com amostragem a seco empregando o amostrador chamado por tipo IPT com dimensões de 46mm de diâmetro externo e 38,1mm de diâmetro interno começaram com a criação, em 1938, da Seção de Solos e Fundações do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). Tal fato ocorreu após a viagem de estudos do Eng. Odair Grillo à Harvard University.

Em 1939, já durante a II Grande Guerra Mundial, a disponibilidade de tubos no Brasil era só de tubos usados e, na ocasião, encontrou-se apenas tubos com as dimensões apresentadas acima, surgindo daí o amostrador do tipo IPT por uma contingência de mercado. Esse amostrador era cravado no terreno, num trecho de 30cm, com auxílio de um martelo de 70Kg em queda livre de 75cm, sendo o índice resultante chamado de “resistência à penetração”. Posteriormente passou-se a utilizar um peso de bater de 60Kg de massa.

Em fins de 1944, a Geotécnica S. A. empresa fundada por Odair Grillo, Otelo Machado e Raymundo Costa, segundo Teixeira (1974) foi a primeira empresa particular a executar sondagens introduzindo o amostrador de diâmetros externo e interno de 41,2mm e 25,4mm, respectivamente. A resistência à penetração era expressa pelo número de golpes de um peso de

65Kg, com altura de queda de 75cm, necessário à penetração no solo de 30cm do barrilete. Este amostrador, que também era usado nos Estados Unidos pela Raymond Concrete Pile Co. nas sondagens com tubo de revestimento de 2" de diâmetro, foi trazido inicialmente ao Brasil pelo Engenheiro H. A. Mohr para ser utilizado na investigação do subsolo de local onde seriam construídas instalações industriais de uma empresa norte-americana. Daí a origem de sua designação usual de amostrador Mohr-Geotécnica. A Geotécnica S. A. optou pelo uso deste amostrador por ser de paredes mais espessas (7,73mm contra 3,96mm) do que o amostrador até então usado pelo IPT e, portanto, por ser mais durável.

Foi a própria Geotécnica que em 1947, (Teixeira, 1974) começou a usar no Brasil o amostrador do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo e 35mm de diâmetro interno, utilizando a metodologia de ensaio até hoje conhecida, isto é, martelo de 65Kg, altura de queda de 75cm e hastes de 25mm de diâmetro (3,23Kg/m). Na Figura 2.4, ilustra-se o ensaio SPT executado na área de estudo. Do amostrador padrão bipartido (Figura 2.5) se coletam as amostras que receberão análises tátil-visual ou laboratoriais, que formarão os perfis descritivos de sondagem. Geralmente a análise tátil-visual é a mais corriqueiramente empregada, já as análises laboratoriais são executadas apenas em grandes obras ou em locais que necessitem de uma maior caracterização do material.



Figura 2.4 – Sondagem SPT executada na área de estudo pela empresa de sondagens e estaqueamentos – Multisolos (Passo Fundo/RS).

O índice de resistência à penetração N é igual ao número de golpes necessários à cravação do amostrador por mais 30cm após a cravação inicial de 15cm. Estes valores de N começaram a ser comparados e correlacionados com os índices de resistência à penetração resultantes do amostrador Mohr-Geotécnica resultando, pela simples transposição de valores, as correlações de N com as consistências das argilas e com a compactidade das areias (norma NBR7250/82).



Figura 2.5 – Amostrador padrão bipartido do ensaio SPT.

De acordo com Belicanta & Cintra (1998), na Tabela 2.1 são apresentadas as correlações típicas existentes desde a década de 60. Ainda, para efeito de comparação são colocadas as correlações para o N do amostrador tipo Raymond (Terzaghi & Peck, 1948) e válidas para os Estados Unidos naquela época.

Costa Nunes (1956) chama a atenção à falta de normalização no Brasil das sondagens a percussão. Teixeira (1977) relata que na década de 70 a sondagem era realizada de forma artesanal com usos de diversos procedimentos e equipamentos distintos. Gerger (1974) discute que para se interpretar os resultados de uma sondagem havia a necessidade de se conhecer a empresa executora.

Tabela 2.1 – Correlações entre a resistência à penetração e a compacidade ou a consistência, para amostradores existentes no Brasil até 1970 e para o Raymond americano [extraído de Belicanta & Cintra (1998)].

Solo	denominação	IPT $\phi_e = 46\text{mm}$ $\phi_i = 38\text{mm}$ (IPT/Brasil) Nápoles Neto (1961)	Mohr Geotécnica $\phi_e = 41\text{mm}$ $\phi_i = 25\text{mm}$ (Geot/Brasil) Machado & Magalhães (1955)	Raymond $\phi_e = 51\text{mm}$ $\phi_i = 35\text{mm}$ (Geot/Brasil) NBR7250 (1982)	Raymond $\phi_e = 51\text{mm}$ $\phi_i = 35\text{mm}$ (Terzaghi – Peck / USA) (1948)
Areia	Fofa	-	≤ 2	≤ 4	≤ 4
	pco. compacta	< 5	3 – 5	5 – 8	4 – 10
	med. compct.	5 – 10	6 – 11	9 – 18	10 – 30
Silte arenoso	compacta	10 – 25	12 – 24	19 – 40	30 – 50
	mta. compacta	> 25	> 24	> 40	> 50
Argila	mta. mole	-	< 1	≤ 2	< 2
	mole	< 4	1 – 3	3 – 5	2 – 4
	média	4 – 8	4 – 6	6 – 10	4 – 8
Silte argiloso	rija	8 – 15	7 – 11	11 – 19	8 – 15
	mta. rija	-	-	-	15 – 30
	dura	> 15	> 11	> 19	> 30

2.3.2 História da Padronização

A normalização e padronização da sondagem tiveram sua evolução histórica iniciada no IV Congresso Internacional da ISSMFE (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering), realizada em Londres em 1957. Neste evento, foi formado um subcomitê técnico com o objetivo de estudar os ensaios penetrométricos, estáticos e dinâmicos, com vistas à normalização. A primeira tentativa de norma foi norte-americana D1586-58T, em 1958 da American Society for Testing and Materials (ASTM), sendo sua publicação definitiva datada de 1967 com a numeração D1586-67.

O subcomitê criado no congresso de Londres foi dissolvido e decidindo-se pela criação de dois grupos de trabalhos, um americano e outro

européu. Apesar de avanços nos estudos não houve um consenso entre os grupos que também foram dissolvidos. Entretanto, mesmo com a dissolução, o grupo europeu continuou trabalhando e em 1977 apresentou normas regionais sobre o ensaio para o Comitê Executivo da ISSMFE, que foram aprovadas. Em 1982, foi criado um comitê internacional que apresentou, na primeira conferência ISOPT I, realizada em Orlando em 1988, as primeiras propostas de referência de ensaios. Em 1989, no Congresso Internacional do Rio de Janeiro, foi publicado em caráter oficial o “Reference Test Procedure”.

No Brasil (Teixeira, 1974) propõem a normalização do Método de Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos. Esta proposta de norma, após discutida em eventos técnicos e por vários usuários e pesquisadores foi enviado em 1977 à ABNT para discussão e aprovação, tornando-se oficialmente a primeira norma brasileira de sondagem SPT em 1979, denominada “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos” (MB 1211/79) com mudança posterior na numeração para NBR 6484/80.

Muitos países, tais como Venezuela, Itália, México, entre outros, adotam a norma dos Estados Unidos ASTM D1586-67 como padrão, já o Brasil, Austrália, Canadá, Japão, possuem norma própria. Entretanto, é consenso mundial a necessidade de seguir a referência internacional “Reference Test Procedure”.

Chama-se atenção que, apesar da Referência Internacional, alguns países, regiões e empresas não a adotam na sua íntegra, e cuidados são necessários quando da extrapolação de experiências. Por exemplo, no oeste do Paraná a sondagem é efetuada com a penetração contínua do amostrador (Belincata, 1998), no Uruguai não é usual a execução de sondagens do tipo SPT, na Argentina, além da adoção de norma americana, o padrão local é o uso do amostrador de “Moreto” (Moreto, 1963).

Em 1999, a Norma Brasileira NBR 6484 é revisada e publicada. Existem poucas modificações em relação da norma de 1980; entretanto, é clara no sentido de que empresas que possuem equipamentos fora das especificações da norma devem apresentar o valor médio da energia transferida à haste quando da aplicação do golpe do martelo. Esta

especificação mostra a importância da correção do valor do número de golpes do ensaio SPT.

Recentemente, houve mais um avanço no sentido de melhorar a qualidade do serviço de sondagem com o lançamento do Manual de Especificações da Associação Brasileira de Empresas de Fundação e Geotécnica (ABEF, 1999). Além da obediência à NBR 6484 de 1999, são especificados procedimentos quanto ao aspecto trabalhista, bem estar do funcionário, frequência e procedimentos a serem obedecidos na aferição dos equipamentos, padronização dos processos, especificação das características da equipe de sondagem e do supervisor. É fundamental, para boa prática da engenharia, no que se refere à execução de sondagem SPT, a adoção das recomendações da Norma Brasileira e da Referência Internacional.

2.4 Medida de Energia do Ensaio SPT

A história do ensaio SPT (*Standart Penetration Test*) tem sido relatada tanto na literatura internacional (Fletcher, 1965; Kovacs *et al.*, 1981; Broms e Flodin, 1988; entre outros) como nacional (Vargas, 1989; Teixeira, 1993 e Belincanta, 1994). A sondagem SPT, segundo os autores citados, data do início do século, passando por uma fase de grande desenvolvimento até o final da década de 50, quando houve a primeira tentativa de normalização. Na década de 60, verifica-se um período de descrédito do SPT, após a publicação do trabalho de Casagrande e Casagrande (1968).

Entretanto, na década de 70 inicia-se uma nova fase, na qual é reconhecida a importância da energia existente no martelo no instante do impacto, bem como sua transferência à haste e desta ao amostrador com os trabalhos de Kovacs (1977, 1979, 1981), Palacios (1977), Schertmann & Palacios (1979), Belincanta (1985). Estes trabalhos demonstraram que o valor de N_{spt} está diretamente associado às características do equipamento utilizado. Principalmente no que diz respeito à forma de liberação do martelo, levaram Seed *et al.* (1985) e Skempton (1986) a propor um fator de correção no valor do N_{spt} que leva em consideração a energia efetivamente transferida

à haste. A importância desta correção é hoje reconhecida e tem sido gradativamente incorporada à prática de engenharia (e.g. Clayton, 1993).

Para permitir a obtenção das curvas de força ao longo do tempo, nas extremidades superior e inferior da haste, foi utilizada uma instrumentação adicional de duas células de carga confeccionadas pelo IPT, dispostas uma em cada extremidade da haste, conforme Figura 2.6. Nestes ensaios não houve uma preocupação com a determinação do número de golpes do SPT, mas sim, na determinação da energia transferida para as hastes.

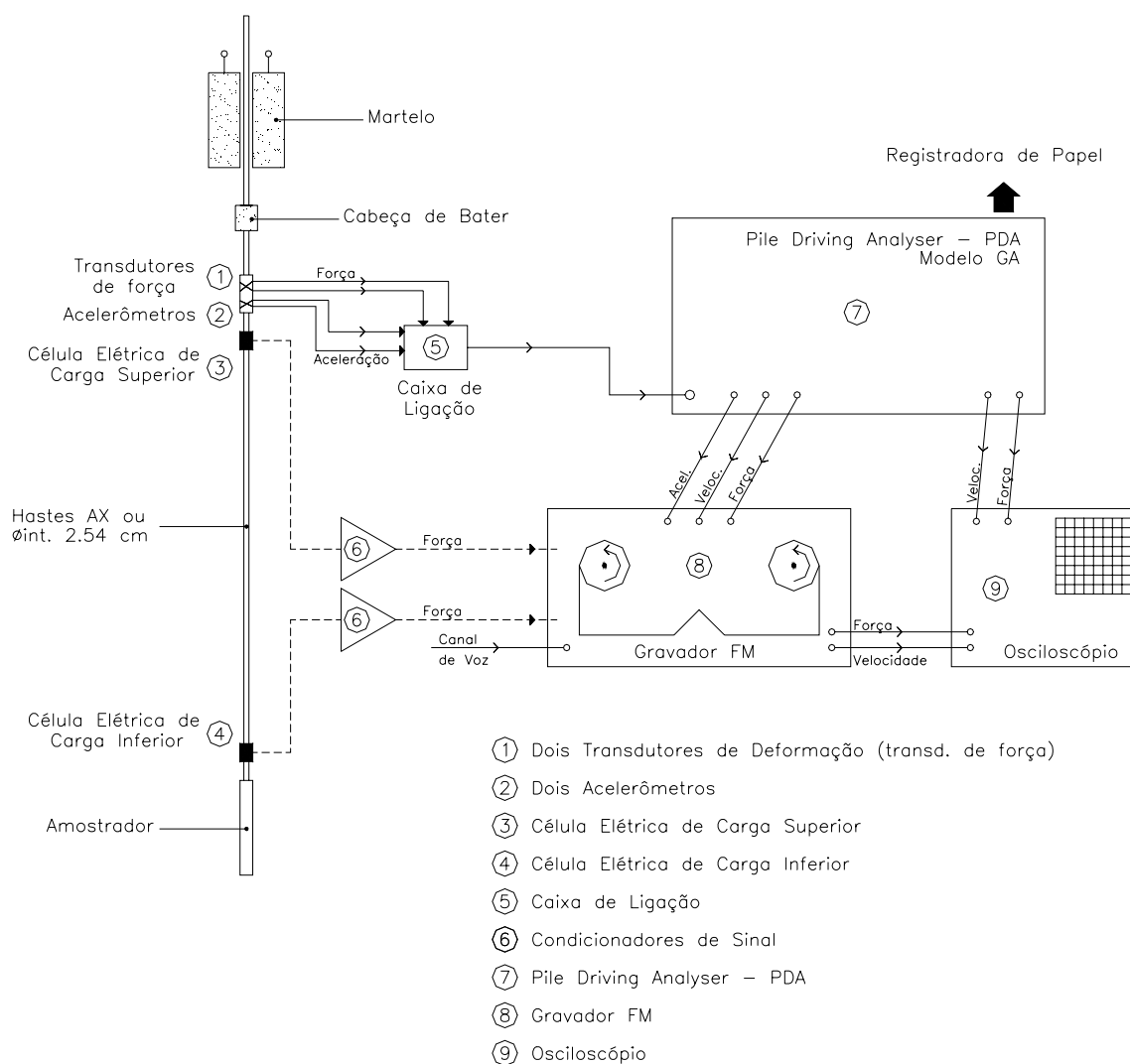


Figura 2.6 – Esquema de instrumentação utilizada em trabalhos no IPT, quando do uso de instrumentação importada e células de carga IPT [Odebrecht *et al.*, (2000) *apud* Belincanta (1985)].

As informações de SPT que serão aplicadas neste estudo de caso, não apresentam correções a respeito da energia transferida às hastes no

ensaio. Portanto, esses valores originais estarão de certa forma superestimados, de acordo com o contexto apresentado acima. O capítulo que segue apresenta a estatística básica dos números de golpes SPT assim como a análise de sua variabilidade, gerando a partir disso mapas de estimativas em locais não amostrados.

Capítulo 3

Definição dos domínios geoestatísticos e a krigagem

Neste capítulo aborda-se aspectos teóricos ligados a geoestatística. Em seguida, são apresentadas partes fundamentais do tratamento do banco de dados, onde será vista a metodologia empregada para subdivisão do banco de dados em camadas relacionadas com a profundidade e como são aplicadas as práticas geoestatísticas para estas informações.

3.1 Considerações Preliminares

Como um todo, a geoestatística trata as variáveis como regionalizadas, dando ênfase às relações espaciais existentes entre as amostras a partir das quais se realizam as avaliações, adicionalmente se quantificam os erros cometidos nessas avaliações. Segundo Matheron (1963) a geoestatística compreende a aplicação do formalismo das Funções Aleatórias ao reconhecimento e à estimativa dos fenômenos naturais.

Matheron (1963) explica claramente o termo Variável Regionalizada, enfatizando dois aspectos, o aleatório e o estruturado. Aleatório no sentido de que os valores das medições feitas podem variar entre si, e sua característica regionalizada, estruturada segundo uma certa lei no espaço, é evidente se,

os valores das amostras não forem considerados completamente independentes de sua localização geográfica. Assim, próximo a um valor elevado é maior a probabilidade de se encontrar outro valor elevado, diz-se que os valores dessas duas amostras próximas estão correlacionados. Assim sendo, é através das Funções Aleatórias que se estudam as Variáveis Regionalizadas. Informações complementares a respeito da teoria das variáveis regionalizadas, que é a base da geoestatística, é amplamente discutida em Matheron (1963) e Journel & Huijbregts (1978, cap. 1).

Em locais não amostrados, os valores desconhecidos podem ser estimados se forem considerados como realizações de sua variável aleatória correspondente. Armstrong (1998, p.16-17) aponta que a família dessas variáveis aleatórias é definida como função aleatória, ou processo estocástico ou mesmo campo aleatório.

Alguns métodos geoestatísticos consagrados, serão aplicados ao longo dessa dissertação, como a krigagem ordinária para estimativas do índice de resistência do solo N_{spt} (presente capítulo), e as simulações seqüenciais Gaussianas para o estudo da variabilidade das estimativas (capítulo 4). Esses métodos foram fundamentados na geoestatística estacionária (estacionariedade), onde se define como estacionária a função aleatória (FA) cuja lei de distribuição de probabilidades é invariante por translação. Assim, uma FA é estacionária se para qualquer incremento de distância h (vetor) a distribuição de $Z(x_1)$, $Z(x_2)$, ..., $Z(x_n)$ é a mesma que $Z(x_1+h)$, $Z(x_2+h)$, ..., $Z(x_n+h)$.

Essa igualdade $[Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)] = [Z(x_1+h), Z(x_2+h), \dots, Z(x_n+h)]$ é conhecida por Estacionariedade Estrita. Não tendo todos os momentos invariantes por translação, se requer a invariabilidade apenas dos dois primeiros momentos (média e covariância) para que seja assumida a estacionariedade de 2ª ordem. Em termos matemáticos a estacionariedade de 2ª ordem pode ser expressa por:

$$E \{Z(x)\} = m, \forall x \quad (3.1)$$

$$C(h) = E \{Z(x+h) Z(x)\} - m^2, \forall x \quad (3.2)$$

$$\text{Var} \{Z(x)\} = E \{[Z(x) - m]^2\} = C(0), \forall x \quad (3.3)$$

Neste caso, o valor esperado (média) da variável aleatória $Z(x)$ precisa ser constante para todos os pontos x (Eq. 3.1), e a função covariância entre dois pontos x e $x+h$ depende do vetor h (magnitude e direção definidas) mas não do valor no ponto x propriamente dito (Eq. 3.2). Assim sendo, a variância dos dados é igual ao valor esperado da covariância numa distância 0 [$C(0)$].

Objetivando-se obedecer a essas observações quanto a estacionariedade de 2ª ordem e buscando-se trabalhar com domínios geoestatisticamente homogêneos, o item 3.2 apresenta a subdivisão feita no banco de dados a fim de atender essa premissa.

Para o modelamento espacial de cada camada do banco de dados em questão, será utilizado o variograma. O variograma reflete a estrutura do fenômeno em estudo, quantificando as correlações espaciais que existem entre as amostras espaçadas de sucessivos valores de h . Essa função cresce até que atinja um máximo também conhecido por sill. A função variograma não depende dos pontos de apoio, mas do espaçamento entre esses pontos. Em termos matemáticos, o variograma é a esperança matemática do quadrado dos acréscimos da variável regionalizada em estudo em uma determinada direção definida pelo vetor h , ou seja, o valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos presentes na área de estudo, considerando uma distância h uns dos outros. Essa função pode ser calculada com:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3.4)$$

sendo, N_h o número de pares de valores separados entre si por uma magnitude $|h|$ na direção deste valor.

Isaaks & Srivastava (1989, cap. 4 e 7), apontam aspectos relevantes quanto a descrição espacial e a continuidade espacial de um banco de dados. O modelamento da continuidade espacial dos valores de N_{spt} será apresentado no item 3.3.

Comumente, se utiliza para o estudo da variabilidade de uma variável regionalizada as simulações estocásticas. São geradas várias

realizações para cada ponto simulado, que dão origem a possíveis cenários. Esses fornecem uma idéia local ou global a respeito da variabilidade ou incerteza que se tem a respeito do atributo em estudo, neste caso o N_{spt} . Dentre os tipos de simulações estocásticas existentes, será utilizada nessa dissertação a simulação seqüencial Gaussiana, que será melhor abordada no capítulo 4. Para fim de complementação, todo embasamento teórico a respeito da geoestatística, está apresentado na literatura básica pelos seguintes autores: David (1977), Journel & Huijbregts (1978), Clark (1979), Isaaks & Srivastava (1989), Goovaerts (1997) e Armstrong (1998).

3.2 Subdivisão do Banco de Dados

Depois de gerado o histograma de todos os valores de N_{spt} para uma análise preliminar dos dados, sobre como se comportava sua média, quais eram os valores mínimos e máximos do banco de dados, bem como seu desvio padrão e coeficiente de variação, se observou que este histograma é bimodal (Figura 3.1). Com isso, decidiu-se subdividi-lo em domínios geoestatísticos semelhantes.

Analisando os perfis de sondagens que compõem o banco de dados, observou-se que quase a totalidade deles apresentavam continuidade dos valores de SPT com o ganho de profundidade, ou seja, o número de golpes N_{spt} crescia de forma aparentemente crescente com a profundidade.

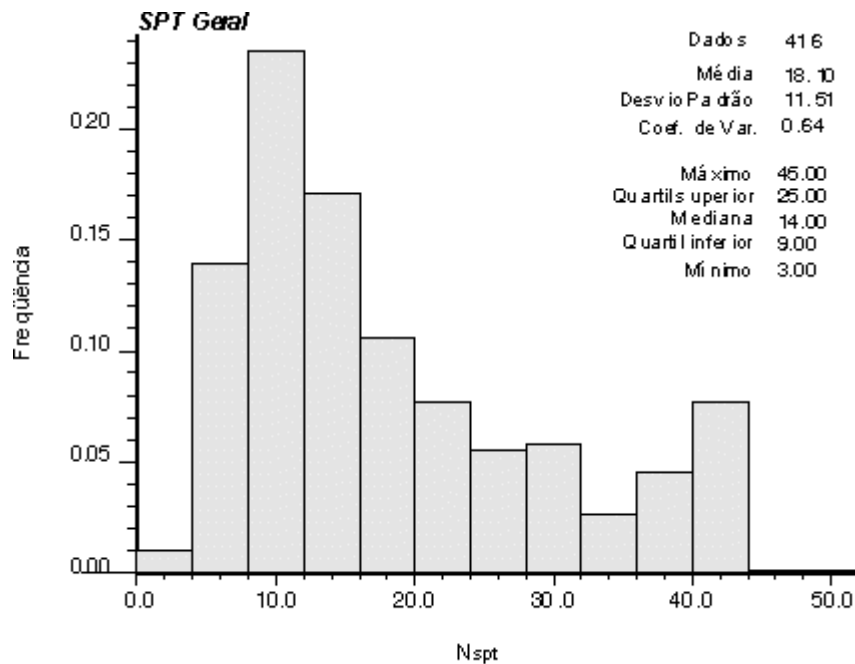


Figura 3.1 – Histograma geral de todos os dados de SPT.

Baseado neste fato, e contando com trabalhos publicados neste sentido, como Xavier & Romanel (2000), Xavier (1999) e Sturaro & Landim (1996), construiu-se um gráfico de correlação apresentado na Figura 3.2, onde no eixo x são plotados valores de profundidades (em metros) e no eixo y a média dos valores N_{spt} para cada metro, levando-se em conta as 141 amostras que compõem o banco de dados. Sobre estes pontos, projetou-se uma curva polinomial correspondente ao ajuste de correlação dos dados, onde se observou a alta correlação entre os parâmetros N_{spt} e profundidade, com um coeficiente de correlação positivo no valor de 0,97.

Com a finalidade de subdividir o banco de dados em camadas ou níveis que apresentassem características similares, levou-se em conta as inflexões apresentadas pela curva de ajuste e sobre esses pontos marcou-se as divisões de camadas, afim de que não se misturassem valores geoestatisticamente diferentes.

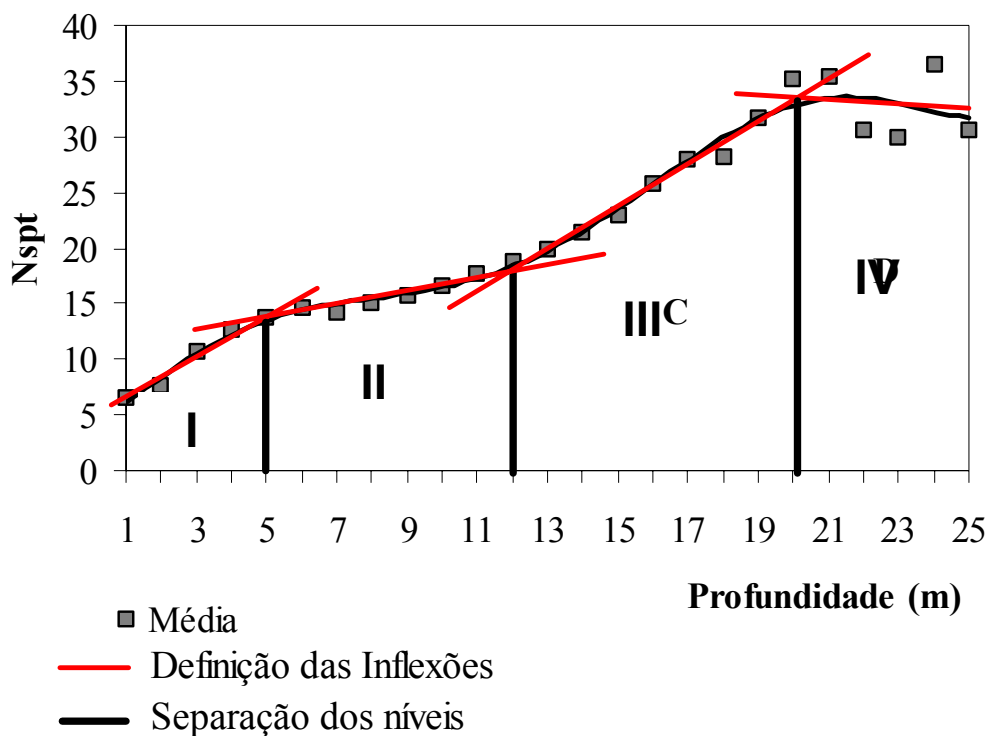


Figura 3.2 – Correlação entre SPT x profundidade e segmentação dos níveis de estudo em domínios geoestatísticos.

Após esta análise, gerou-se os histogramas correspondentes a cada camada, denominadas de **I** (0 a 4,99m), **II** (5 a 11,99), **III** (12 a 19,99) e **IV** (20 a 25,99). Partindo desta subdivisão, todos os procedimentos que seguem serão feitos bi-dimensionalmente correspondentes às médias dos valores de N_{spt} para cada camada. Para efeito de visualização do banco de dados, encontra-se em anexo (Apêndice A) os mapas de localização das amostras para cada uma das camadas em estudo.

Seguem para análise os histogramas de cada camada, sendo as Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 correspondentes a camada **I**, **II**, **III** e **IV** respectivamente. Os histogramas das camadas **I** e **II** apresentam uma assimetria positiva, com uma média 9,43 e 16,60 respectivamente. A camada **III** apresenta um histograma com assimetria não bem definida, pois existem vários valores baixos e altos onde a média e a mediana praticamente se equivalem, 24,91 e 24,00 respectivamente. Já a camada **IV** apresenta uma assimetria negativa, em direção aos valores extremos mais baixos, e apresenta uma média de 38,25, demonstrando que neste nível se atinge o

limite entre o solo e a camada impenetrável. Não desconsiderando, que muitas sondagens tiveram seu fim antes desta profundidade, devido a variabilidade da superfície do impenetrável.

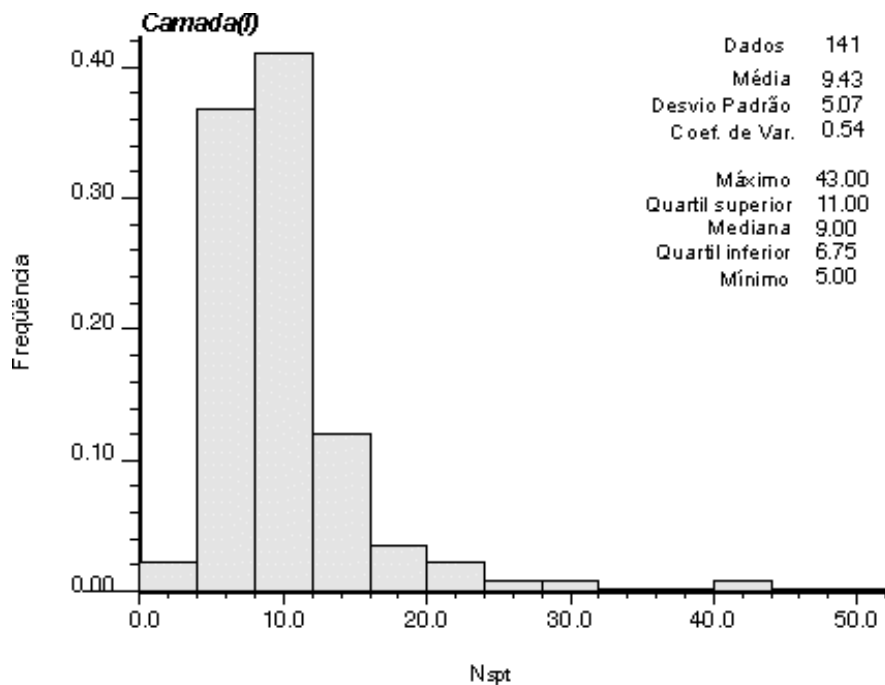


Figura 3.3 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada I.

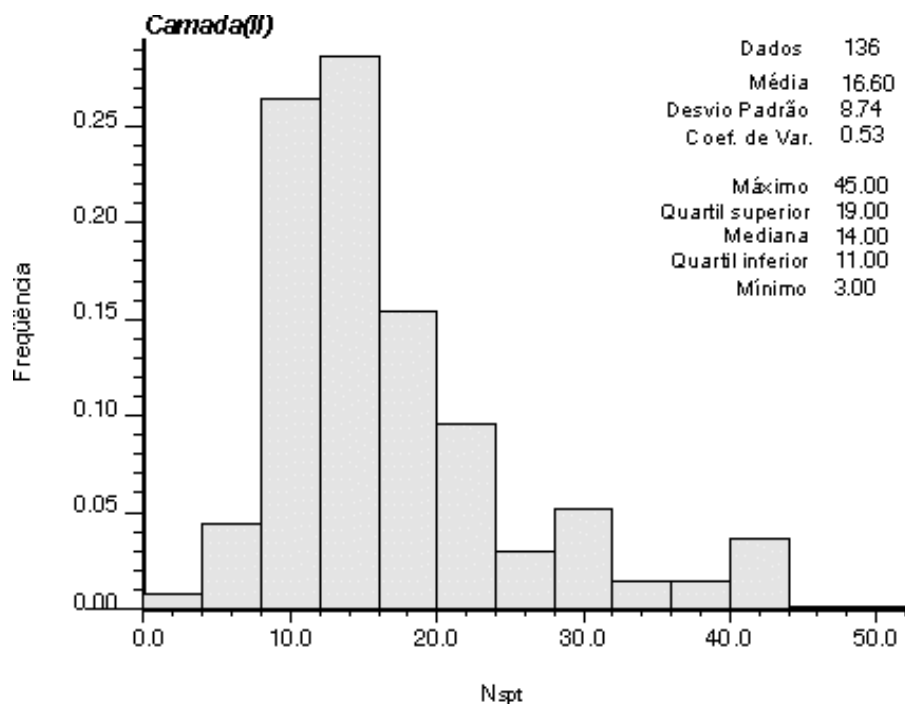


Figura 3.4 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada II.

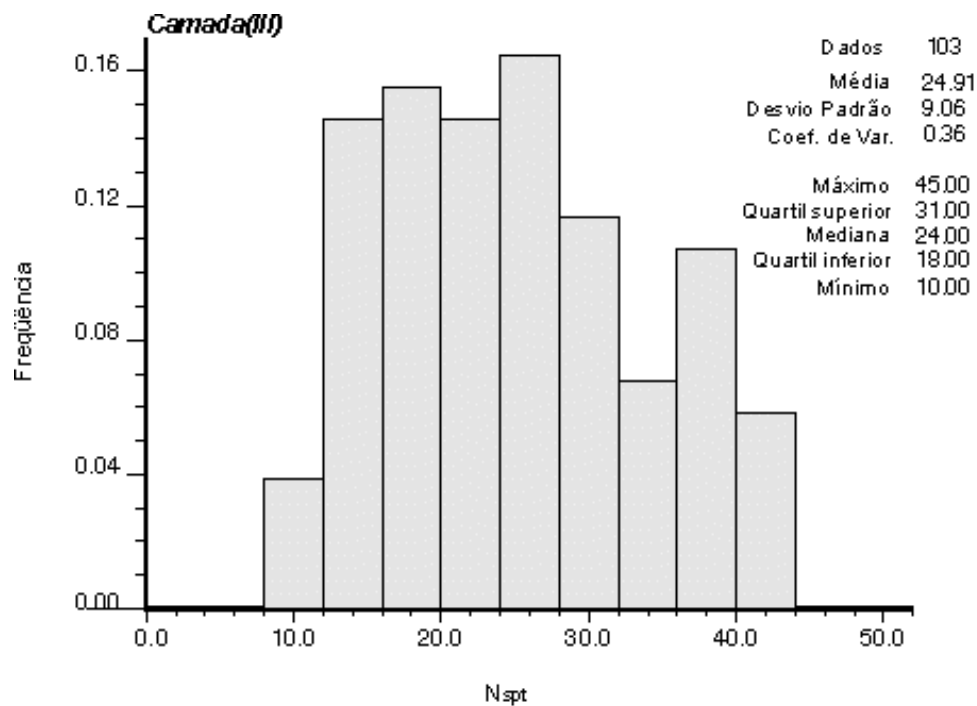


Figura 3.5 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada III.

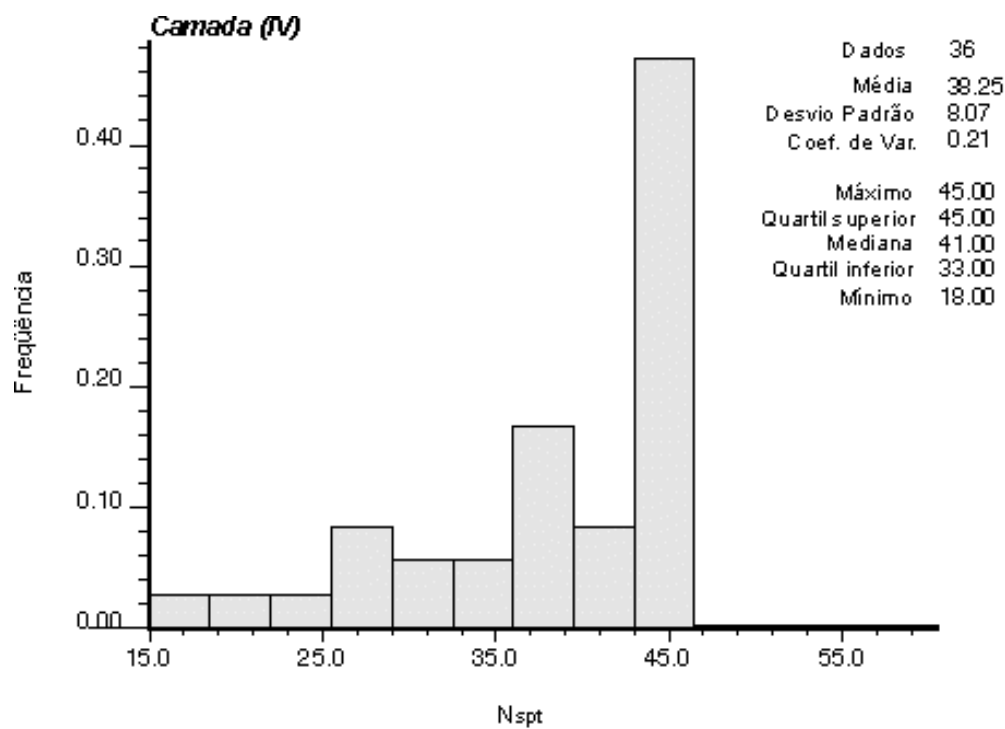


Figura 3.6 – Histograma das médias dos valores N_{spt} correspondentes à camada IV.

3.3 Modelamento da Continuidade Espacial

Uma das principais características das variáveis regionalizadas é a sua continuidade espacial, cuja avaliação está fundamentada nos princípios da regressão linear que, na estatística, investiga a dependência entre variáveis de um fenômeno. Em geoestatística, procura-se avaliar a dependência da variável com ela própria, avaliada em diferentes posições separadas por um vetor \vec{h} . Esta continuidade espacial pode ser descrita pela variação dos coeficientes de correlação (função de correlação ou correlograma), das variâncias (função covariância) ou do semivariograma, ou simplesmente variograma.

Deste ponto em diante, será brevemente abordada a questão matemática que envolve o modelamento da continuidade espacial e posteriormente (item 3.4) a krigagem. Sabendo que existe uma importante diferença entre os parâmetros de um modelo conceitual e as estatísticas que podem ser calculadas partindo de valores experimentais, utilizou-se a notação com símbolo \sim (til) para referenciar parâmetros do modelo. Valores estimados também serão distinguidos pelo símbolo $\hat{}$ (acento circunflexo).

A função covariância, pode ser calculada com:

$$\tilde{C}_v(h) = \text{Cov}\{V(x), V(x+h)\} \quad (3.5)$$

$$\tilde{C}_v(h) = E\{V(x) \cdot V(x+h)\} - E\{V(x)\} \cdot E\{V(x+h)\} \quad (3.6)$$

onde o valor esperado da variável aleatória $E\{V(x)\}$ denota sua média \tilde{m} . Para funções aleatórias estacionárias, $E\{V(x)\} = E\{V(x+h)\}$, resultando:

$$\tilde{C}_v(h) = E\{V(x) \cdot V(x+h)\} - E\{V(x)\}^2 \quad (3.7)$$

Já a função correlação ou correlograma $[\tilde{\rho}_v(h)]$, pode ser expresso por:

$$\tilde{\rho}_v(h) = \frac{\text{Cov}\{V(x), V(x+h)\}}{\sqrt{\text{Var}\{V(x)\} \cdot \text{Var}\{V(x+h)\}}} \quad (3.8)$$

como a covariância entre variáveis na mesma posição é a variância da função aleatória,

$$\tilde{C}_v(0) = \text{Cov}\{V(x), V(x)\} = \text{Var}\{V(x)\} \quad (3.9)$$

$$\tilde{C}_v(0) = E\{V^2(x)\} - E\{V(x)\}^2 \quad (3.10)$$

assim,

$$\tilde{\rho}_v(h) = \frac{\tilde{C}_v(h)}{\tilde{C}_v(0)} \quad (3.11)$$

observando que: $\tilde{\rho}_v(0) = 1$.

O variograma, é definido basicamente como a metade do quadrado das diferenças esperadas entre variáveis aleatórias separadas por h:

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \frac{1}{2} E\{[V(x) - V(x+h)]^2\} \quad (3.12)$$

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \frac{1}{2} E\{V^2(x)\} - E\{V(x).V(x+h)\} + \frac{1}{2} E\{V^2(x+h)\} \quad (3.13)$$

Para funções aleatórias estacionárias $E\{V^2(x)\} = E\{V^2(x+h)\}$, pode-se reescrever a expressão 3.13 como:

$$\tilde{\gamma}_v(h) = E\{V^2(x)\} - E\{V(x).V(x+h)\} \quad (3.14)$$

adicionando e subtraindo $E\{V(x)\}^2$ ao segundo termo da equação acima:

$$\tilde{\gamma}_v(h) = E\{V^2(x)\} - E\{V(x)\}^2 - [E\{V(x).V(x+h)\} - E\{V(x)\}^2] \quad (3.15)$$

com auxílio das equações 3.7 e 3.10 resulta em:

$$\tilde{\gamma}_v(h) = \tilde{C}_v(0) - \tilde{C}_v(h) \quad (3.16)$$

sendo $\tilde{\gamma}_v(0) = 0$.

As funções covariância, correlograma e variograma fornecem informações similares a respeito da continuidade espacial (Figura 3.7). O correlograma inicia com valor 1, tendendo a zero com o incremento de h, enquanto que a função covariância decresce de forma similar a partir do valor inicial $\tilde{C}(0) = \sigma^2$. Já o variograma, inicia em 0 aumentando até o valor máximo $\tilde{\gamma}^2(\infty) = \sigma^2$. Normalmente os variogramas são construídos ao longo das direções em que a variável apresenta maior e menor continuidade espacial. Tais procedimentos serão descritos mais detalhadamente a seguir.

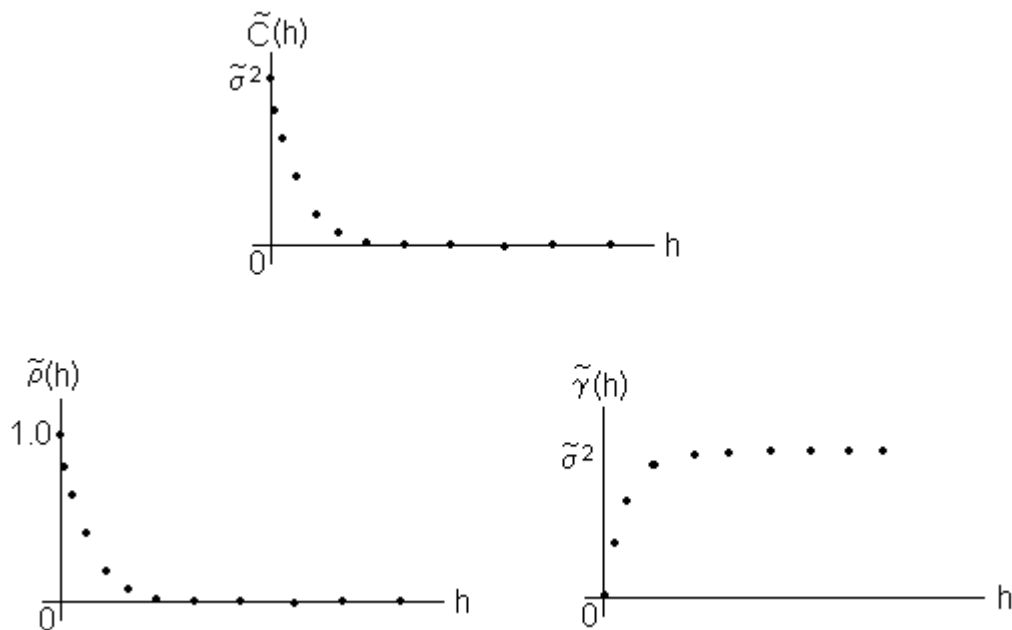


Figura 3.7 – Comportamento das medidas de correlação $\tilde{C}(h)$, $\tilde{\rho}(h)$, $\tilde{\gamma}(h)$, de uma variável aleatória $V(x)$.

O caso em estudo mostra um banco de dados que será tratado de forma bidimensional, onde as amostras são distribuídas em um grid irregular. David (1977, p.118-119) mostra um exemplo do efeito suavizador no ajuste variográfico à medida que se incrementam os valores de h (distância entre amostras). Isso mostra a importância da escolha do valor de h , a fim de que não haja uma distorção no valor do alcance do variograma após o seu ajuste. Neste caso, sobre o banco de dados foram criados vários grids com o objetivo de se definir qual a distância h entre as amostras que predominava, testando-se vários valores, sendo adotado um h igual a 140 metros.

A variografia geralmente é realizada, mapeando-se várias direções diferentes, com ângulo de tolerância e valor de tolerância do parâmetro h definidos, com o objetivo de se definir a direção de maior e menor continuidade do fenômeno em estudo. Dá-se preferência por iniciar esta análise com o ajuste variográfico onidirecional, cuja tolerância direcional é grande o suficiente para tornar desprezível a direção de um vetor de separação (h_{ij}). Todas as direções possíveis são combinadas em um único variograma, onde somente a magnitude de h_{ij} é importante. Pode-se

considerar este variograma como sendo uma forma de apresentar uma média dos variogramas direcionais (Isaaks & Srivastava, 1989 p.143-144).

O cálculo do variograma onidirecional não implica em crer que a continuidade espacial seja a mesma em todas as direções. Ele serve, simplesmente como um ponto de partida para definição de alguns parâmetros requeridos para o cálculo do variograma direcional. Pode-se a partir deste variograma definir o melhor tipo de função de ajuste para os demais modelos, pois neste caso (onidirecional) são obtidos um maior número de pares de amostras comparados a um variograma direcional.

Para este estudo de caso, gerou-se os variogramas onidirecionais para cada camada, assim como os direcionais variando de 0° até 180°, com um incremento de 22,5°. Baseado nos resultados obtidos nos modelos variográficos de cada camada, observa-se uma anisotropia geométrica para um modelo de ajuste esférico, onde se têm dois variogramas, um para cada direção, o de maior e menor continuidade, resultando num mesmo patamar (sill), mesmo efeito pepita (nugget effect) e alcances (range) na proporção de h. Esse modelo de ajuste esférico é expresso pela seguinte formulação (David, 1977):

$$\gamma_1(h) = C_0 + C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \left(\frac{h^3}{2a^3} \right) \right] \quad (3.17)$$

$$\gamma_2(h) = C_0 + C \left[\left(\frac{3kh}{2a} \right) - \left(\frac{k^3 h^3}{2a^3} \right) \right] \quad (3.18)$$

sendo:

C_0 = efeito pepita (nugget effect);

C= patamar (sill);

a= alcance (range);

h= espaçamento entre amostras (lag);

k= número de vezes que h é incrementado (n° lag).

Depois de realizada a varredura em diversas direções, observou-se que a direção de maior continuidade é a de 90° (N90°E) e a de menor continuidade a 0° (N0°). É relevante saber que a orientação é feita no sentido horário tendo como referência o norte. As tabelas com todos os valores

obtidos dos ajustes variográficos para todas as direções avaliadas, bem como a respectiva equação de ajuste, encontra-se no apêndice B.

Para todas as camadas, observa-se que os valores de alcance para as direções de interesse giram em torno de 850m na direção de 90° e 490m na direção 0°, isso pode ser visto nas Figuras 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11, respectivamente camadas **I**, **II**, **III** e **IV**. Todos os parâmetros obtidos desta análise exploratória dos dados são fundamentais para o procedimento seguinte, que neste caso será a aplicação da krigagem ordinária objetivando a estimativa de valores de N_{spt} em locais não sondados.

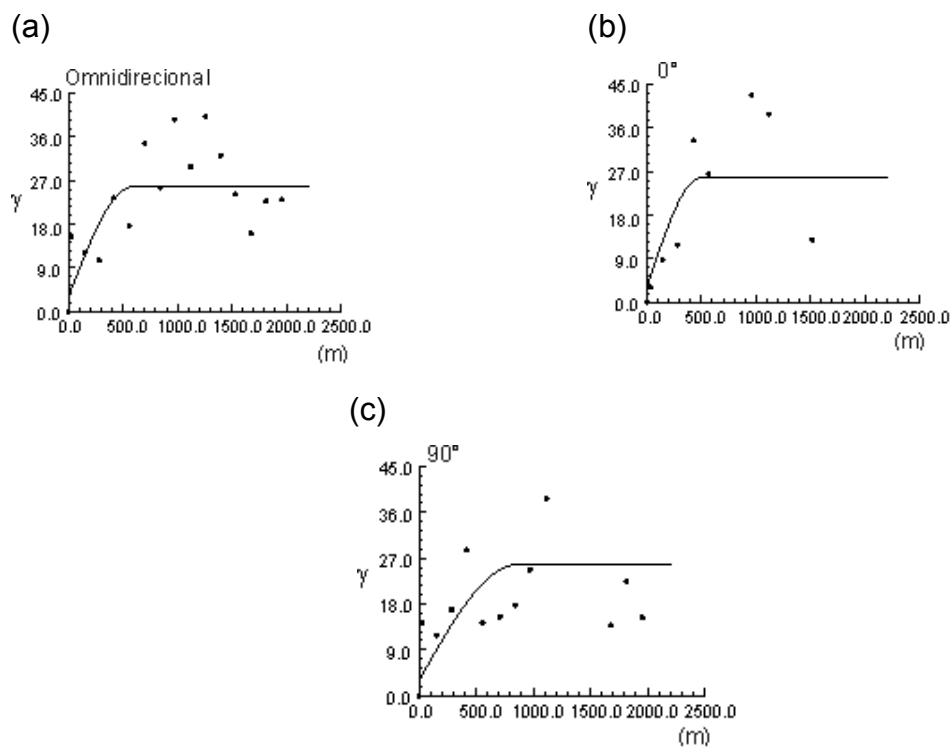


Figura 3.8 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90°, correspondentes à camada I.

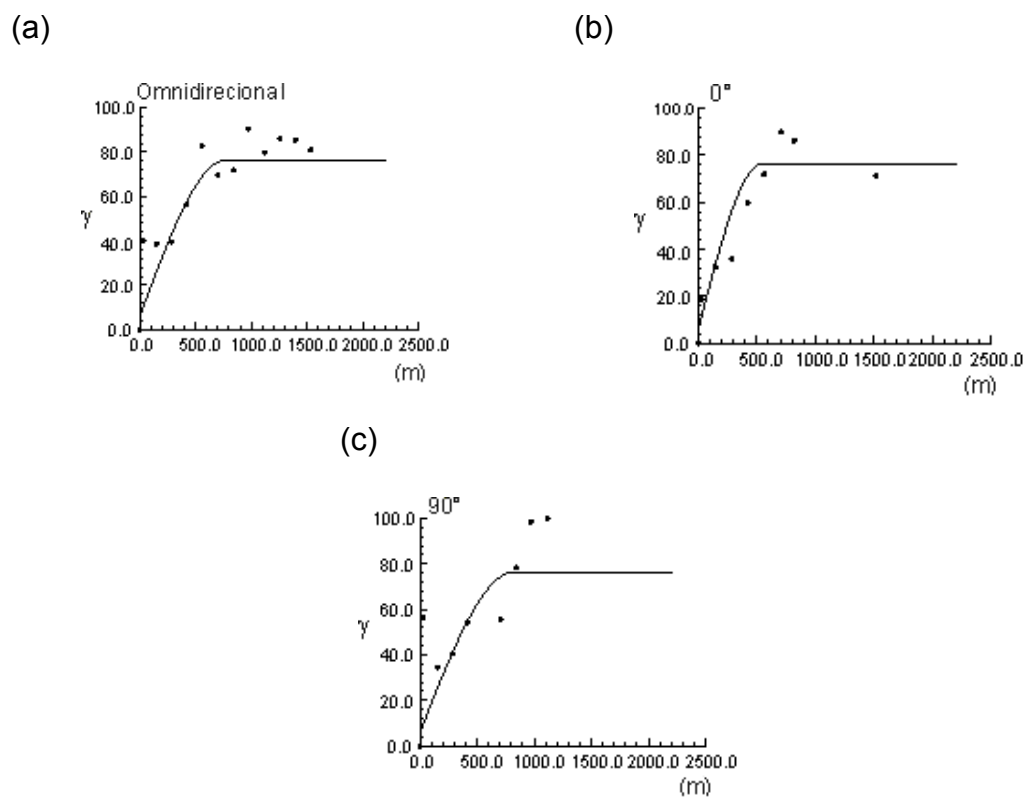


Figura 3.9 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90°, correspondentes à camada II.

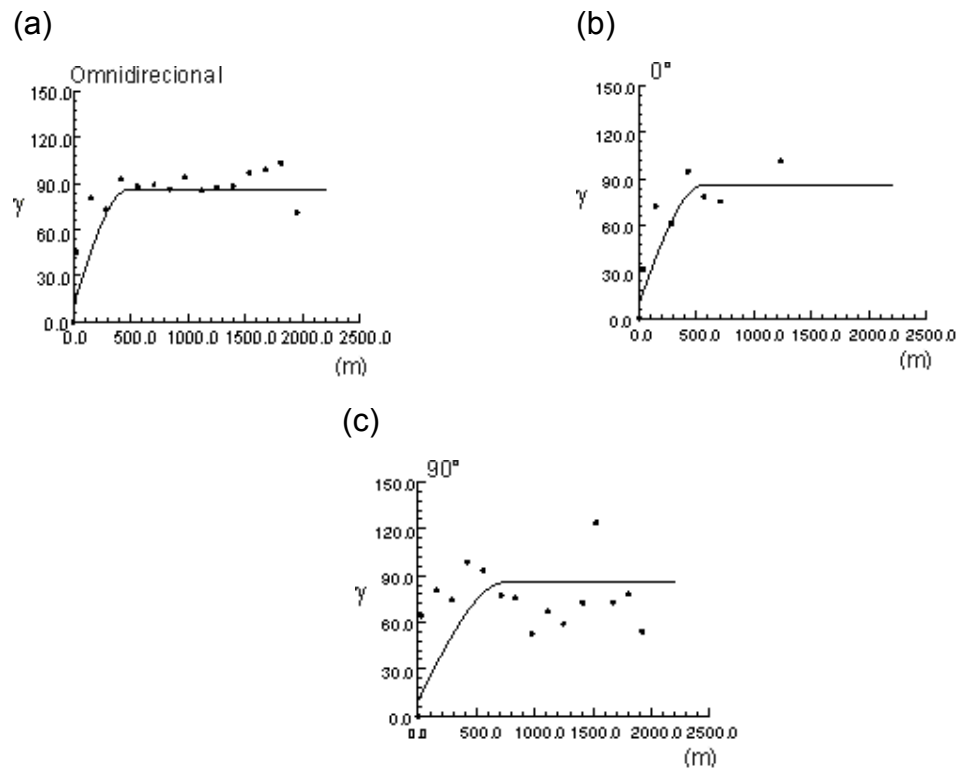


Figura 3.10 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90°, correspondentes à camada III.

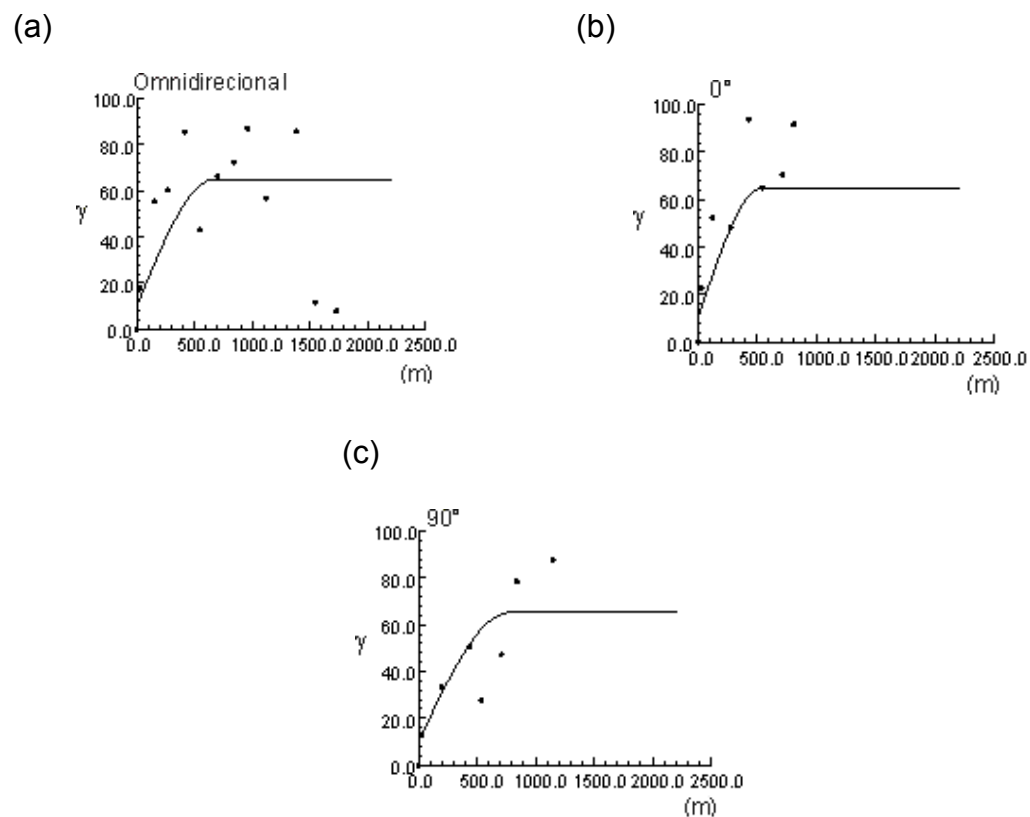


Figura 3.11 – Variograma dos valores de N_{spt} , sendo (a) omnidirecional, (b) direção 0° e (c) direção 90°, correspondentes à camada IV.

3.4 Krigagem Ordinária

A designação krigagem ordinária, segundo Olea (1991, p.41) surgiu por meio de Matheron na década de 60 em homenagem a Daniel Krige pelos estudos desenvolvidos nas minas de ouro da África do Sul na década de 50.

O método de krigagem ordinária (KO) é parte fundamental da geoestatística linear, sendo um método que fornece valores estimados não tendenciosos pontuais ou médias de blocos, partindo de um modelo ajustado de covariância/variograma e de uma variável em seu domínio geoestatístico. A KO define uma média das amostras ponderadas com mínima variância de erro, ou seja, mínima variância de estimativa. Esta será analisada graficamente no item 3.5 através das figuras representativas da variância da estimativa de cada uma das camadas em estudo.

Em aplicações geotécnicas que se tem conhecimento, a krigagem ordinária é o método mais popular. Nesse estudo de caso, a krigagem ordinária, assim como as simulações condicionais (capítulo 4), serão tratadas no suporte de blocos, mais amplamente abordado no item 3.4.1.

Dentro do aspecto de estimativas de valores em locais não amostrados, pode-se apontar vários métodos clássicos, como citados no capítulo 1 (método dos polígonos, das curvas de isovalores, da triangulação entre outros) e os geoestatísticos, como a krigagem ordinária. A grande maioria desses métodos envolve combinações lineares da forma:

$$\hat{v} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i \quad (3.19)$$

onde v_1, v_2, \dots, v_n representam os n valores amostrados e w_i um fator de ponderação associado a cada valor v_i . Os métodos se diferenciam basicamente no processo de escolha de w_i para $i=1, \dots, n$.

No caso de métodos estatísticos baseados em funções aleatórias estacionárias, os valores $V(x_i)$ são considerados realizações de variáveis aleatórias, com distribuição de probabilidade conjunta dependendo apenas da distância entre as amostras e não de suas localizações x_i .

Logo, a estimativa $\hat{V}(x_0)$, combinação linear de $V(x_i)$ para $i=1, 2, \dots, n$ pode também ser considerada aleatória:

$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i) \quad (3.20)$$

o erro das estimativas pode ser expresso como,

$$R(x_0) = \hat{V}(x_0) - V(x_0) \quad (3.21)$$

onde $V(x_0)$ representa a modelagem aleatória do valor verdadeiro em x_0 .

O valor esperado do erro em qualquer posição é freqüentemente referido como viés (“bias”), podendo ser definido como:

$$E\{R(x_0)\} = E\{\hat{V}(x_0)\} - E\{V(x_0)\} \quad (3.22)$$

$$E\{R(x_0)\} = E\left\{\sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i)\right\} - E\{V(x_0)\} \quad (3.23)$$

$$E\{R(x_0)\} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot E\{V(x_i)\} - E\{V(x_0)\} \quad (3.24)$$

para a função aleatória estacionária,

$$E\{V(x_i)\} = E\{V(x_0)\} = E\{V\} \quad (3.25)$$

então,

$$E\{R(x_0)\} = E\{V\} \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) \quad (3.26)$$

gerando assim a condição para que o método de estimativa não apresente viés:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3.27)$$

Resumidamente, a krigagem ordinária é também conhecida por “The Best Linear Unbiased Estimator” (B.L.U.E.). É Linear porque suas estimativas são feitas por combinações lineares, Unbiased (sem viés) porque a média do erro esperado no modelo é nulo, e Best porque seu objetivo é minimizar a variância destes erros. O erro de estimativa foi anteriormente apresentado na equação 3.21, e sua variância pode então ser definida como:

$$\text{Var}\{R(x_0)\} = \text{Var}\{\hat{V}(x_0) - V(x_0)\} \quad (3.28)$$

$$\text{Var}\{R(x_0)\} = \text{Cov}\{\hat{V}(x_0), \hat{V}(x_0)\} - 2\text{Cov}\{\hat{V}(x_0), V(x_0)\} + \text{Cov}\{V(x_0), V(x_0)\} \quad (3.29)$$

realizando-se algumas substituições nos termos a direita da equação 3.29, esta equação pode ser reescrita como:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i \cdot w_j \cdot \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot \tilde{C}_{i0} \quad (3.30)$$

onde tais parâmetros são a seguir definidos.

A minimização da função a n variáveis produz então um sistema de n equações a n incógnitas (fatores de ponderação w_1, \dots, w_n) que, em princípio, poderia ser resolvido por um método da álgebra linear para solução de um sistema de equações lineares. Como existe a condição de restrição que garante a solução não apresentar viés ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$), ao sistema deve ser

adicionado o multiplicador de Lagrange, resultando:

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i \cdot w_j \cdot \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot \tilde{C}_{i0} - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n w_i = 1 \right) \quad (3.31)$$

O multiplicador de Lagrange μ introduz uma nova incógnita no problema, agora expresso sem restrição já que a condição de não viés é automaticamente satisfeita pela equação 3.31.

A minimização desta equação, é obtida com:

$$\frac{\partial \tilde{\sigma}_R^2}{\partial w_i} = 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (3.32a)$$

$$\frac{\partial \tilde{\sigma}_R^2}{\partial \mu} = 0$$

e resulta em um sistema de $(n+1)$ equações que pode ser expresso sob forma matricial da seguinte maneira:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \Lambda & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ M & O & M & M \\ \tilde{C}_{n1} & \Lambda & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \Lambda & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{(n+1) \times (n+1)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} w_1 \\ M \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix}}_{(n+1) \times 1} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{C}_{10} \\ M \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}}_{(n+1) \times 1} \quad (3.33)$$

a matriz \mathbf{C} é composta pelos valores de covariância \tilde{C}_{ij} entre as variáveis randômicas V_i e V_j da locação amostral. O vetor \mathbf{D} consiste dos valores de

covariância \tilde{C}_{i_0} entre as variáveis randômicas V_i da locação amostral e a variável randômica V_0 na locação onde se deseja estimar. O vetor \mathbf{w} consiste nos pesos de krigagem w_1, \dots, w_n e μ o parâmetro Lagrange.

A matriz (3.32) possibilita que as incógnitas w_1, \dots, w_n sejam obtidas através do método de eliminação de Gauss, por exemplo. O valor da variância do erro minimizada pode enfim ser calculada como:

$$\sigma_R^2 = \sigma^2 - \{\mathbf{W}\}^T \cdot \{\mathbf{D}\} \quad (3.34)$$

Vários trabalhos como: David (1997, caps.9 e 10), Journel & Huijbregts (1978, cap.V), Clark (1979, cap.5), Isaaks & Srivastava (1989, cap.12), Goovaerts (1997, cap.5), Deutsch & Journel (1998, cap.IV), Olea (1999, caps.2 e 4) entre outros, apresentam maiores detalhes sobre a teoria da krigagem.

3.4.1 Krigagem Ordinária em Blocos

Isaaks & Srivastava (1989, p.323) explicam claramente, que a krigagem em blocos discretiza a área local (bloco) em vários pontos e então faz-se a média das estimativas dos pontos tomados simultaneamente para fornecer a média deste determinado bloco. A krigagem em blocos compreende uma estimativa de krigagem de valores médios considerados num suporte maior que o suporte amostral, os quais no caso de furos de sondagem SPT podem ser considerados como pontos, dado o pequeno volume da amostra em relação à área a ser estimada.

O sistema de krigagem em blocos é igual ao sistema de krigagem pontual, ou seja, o suporte ponto ou bloco não influencia em nada a construção da matriz covariância \mathbf{C} apresentada no item anterior. No entanto, o vetor covariância \mathbf{D} consiste nos valores de covariância entre variáveis randômicas das amostras locais e das variáveis randômicas do local que se deseja estimar. Para estimativas pontuais, essas covariâncias são ponto-a-ponto. Por analogia, para o bloco a ser estimado, os valores de covariância

requerem um vetor de covariância **D** ponto/bloco. A covariância ponto/bloco que é requerida para krigagem em bloco pode ser desenvolvida como segue:

$$\tilde{C}_{iA} = \text{Cov}\{V_A V_i\} \quad (3.35a)$$

$$= E\{V_A V_i\} - E\{V_A\}E\{V_i\} \quad (3.35b)$$

$$= E\left\{\frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} V_j V_i\right\} - E\left\{\frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} V_j\right\} E\{V_i\} \quad (3.35c)$$

$$= \frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} E\{V_j V_i\} - \frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} E\{V_j\} E\{V_i\} \quad (3.35d)$$

$$= \frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} [E\{V_j V_i\} - E\{V_j\} E\{V_i\}] \quad (3.35e)$$

$$= \frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} \text{Cov}\{V_j V_i\} \quad (3.35f)$$

sendo importante apontar que a média dos valores da área local (bloco) pode ser descrita como segue:

$$V_A = \frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} V_j \quad (3.36)$$

A covariância entre variáveis randômicas de locação amostral i^{th} e a variável randômica V_A representando o valor médio do fenômeno sobre a área **A** é a mesma que a média de covariância ponta-a-ponto entre V_i e a variável randômica de todos os pontos em **A**. O sistema de krigagem em blocos pode então ser reescrito da seguinte maneira:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \Lambda & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ M & O & M & M \\ \tilde{C}_{n1} & \Lambda & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \Lambda & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{(n+1) \times (n+1)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} w_1 \\ M \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix}}_{(n+1) \times 1} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{C}_{1A} \\ M \\ \tilde{C}_{nA} \\ 1 \end{bmatrix}}_{(n+1) \times 1} \quad (3.37)$$

A barra sobre a covariância ao lado direito da matriz indica que a covariância não é mais ponto-a-ponto, mas a covariância da média entre uma amostra em particular e todos os pontos em **A**:

$$\bar{\tilde{C}}_{iA} = \frac{1}{|A|} \sum_{jj \in A} \tilde{C}_{ij} \quad (3.38)$$

A variância do bloco de krigagem é dada por:

$$\sigma_{OK}^2 = \bar{\tilde{C}}_{AA} - \left(\sum_{jj \in A} w_i \tilde{C}_{iA} + \mu \right) \quad (3.39)$$

O valor $\bar{\tilde{C}}_{AA}$ nesta equação é a covariância da média entre os pares de locações em **A**.

$$\bar{\tilde{C}}_{AA} = \frac{1}{|A|^2} \sum_{ii \in A} \sum_{jj \in A} \tilde{C}_{ij} \quad (3.40)$$

Neste caso específico em estudo, o conhecimento do comportamento do solo será realizado em blocos correspondentes as dimensões de aproximadamente um quarteirão (100m x 100m), sendo que o solo apresenta uma continuidade lateral que permite essa inferência. Já o conhecimento pontual seria interessante se houvesse um terreno (local) específico a ser conhecido.

3.5 Resultados Obtidos

As estimativas, como dito anteriormente, foram feitas em blocos bidimensionais de 100m x 100m. Todo o processo de krigagem ordinária em blocos da variável de interesse (N_{spt}), seguiu a fundamentação teórica apresentada nos itens anteriores.

A opção por estimar-se em bloco se deu devido ao interesse de conhecer o subsolo como uma área média, de modo a planejar-se a qualidade geotécnica em setores da cidade. Pelo conhecimento do subsolo da região de Passo Fundo, tal inferência pode ser assumida. O procedimento de krigagem em blocos é comumente usado no meio mineiro, onde a partir

de sondagens consideradas pontuais como neste estudo de caso, são realizadas krigagens em blocos de lavra.

Como exemplo de tal procedimento, Stangler (2001) aponta uma reserva de argila para uso cerâmico, onde partindo de um banco de dados de sondagens de trado manual, realizou as estimativas neste banco de dados assumindo blocos a serem lavrados nas dimensões de 25m x 25m.

Seguem os mapas correspondentes às estimativas obtidas para cada camada (I, II, III e IV), onde sobre cada uma delas foram sobrepostos os mapas representativos dos furos de sondagens para tal nível de profundidade, assim como o mapa da locação das ruas da cidade em questão (apenas da área urbana em estudo). É importante sempre, que se sobreponha aos mapas de estimativas, o de locação amostral, podendo-se melhor visualizar as áreas mais densamente amostradas. E assim, observar as regiões onde as estimativas podem se apresentar mais imprecisas, ou seja, essas regiões são as não amostradas e se localizam distantes de algum ponto amostral que possa influenciar na sua estimativa.

A Figura 3.12c apresenta os valores correspondentes a krigagem ordinária dos valores de N_{spt} para a camada I. Essa estimativa, resultou em uma área globalmente homogênea, correspondente a valores de N_{spt} baixos, variando de 8 a 13 golpes a sua resistência. Esses valores estão em torno da média global da área, apresentada anteriormente no histograma de freqüências da camada I, como sendo 9,43. Mas, apenas uma área que se apresenta circulada no mapa de locação amostral da camada I (Figura 3.12b), aponta uma pequena região de valores mais elevados de resistência, sendo seu valor máximo 28 golpes.

Cabe apontar, que esta mesma região apresentou elevados valores de resistência devido a pontos amostrais localizados na mesma área com valores também elevados. Tais pontos podem ser observados no apêndice A, onde o mapa de locação amostral comprova essa afirmação. Esse é um fator que leva a crer que os valores de N_{spt} estimados estão coerentes, ou mesmo honrando sua informação de origem. Outro ponto importante a ser comentado é quanto ao uso geotécnico desta camada (I), com até 5 metros de profundidade. Este é o principal nível em subsuperfície quando se tratam

de fundações superficiais (rasas), ou mesmo na região de estudo quando se fala em micro-estacas, ou também chamada de estacas-broca.

Na maior parte da área em estudo da camada **II** (Figura 3.13c) encontram-se valores em torno da média (16,60), variando de 11 a 19 golpes. Duas áreas apenas foram circuladas no mapa de locação amostral da camada **II** (Figura 3.13b), apontando duas pequenas regiões de valores mais elevados de resistência, onde seu valor máximo foi de 39 golpes. Sendo que, uma delas é coincidente com a área encontrada na camada **I**, mostrando a sua continuidade com o ganho de profundidade. Já a outra área, apresenta coerência com os dados reais de amostragens (apêndice A), pois na camada **II** começam a surgir neste ponto, valores de N_{spt} mais elevados.

A Figura 3.14c apresenta os valores correspondentes a krigagem ordinária dos valores de N_{spt} para terceira camada (**III**). Essa estimativa, resultou em um acréscimo significativo dos valores de N_{spt} , onde o valor mínimo é de 12 golpes. A maior parte da área corresponde a valores mais elevados, variando de 22 a 37 golpes a sua resistência. Esses valores estão em torno e acima da media global da área, apresentada anteriormente no histograma de freqüências da camada **III**, como sendo 24,91. Uma grande área que se apresenta circulada no mapa de locação amostral da camada **III** (Figura 3.14b), aponta uma região de valores mais elevados de resistência, sendo seu valor máximo 42 golpes.

Considera-se para uso geotécnico em fundações profundas, a camada (**III**) como sendo o principal nível em subsuperfície, onde quase que a totalidade das estacas executadas na área de estudo até hoje, são apoiadas a esta profundidade. O tipo de estaca mais comumente utilizada é a do tipo Rotativa e Strauss.

A próxima camada a ser analisada é a **IV** (Figura 3.15c), onde a maior parte da área, assim como nas demais camadas, apresenta a maioria de seus valores girando em torno da média (38,25), sendo eles em geral 32 a 45 golpes. Achou-se relevante neste nível, a partir do resultado obtido, circular duas áreas que dizem respeito a menores valores de SPT, resistência essa que mostra que nessas profundidades ainda não foi possível atingir o impenetrável. Mas, não se pode dizer que a resistência é ruim, pois ela varia

de 20 a 27 golpes. Apenas se buscou mostrar dois lugares que ressaltaram menores resistências.

Juntamente com os mapas de krigagem ordinária para cada camada, foram confeccionados também mapas referentes a variância das estimativas realizadas até então. Esses mapas podem ser observados nas Figuras 3.16c, 3.17c, 3.18c e 3.19c, e sobrepostos a eles, com designação “a” (ex.: 3.16a), os referentes a localização das ruas da área em estudo e denominado “b” (ex.: 3.16b) os representativos das locações amostrais de cada camada.

É unânime se observado, que para as quatro camadas **I**, **II**, **III** e **IV** os valores de variância das estimativas foram na sua grande maioria baixos. Outro ponto importante a salientar é que apenas nas bordas (contorno) dos mapas é que os valores de variância crescem. Isso se justifica por serem áreas de pouca ou às vezes raramente amostradas, assim, a variabilidade das estimativas por falta de informações é conseqüentemente alta.

A seguir, no capítulo 4, será apresentado os principais conceitos e procedimentos relativos a simulação seqüencial Gaussiana (ssG). Ainda serão mostrados seus principais resultados, assim como a análises e discussões destes. A este próximo capítulo caberá a importância de avaliar os riscos associados às estimativas realizadas neste capítulo 3.

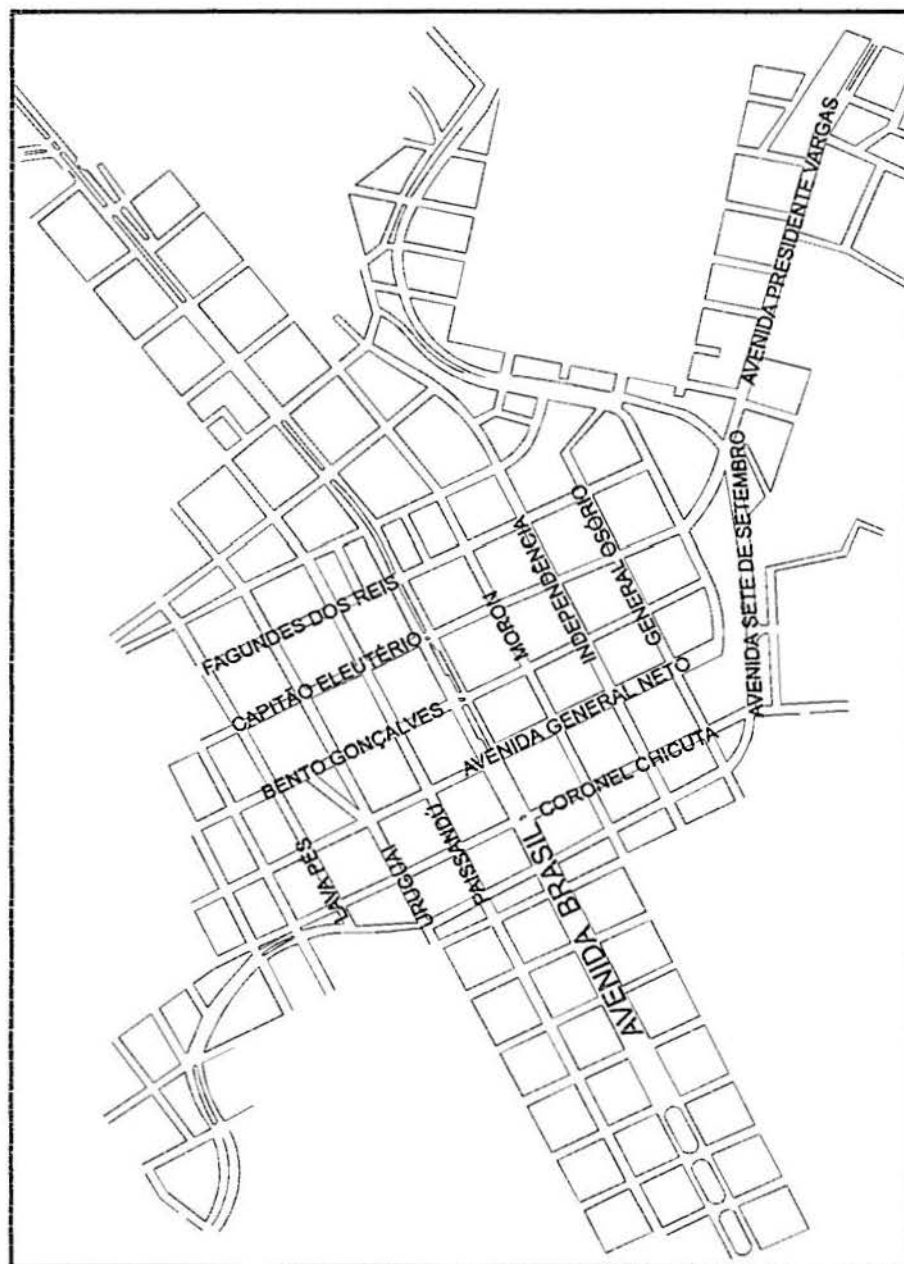


Figura 3.12 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

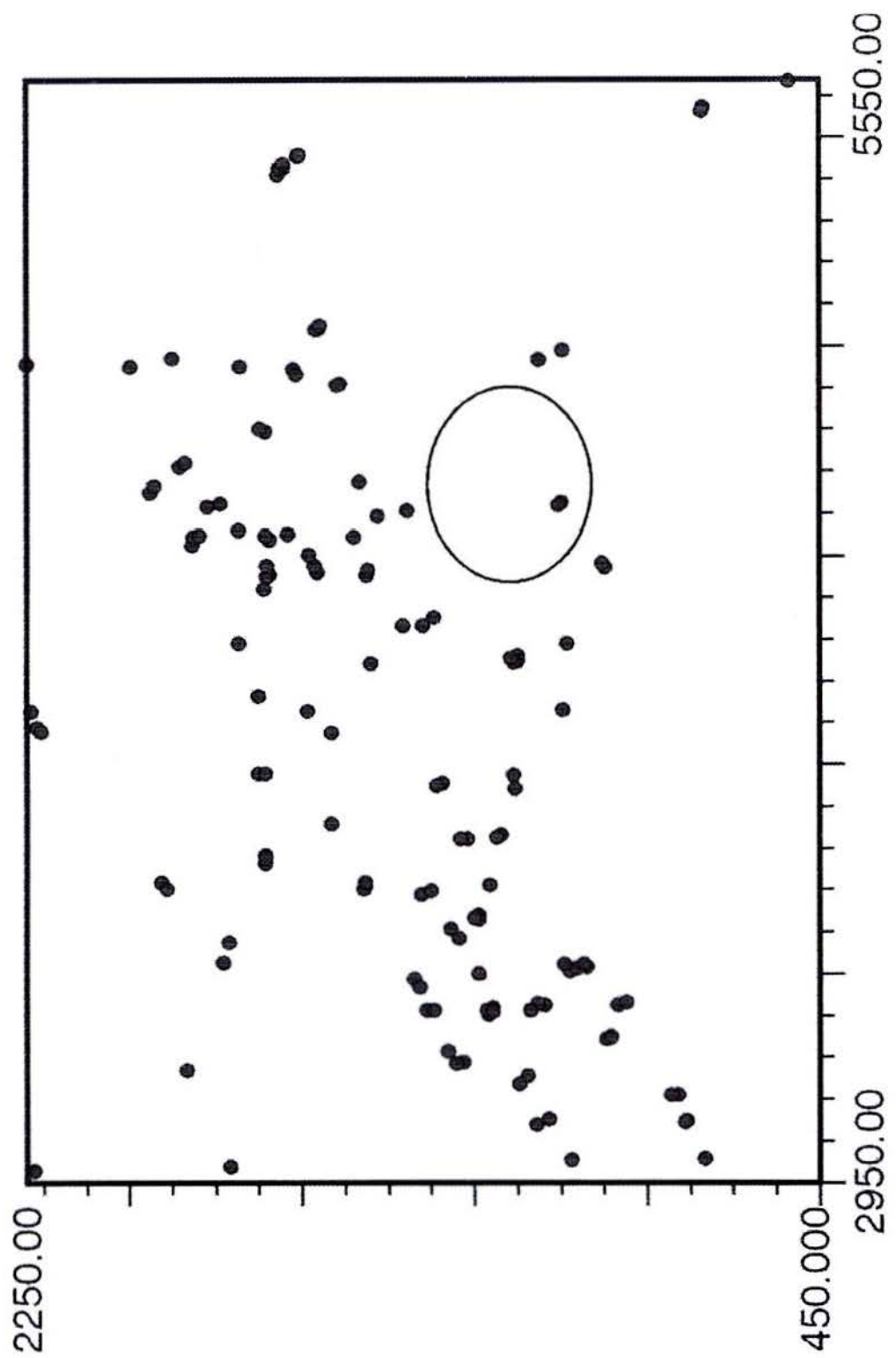


Figura 3.12 (b) - Localização das sondagens SPT da camada I.

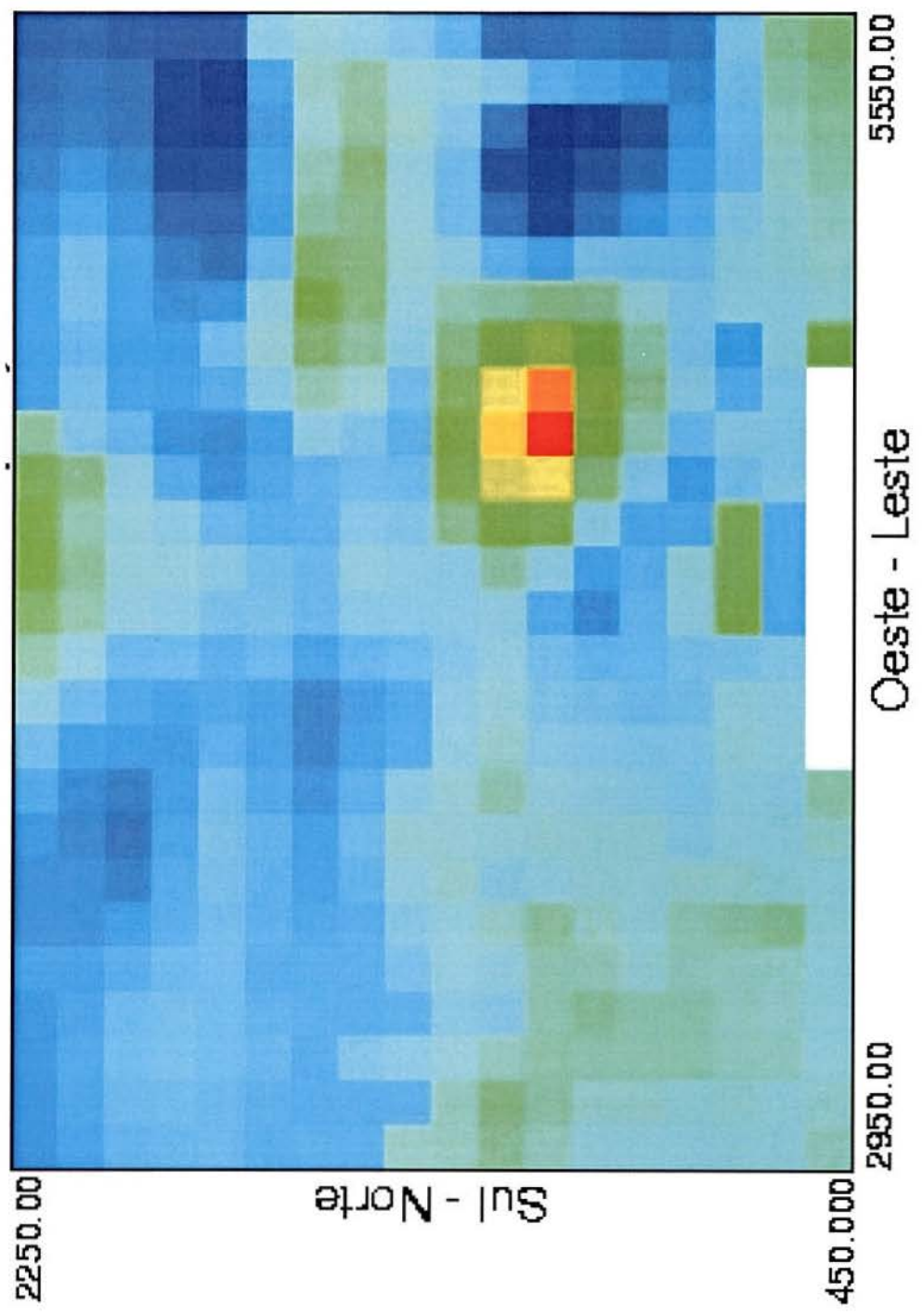
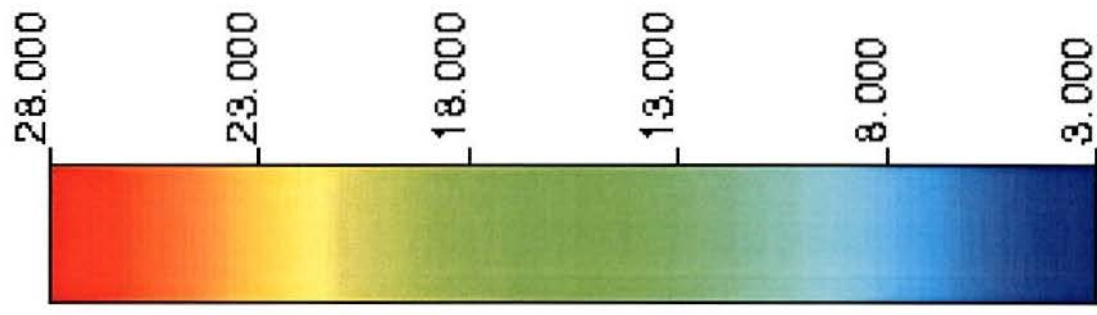


Figura 3.12 (c) - Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada I.

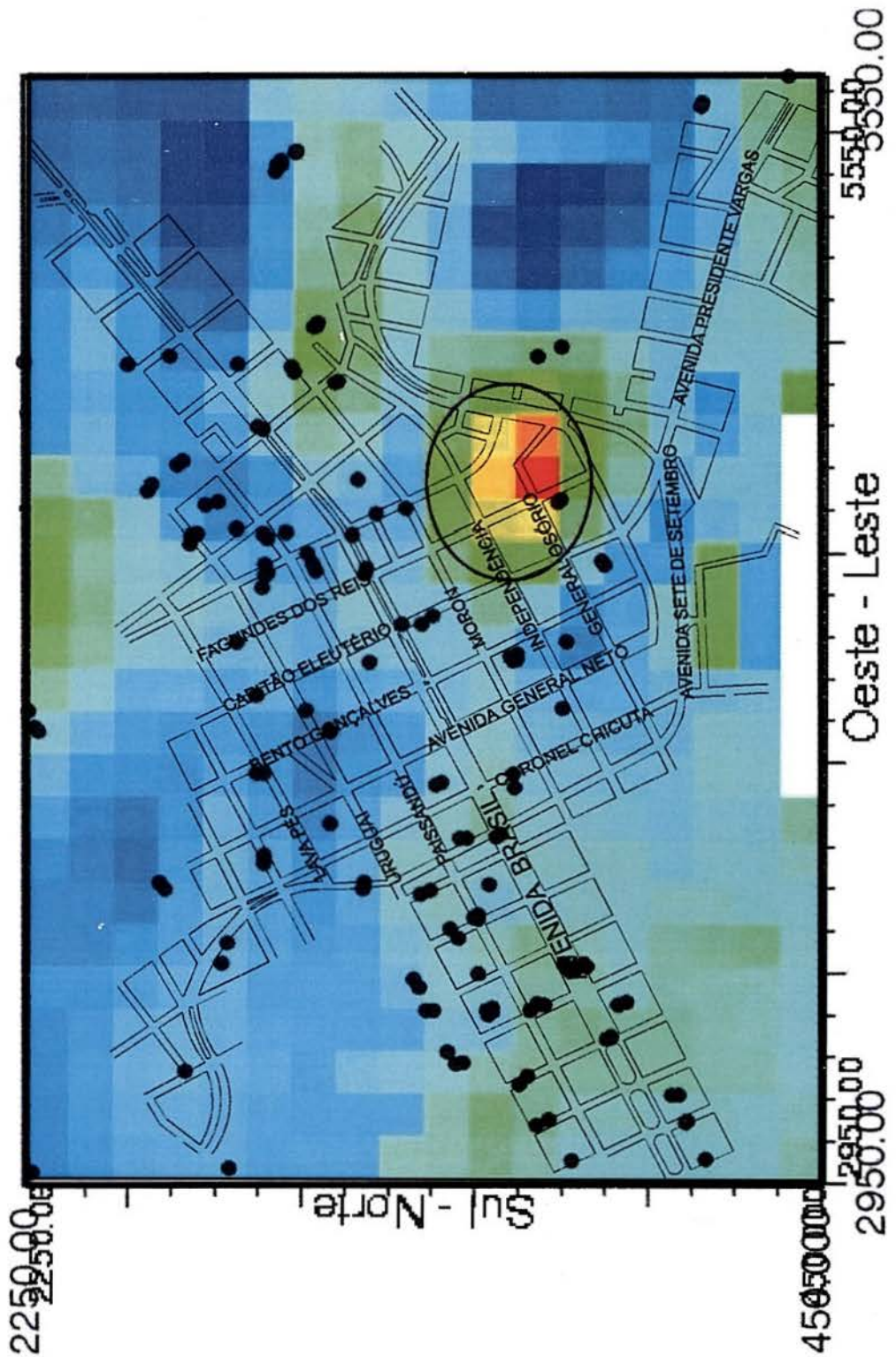
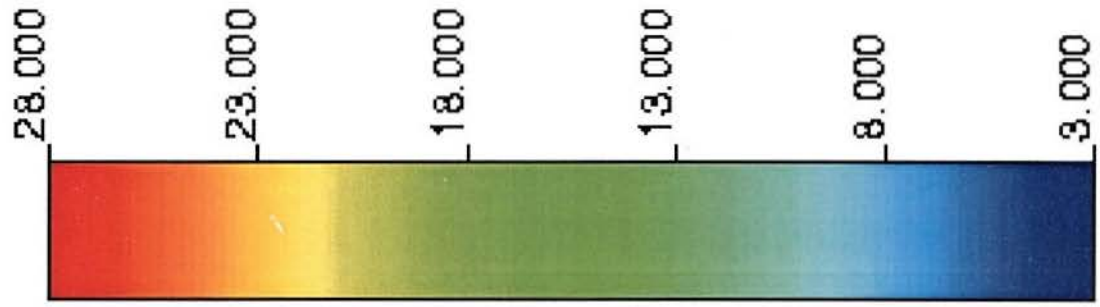


Figura 3.12 (a) Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada I.

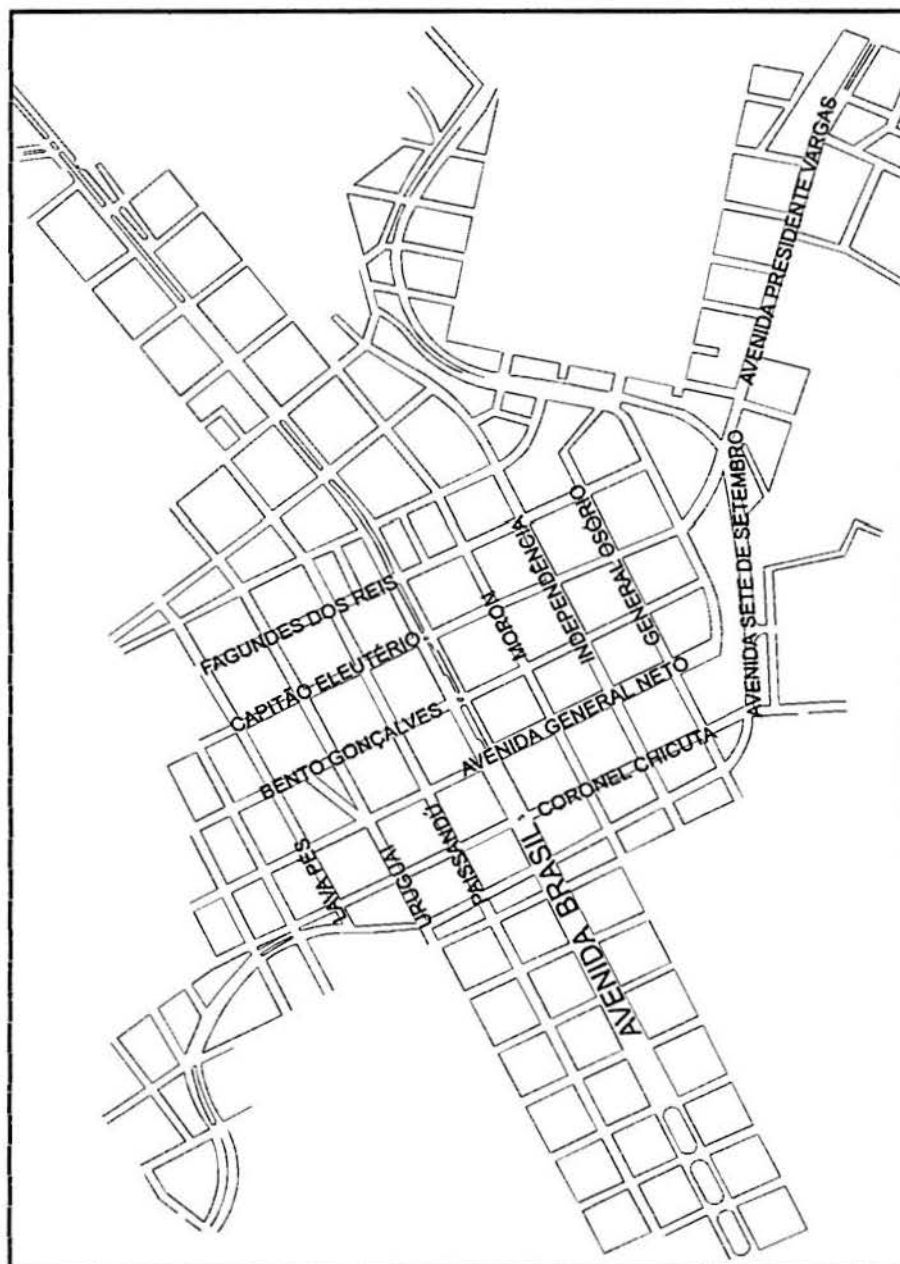


Figura 3.13 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

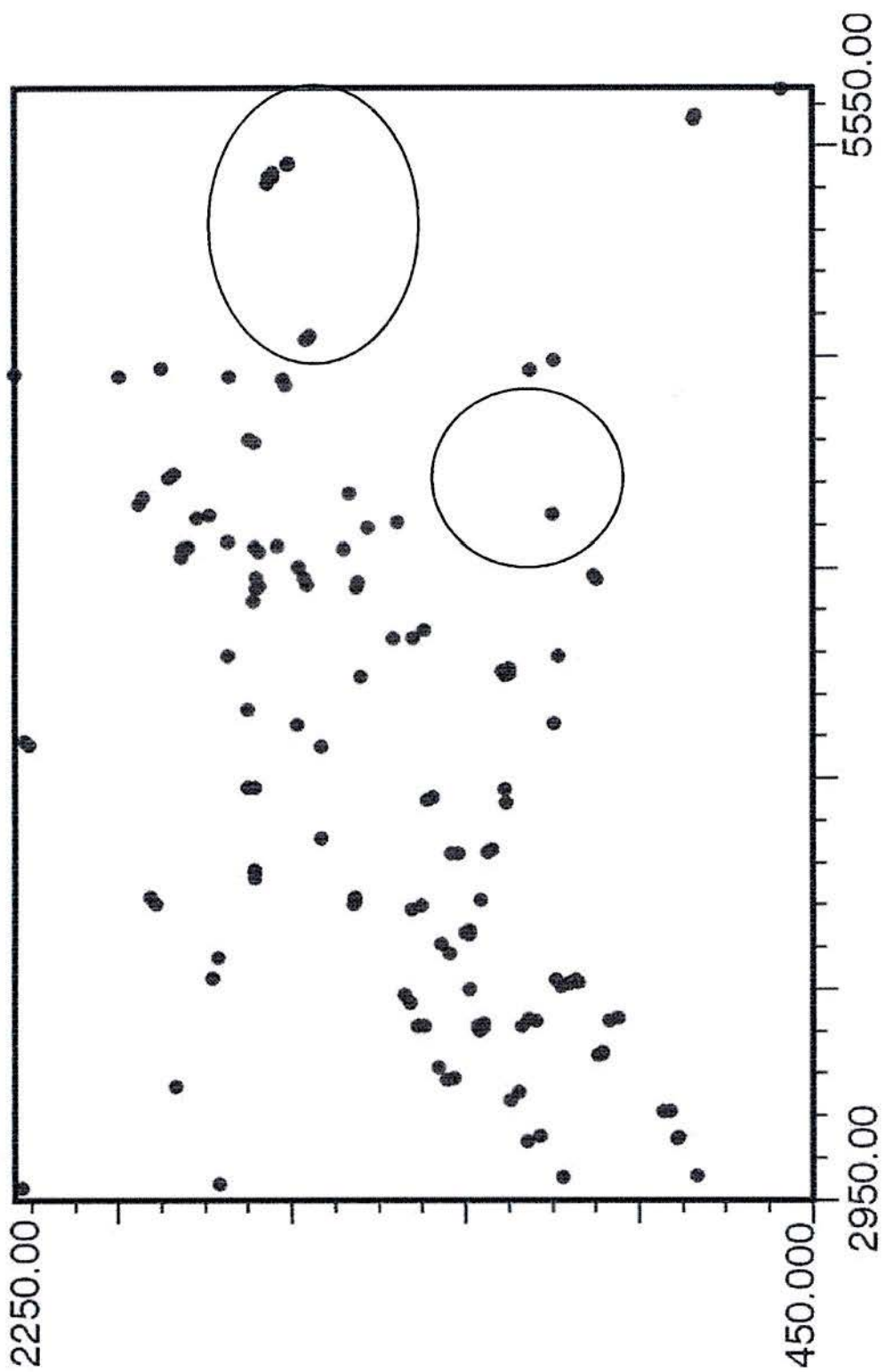


Figura 3.13 (b) - Localização das sondagens SPT da camada II.

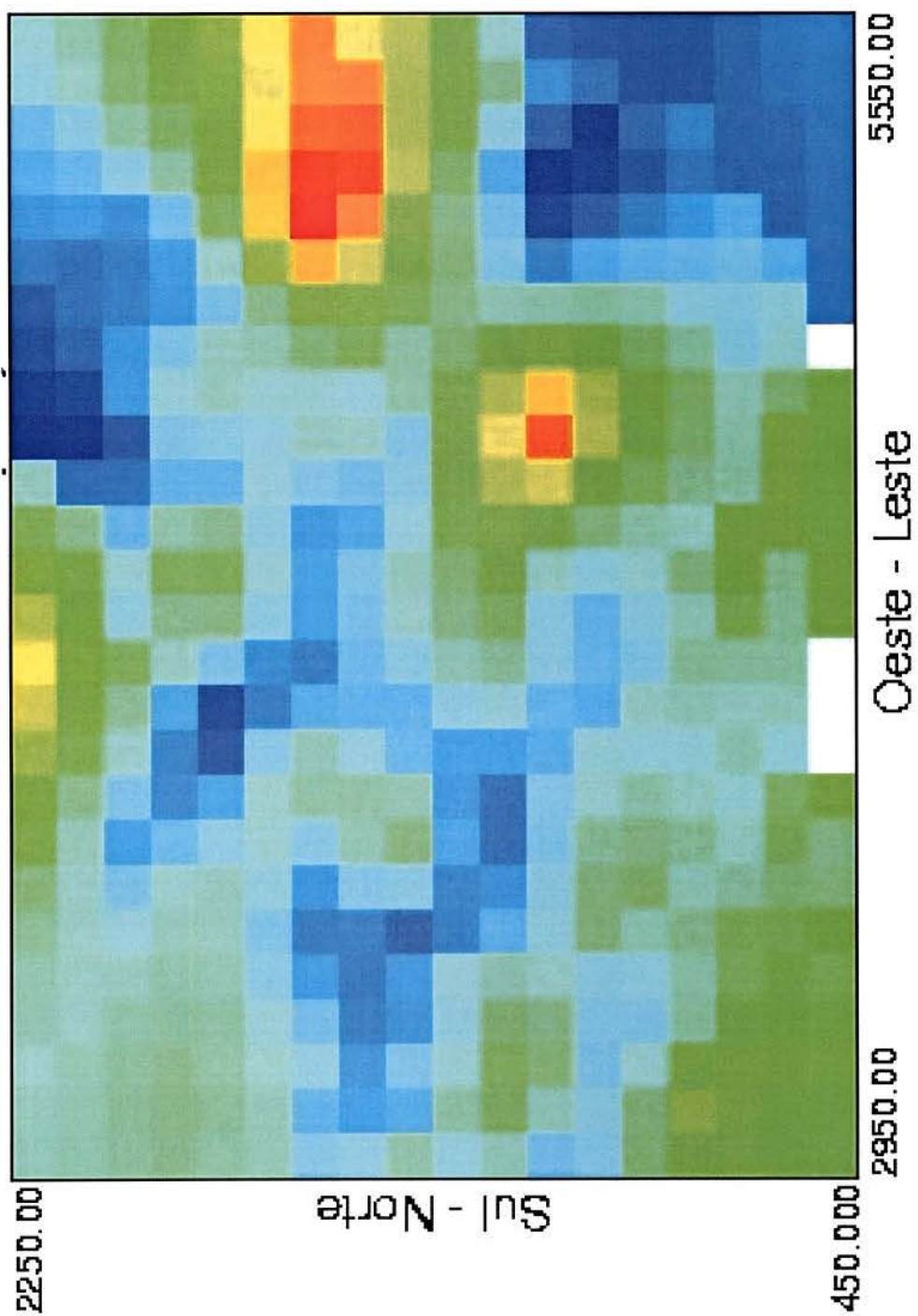
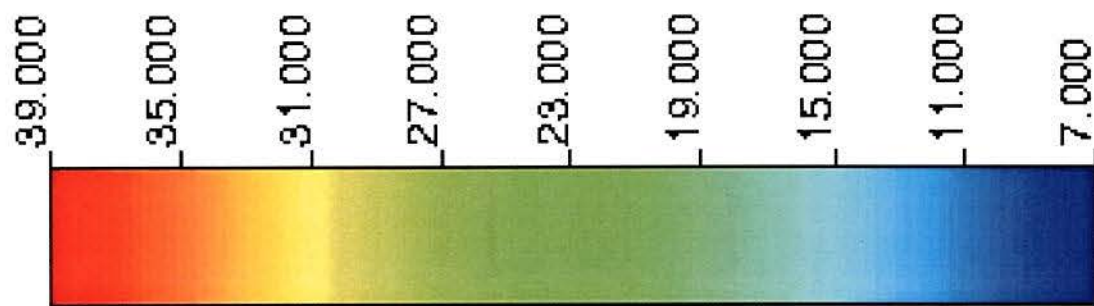


Figura 3.13 (c) - Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada II.

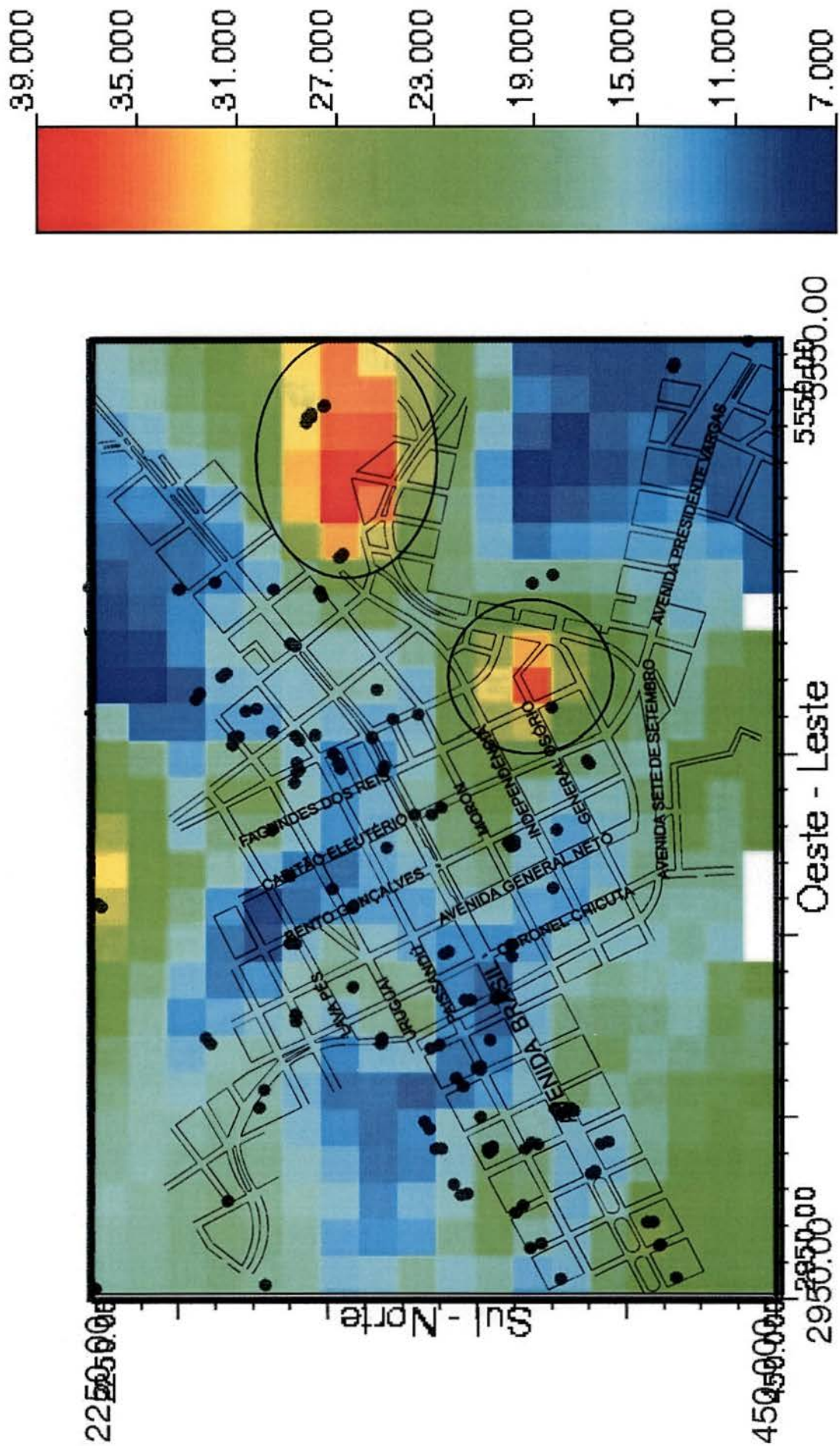


Figura 3.13 (c). Resultado da Krigagem Ordinária dos valores da SBT da camada II.

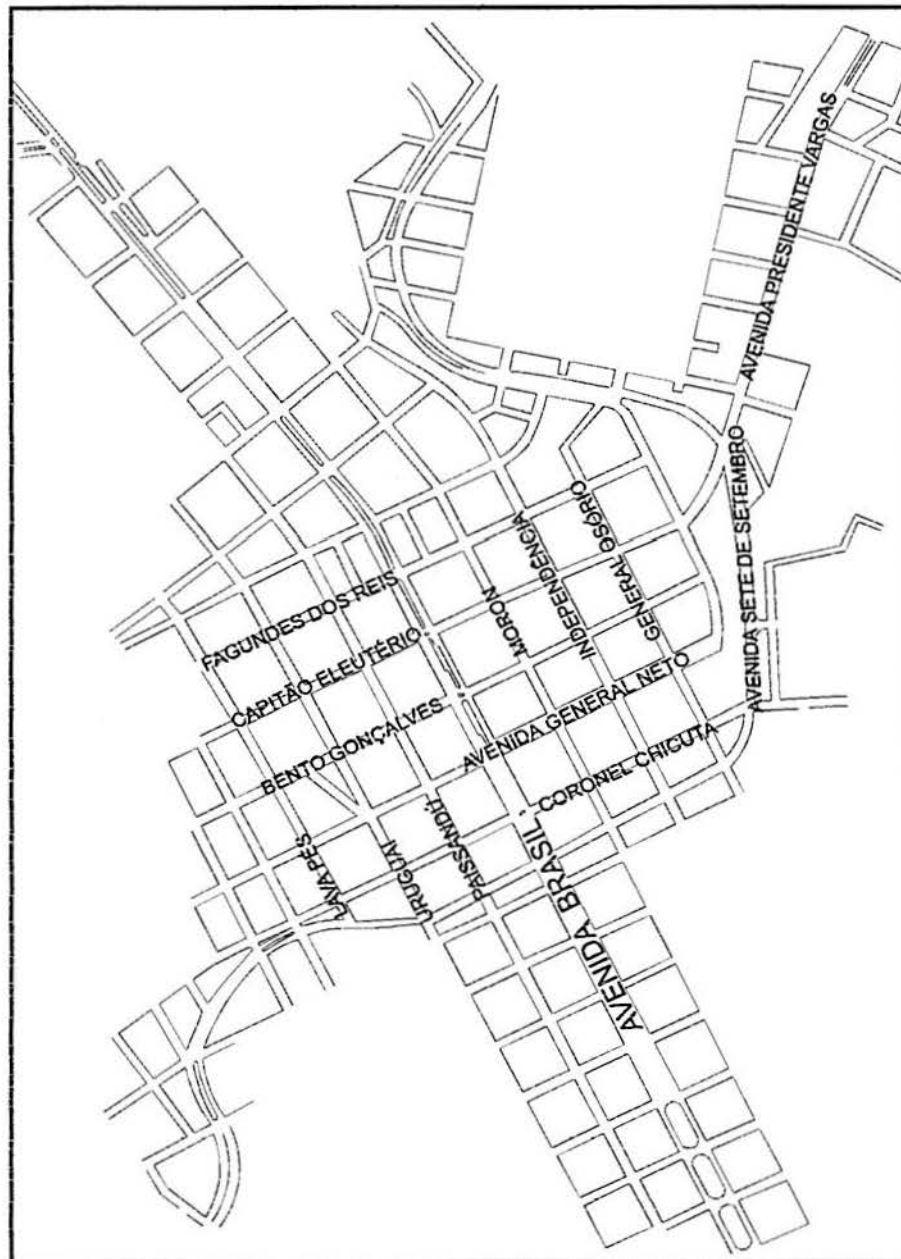


Figura 3.14 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

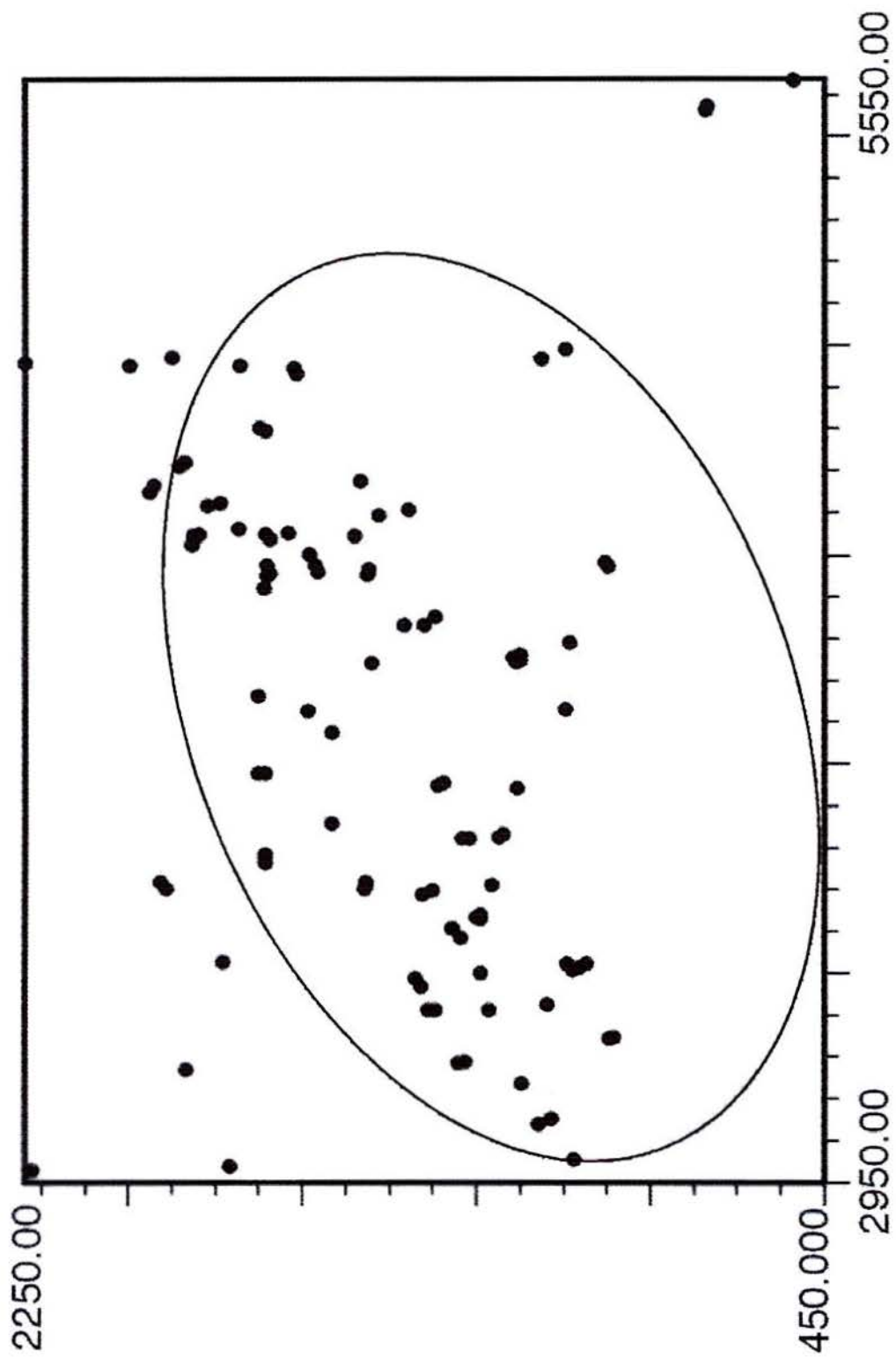


Figura 3.14 (b) - Locação das sondagens SPT da camada III.

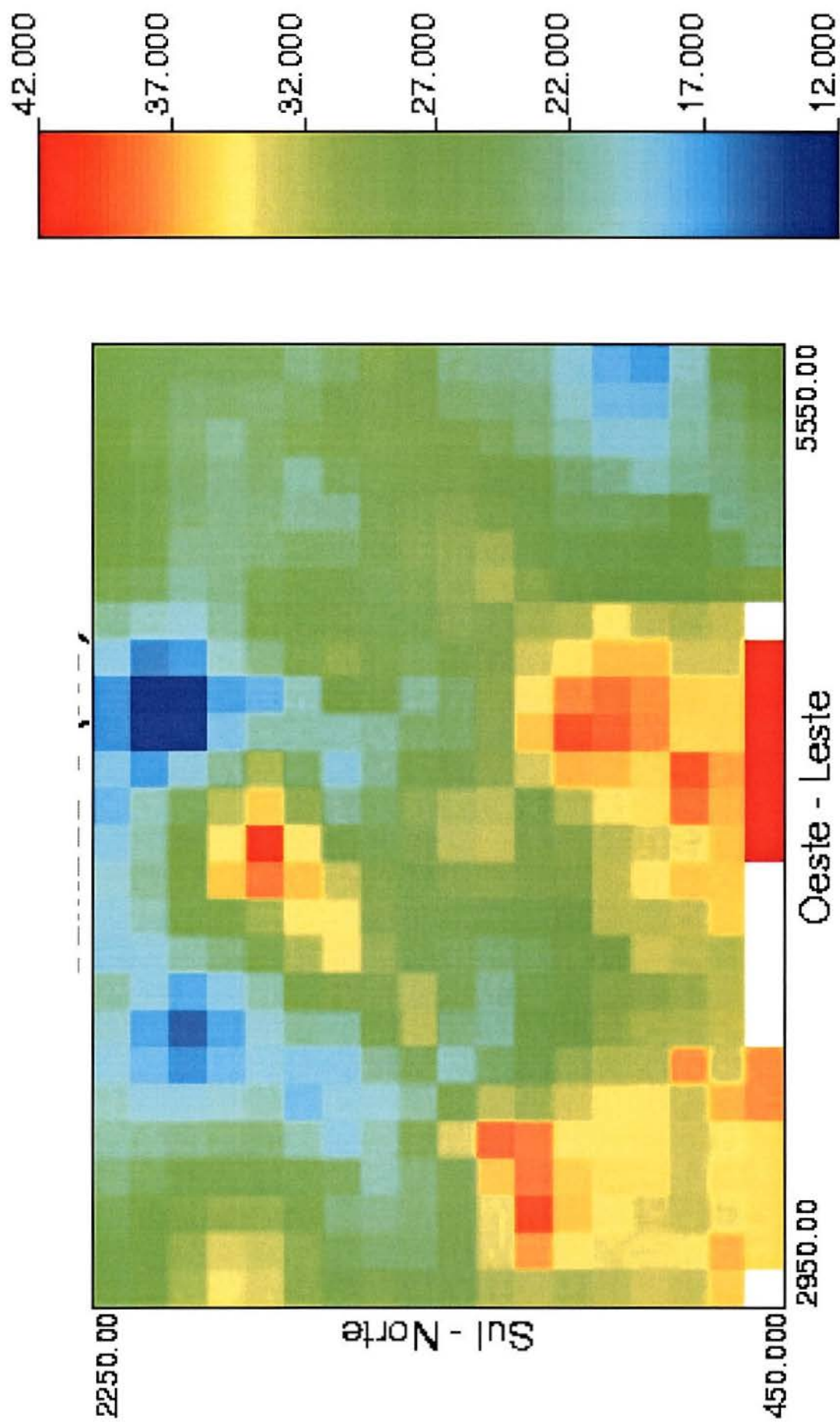


Figura 3.14 (c) - Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada III.

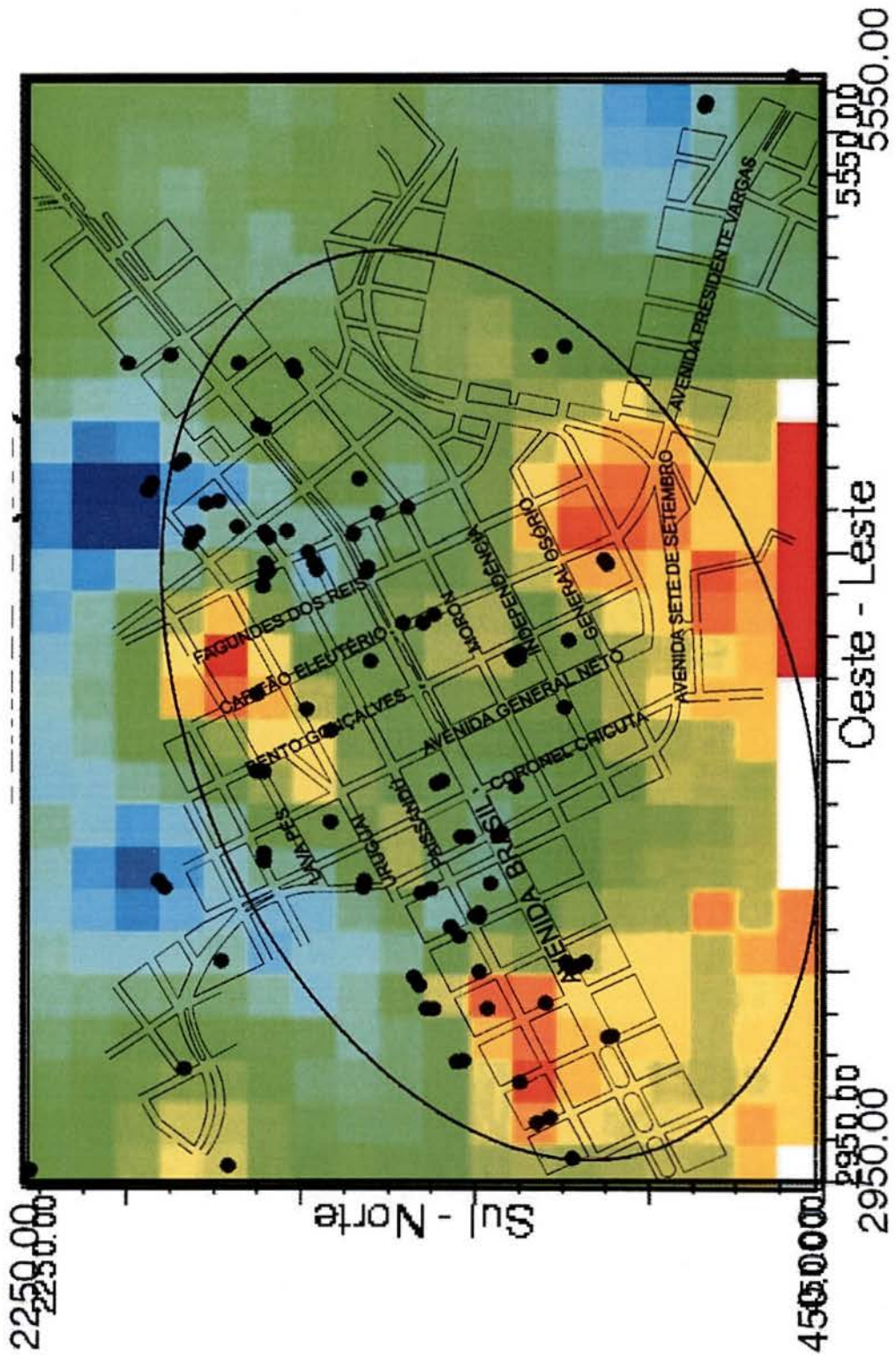
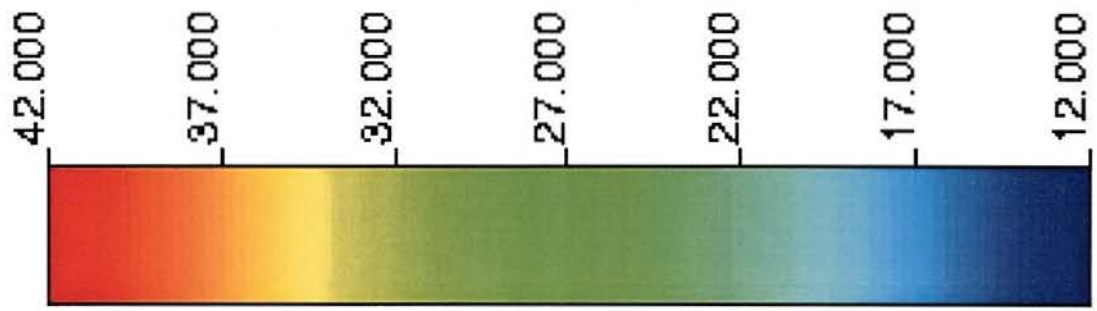


Figura 3.14 (a) Resultado da investigação para a avaliação da condição da camada III. (b) Localização das sondagens SPT da camada III.

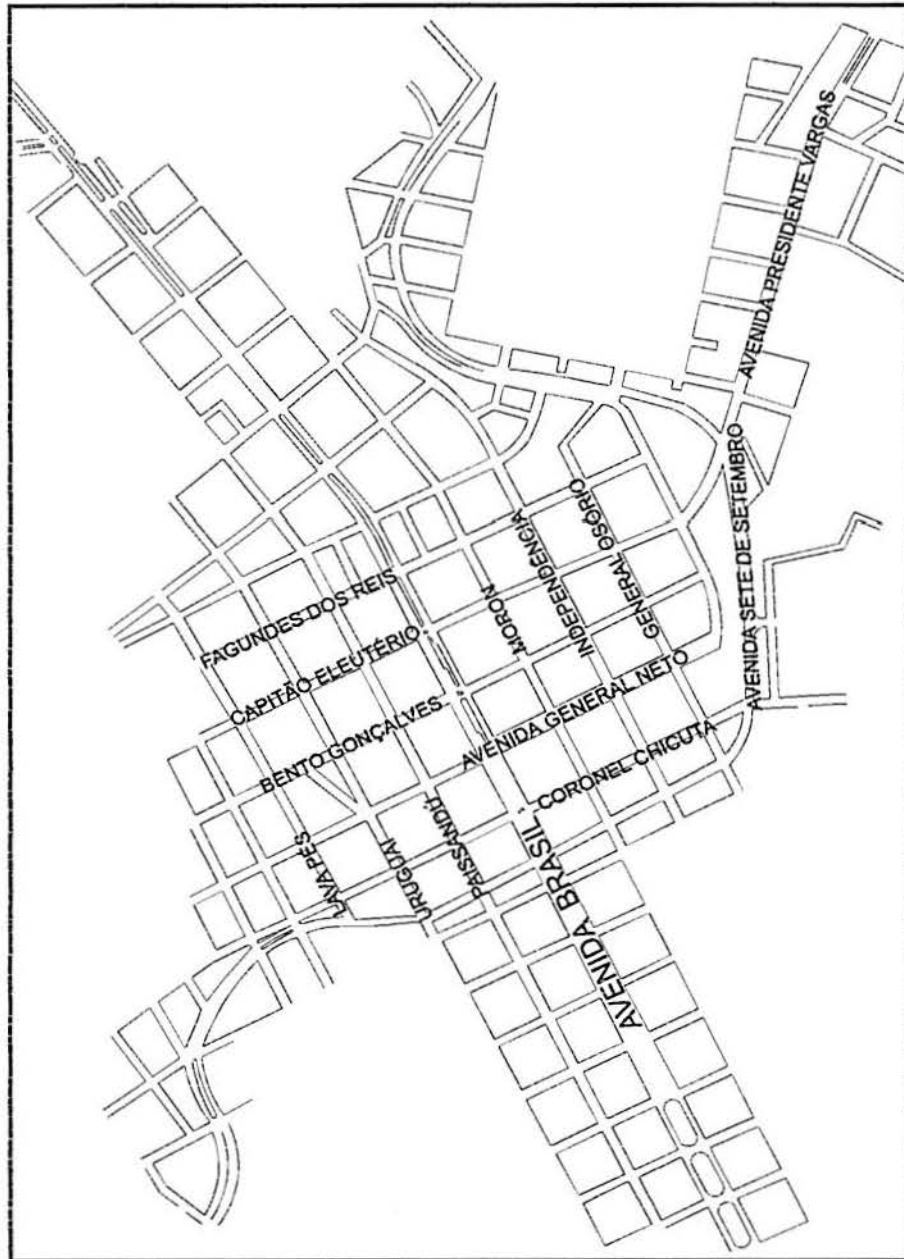


Figura 3.15 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

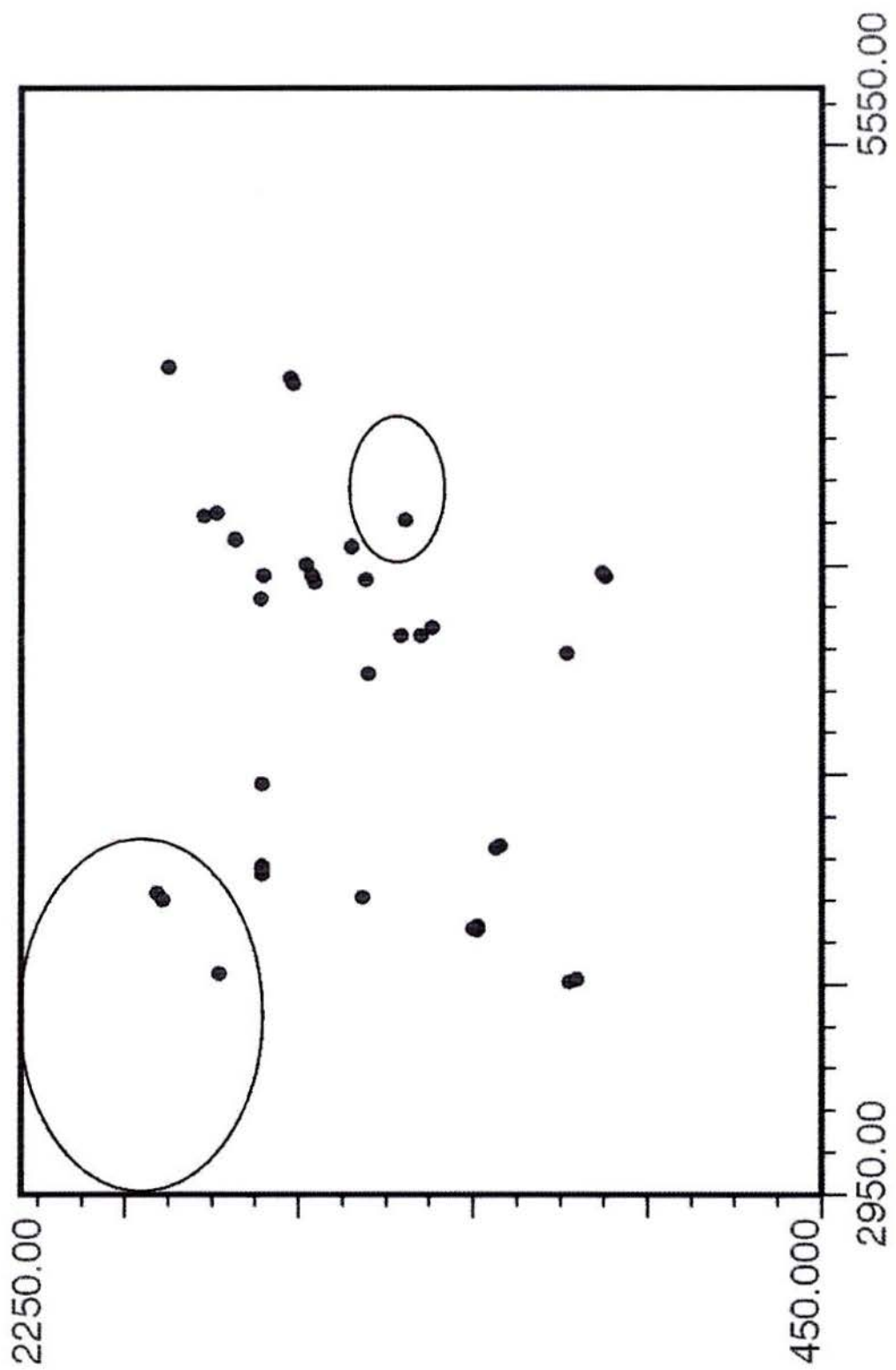


Figura 3.15 (b) - Localização das sondagens SPT da camada IV.

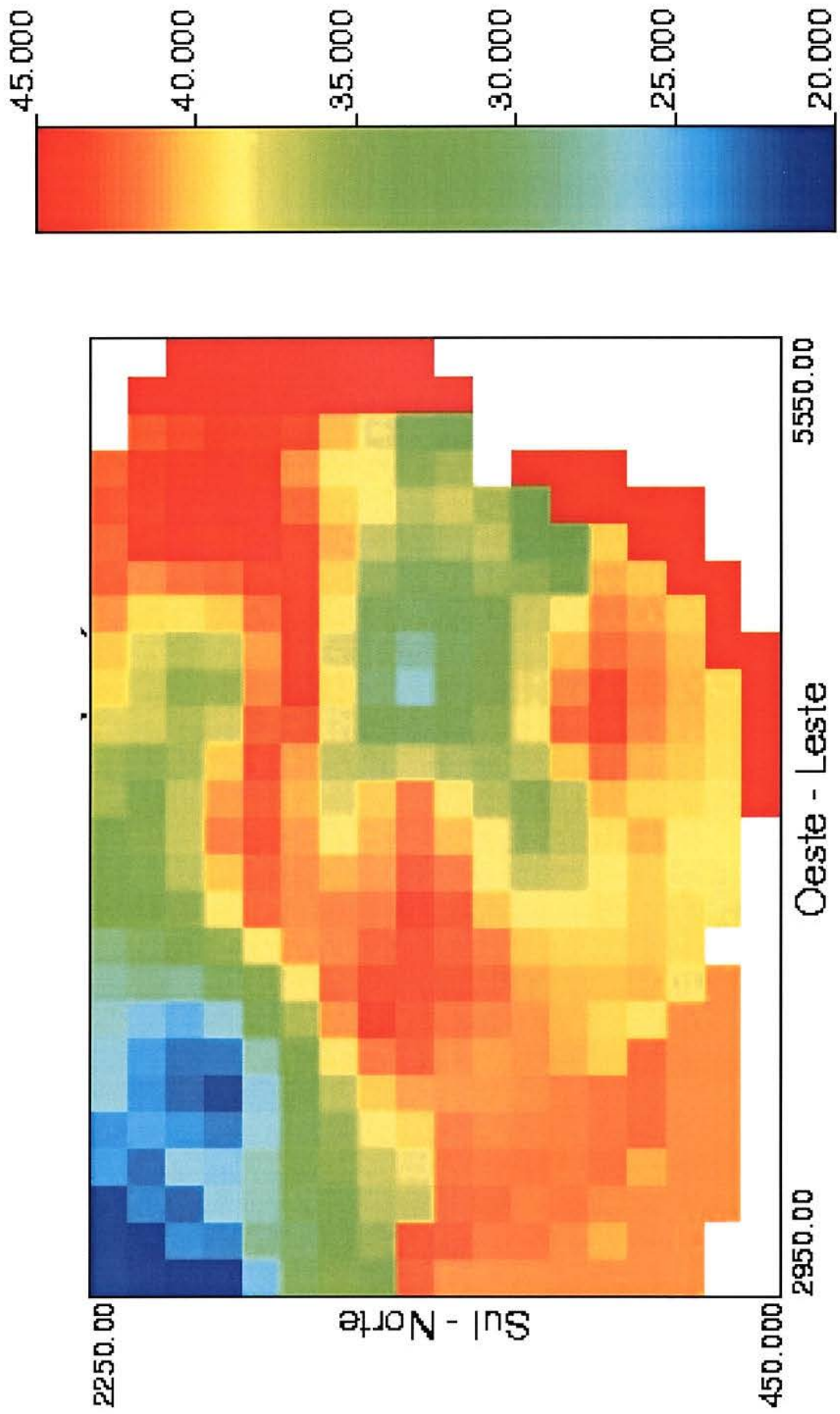


Figura 3.15 (c) - Resultado da Krigagem Ordinária dos valores de SPT da camada IV.

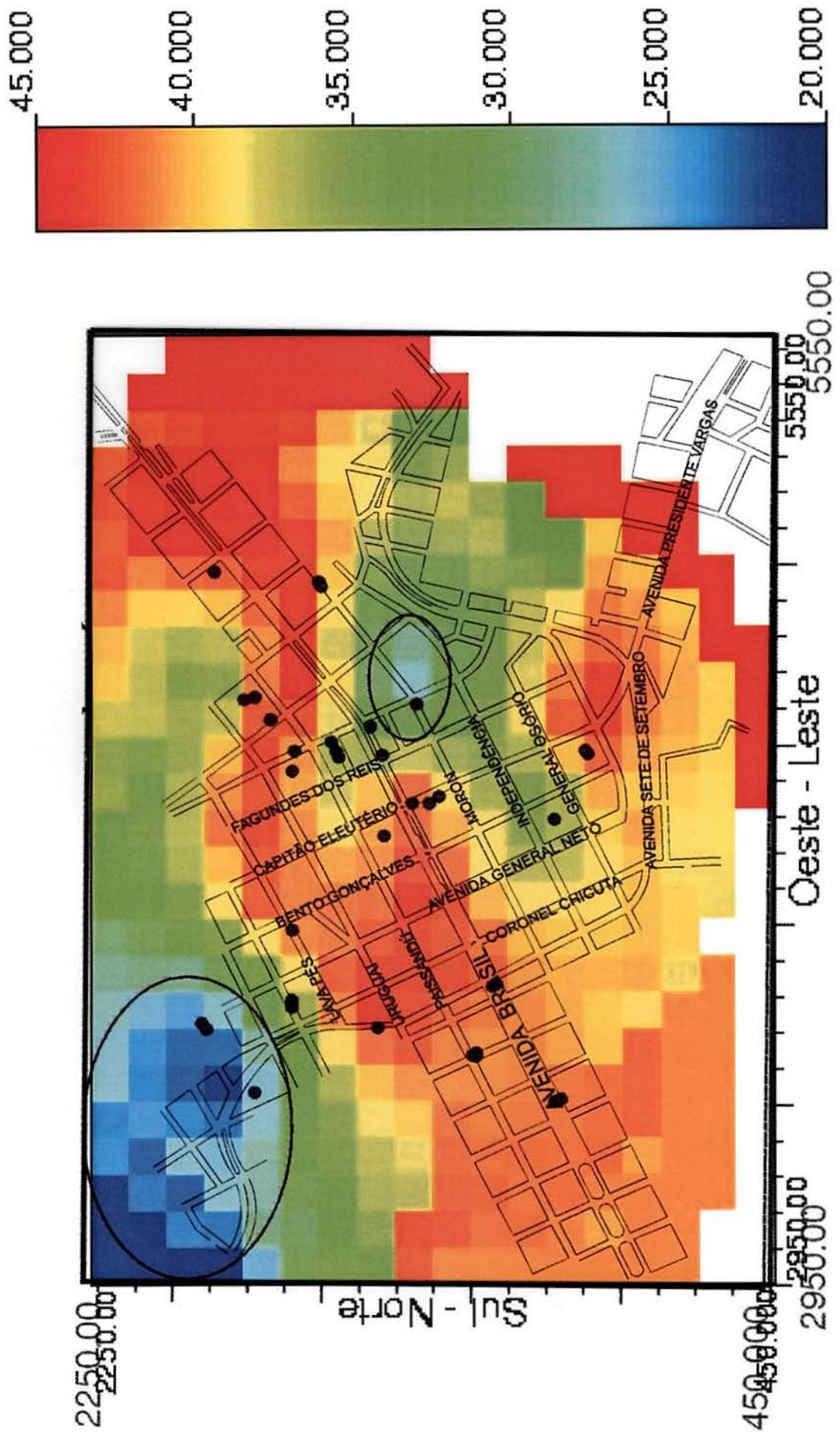


Figura 3.15 (a) Resultado da simulação de ruído dos edifícios da Vila de SPT, ramada IV.

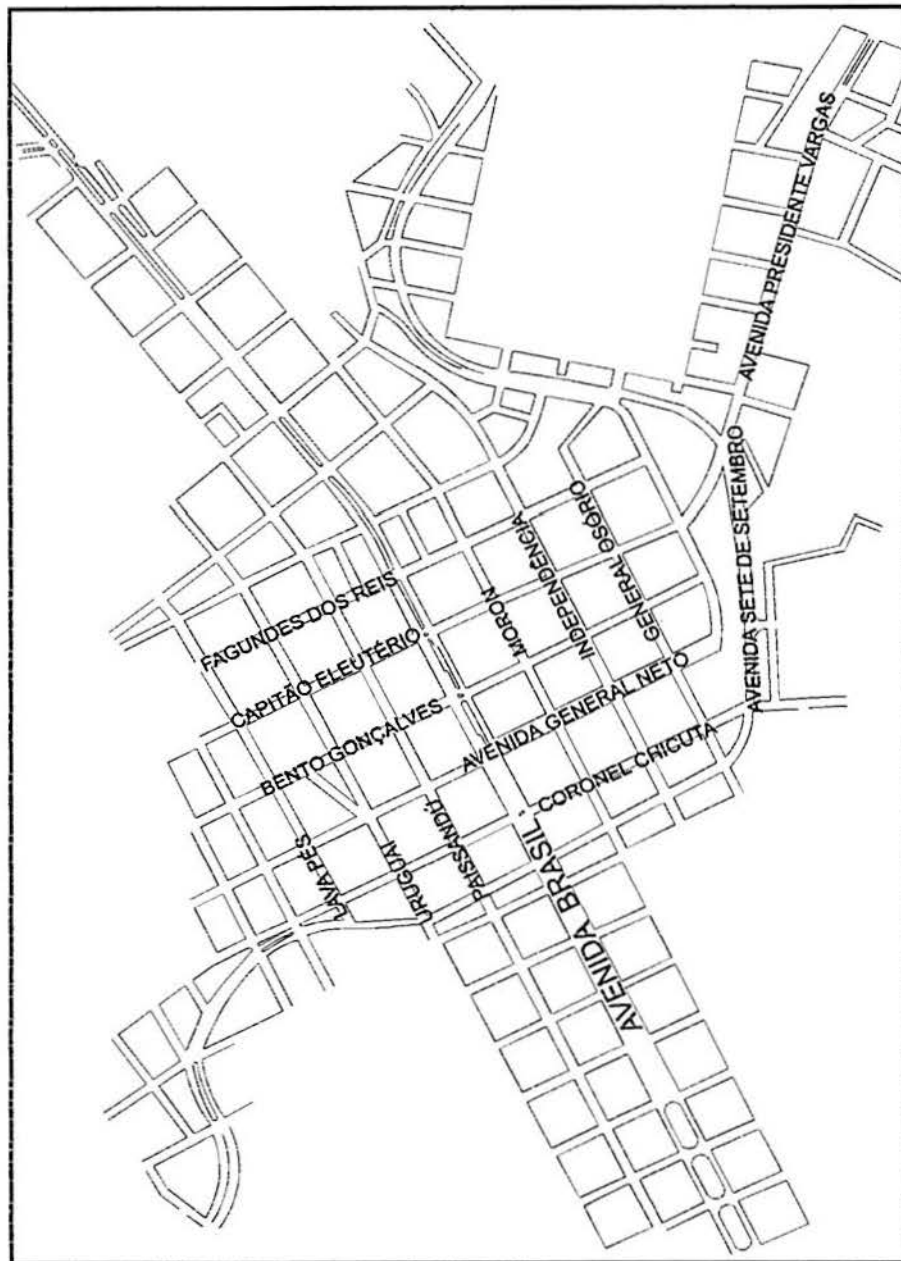


Figura 3.16 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

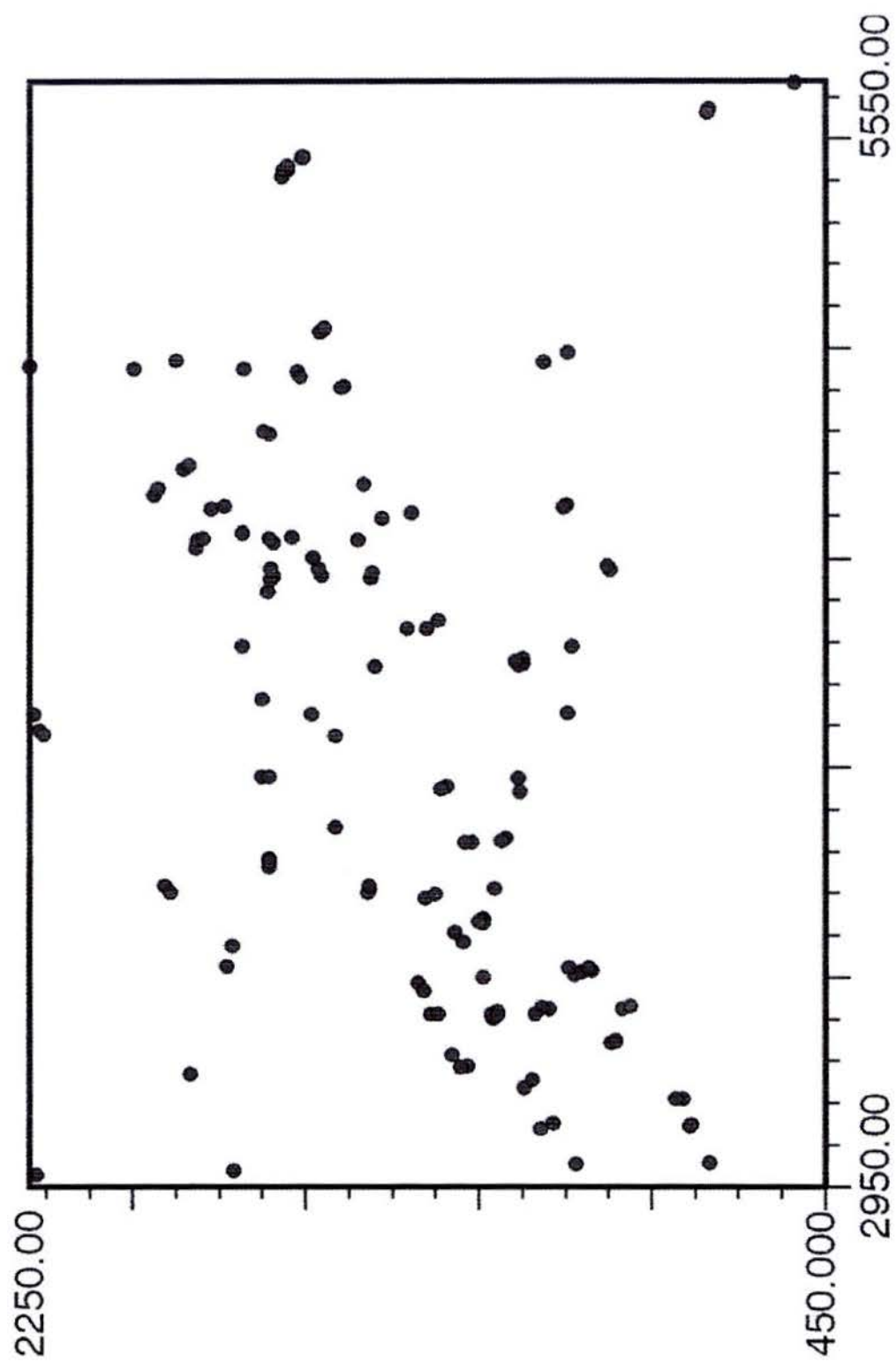


Figura 3.16 (b) - Localização das sondagens SPT da camada I.

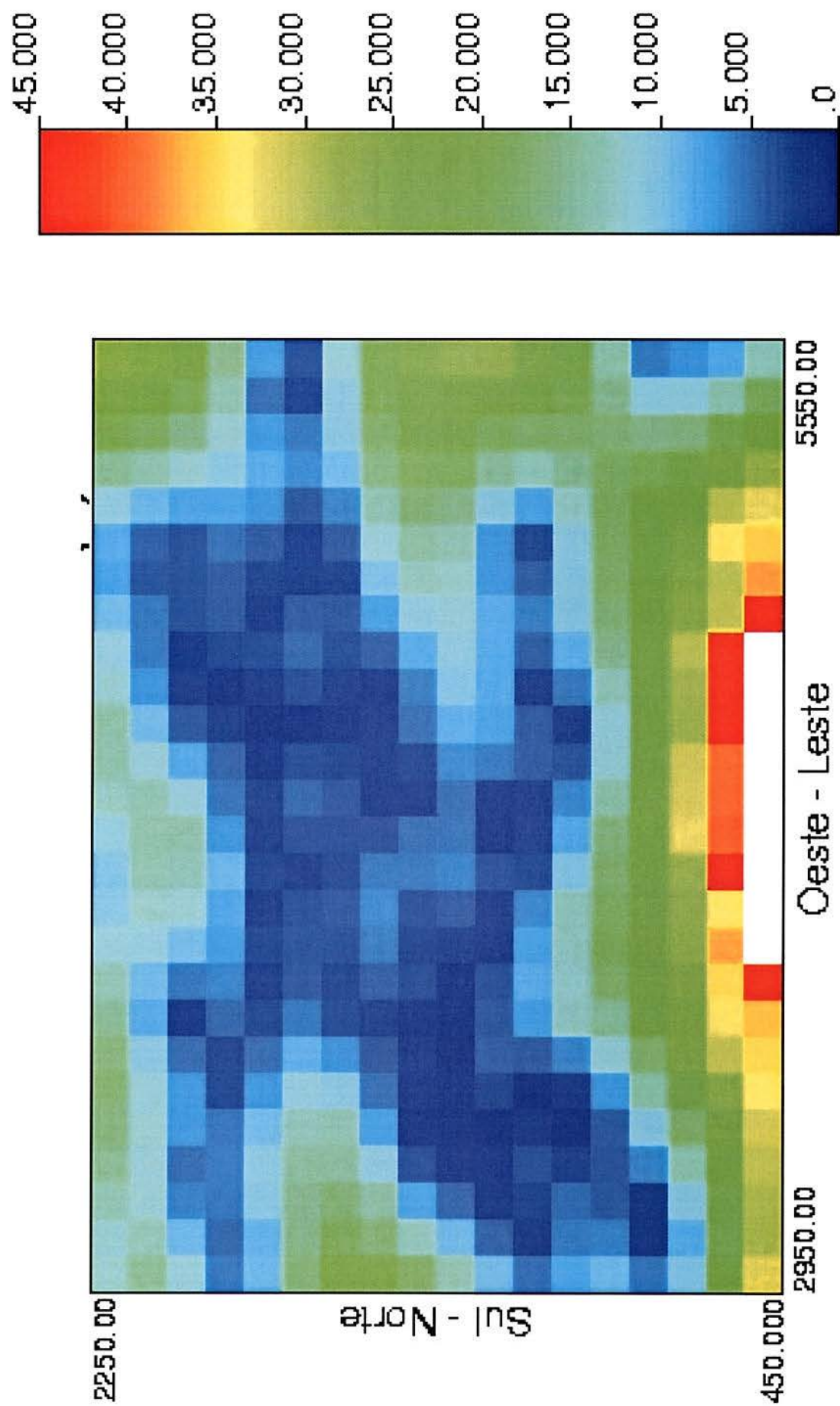


Figura 3.16 (c) - Variância de Estimativa dos valores de SPT krigados da camada I.

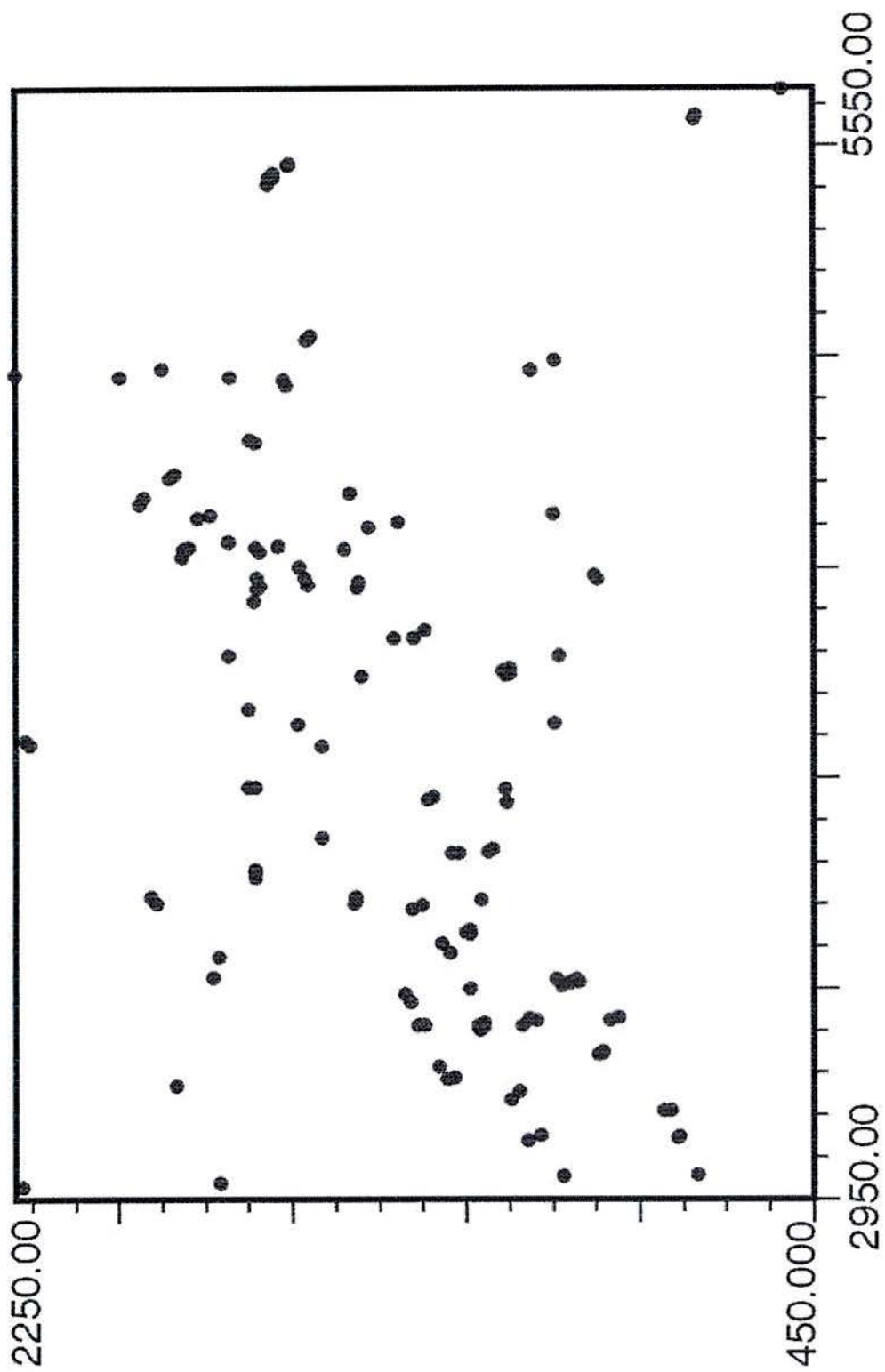


Figura 3.17 (b) - Localização das sondagens SPT da camada II.

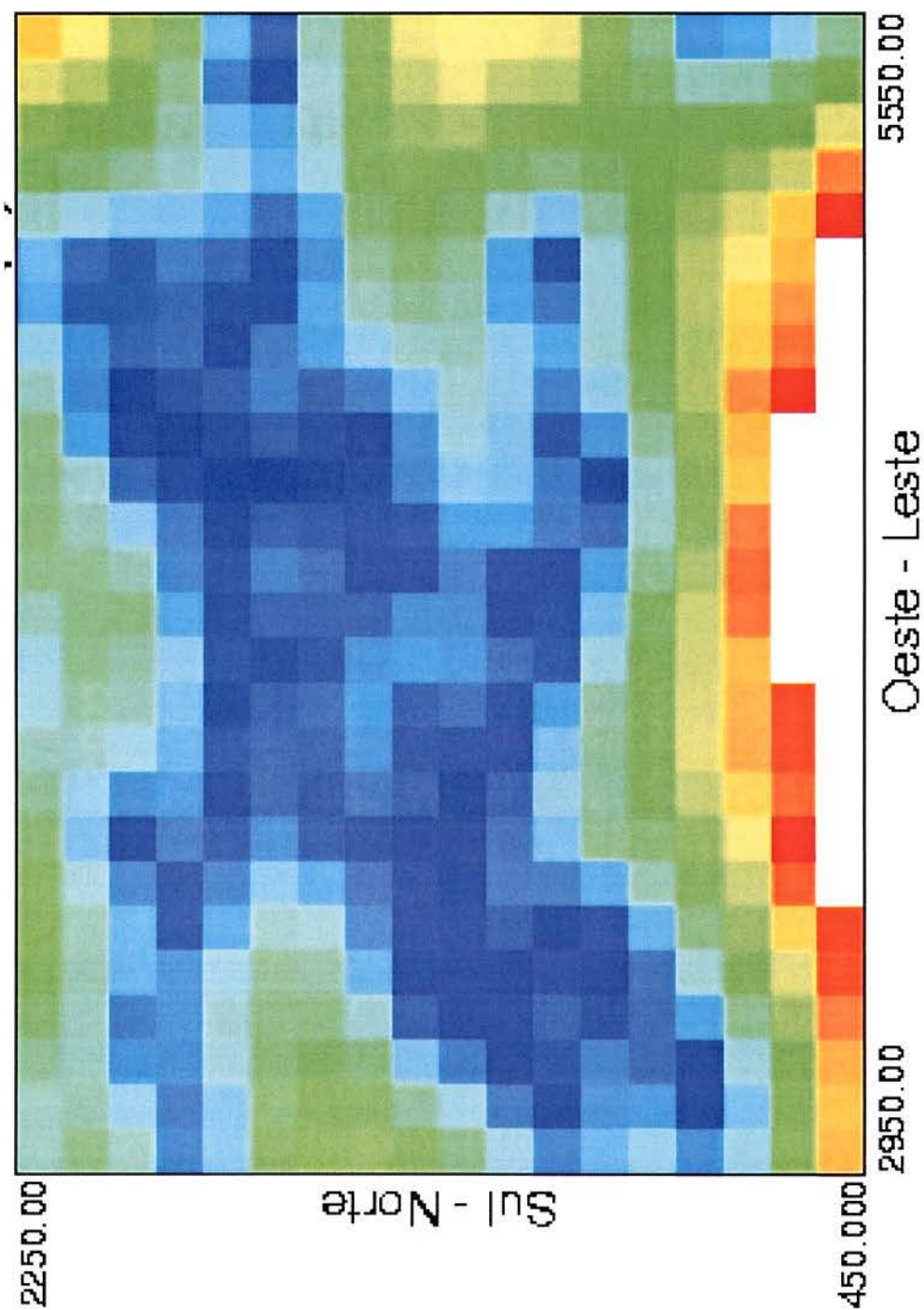


Figura 3.17 (c) - Variância de Estimativa dos valores de SPT krigados da camada II.

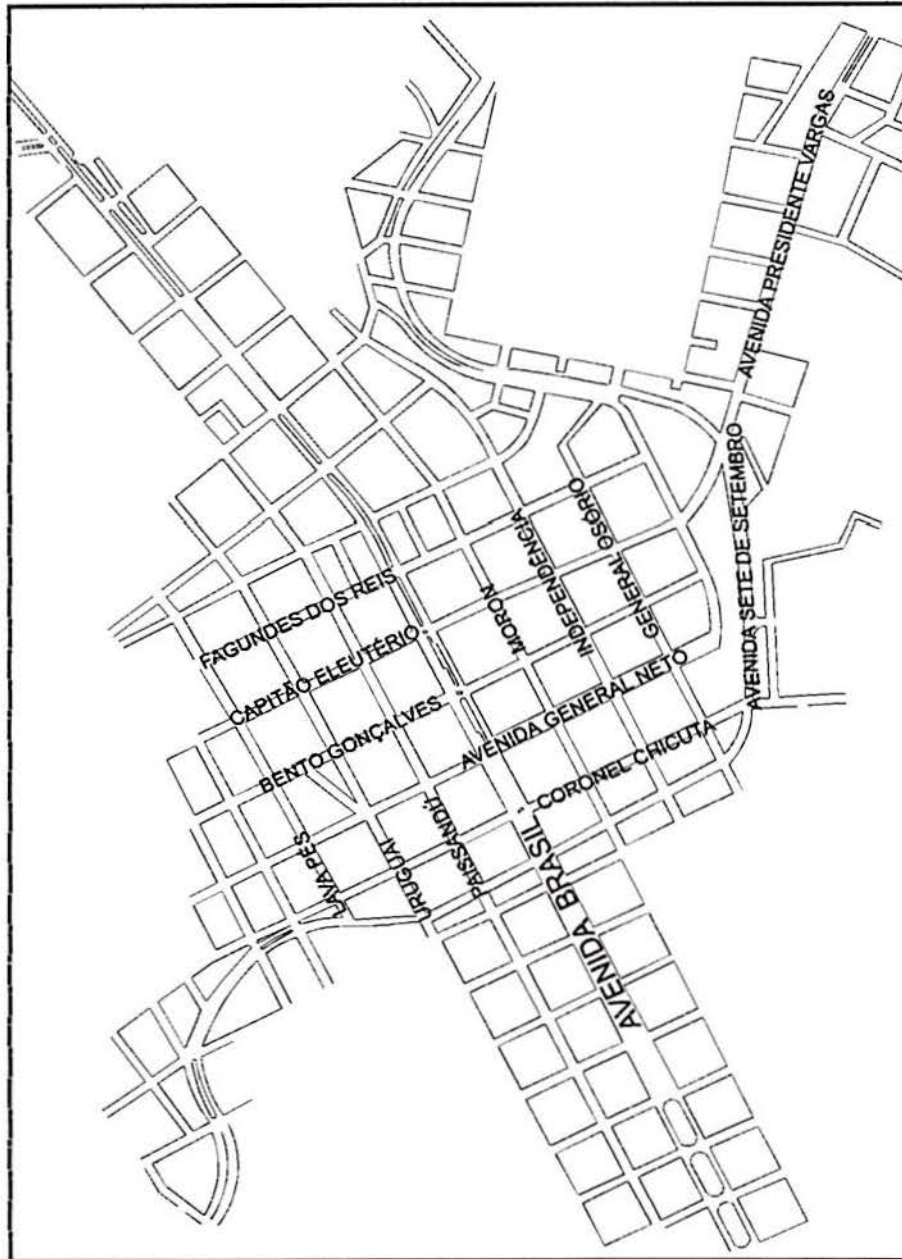


Figura 3.18 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

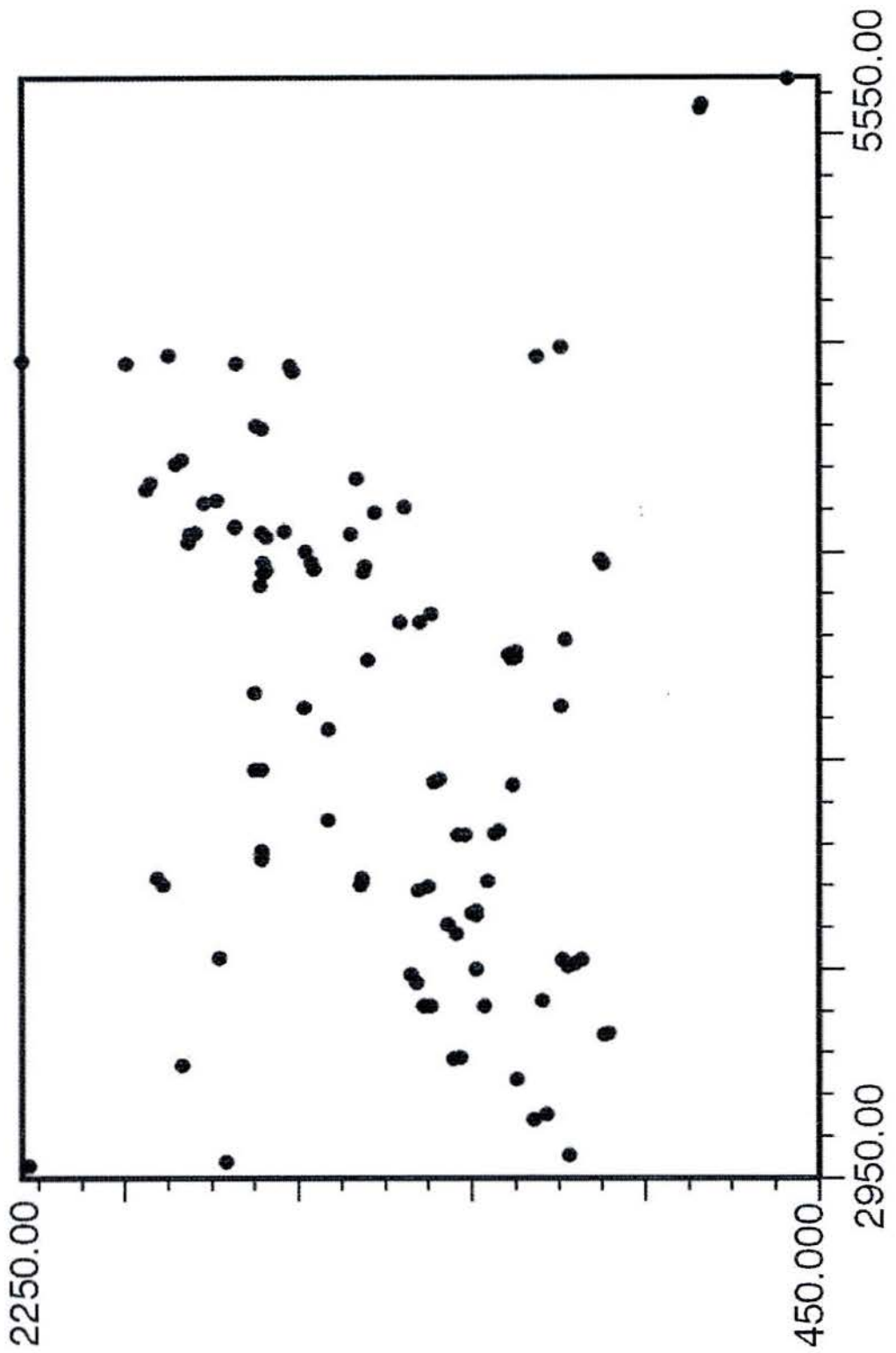


Figura 3.18 (b) - Localização das sondagens SPT da camada III.

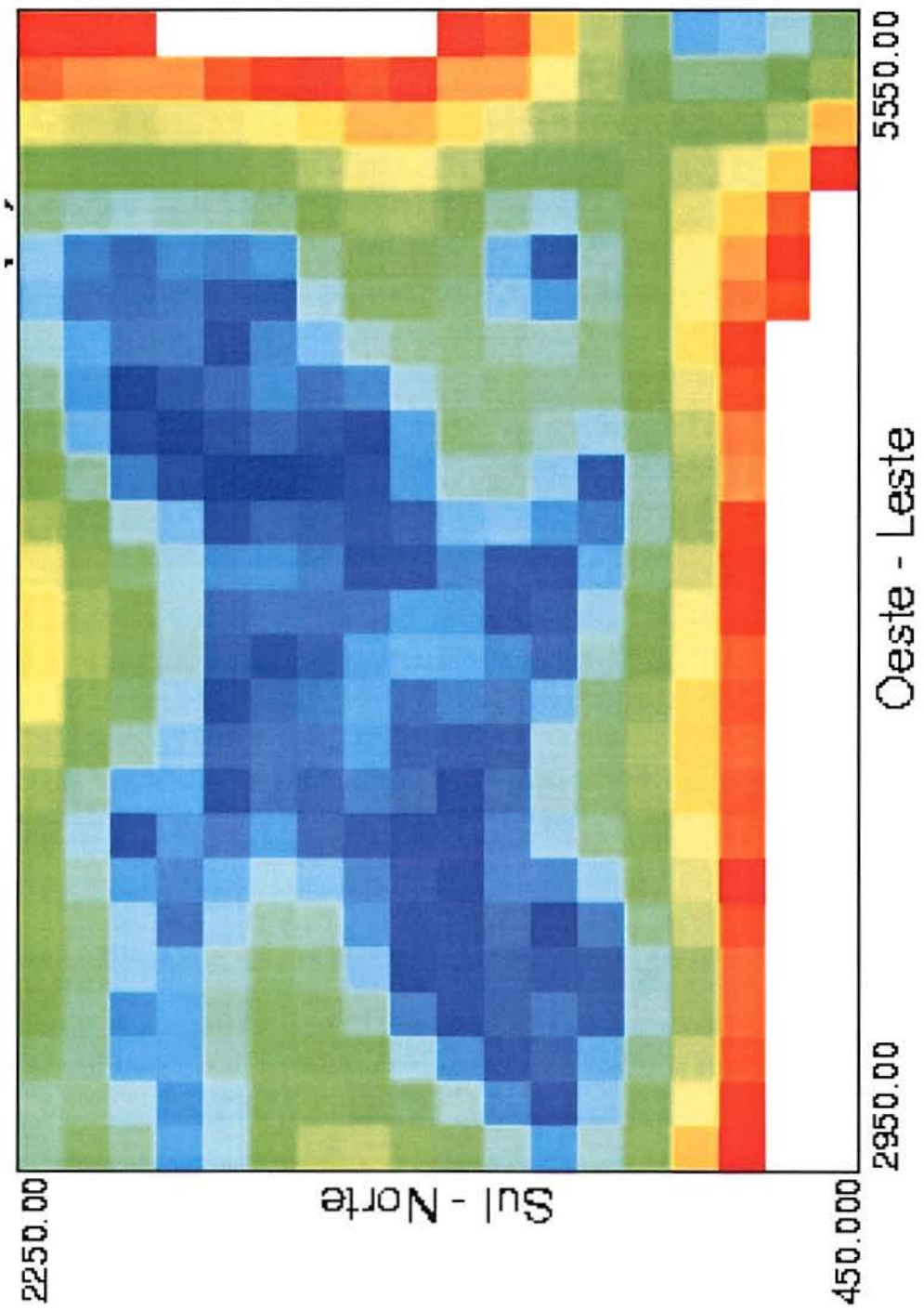
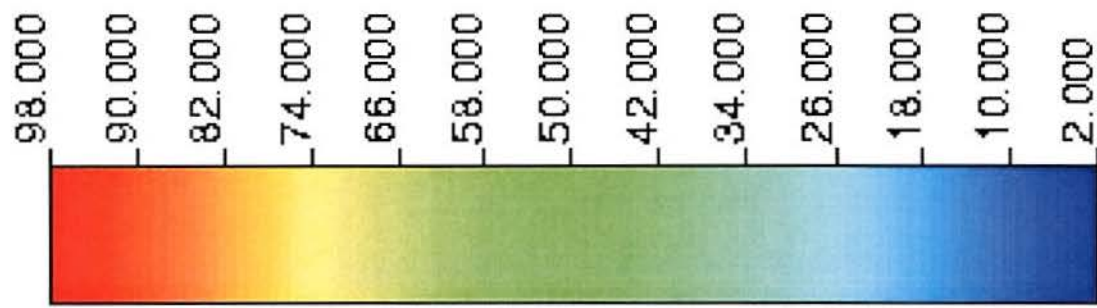


Figura 3.18 (c) - Variância de Estimativa dos valores de SPT krigados da camada III.

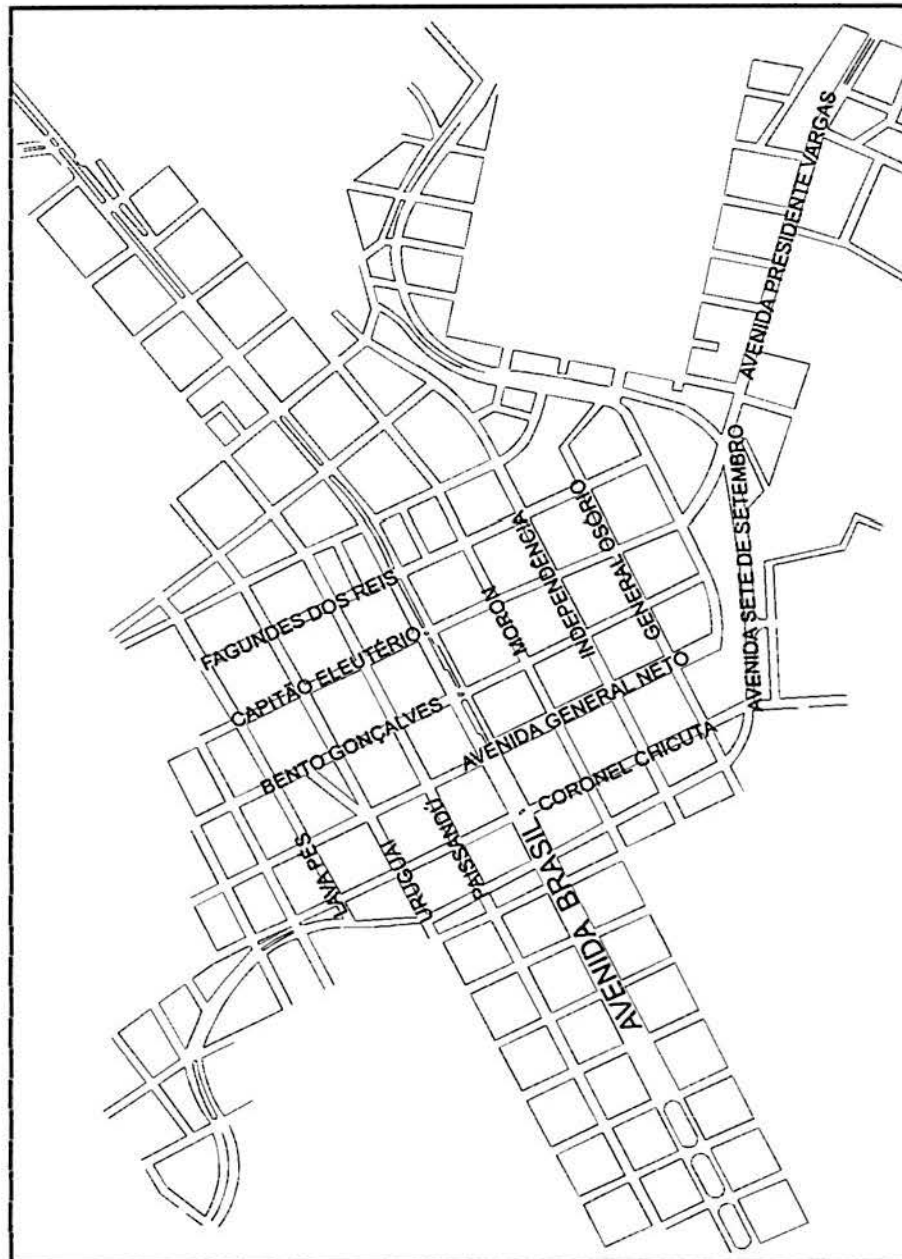


Figura 3.19 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

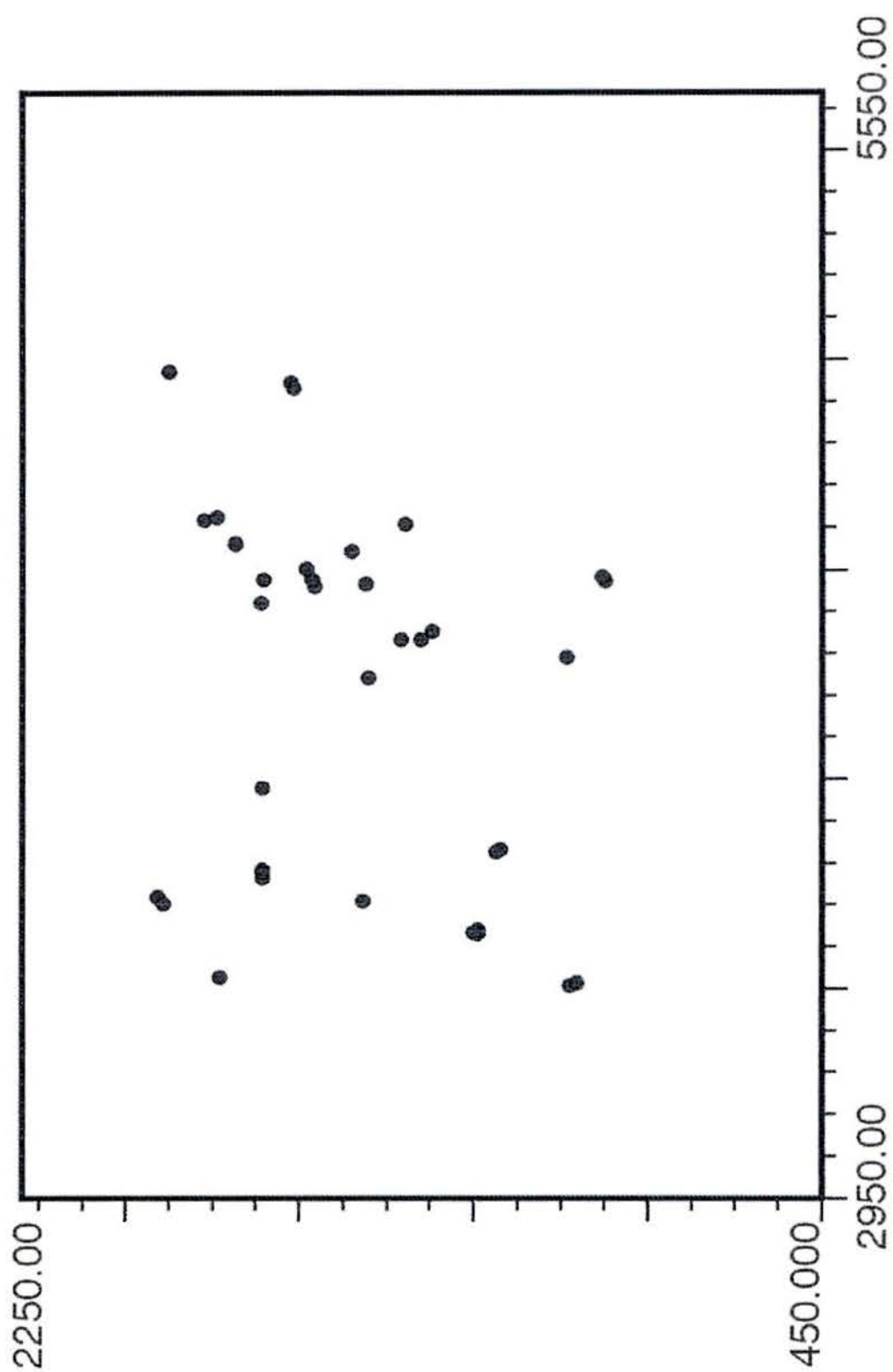


Figura 3.19 (b) - Localização das sondagens SPT da camada IV.

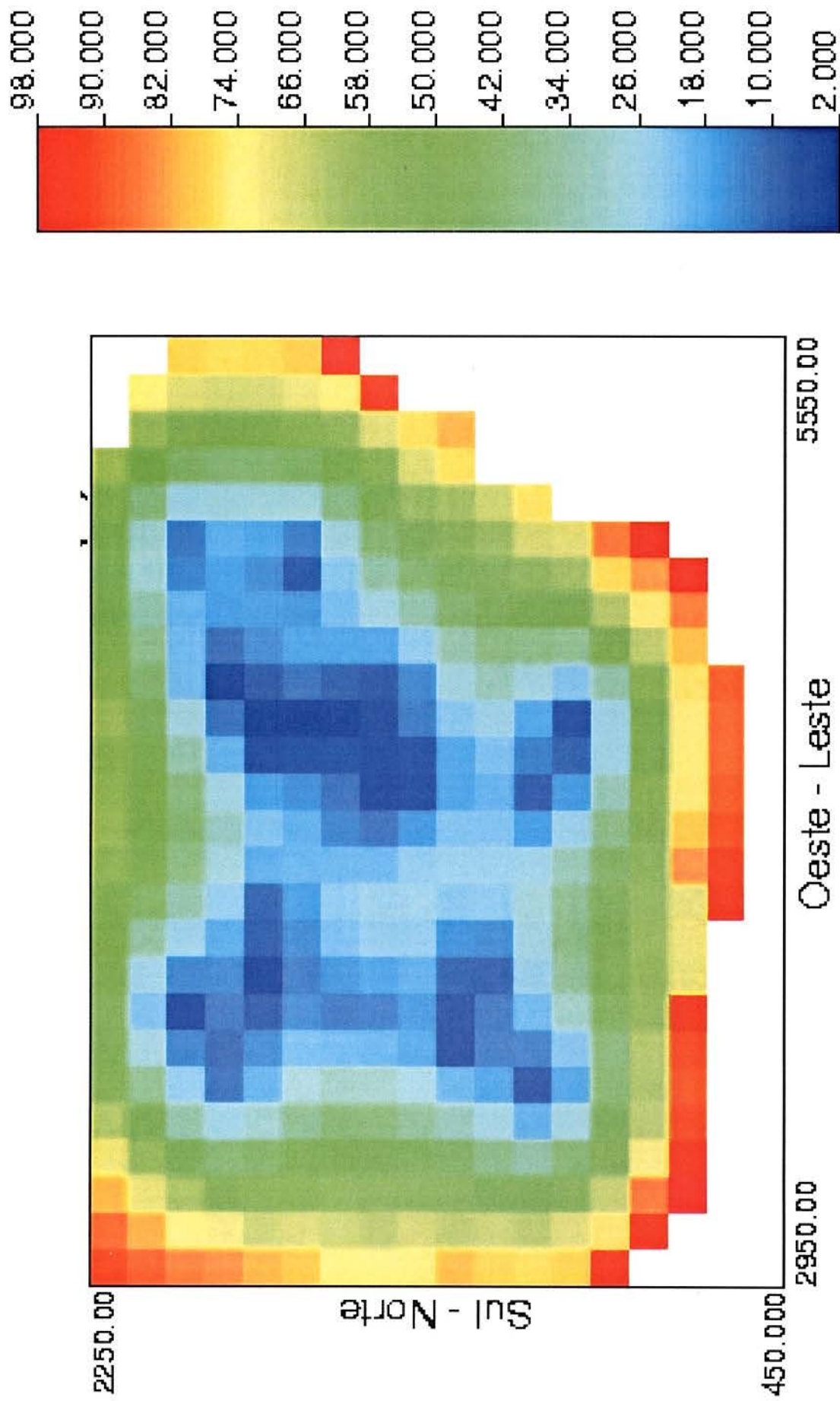


Figura 3.19 (c) - Variância de Estimativa dos valores de SPT krigados da camada IV.

Capítulo 4

Simulação Geoestatística

No presente capítulo têm-se por objetivo a realização de simulações estocásticas condicionais (geoestatística não-linear), mais especificamente a simulação seqüencial Gaussiana (ssG), objetivando a quantificação bloco-a-bloco das variabilidades dos índices de consistência do solo (N_{spt}), assim como o risco associado aos valores gerados no capítulo precedente.

Aborda-se a questão de normalização dos dados, testes de multinormalidade, simulação seqüencial Gaussiana, mudança de suporte e por fim suas validações com posterior geração de mapas. Cabe salientar que será apresentado todo o processo metodológico desenvolvido para a simulação, porém só mostrando resultados intermediários de uma camada (camada III) escolhida aleatoriamente. Os demais resultados das outras três camadas estão anexados ao fim dessa dissertação, conforme indicado no decorrer do texto. Os mapas finais de maior relevância para o objetivo deste trabalho serão apresentados nesse capítulo.

4.1 Simulação Condicional

A atividade relacionada à caracterização geotécnica de subsolos por métodos geoestatísticos requer o conhecimento da dispersão estatística da estimativa do atributo geológico de interesse. Então, o modelo da área

simulada é dito simulado condicionalmente, se esse honrar os valores nos pontos já amostrados e reproduzir as mesmas características de dispersão e continuidade espacial dos dados originais, ou seja, histograma e variograma. A simulação condicional é uma ferramenta muito importante dentro da geoestatística por apresentar uma maneira de quantificar a incerteza a respeito do atributo geológico em estudo.

A simulação condicional é qualitativamente usada para obtenção de figuras realistas da variabilidade espacial. Quantitativamente, elas são as ferramentas de escolha para avaliar o impacto da incerteza espacial nos resultados de procedimentos complexos, assim como o modelamento numérico de um sistema dinâmico ou a otimização econômica do desenvolvimento de um recurso natural. A simulação condicional é a estrutura do chamado Método de Monte Carlo (Chilès & Delfiner, 1999 p.453).

Ainda, Chilès & Delfiner (1999, p.460-461) apresentam vários métodos de simulação condicional existentes, sendo eles:

- simulação seqüencial Gaussiana;
- matriz de decomposição da covariância (decomposição LU);
- método das bandas rotativas (*turning bands*);
- método autoregressivo;
- janelas móveis;
- método da diluição;
- método espectral contínuo;
- método espectral discreto;
- hiperplanos de Poisson;
- método da integração;
- simulação seqüencial dos indicadores;
- método de truncagem gaussiana;
- método de Voronoi;
- método de poliedros de Poisson;
- método da substituição;
- simulação booleana;
- *simulated annealing*.

Costa (1997, p.130-132) apresenta uma síntese da evolução histórica de diferentes métodos de simulação condicional, enfocando os algoritmos seqüenciais, utilizando como base de partida o trabalho de Journel (1974).

A metodologia que será empregada nessa dissertação, como já mencionado anteriormente, será a simulação seqüencial Gaussiana (ssG). David (1977, p.325-327), Journel & Huijbregts (1978, p.494-498) e Deutsch & Journel (1998, p.119-124) apresentam aspectos teóricos referentes às simulações estocásticas condicionais.

Isaaks (1990) propôs um algoritmo seqüencial, que através de um caminho aleatório simula cada ponto de acordo com a sua função de distribuição condicional local, que pode ser determinada por krigagem simples, no caso de uma população de dados multinormal. Os dados condicionantes consistem no subconjunto de amostras, originais normalizadas e simuladas anteriormente, dentro da vizinhança do ponto a ser simulado.

4.1.1 Simulação Seqüencial Gaussiana

A simulação seqüencial gaussiana é um método para geração de realizações usando uma função randômica multivariada normal. O fundamento do método segue o teorema de Bayes demonstrando a equivalência entre uma imagem gerada a partir de uma distribuição multivariada e uma a partir da seqüência de distribuições condicionais univariadas (Olea, 1999 p.143).

Uma variável $Z_s(x)$ é interpretada como uma realização de uma Função Randômica (FR). Essa FR é caracterizada por uma função de distribuição (histograma) e uma função de covariância ou modelo variográfico (variograma). A idéia de simulação consiste em gerar outras realizações $z_s(x)$ a partir da FR (Journel & Huijbregts, 1978 p.508-510).

Cada ponto a ser simulado é representado por uma distribuição cumulativa de probabilidade condicional (*ccdf*), onde essas distribuições são derivadas de um modelo de distribuições multivariadas da função randômica

$Z(x)$. Em cada localização de x , todas as distribuições são especificadas por meio de sua média e variância, $F(x; z|(n))$, $\forall x \in \mathbf{A}$, onde \mathbf{A} é a área de estudo.

O princípio a que se baseia a simulação seqüencial Gaussiana (ssG) é de que em cada ponto simulado, seleciona-se L resultados equiprováveis. A simulação é dita condicional se honrar os valores dos dados em suas localizações: $z^{(l)}(x_\alpha) = z(x_\alpha) \forall l, l=1, \dots, L$ a partir da distribuição condicional local de probabilidade, ao invés de estimar um único valor (Deutsch & Journel, 1996 p.117). Além de a distribuição ser condicionada aos dados, cada valor simulado é agregado ao banco de dados, assim, a distribuição condicional local de probabilidade não é a mesma para todas as realizações. Isso se deve ao fato de o ponto inicial a ser simulado, bem como os demais, são selecionados aleatoriamente.

De acordo com Dimitrakopoulos (1998) os métodos de simulação seqüencial consistem dos seguintes passos:

- (i) seleção aleatória de um bloco a ser simulado (cada bloco é selecionado somente uma vez);
- (ii) estimativa da distribuição condicional local de probabilidade do bloco selecionado;
- (iii) seleção aleatória de um valor da distribuição condicional local de probabilidade estimada;
- (iv) inclusão do valor simulado no banco de dados original;
- (v) repetição dos passos (i) a (iv) até que todos os blocos tenham um valor;
- (vi) repetição dos passos (i) a (v) para gerar múltiplos modelos igualmente prováveis.

No método de simulação seqüencial Gaussiana, a distribuição condicional local de probabilidade é determinada por meio de krigagem simples, a qual define a média e a variância da distribuição. Esse método assume que essa distribuição seja estacionária e que siga a forma de uma distribuição normal standard, ou seja, média igual a zero e variância igual a 1. Para isso, necessita-se normalizar o banco de dados em estudo.

4.1.2 Normalização dos Dados

A normalização da distribuição das amostras do banco de dados em estudo é realizada através de uma transformação gerada a partir de uma função monotônica crescente, $\phi(\cdot)$. Os dados originais, z-valores, são transformados em y-valores $y(x_\alpha) = \phi[z(x_\alpha)]$, $\alpha = 1, \dots, n$, que são chamados de escores normalizados. A transformação de uma função randômica $Z(x)$ com qualquer cdf (função de distribuição cumulativa) $F(z)$ para uma função randômica $Y(x)$ com um padrão Gaussiano cdf $G(y)$ é vista pela Figura 4.1 e descrita pela Fórmula (4.1) (Goovaerts, 1997 p.266-269; David, 1988 p.14-15):

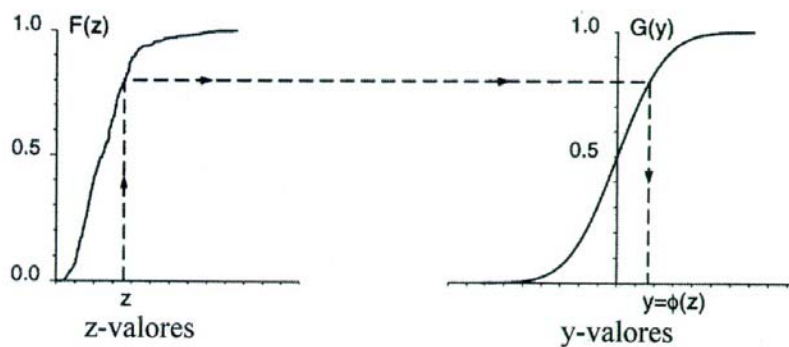


Figura 4.1 – Exemplo da transformação da distribuição original em normalizada.
(Fonte: Goovaerts, 1997 p.268).

$$Y(x) = \phi[Z(x)] = G^{-1}\{F[Z(x)]\} \quad (4.1)$$

onde:

$Y(x)$ = variável regionalizada que representa os y-valores;

$Z(x)$ = variável regionalizada que representa os z-valores;

ϕ = função de transformação;

G^{-1} = distribuição Gaussiana inversa ou função quantil da função randômica $Y(x)$.

De acordo com Goovaerts (1997), na prática o processo de normalização é realizado em três etapas:

- (i) os n dados originais $z(x_\alpha)$ devem ser ordenados em ordem crescente:

$$[z(x_{\alpha'})]^{(1)} \leq \dots \leq [z(x_{\alpha})]^{(k)} \leq \dots \leq [z(x_{\alpha''})]^{(n)}$$

onde k representa o ordenamento dos valores $z(x_{\alpha})$. Pela transformação ser monotônica, dados de mesmo valor serão ordenados de modo que seja dada prioridade aos dados cuja média dos valores circunvizinhos seja menor;

(ii) a distribuição ordenada é computada como:

$p^*k = (k/n) - (0,5/n)$, para dados desagrupados onde o espaço foi igualmente amostrado;

$$p^*k = \sum_{i=1}^k w_i - 0,5wk \in [0,1], \text{ se os dados estão agrupados, onde } w_i \text{ são}$$

os pesos de desagrupamento;

(iii) os p -quantis da distribuição original são combinados com os p -quantis da distribuição normal:

$$y(x_{\alpha}) = G^{-1}\{F^*[z(x_{\alpha})]\} = G^{-1}(p^*k) \quad (4.2)$$

Assim, na maioria dos casos, uma transformação de escores normalizados precede os passos da simulação condicional, e uma retro-transformação dos valores simulados é requerida ao final, a fim de restaurá-los à escala original. A seguir observa-se o histograma obtido da normalização dos dados para a camada III, bem como seu histograma de dados cumulativos (Figura 4.2), nos quais pode-se observar que a média é igual a zero e o desvio padrão igual a um para a normalização dos dados. Para as demais camadas os histogramas apresentam-se no Apêndice C.

Segue o variograma dos dados normalizados da camada III para visualização do seu patamar, que é igual a um, bem como da sua variabilidade espacial (Figura 4.3). Priorizou-se a análise apenas das direções de maior e menor continuidade (90° e 0°) de interesse. Em anexo (Apêndice C), pode-se observar as tabelas de parâmetros que geraram os variogramas dos dados normalizados, assim como os variogramas das demais camadas.

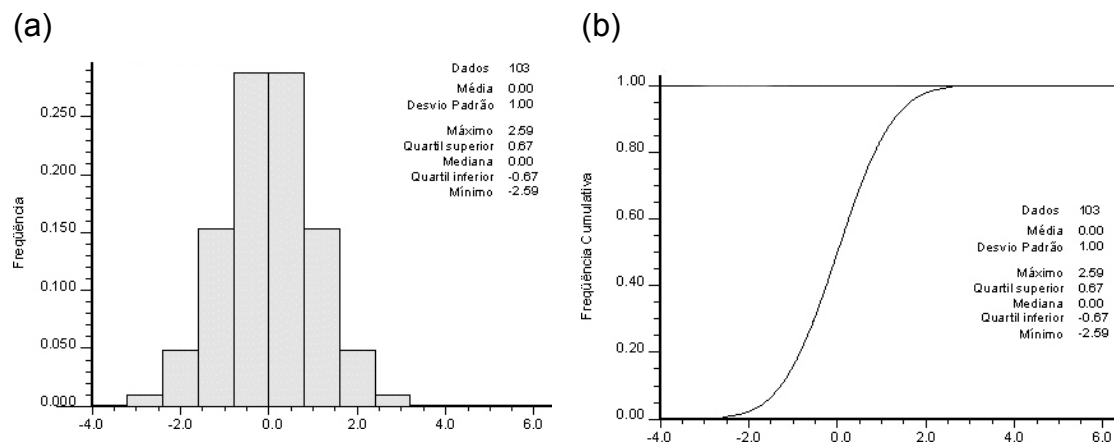


Figura 4.2 – Histograma dos dados normalizados da camada III (a). Histograma dos dados cumulativos desta mesma camada (b).

Depois de computados os variogramas normalizados de todas as camadas, nota-se que suas formas, direções de máxima e mínima continuidade, e alcances resultaram semelhantes aos modelos variográficos dos dados originais.

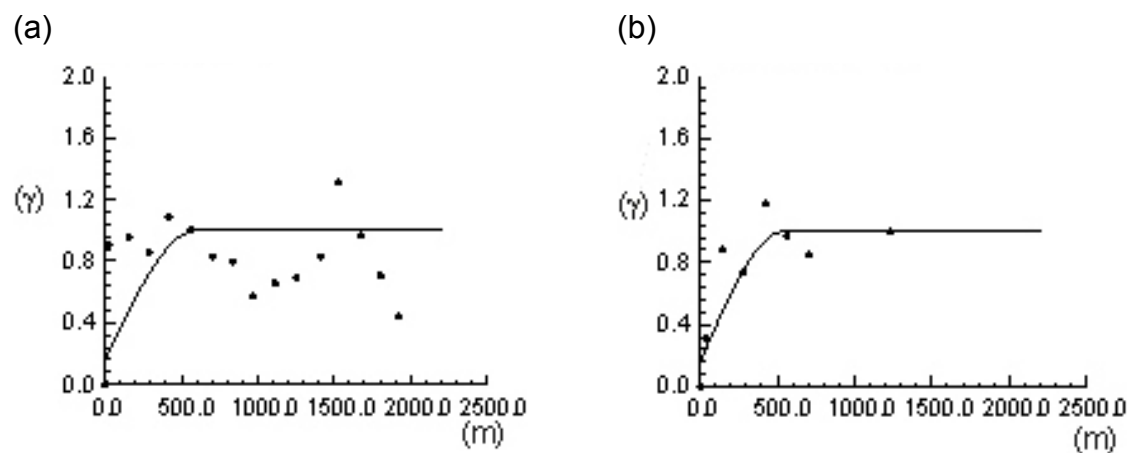


Figura 4.3 – Variograma direcional dos dados normalizados da camada de III a 0° (a), e 90° (b).

4.1.3 Verificação da Multinormalidade

A multinormalidade é assumida pela simulação seqüencial Gaussiana e alguns testes são recomendados para validar esta hipótese. Os dois testes

para verificação da binormalidade que serão utilizados são apresentados como segue:

- (i) a relação madograma/variograma, deve se aproximar à constante 0,564 e deve ser verificada para diversas distâncias h (*lags*), de acordo com a seguinte formulação:

$$\frac{\gamma_1(h)}{\sqrt{\gamma_2(h)}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} = 0,564 \quad (4.3)$$

onde:

$$2\gamma_1(h) = E[|Y(x+h) - Y(x)|]$$

$$2\gamma_2(h) = E\{[Y(x+h) - Y(x)]^2\}$$

- (ii) comparação entre a função covariância de uma distribuição cumulativa bivariada calculada para certos quantis e o covariograma da indicatriz calculado para os mesmos quantis. O covariograma da indicatriz deve reproduzir esse modelo de função covariância da distribuição cumulativa bivariada. Nesse teste, geralmente, se utilizam os quartis inferior (0,25), superior (0,75) e a mediana (0,50) (Deutsch & Journel, 1996 pp.227-228).

Pela necessidade de se checar a normalidade das distribuições bivariadas dos dados anteriormente normalizados, para após assumir que uma função aleatória seja multiGaussiana, é que foram realizados tais testes. Os testes para as variáveis em estudo normalizadas são apresentados no Apêndice D, juntamente com seus resultados. Após a realização destes testes de binormalidade, aplicou-se a simulação seqüencial gaussiana (ssG).

4.2 Simulação Seqüencial Gaussiana no espaço normal

Foram realizadas simulações partindo dos dados normalizados, resultando em valores simulados no espaço Gaussiano, utilizando as mesmas leis de correlação da normalização inicial, porém no sentido inverso.

Os dados serão inicialmente simulados no suporte pontual. Considerou-se o suporte de 5m x 5m como sendo o suporte correspondente e representativo de cada amostras, por facilidade computacional. Posteriormente serão retro-transformados para o espaço original, a partir daí será realizada a mudança de suporte para uma malha de 100m x 100m, mesmo tamanho de bloco utilizado na krigagem ordinária.

Para os ajustes variográficos realizados anteriormente, buscou-se escolher cuidadosamente o tamanho da elipse de busca de acordo com os alcances da variável em estudo, em cada direção considerada. Dentro de parâmetros que devem ser assumidos para a realização das simulações, se deu importância para a escolha do número de dados simulados e originais a serem levados em conta a cada realização. Dando maior importância aos dados originais, a fim de favorecer a possível proximidade dos histogramas e variogramas dos dados simulados com os originais. Tais resultados podem ser observados na Figura 4.4.

Foram realizadas 50 simulações, ou seja, 50 possíveis cenários equiprováveis, no suporte considerado pontual, para cada uma das camadas em estudo. Dessas 50, foram selecionadas aleatoriamente cinco realizações, para que fossem apresentados e avaliados os resultados. São elas: 03, 18, 24, 39 e 43. Os respectivos histogramas representativos da camada III destas simulações são apresentados na Figura 4.4 e para as demais camadas encontram-se no Apêndice E.

Verifica-se claramente que os histogramas das cinco simulações selecionadas honraram o histograma condicionante (Figura 4.2) ocorrendo pequenas variações dos seus valores como esperado (flutuações ergódicas). Mas em geral, a média oscila em torno de 0 e o desvio padrão de 1.

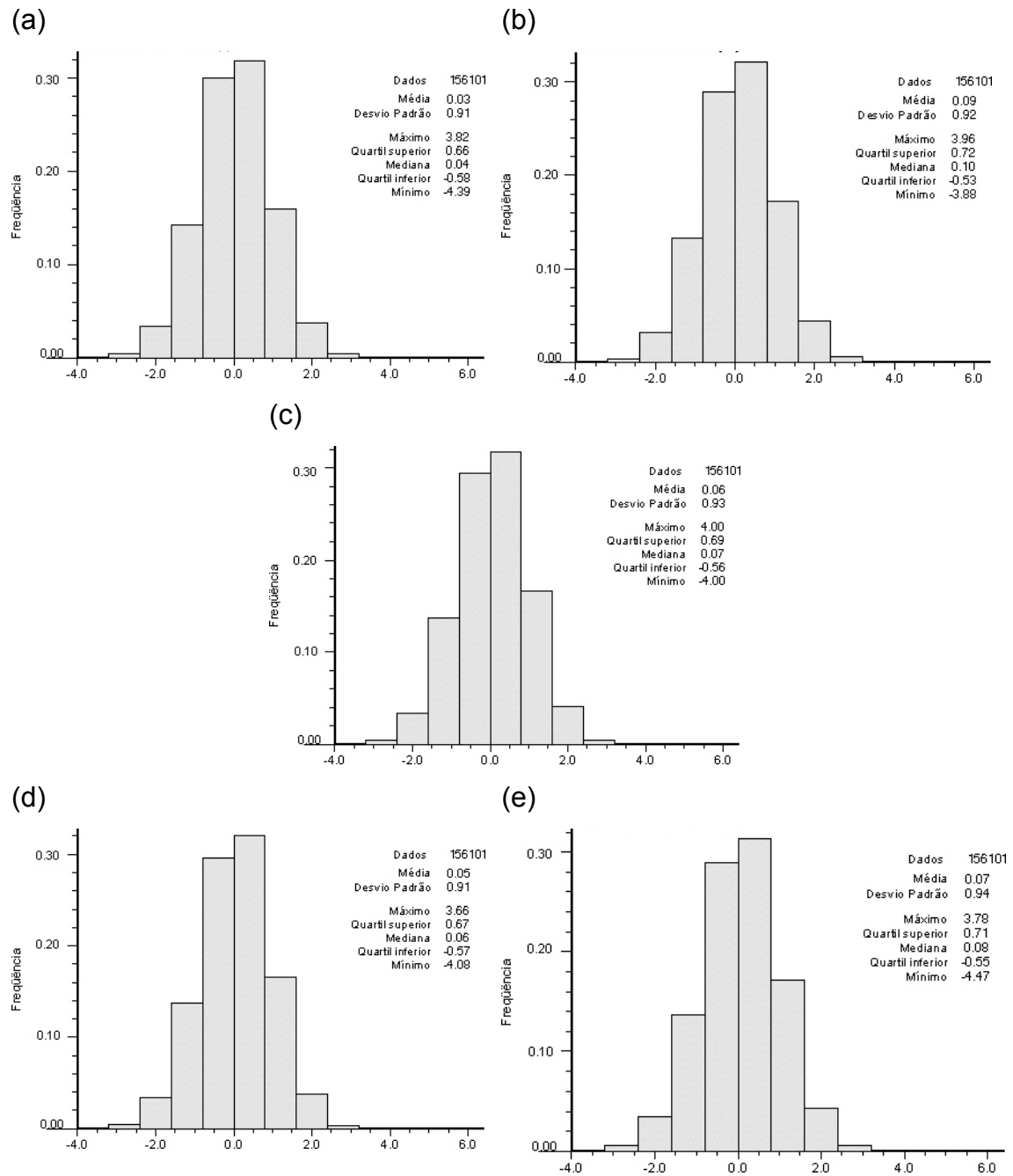


Figura 4.4 – Histograma de cinco simulações selecionadas aleatoriamente representativas da camada III, dos dados normalizados [3 (a), 18 (b), 24 (c), 39 (d) e 43 (e)].

4.2.1 Validação dos Resultados

A simulação seqüencial deve gerar realizações que reproduzam em média o histograma e o variograma das amostras condicionantes. A perfeita reprodução é raramente atingida (inclusive indesejável) devido à existência das chamadas flutuações ergódicas. Existem vários fatores que controlam a magnitude dessas flutuações apresentadas por uma realização:

- (i) o algoritmo utilizado para gerar as realizações. Algoritmos de simulação seqüencial Gaussiana e simulação seqüencial da indicatriz, reproduzem o modelo condicionante de segunda ordem somente na média de muitas realizações;
- (ii) a densidade dos dados condicionantes. Quanto mais dados condicionantes amostrais forem usados para efetuar uma realização, mais similar será a estatística da realização em relação à estatística dos dados amostrais;
- (iii) os parâmetros do variograma e o tamanho da área em que será realizada a simulação. A magnitude das flutuações ergódicas dos variogramas das realizações de um processo de simulação serão significativas quando o alcance do modelo variográfico é grande em relação ao tamanho da área a ser simulada, particularmente se o efeito pepita for pequeno.

Seguem abaixo, as figuras que representam a ergodicidade dos variogramas para a validação dos dados simulados no espaço normal da camada III (Figura 4.5). Observa-se para tanto, que a ergodicidade é visível devido aos fatores citados acima. A ergodicidade para as demais camadas é apresentada no Apêndice E.

Pode-se observar nos variogramas apresentados abaixo, que do ponto inicial do variograma até o momento onde atinge o maior alcance (range/patamar), a ergodicidade flutua aproximadamente 50% para cima e 50% para baixo, em geral em torno do modelo condicionante (Figura 4.3), comprovando a não-tendenciosidade do método.

Após isso, os dados foram retro-transformados, ou seja, transformados ao seu espaço original, utilizando-se de rotinas computacionais, para posterior realização de mudança de suporte, que é apresentada a seguir.

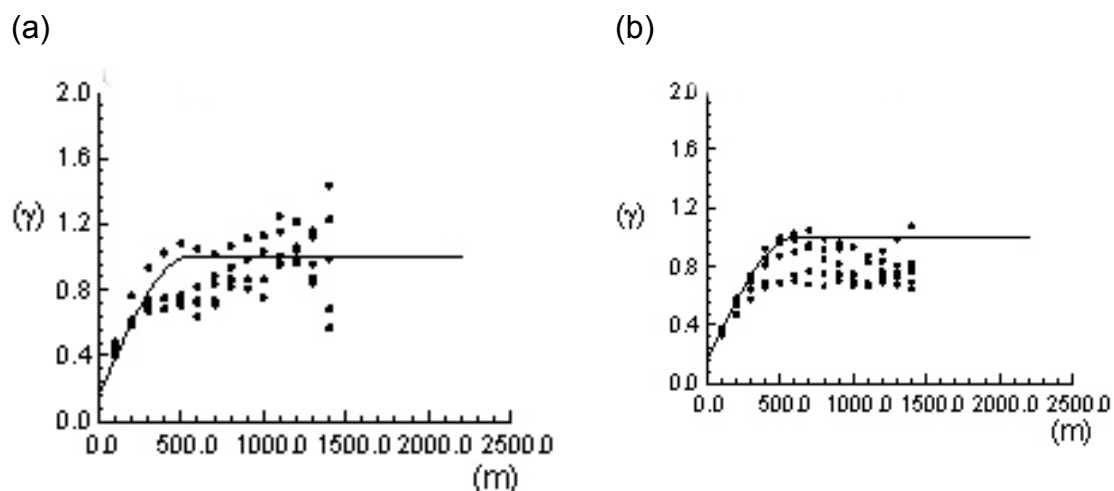


Figura 4.5 – Flutuações nas direções de maior e menor continuidade espacial dos dados normalizados da camada III (suporte pontual – 5x5m).

4.3 Mudança de Suporte a *Posteriori*

As sondagens de penetração dinâmica (SPT), são informações pontuais. Nessa etapa do trabalho se realizará a mudança de suporte amostral do banco de dados, para blocos de 100m x 100m, igual ao suporte de blocos utilizado anteriormente na krigagem ordinária.

Os conceitos de suporte e de efeito suporte são assim fundamentais no tratamento geoestatístico de qualquer variável regionalizada. Embora a mudança de suporte não faça parte da simulação em si, este é um passo de extrema importância para a abordagem da variância no estudo de variabilidade em geral.

Seria ideal que as amostras coletadas em campo tivessem o mesmo suporte do volume do bloco a ser estimado, mas isso é praticamente impossível de ocorrer. Com o aumento do suporte amostral, reduz-se a variância dos dados e conseqüentemente seu patamar (*sill*) no variograma reduzirá. A distribuição do histograma se apresentará de uma forma

aparentemente mais simétrica e a média permanecerá a mesma, por esta ser uma propriedade intrínseca da população.

O conceito de variância de dispersão, bem como suas diferenças e relações entre variâncias ponto-bloco, bloco-bloco e ponto-depósito, segundo a relação de krige, são abordadas em Isaaks & Srivastava (1989, cap.19).

A variância é a medida de dispersão em torno da média, e é muito sensível a valores extremos (*outliers*). Para uma variável aleatória \mathbf{x} , a variância $Var(\mathbf{x})$ é o valor esperado $E[(\mathbf{x}-m)^2]$, onde m é a média.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right] - m^2 \quad (4.4)$$

onde:

σ^2 = variância;

n = nº de valores amostrais;

$(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ = valores amostrais;

m = média aritmética amostral.

Neste estudo de caso, optou-se pela mudança de suporte *a posteriori*, ou seja, realizar todo o processo de simulação e validações no suporte amostral e posteriormente realizar a mudança para suporte de blocos. Esse procedimento está fundamentado em Journel & Huijbregts (1978, p.511-513).

A alternativa aqui adotada para que se obtivessem valores simulados em blocos, consistiu na simulação de valores considerados pontuais $z_{sc}(x)$ em uma malha de 5m x 5m. A partir daí, aplicou-se o método da média móvel de todos os pontos simulados que estivessem incluídos em um bloco de 100mx100m. Isso resulta numa aproximação da simulação condicional direta de valores de consistência N_{spt} de blocos $z_{v,sc}(x)$. Como a simulação pontual é condicionada aos dados z_0 , a simulação em blocos será conseqüentemente condicionada aos mesmos dados.

O bloco é aproximado por n pontos interiores $(x_i, i=1$ a $n)$, e o verdadeiro valor do atributo de interesse do bloco v , obtido pela equação que segue:

$$Z_v(x) = \frac{1}{v} \int_{v(x)} Z(y) dy \quad (4.5)$$

é aproximado pela média aritmética com os n valores dos pontos interiores de discretização do bloco, conforme a Equação 4.6:

$$Z_v^*(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(x_i) \quad (4.6)$$

Assim, a média aritmética é que é simulada. Neste estudo de caso, assume-se que a densidade de discretização do bloco v , é de 400 blocos com 5m x 5m interiores a um bloco de 100m x 100m. Essa densidade é suficiente para aceitar-se a aproximação da Equação 4.6 pela Equação 4.5, considerando assim, que a função estrutural semivariograma caracteriza a variabilidade espacial do suporte v .

Este método de simular blocos por janelas móveis de pontos (pequenos blocos=5mx5m) pré-simulados apresenta algumas vantagens, reunidas e apresentadas em Stangler (2001):

- (i) permite uma simulação simultânea de valores do atributo em blocos e em amostras interiores;
- (ii) não há nenhuma necessidade de assumir premissas sobre a variabilidade estrutural da distribuição univariada da FR regularizada $Z_v(x)$. A simulação como um todo é baseada apenas na informação disponível, ou seja, a informação obtida das amostras;
- (iii) a partir da simulação no suporte quase-pontual, a geração de uma simulação para um novo tamanho de blocos, ou mesmo para blocos de dimensão variável, é obtida diretamente (Chilès & Delfiner, 1999 p.572).

Os resultados das simulações executadas são apresentados a seguir no suporte final de blocos (100m x 100m). A implementação de todas as simulações realizadas seguiu toda a fundamentação teórica apresentada até aqui.

4.4 Imagens Equiprováveis

Estabeleceu-se a camada **III** para mostrar todos os resultados das etapas intermediárias decorrentes do processo de simulação. A partir deste momento, serão apresentados os resultados finais de todas as camadas (**I**, **II**, **III** e **IV**) no espaço retro-transformado e no suporte de blocos final de 100mx100m. Para isso, gerou-se cinco mapas dos 50 possíveis cenários proporcionados pelo processo de simulação para cada uma das camadas em estudo [Figuras 4.6(c) a 4.25(c)]. Estes mapas são correspondentes a valores de resistência de N_{spt} . Deve-se observar a escala de cores a qual apresenta valores de resistência que diferem para cada camada, sendo esses representativos de valores de SPT.

Sobreposto às Figuras 4.6(c) a 4.25(c), encontra-se em papel transparente para melhor visualização, o mapa correspondente as principais ruas e avenidas da área de estudo [Figuras 4.6(a) a 4.25(a)], bem como o mapa das locações dos furos de sondagens para cada camada [Figuras 4.6(b) a 4.25(b)].

Nas cinco realizações analisadas para a camada **I** apresentadas nas Figuras 4.6(c) a 4.10(c), predominam valores baixos de SPT em torno de 3 a 10 golpes na maior parte da área de estudo. Duas regiões apenas que englobam de 2 a 3 quarteirões, apresentam na maioria das simulações valores mais elevados de resistência, variando entre 15 e 28 golpes. Essas duas regiões estão circuladas e podem ser visualizadas sobrepondo o mapa de locação das amostras [Figuras 4.6(b) a 4.10(b)] sobre os resultados das simulações. Essas áreas isoladas de valores mais elevados de SPT justificam-se como locais que apresentam pedras falsas ou matacões, pois de acordo com a experiência local da empresa Multisolos, se considera a Rua Independência como sendo um divisor da cidade, onde ali foram detectadas em algumas sondagens as presenças desses matacões. Uma dessas áreas coincide com o estimado anteriormente por krigagem ordinária (Figura 3.12).

De uma forma geral, esta camada possui uma predominância de valores mais baixos (solo menos resistente), na sua maioria 5 a 8 golpes. A espessura de solo 0 a 5m, correspondente à camada **I**, engloba as fundações superficiais com aproximadamente 1 a 1,5m de profundidade, executadas

nas obras civis da cidade em estudo. No entanto, esse valor de resistência é considerado aceitável também pelo tipo de solo que compõem essa camada, que na maioria dos perfis de sondagens analisados, apresenta-se como uma argila vermelha de consistência média.

Nestas mesmas profundidades correspondentes à camada I são executadas micro-estacas ou também denominadas em outras regiões de estacas broca, essas executadas a profundidades correspondentes a 10ϕ , sendo os diâmetros (ϕ) usuais de 20 e 25 centímetros. Cabe ressaltar, que este tipo de fundação é considerada profunda pela sua funcionalidade com o atrito lateral e ponta. O porte de obra compatível a esta camada pela resistência de solo, tipos de fundações executadas e profundidades, são de até 3 pavimentos.

É possível também realizar um paralelo com a geologia local apresentada no capítulo 2, onde se percebe que esta camada é basicamente formada por um solo que sofreu um maior processo de intemperismo ou também chamado de solo laterítico. Esse, perdeu praticamente todas as características da rocha mãe que lhe deu origem, neste caso, como será visto na camada IV, uma rocha de origem basáltica. Ocorre que, geralmente, as camadas superiores de solo apresentam menor resistência, por não sofrerem grandes sobrecargas, por ser um material inconsolidado e também pelo solo ser formado por materiais decompostos.

A camada II de 5 a 12 m de profundidade representadas pelas Figuras 4.11(c) a 4.15(c), começa a apresentar grandes áreas com considerável aumento de suas resistências e poucas ou mesmo isoladas áreas que ainda apresentam baixas resistências (3 a 8 golpes).

As três áreas que se considerou um aumento brusco de resistência (18 a 40 golpes), apresentam-se circuladas no mapa de locação de amostras de sondagem [4.11(b) a 4.15(b)]. É importante observar que as duas regiões apontadas na camada I, como sendo áreas com maior ganho de resistência, aparecem novamente nesta camada.

De acordo com os perfis de sondagens analisados, o solo a estas profundidades apresenta-se mais resistente, caracterizado tátil-visualmente como uma argila vermelha siltosa com pigmentos amarelos de consistência

média a rija. Deste ponto em diante, a geologia local começa a aparecer de uma forma mais clara, pois este solo já apresenta resíduos de alterações da rocha que o deu origem.

A camada **II** e **IV**, em comparação com as camadas **I** e **III**, são as menos representativas em nível de fundações, pois a maioria das fundações executadas na cidade de estudo encontra-se nas profundidades das camadas **I** e **III**. A terceira camada (**III**) envolve as profundidades de 12 a 20m, onde o solo de menor resistência é o de 12 golpes, este localizado predominantemente nas áreas mais extremas (bordas) da área de estudo.

Considerou-se adequado apontar uma grande área, que pode ser visualizada com a sobreposição do mapa de locação de amostras [Figuras 4.16(b) a 4.20(b)] sobre as simulações. Essa área aproxima-se ou mesmo em muitos locais já atinge o impenetrável [Figuras 4.16(c) a 4.20(c)]. As principais resistências na maior parte desta área giram em torno de 20 a 42 golpes.

Esta camada (**III**) é basicamente formada por argila vermelha silte arenosa com pigmentos amarelos de consistência rija, conforme os perfis de sondagens existentes no banco de dados. Este solo mostra a maior proximidade com o impenetrável e também menor índice de material intemperizado comparativamente com as camadas superiores.

Devido à elevada resistência em boa parte das regiões, é que se justifica esta como sendo a principal camada para apoiar as fundações profundas. São executadas edificações acima de 4 pavimentos nestas áreas com fundações assentadas nessas profundidades. Os principais tipos de fundações executadas na área de estudo são estacas escavadas profundas do tipo Rotativa e Strauss, com diâmetros variando de acordo com as cargas solicitadas pela obra. As estacas rotativas são utilizadas para valores de SPT de 36 a 40 golpes e a do tipo Strauss para valores de SPT de 14 a 16 golpes, valores estes correspondentes à resistência do solo para parada do equipamento de escavação.

Dando continuidade às análises das camadas, será analisado o último nível (camada **IV**), representativo das profundidades de 20 a 26 metros. Circulou-se duas regiões que podem ser vistas sobrepondo o mapa de locação das amostras sobre as realizações (Figuras 4.21 a 4.25). Essas

regiões apresentam solos de menor resistência para esta camada, 20 a 25 golpes. As demais áreas são solos de grande resistência, onde se estima que na maior parte seja grande a possibilidade de ter atingido o nível do impenetrável.



Figura 4.6 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

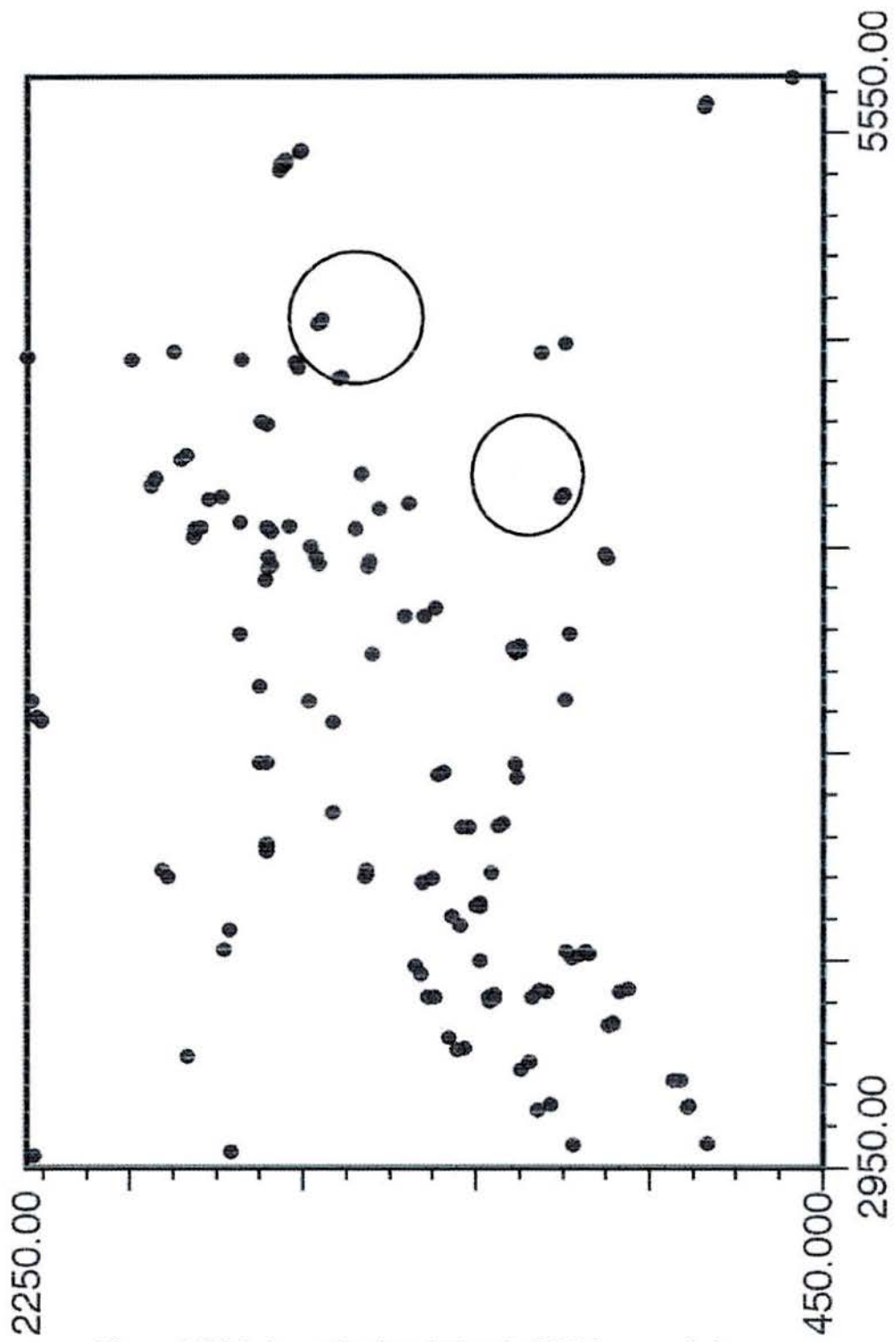


Figura 4.6 (b) - Localização dos dados de SPT da camada I.

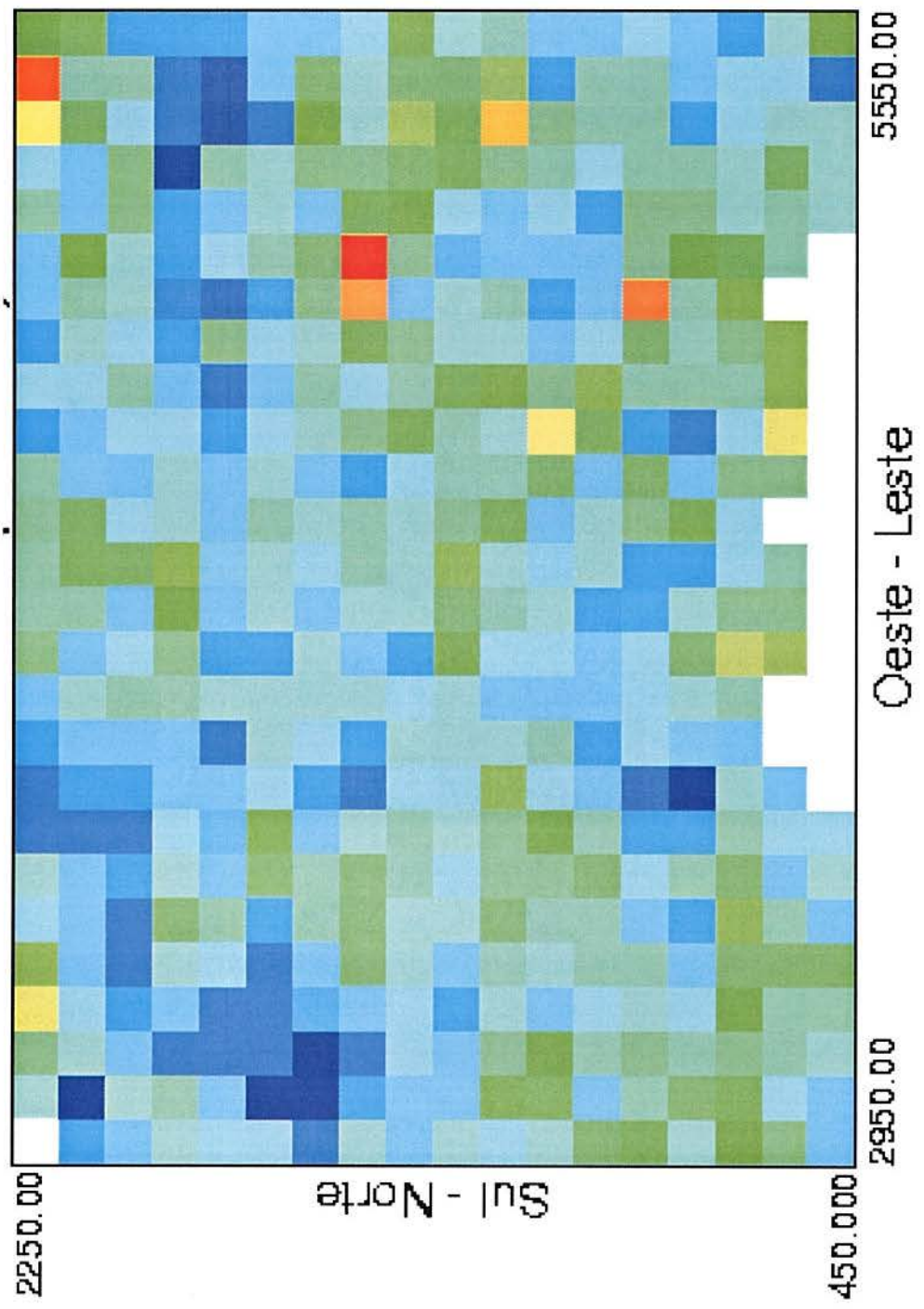
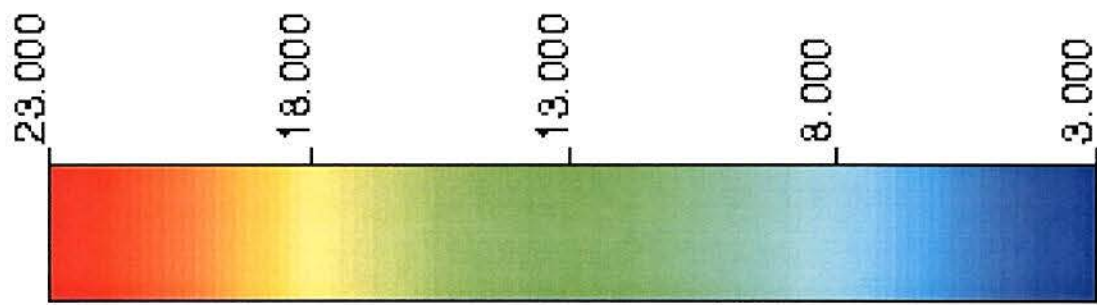


Figura 4.6 (c) - Realização n°03, para dados de SPT da camada I.

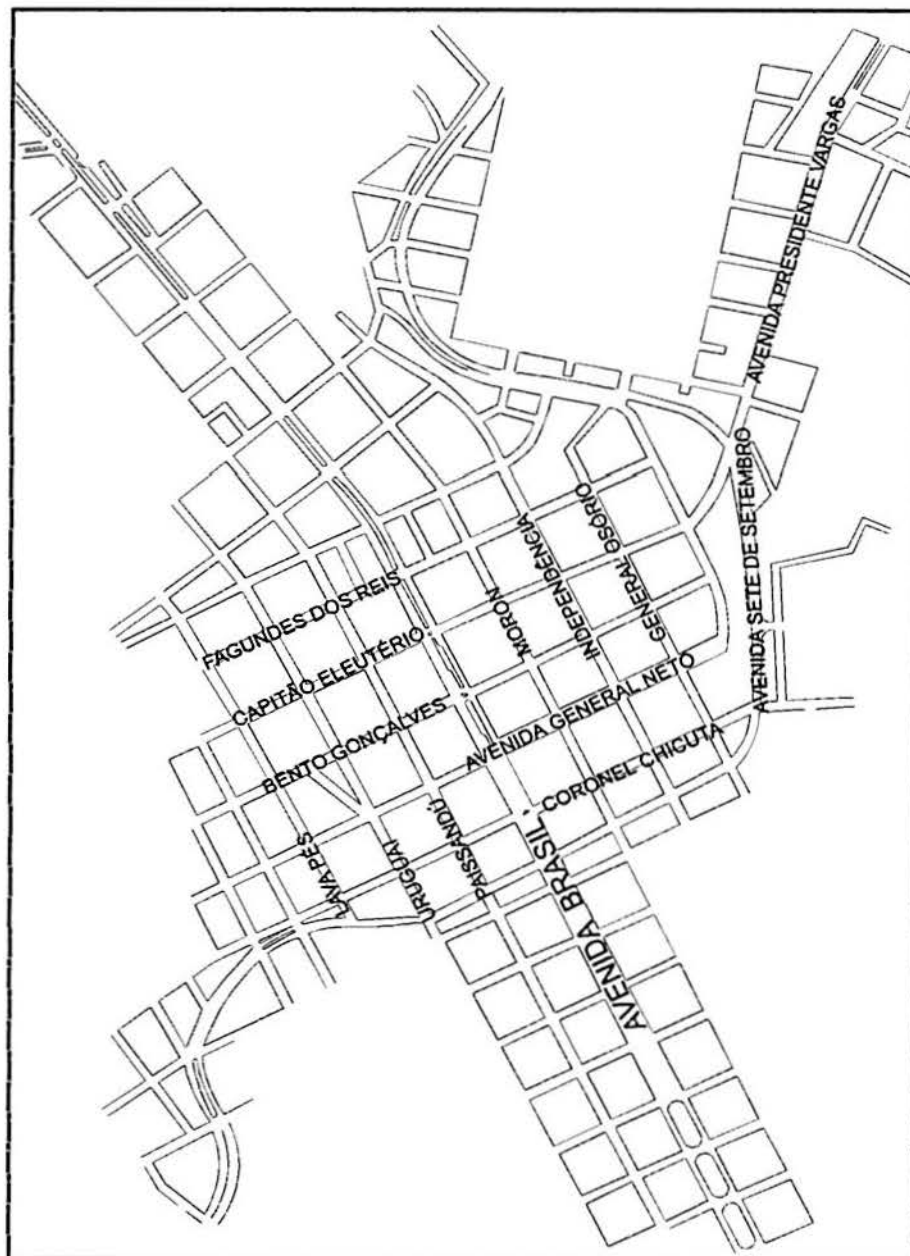


Figura 4.7 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

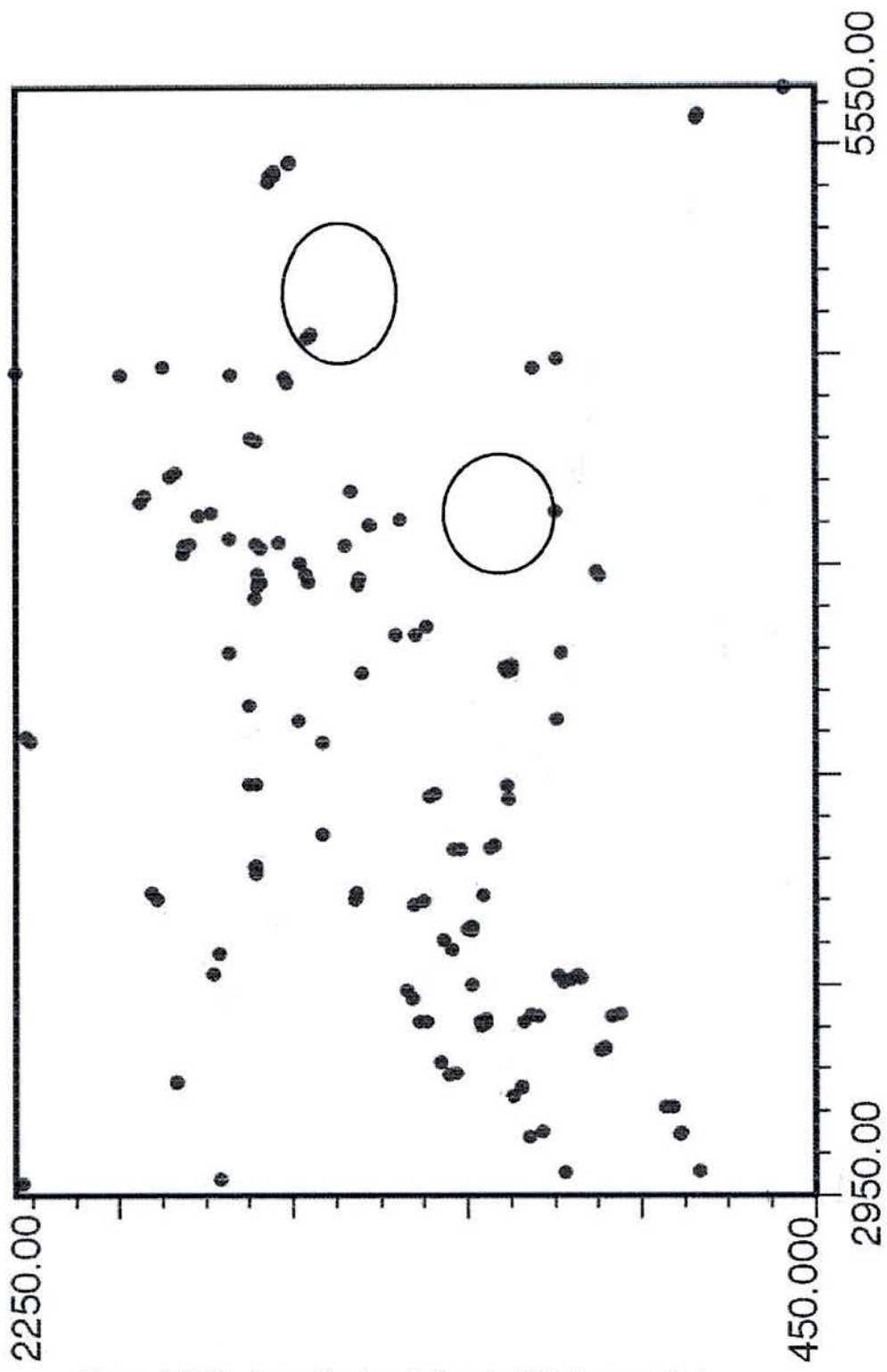


Figura 4.7 (b) - Locação dos dados de SPT da camada I.

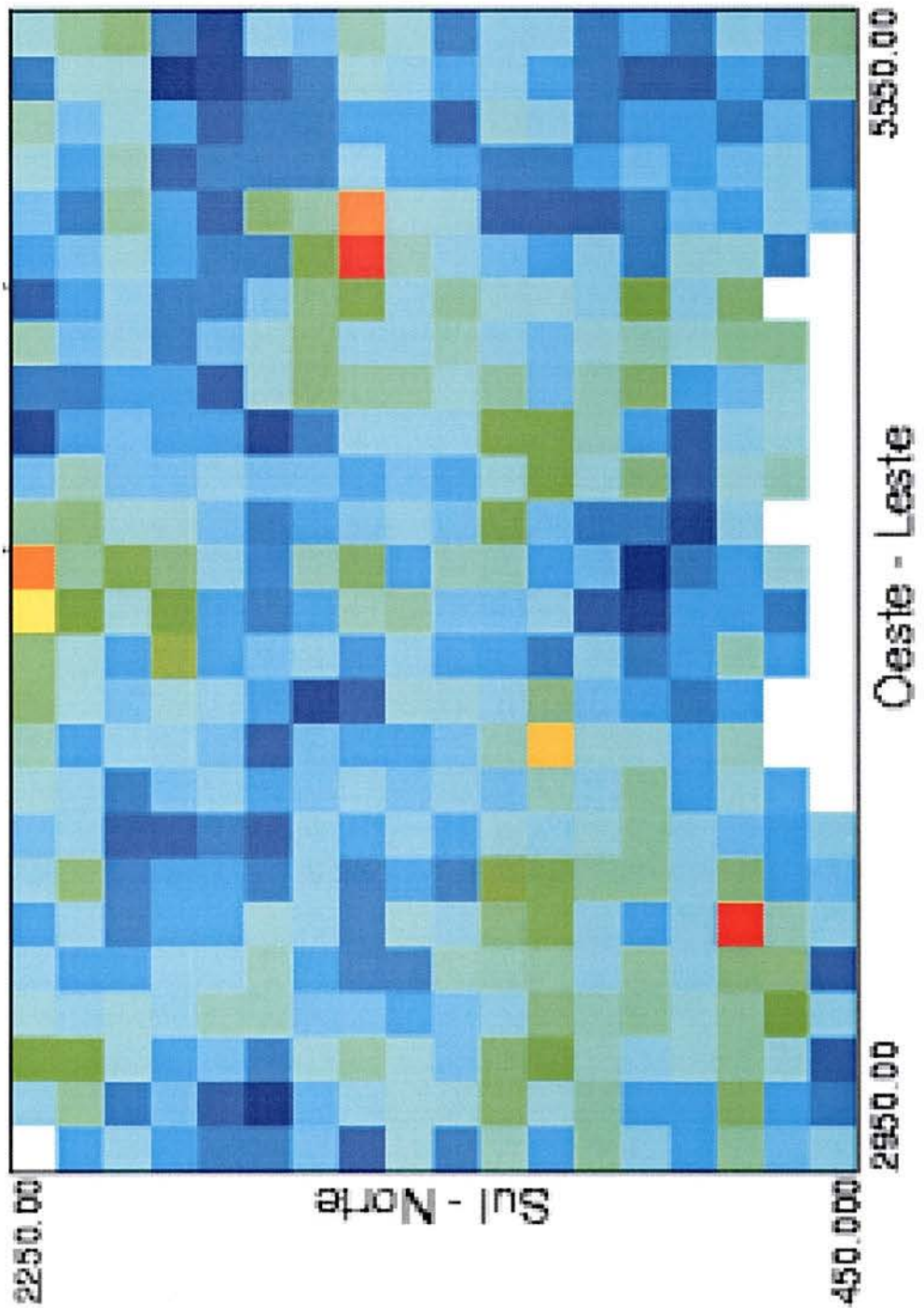
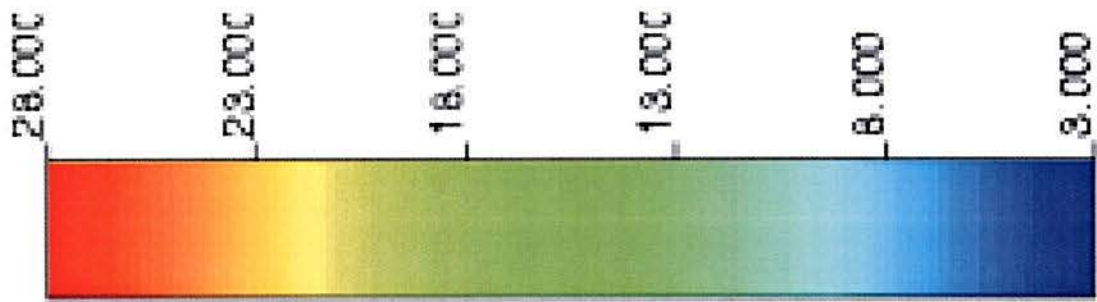


Figura 4.7 (c) - Realização nº18, para dados de SPT da camada I.

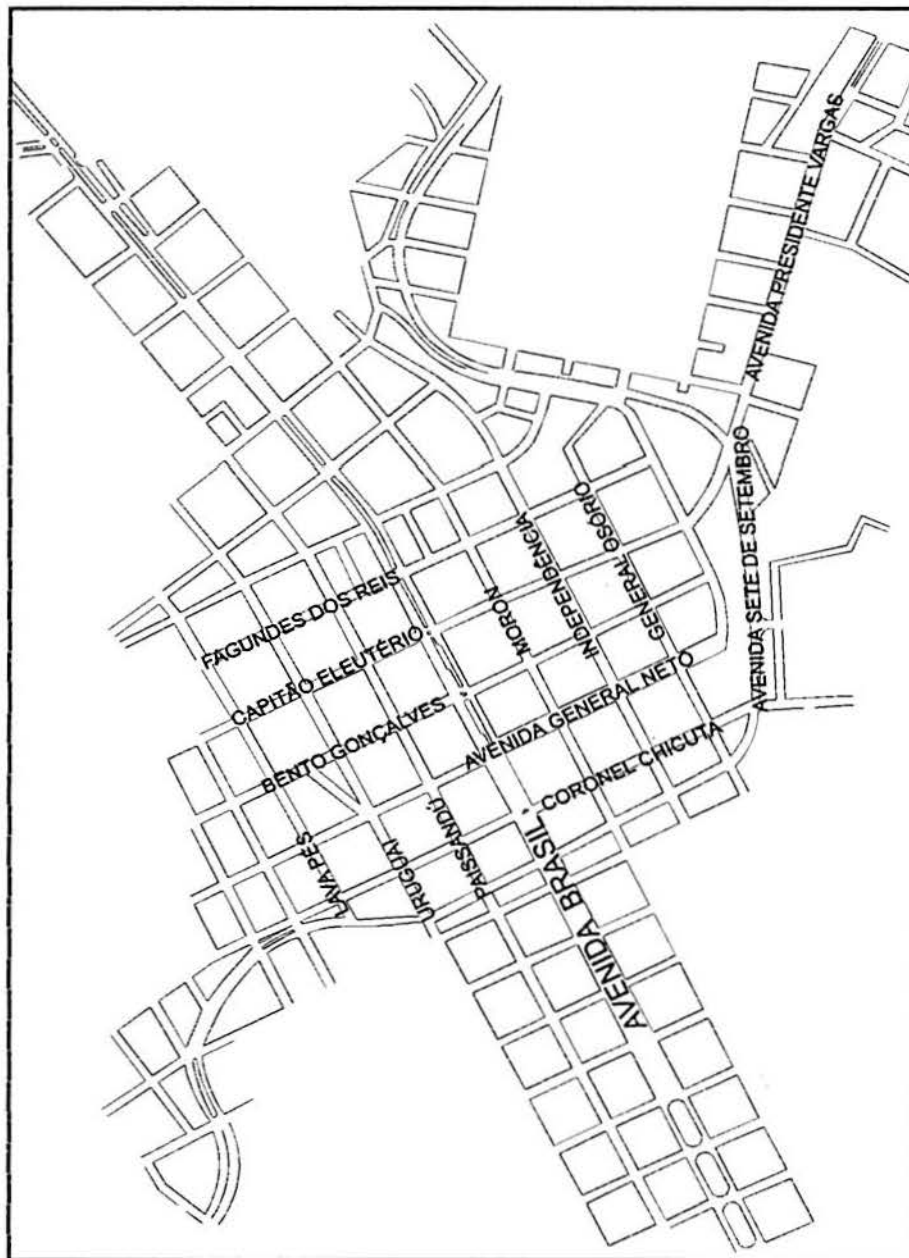


Figura 4.8 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

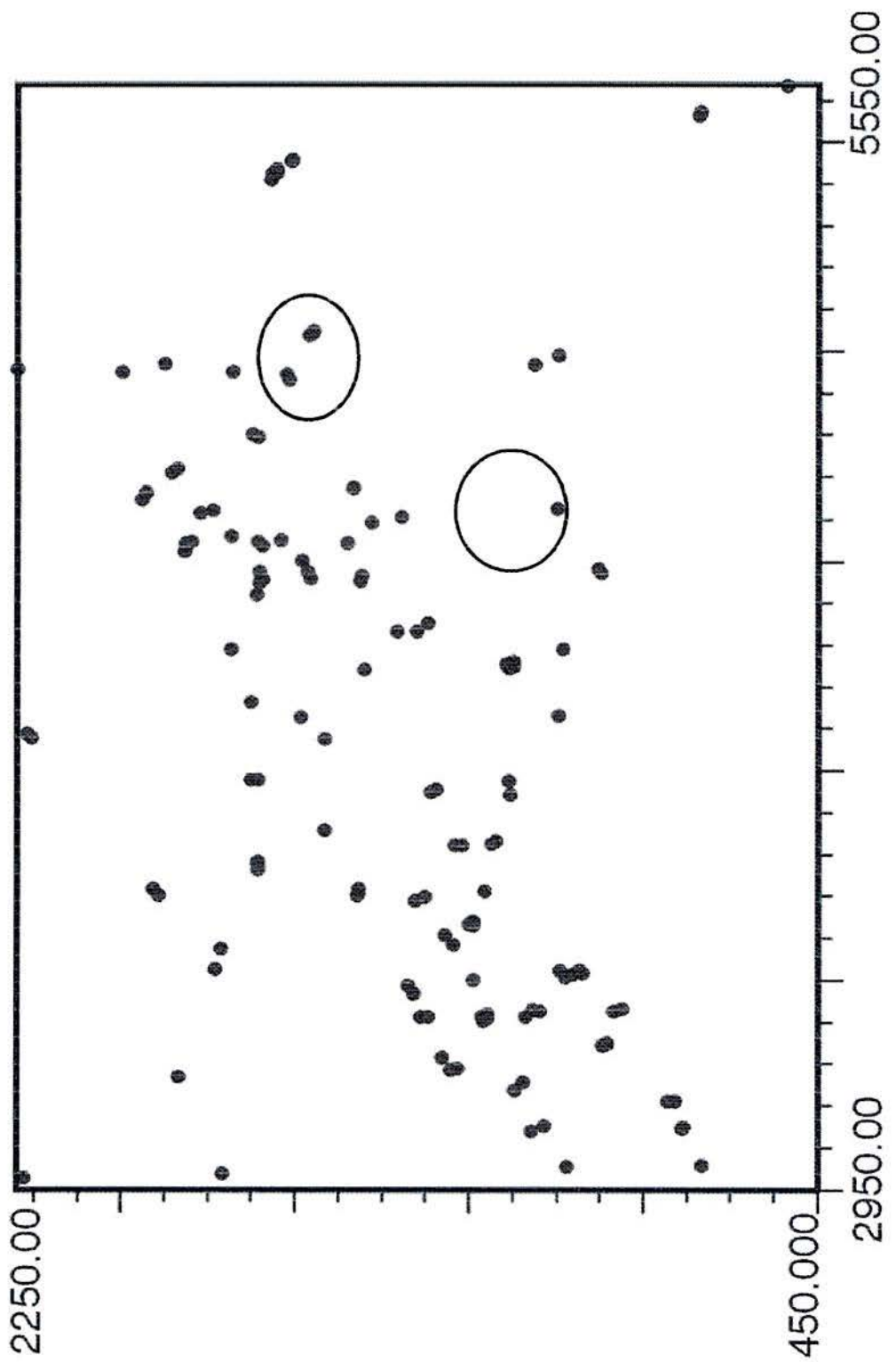


Figura 4.8 (b) - Localização dos dados de SPT da camada I.

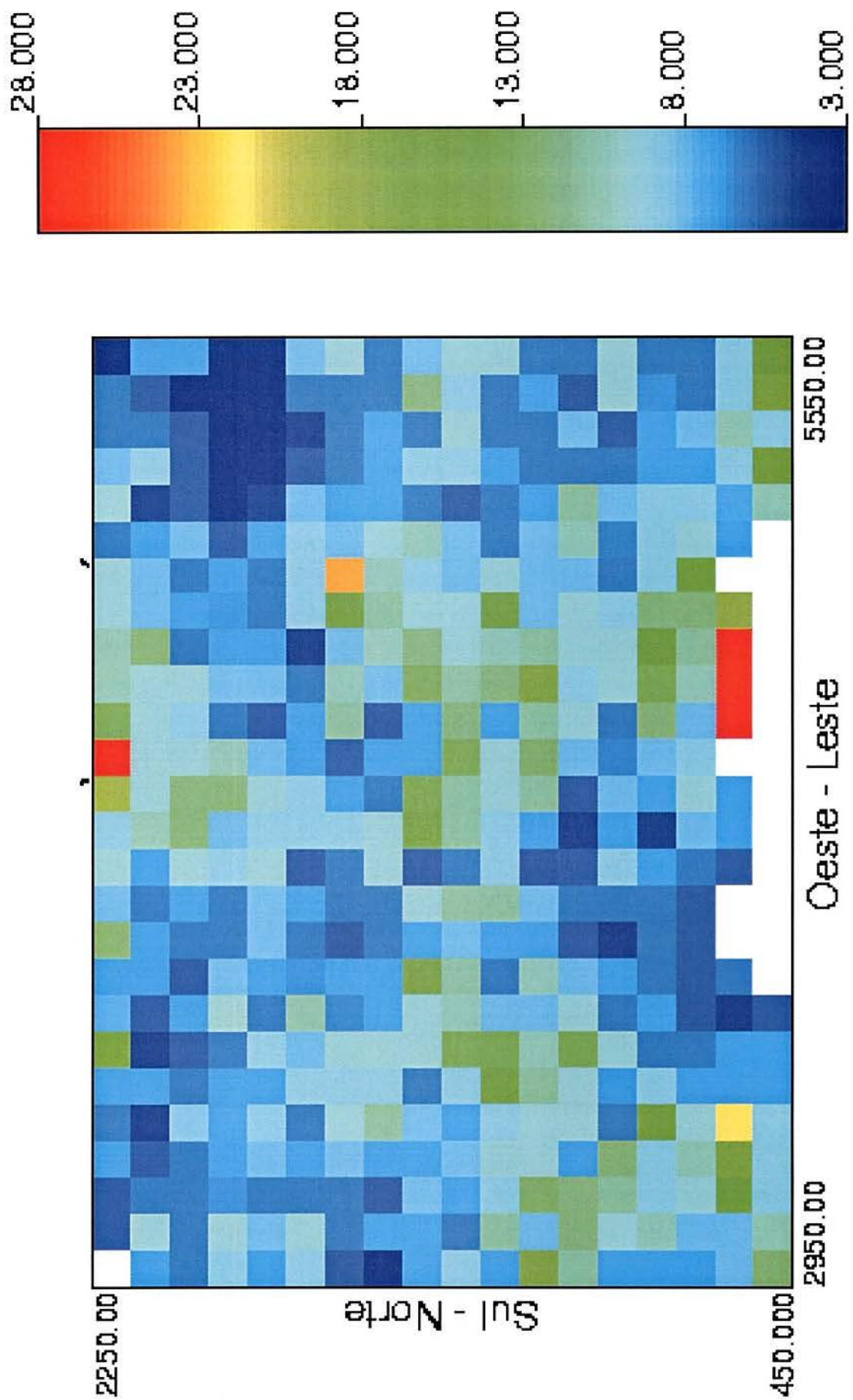


Figura 4.8 (c) - Realização n°24, para dados de SPT da camada I.

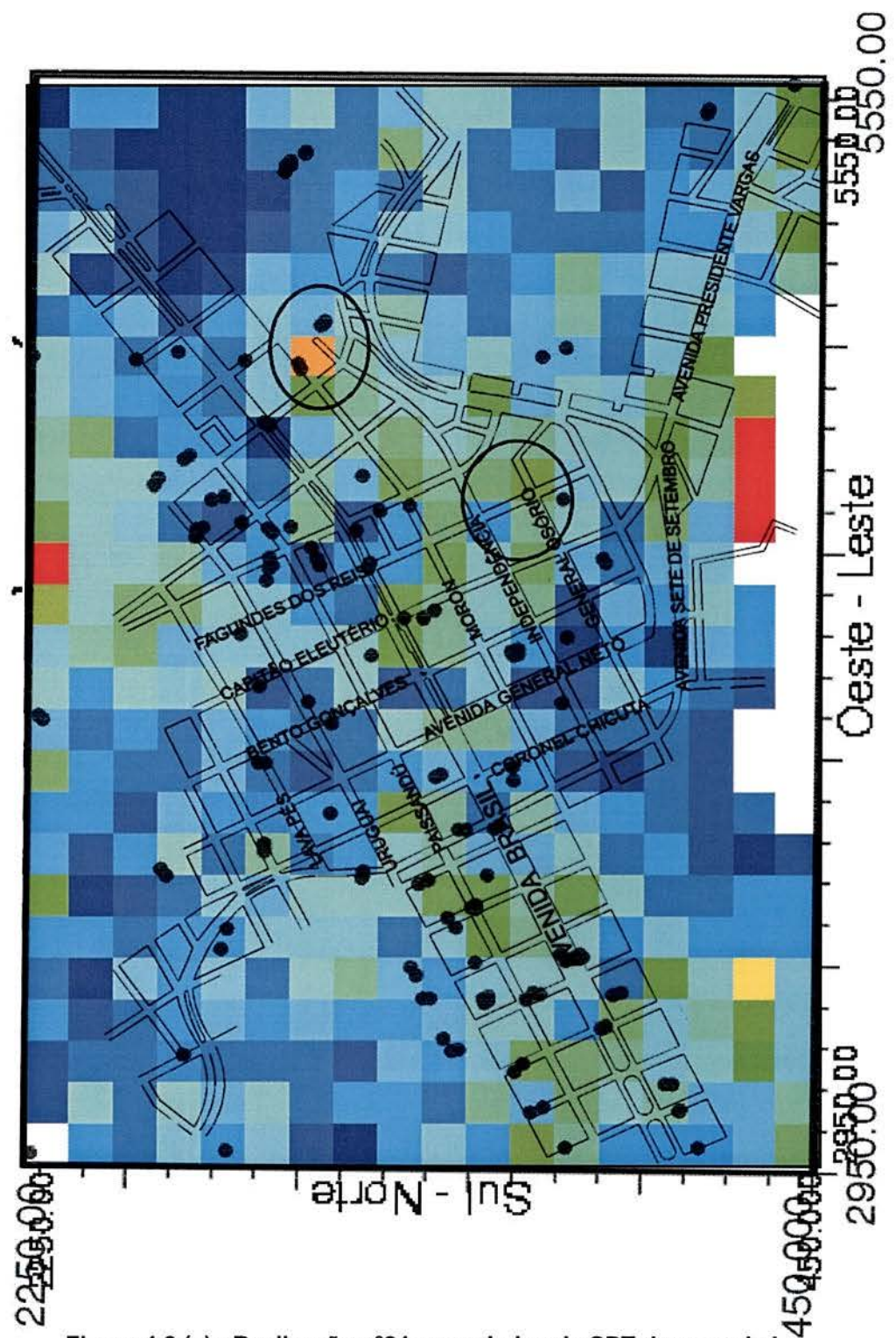
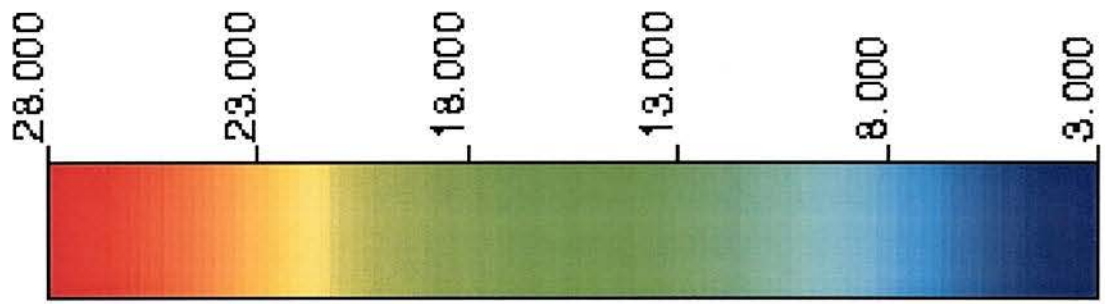


Figura 4.8 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.
Figura 4.8 (b) - Realização n.º24 para dados de SPT da camada I.

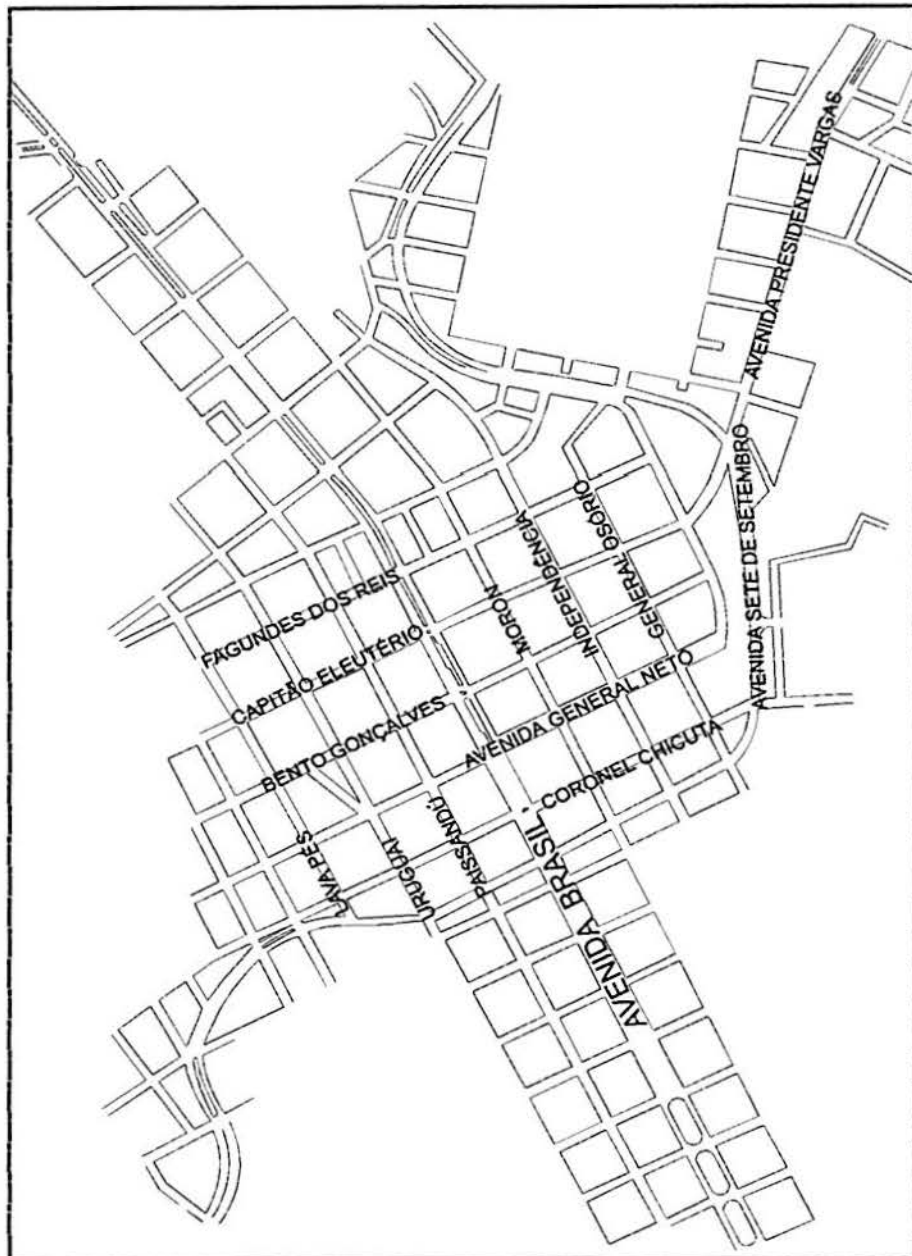


Figura 4.9 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

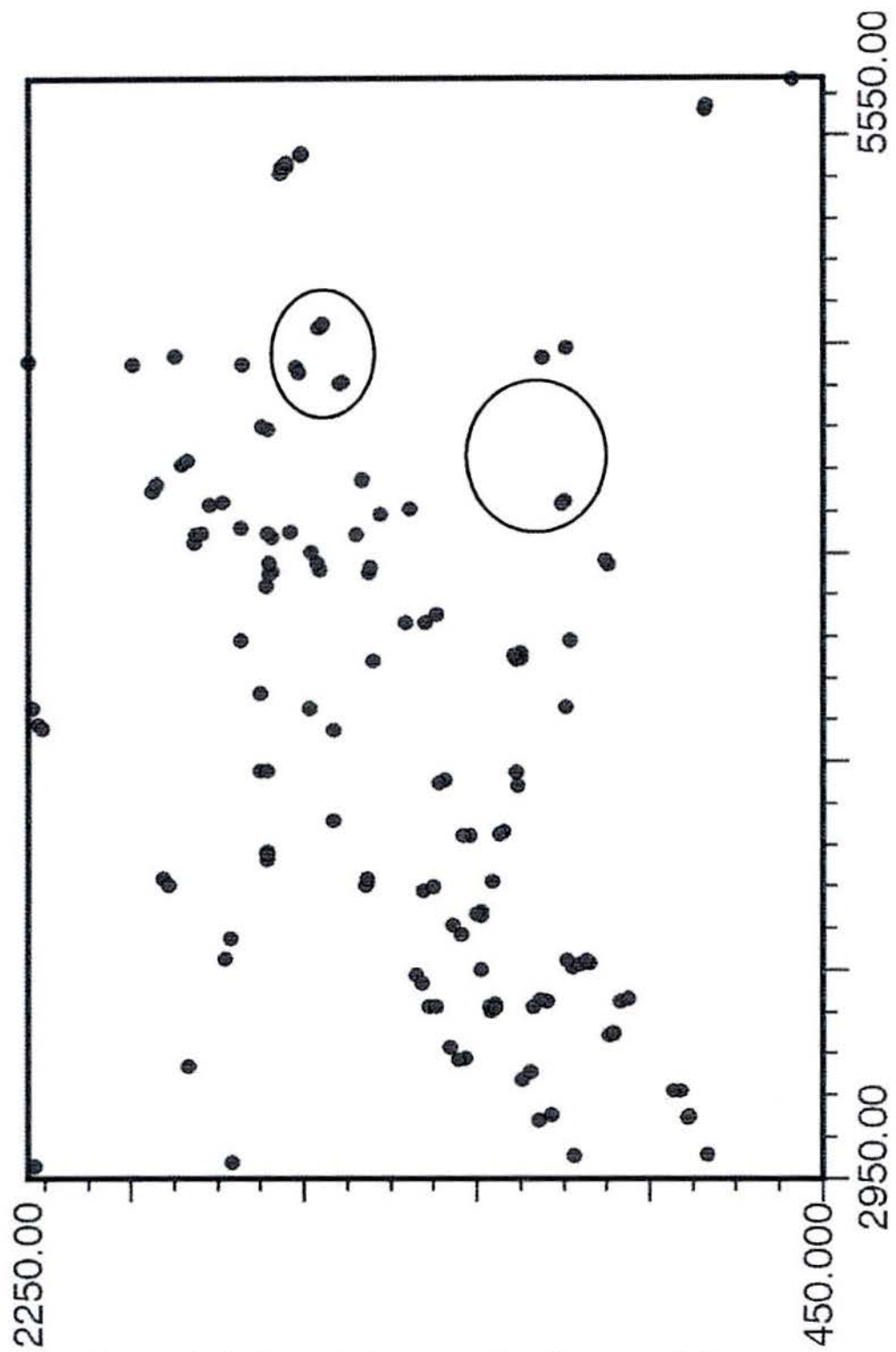


Figura 4.9 (b) - Locação dos dados de SPT da camada I.

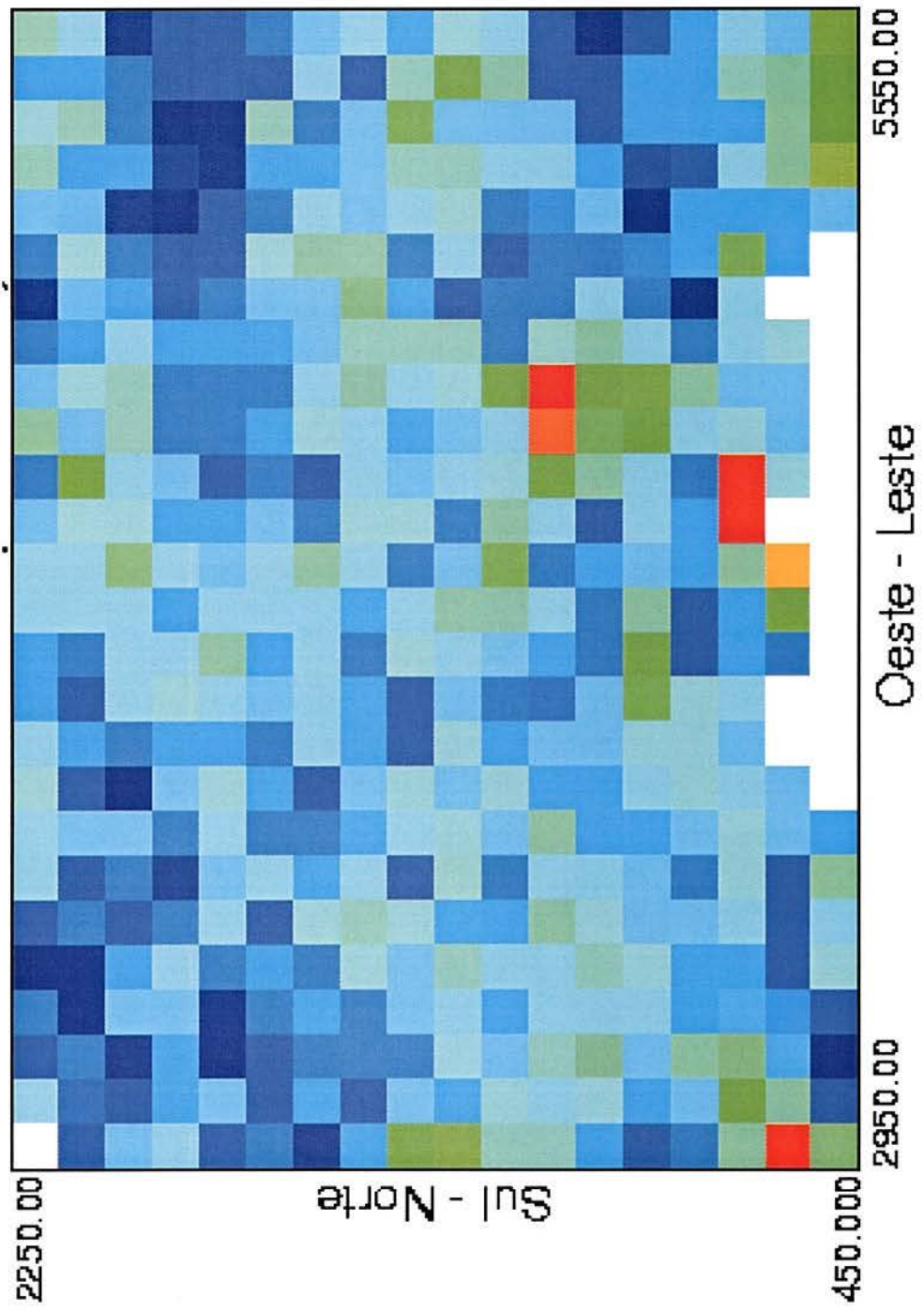
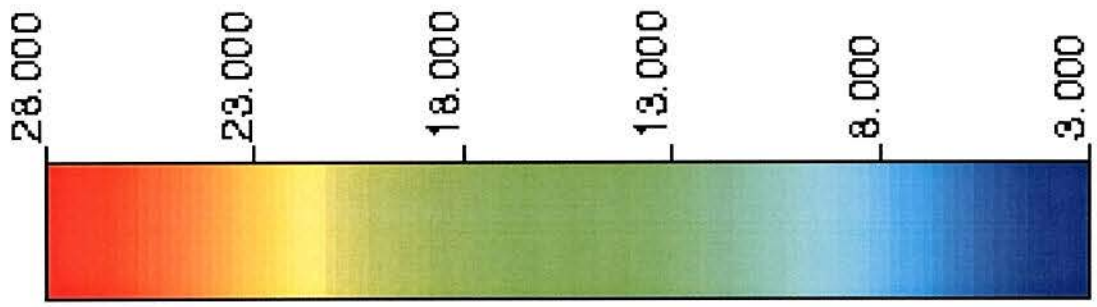


Figura 4.9 (c) - Realização nº39, para dados de SPT da camada I.

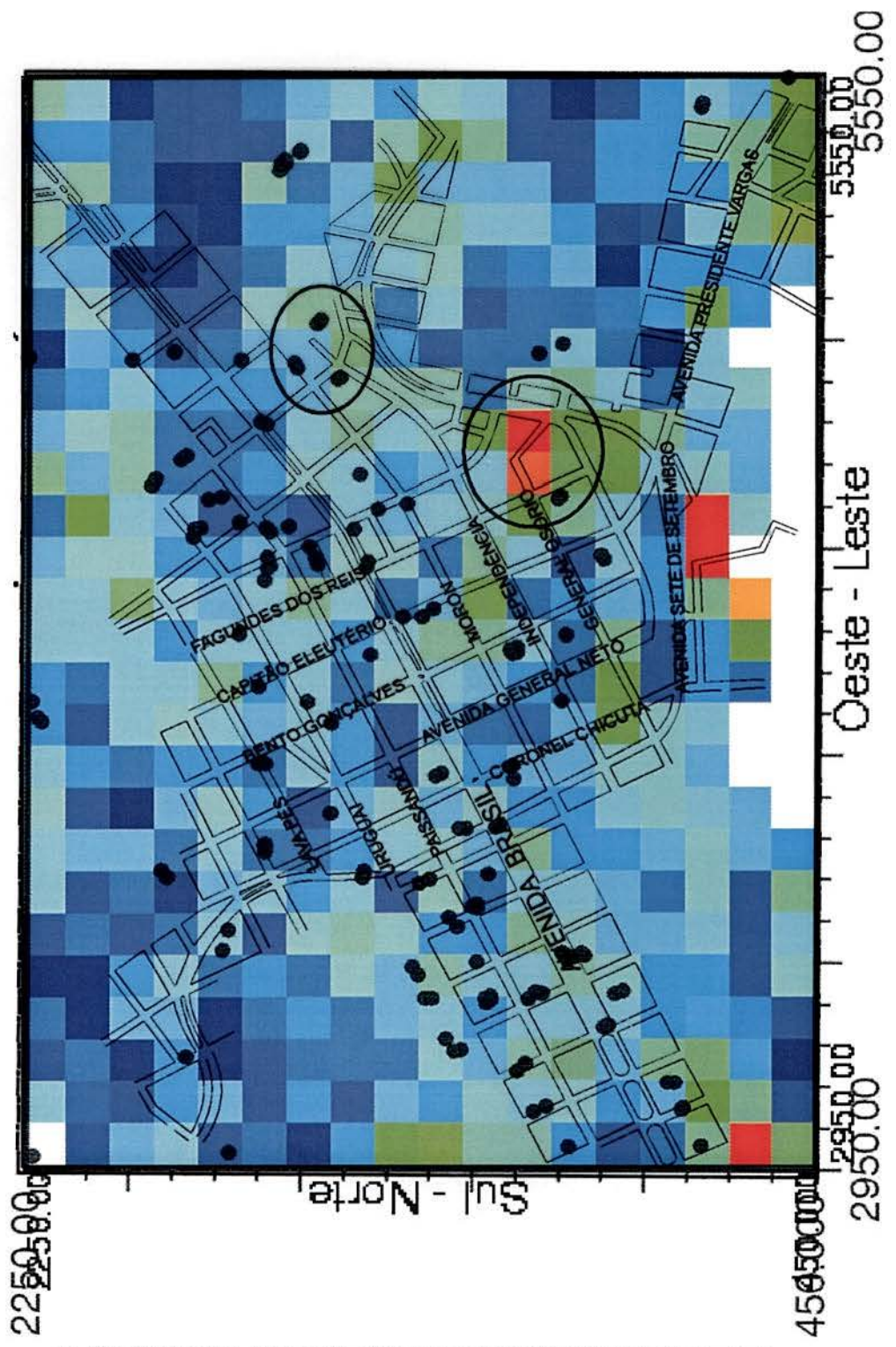
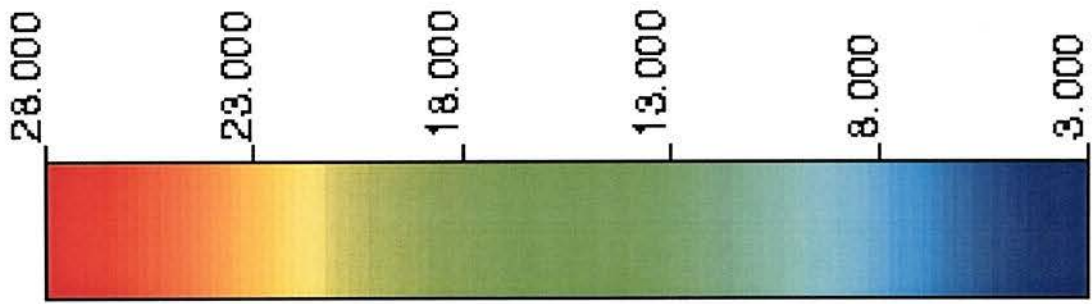


Figura 4.9 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

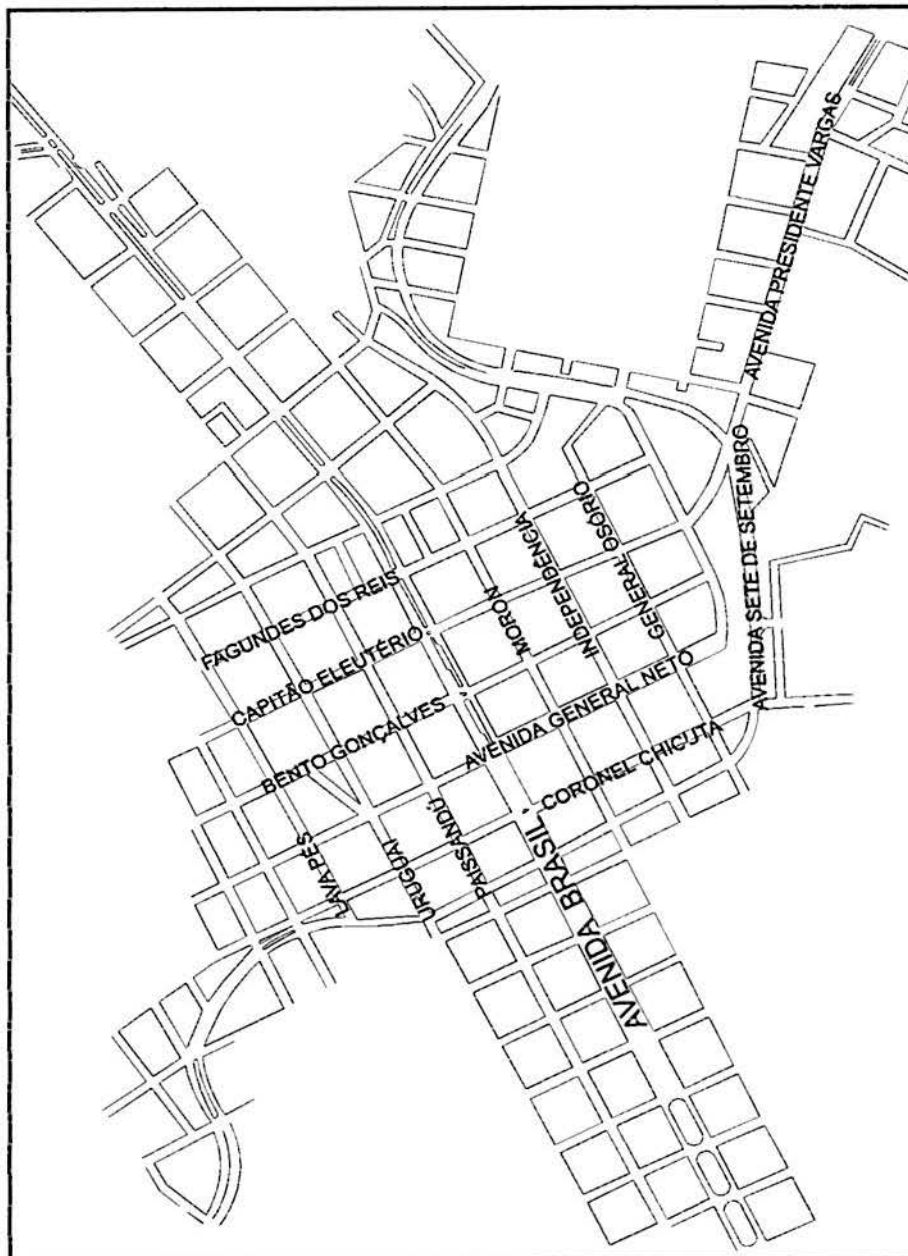


Figura 4.10 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

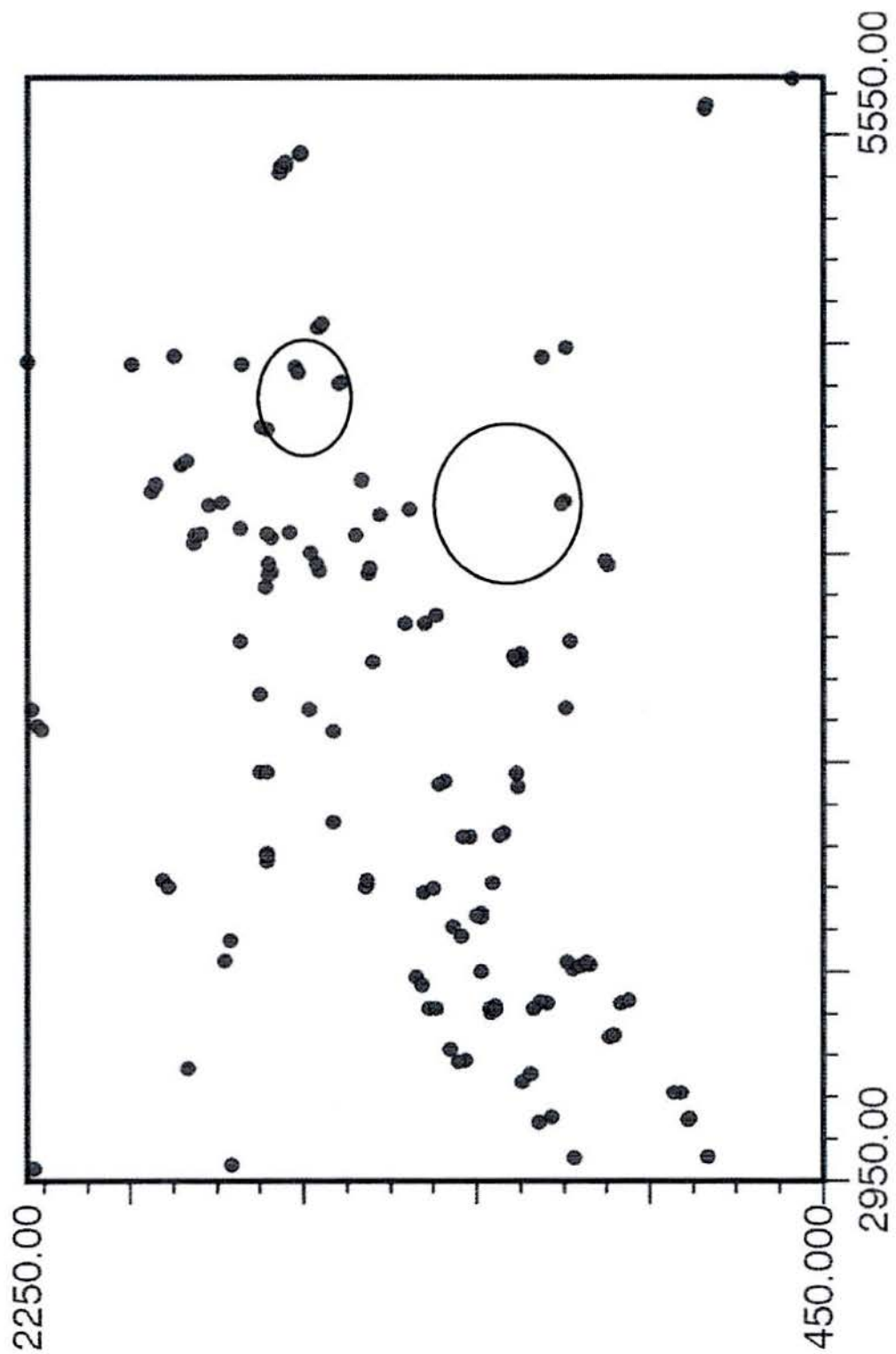


Figura 4.10 (b) - Locação dos dados de SPT da camada I.

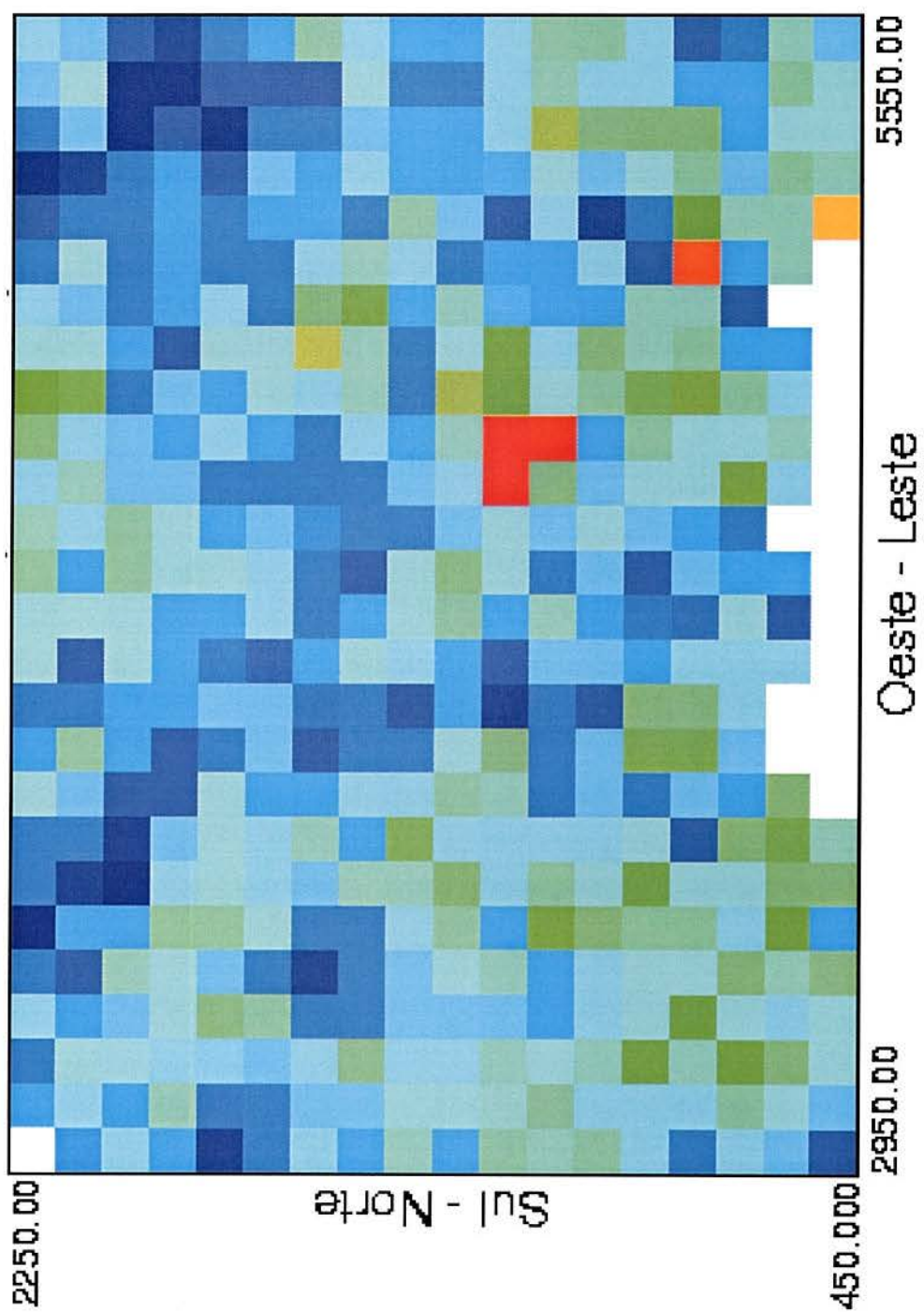
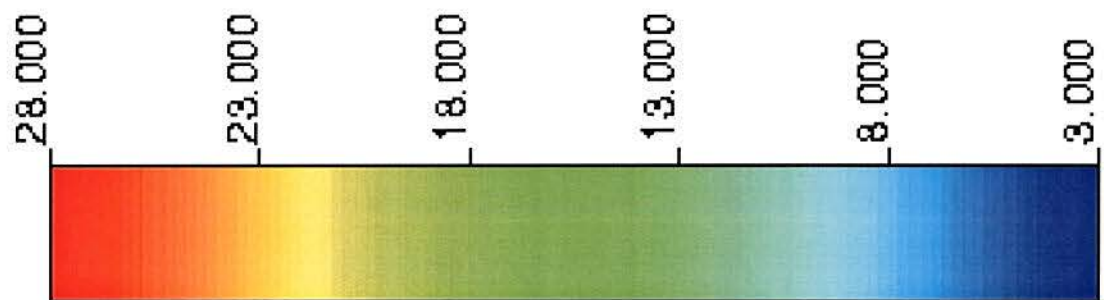


Figura 4.10 (c) - Realização n°43, para dados de SPT da camada I.

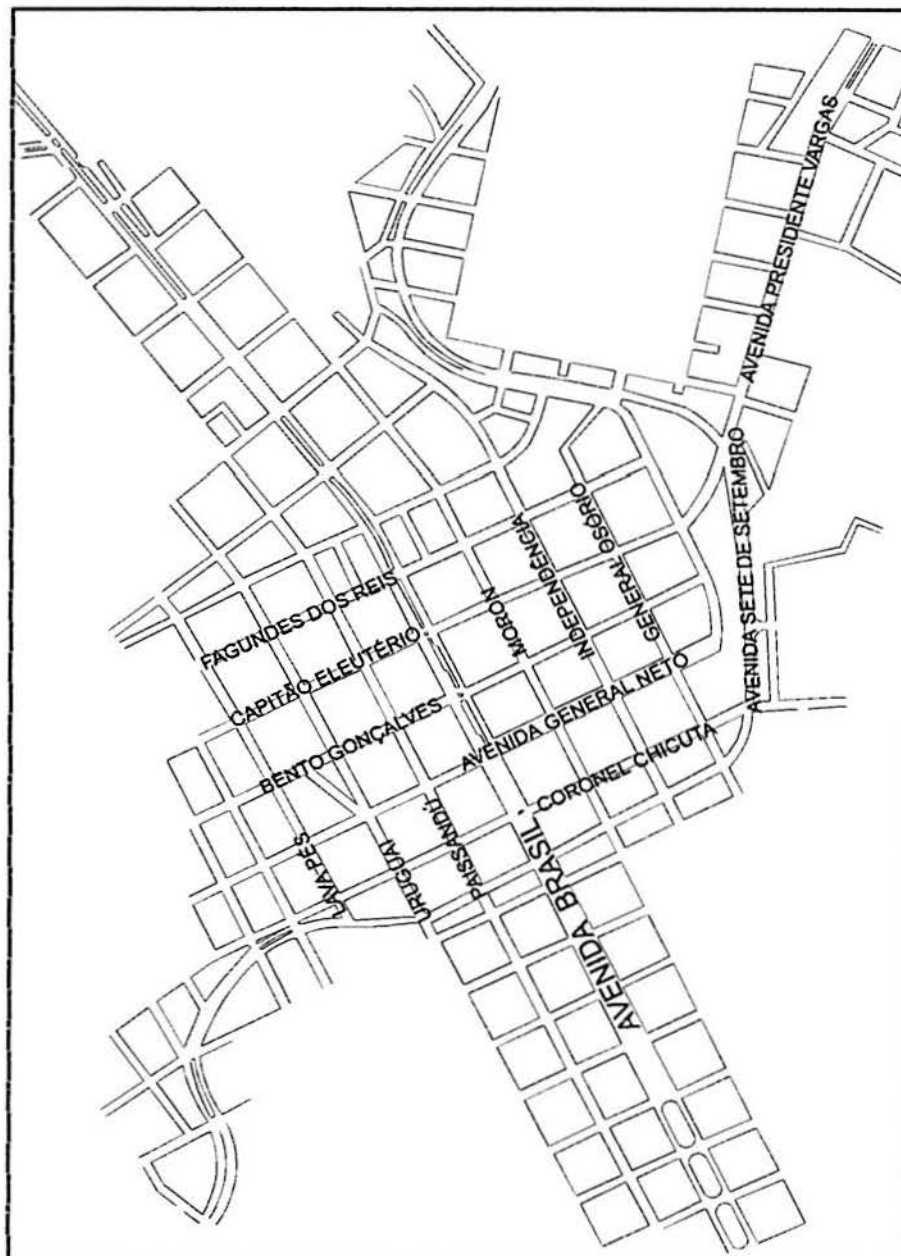


Figura 4.11 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

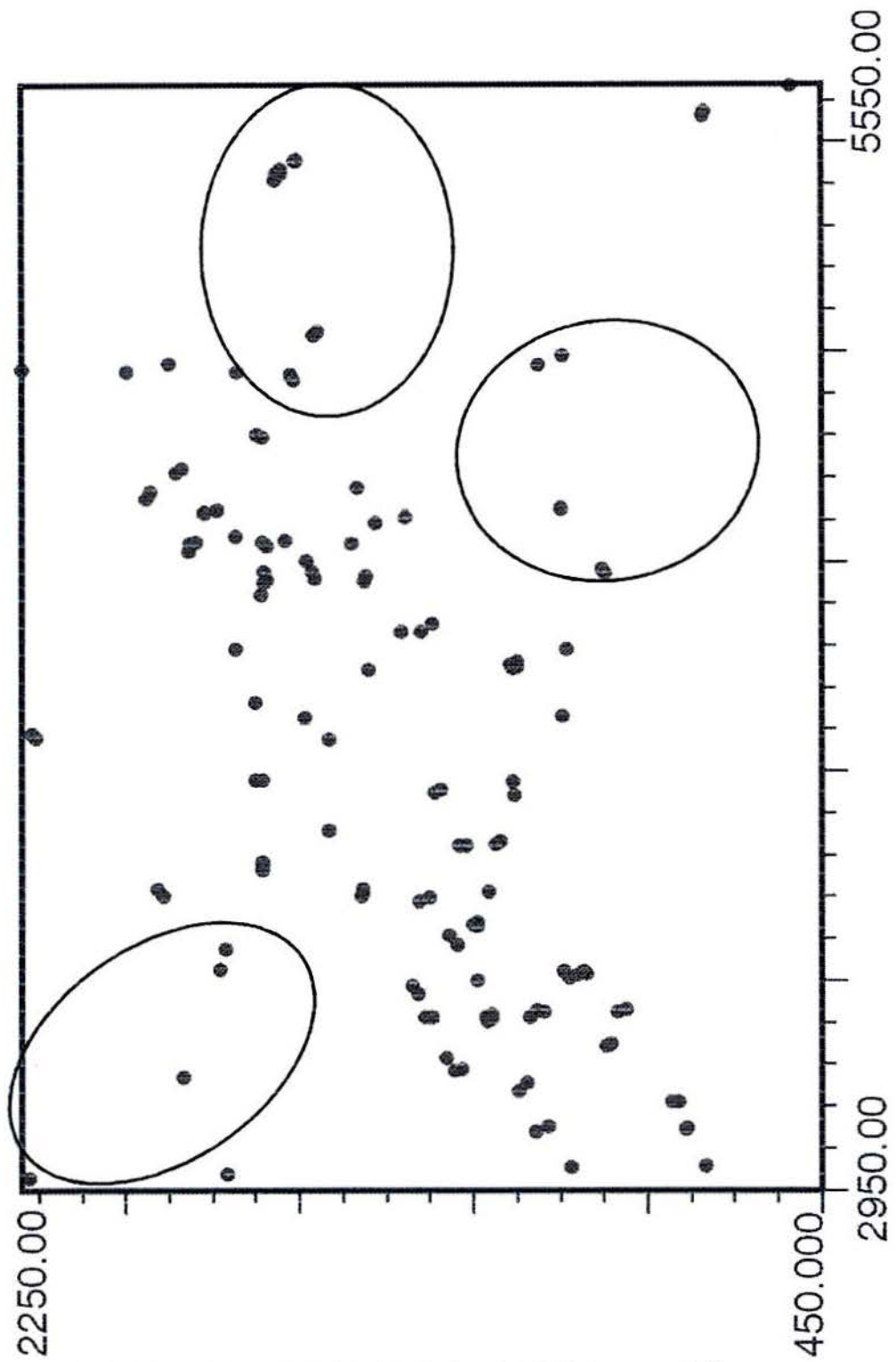


Figura 4.11 (b) - Localização dos dados de SPT da camada II.

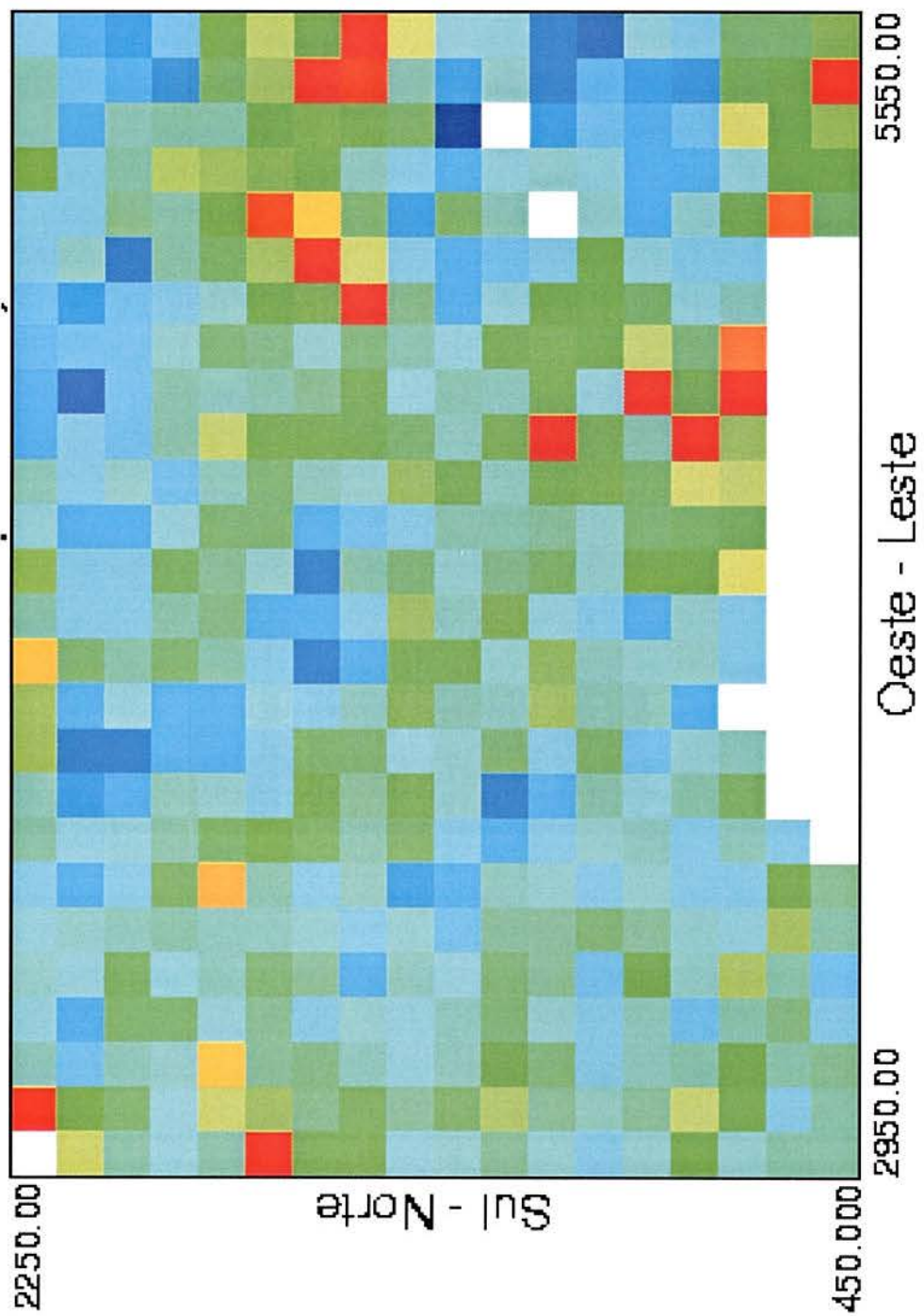
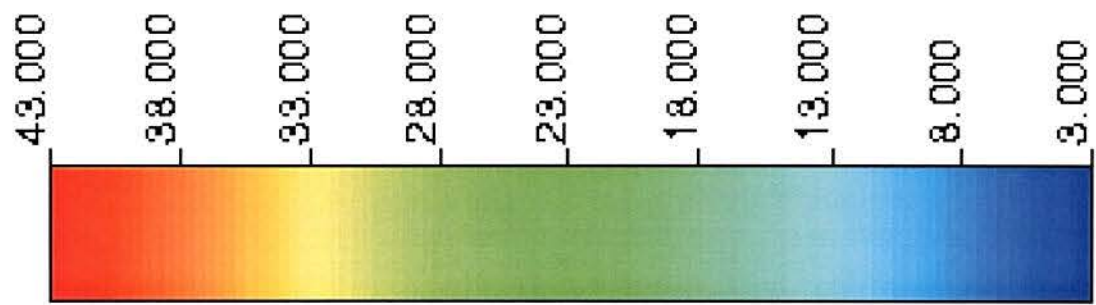


Figura 4.11 (c) -Realização nº03, para dados de SPT da camada II.

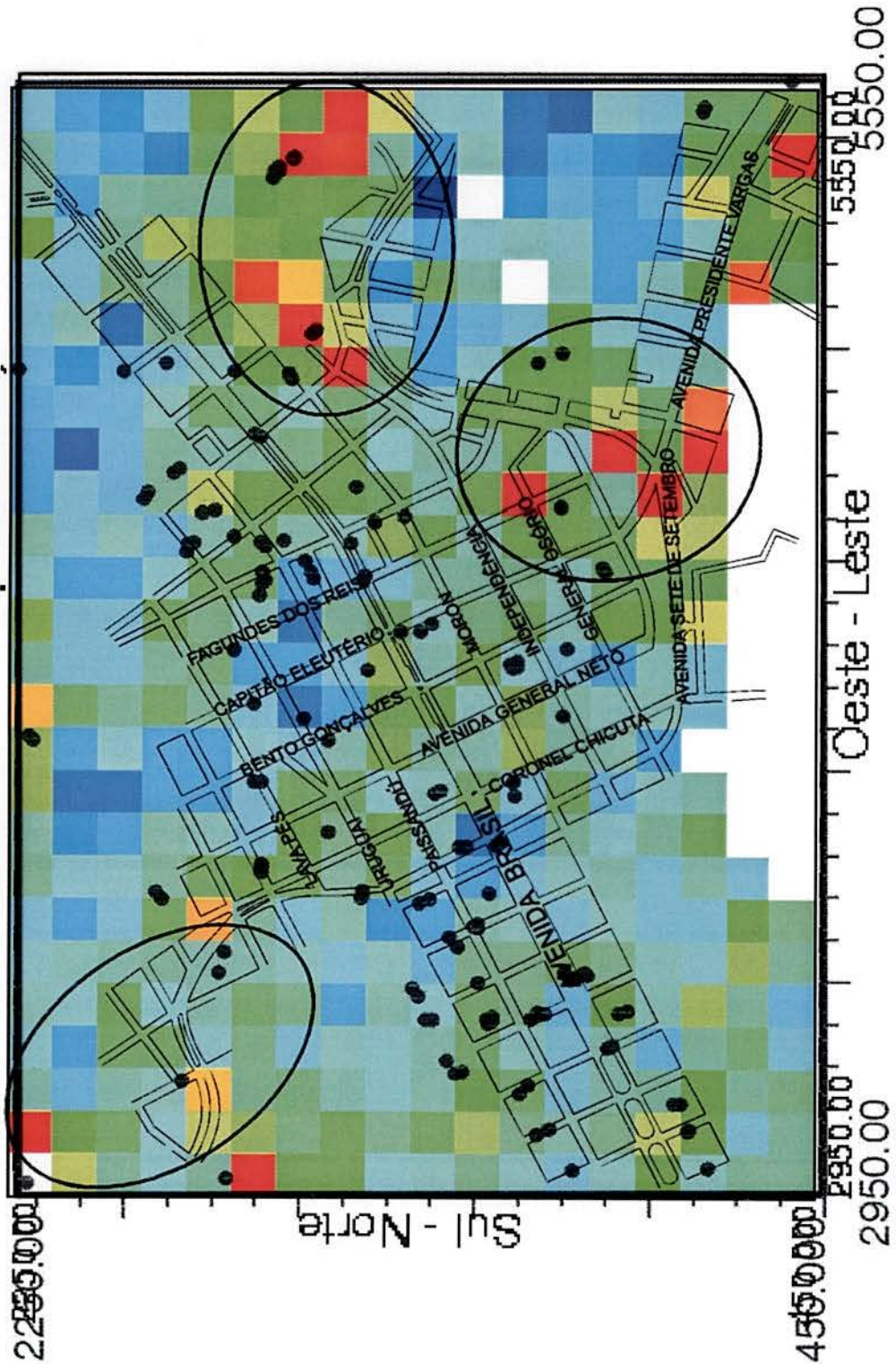
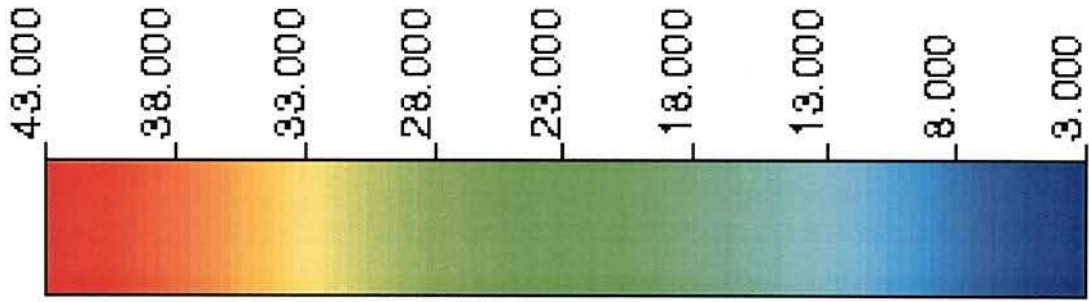


Figura 4.11 (b) Localização dos dados de SPT da camada II.
Figura 4.11 (c) Realização nº 00, para dados de SPT da camada II.

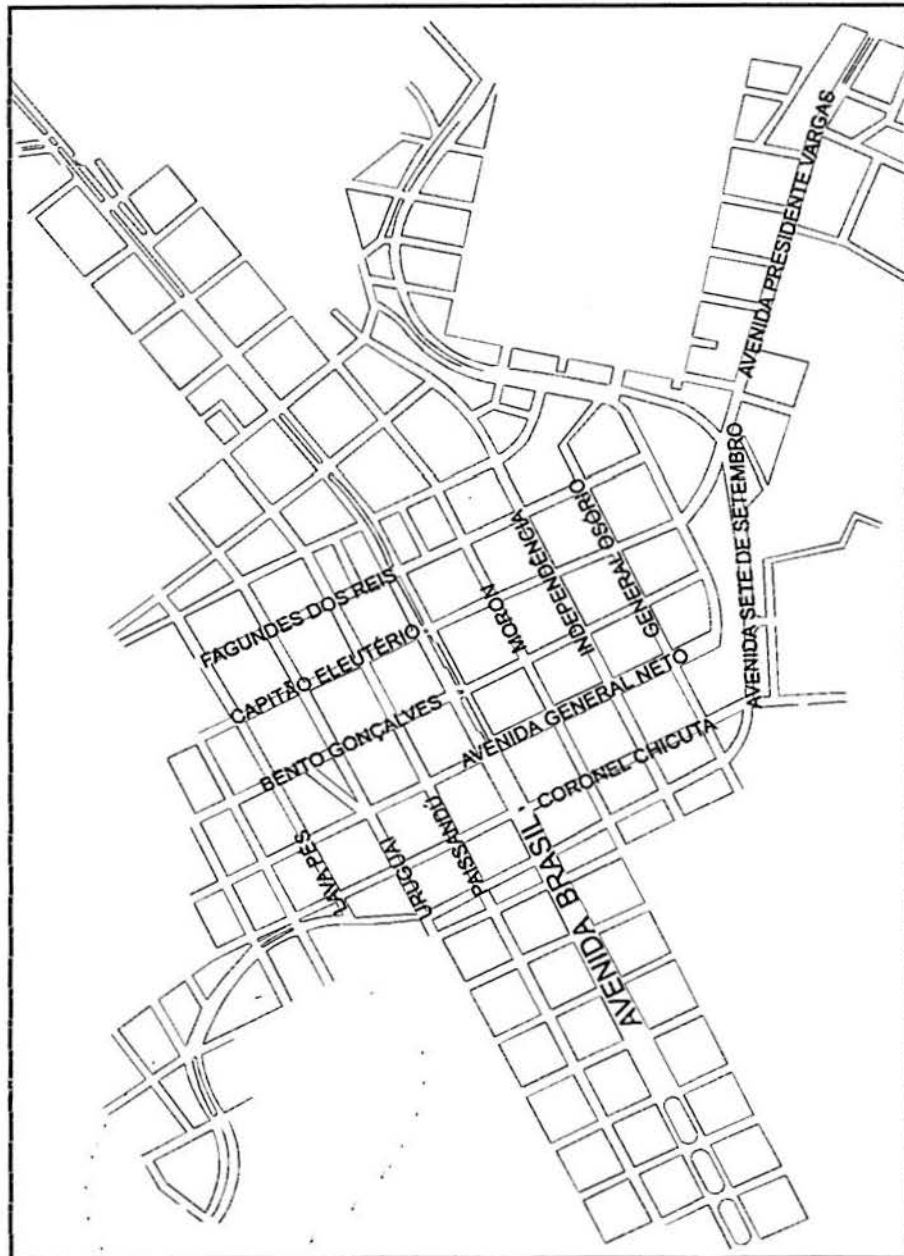


Figura 4.12 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

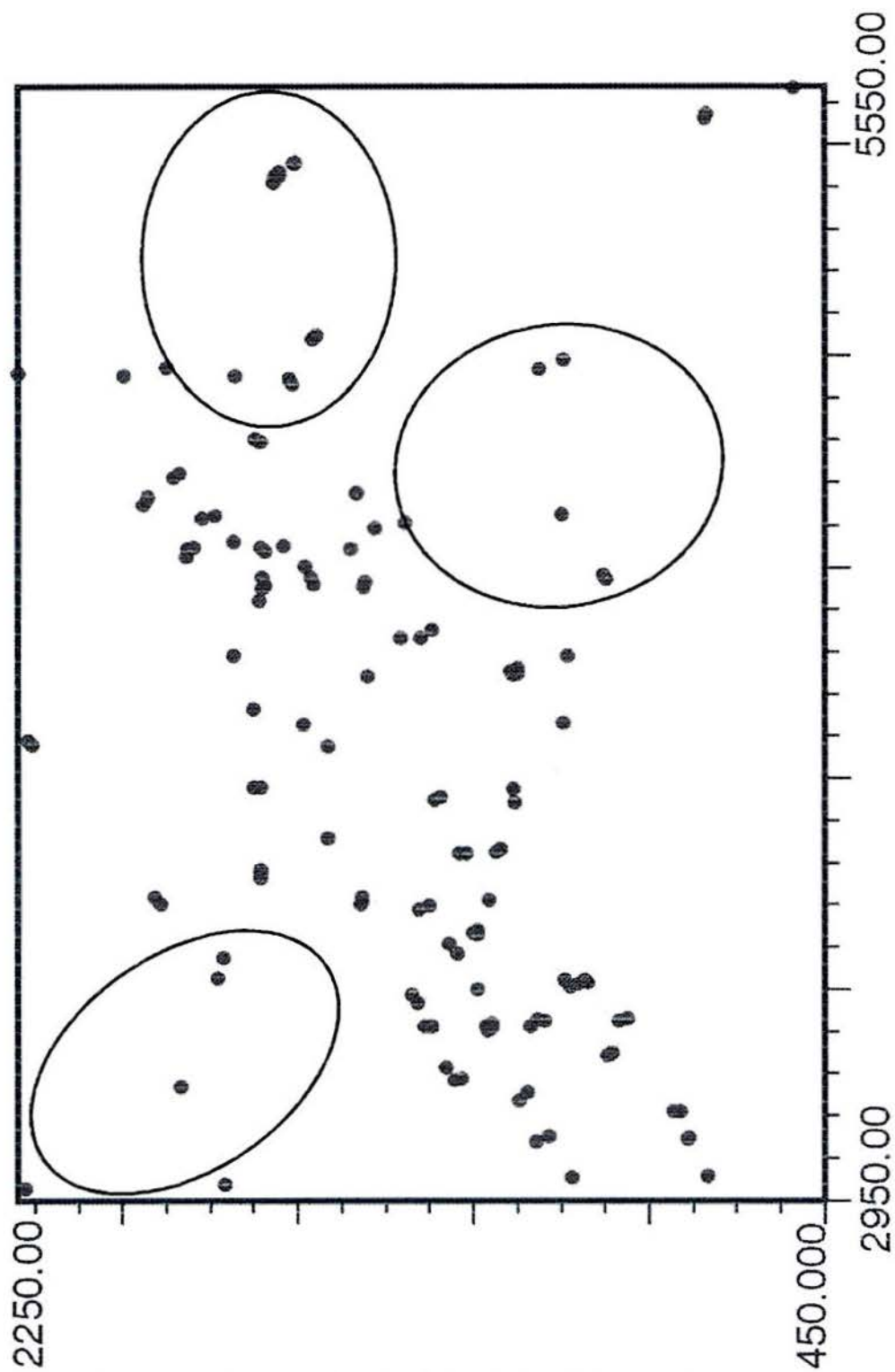


Figura 4.12 (b) - Localização dos dados de SPT da camada II.

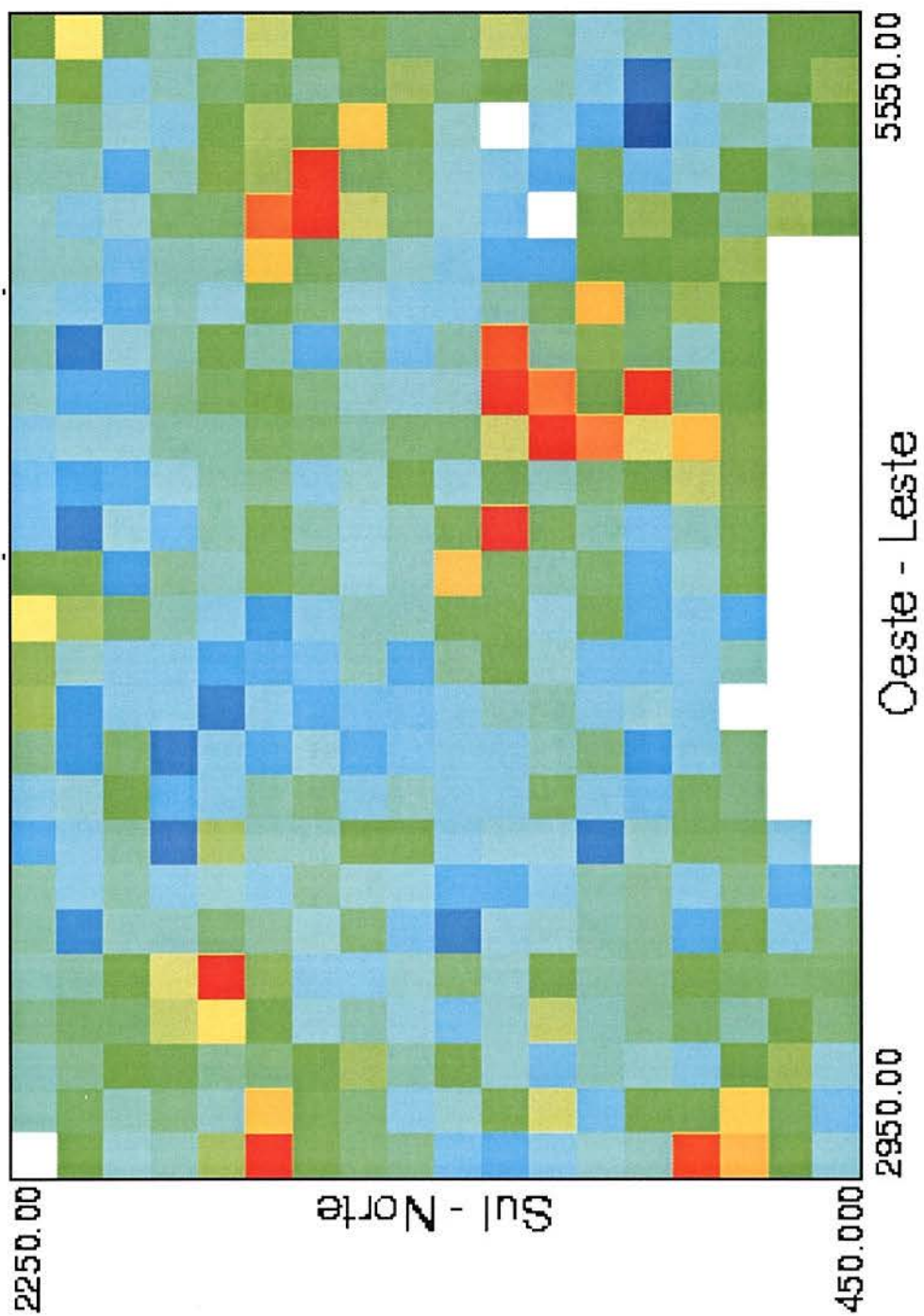
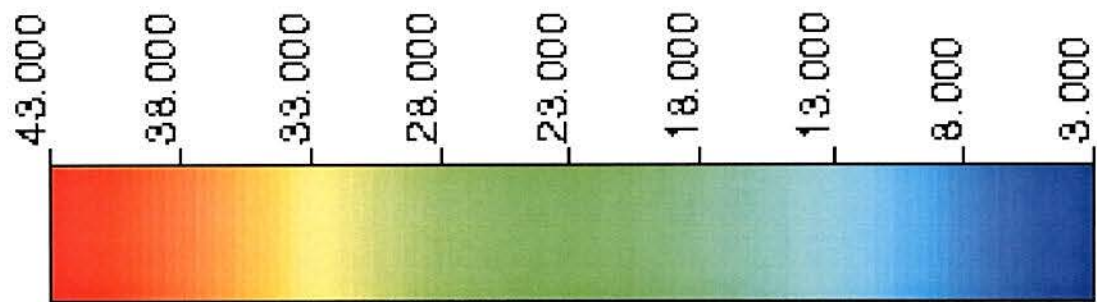
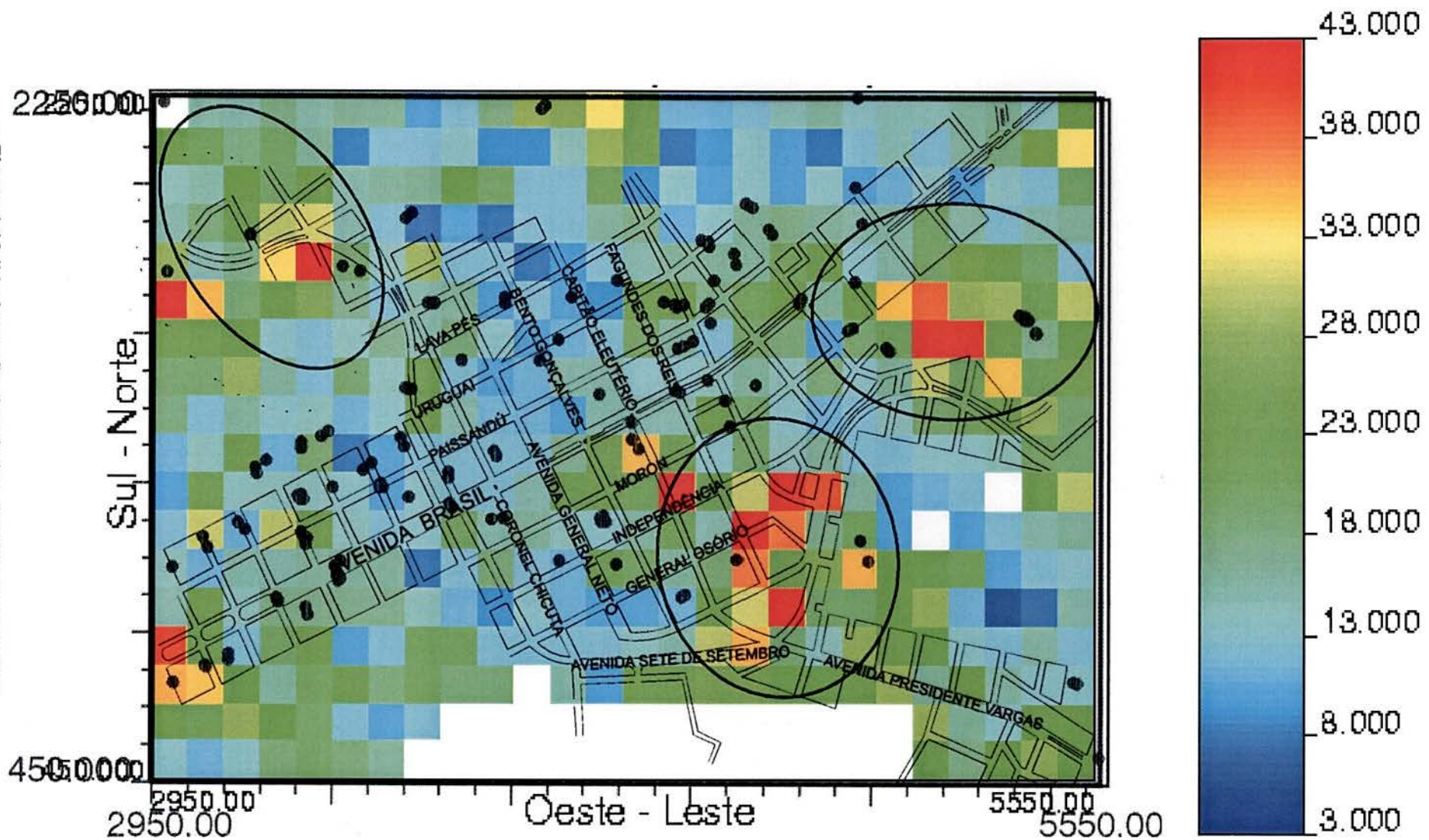


Figura 4.12 (c) - Realização n°18, para dados de SPT da camada II.

Figura 12.13 Mapa de densidade de pontos de venda de produtos de limpeza em um bairro de Curitiba.



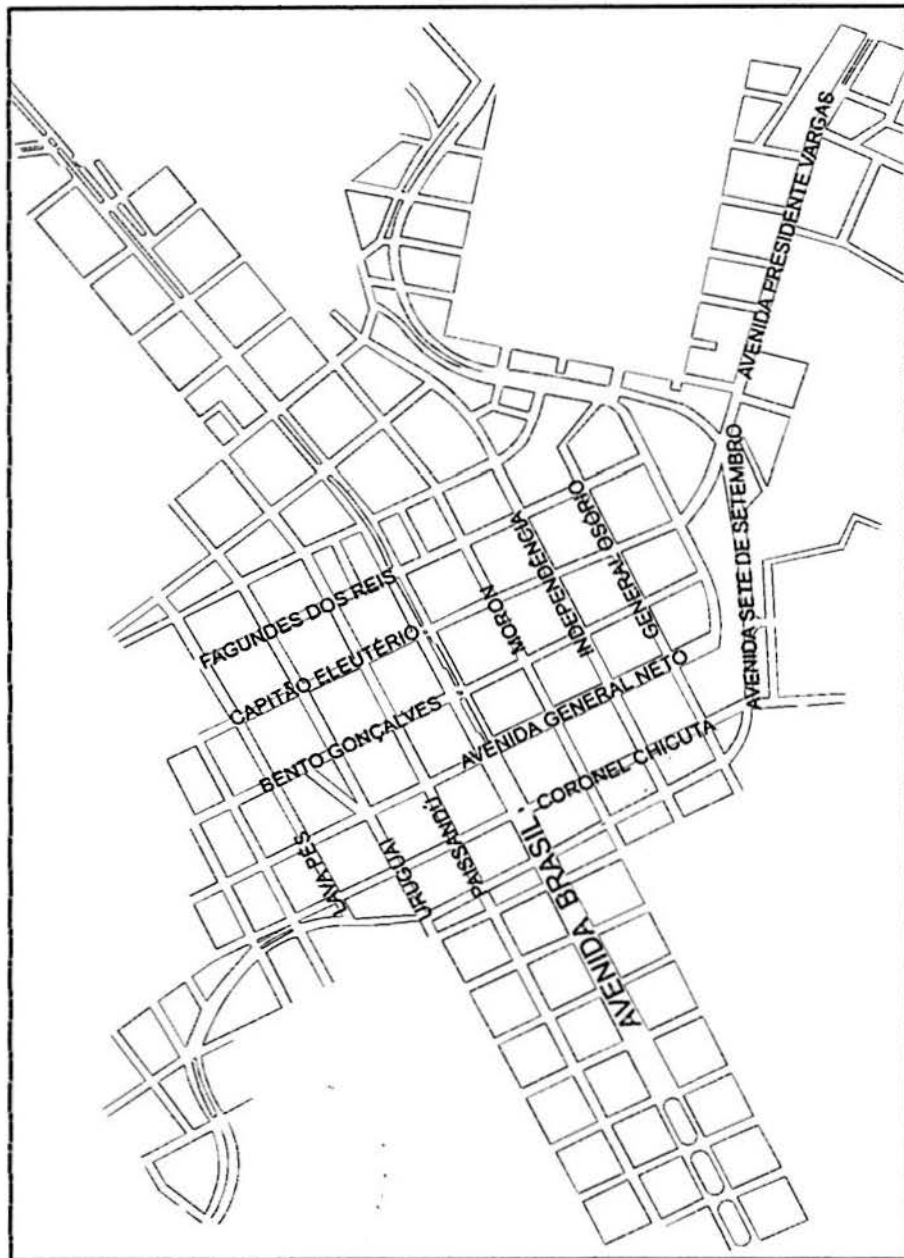


Figura 4.13 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

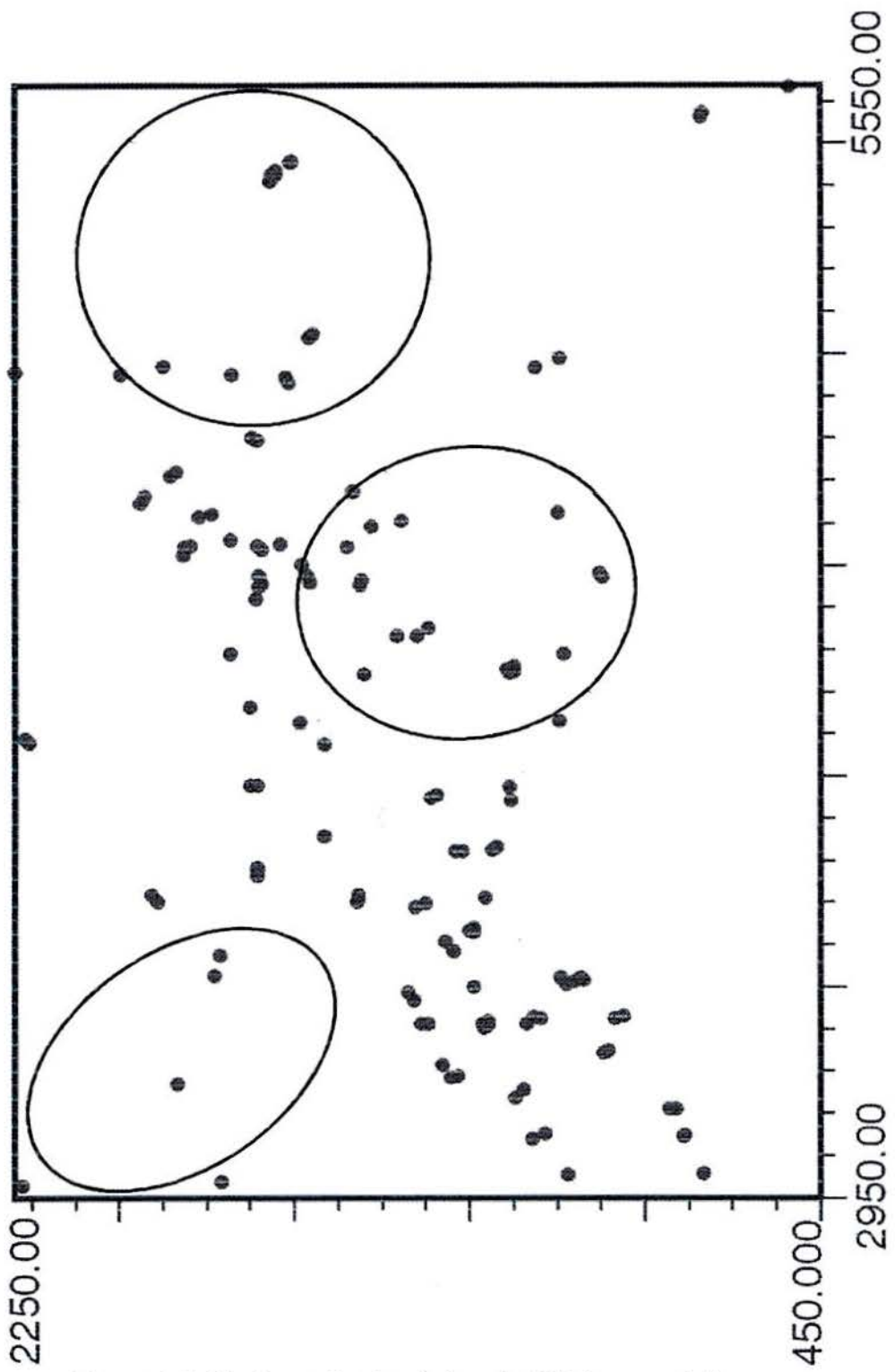


Figura 4.13 (b) - Localização dos dados de SPT da camada II.

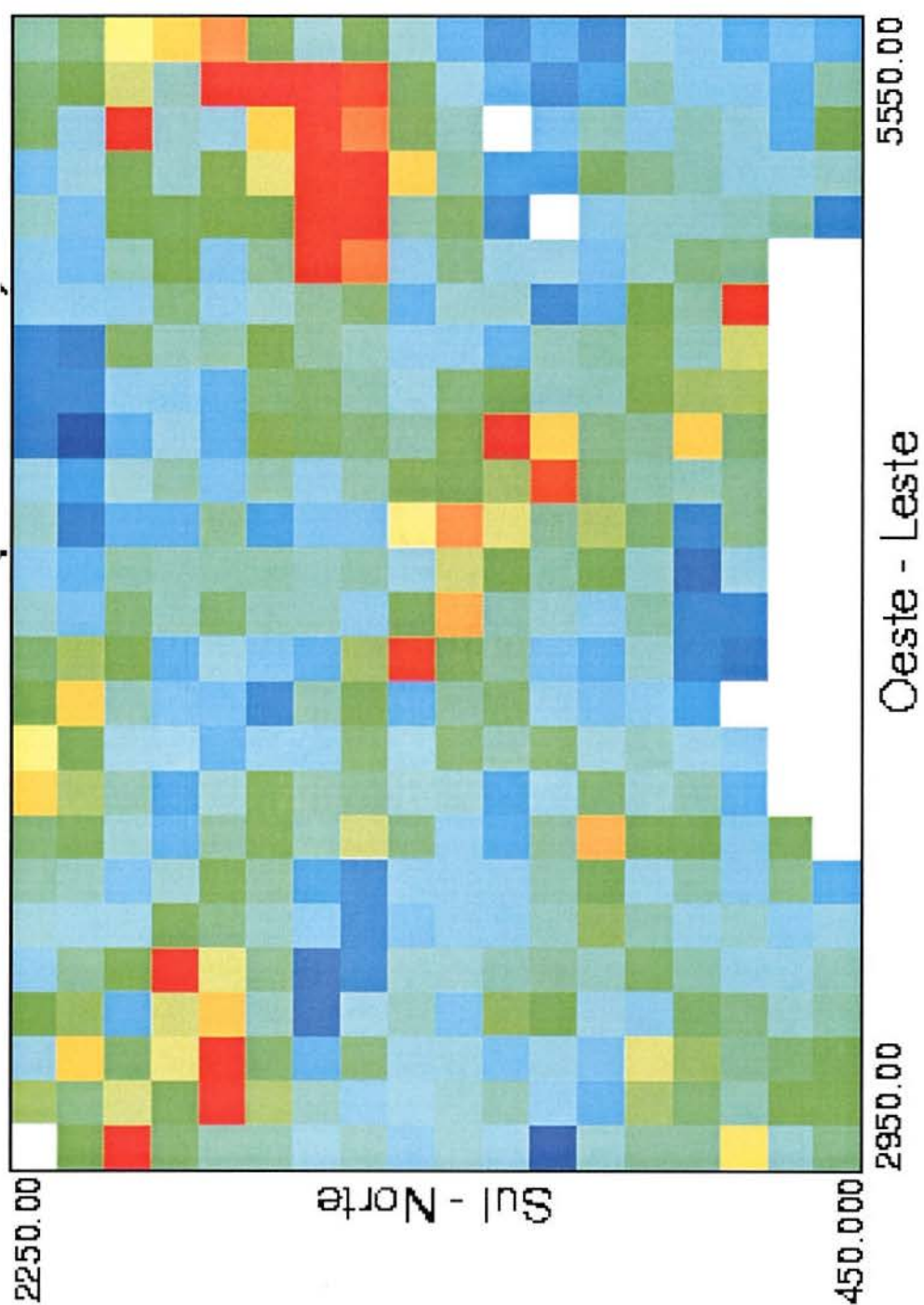
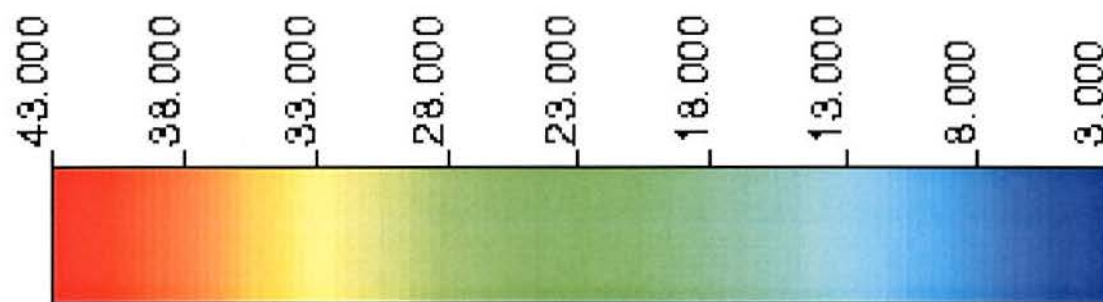


Figura 4.13 (c) - Realização n°24, para dados de SPT da camada II.

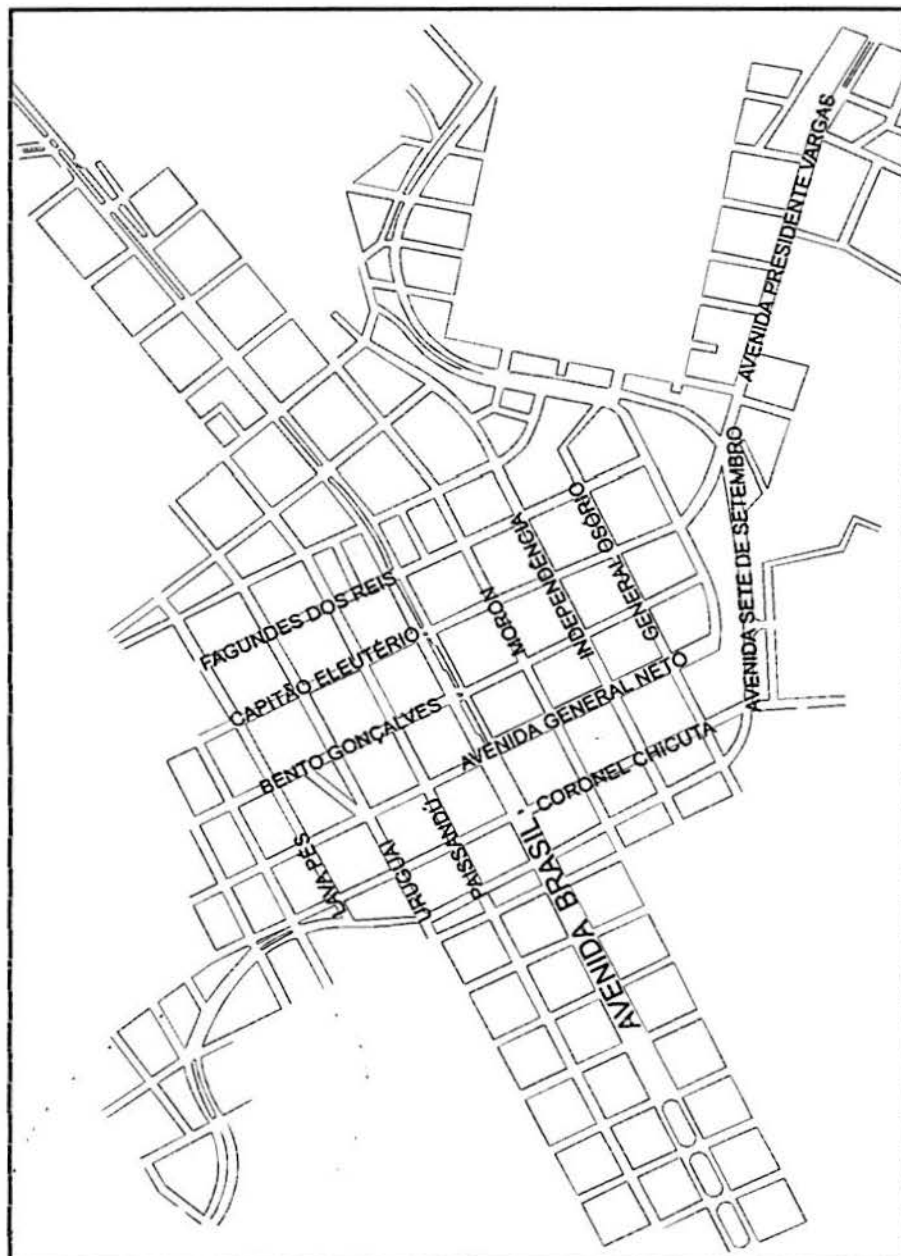


Figura 4.14 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

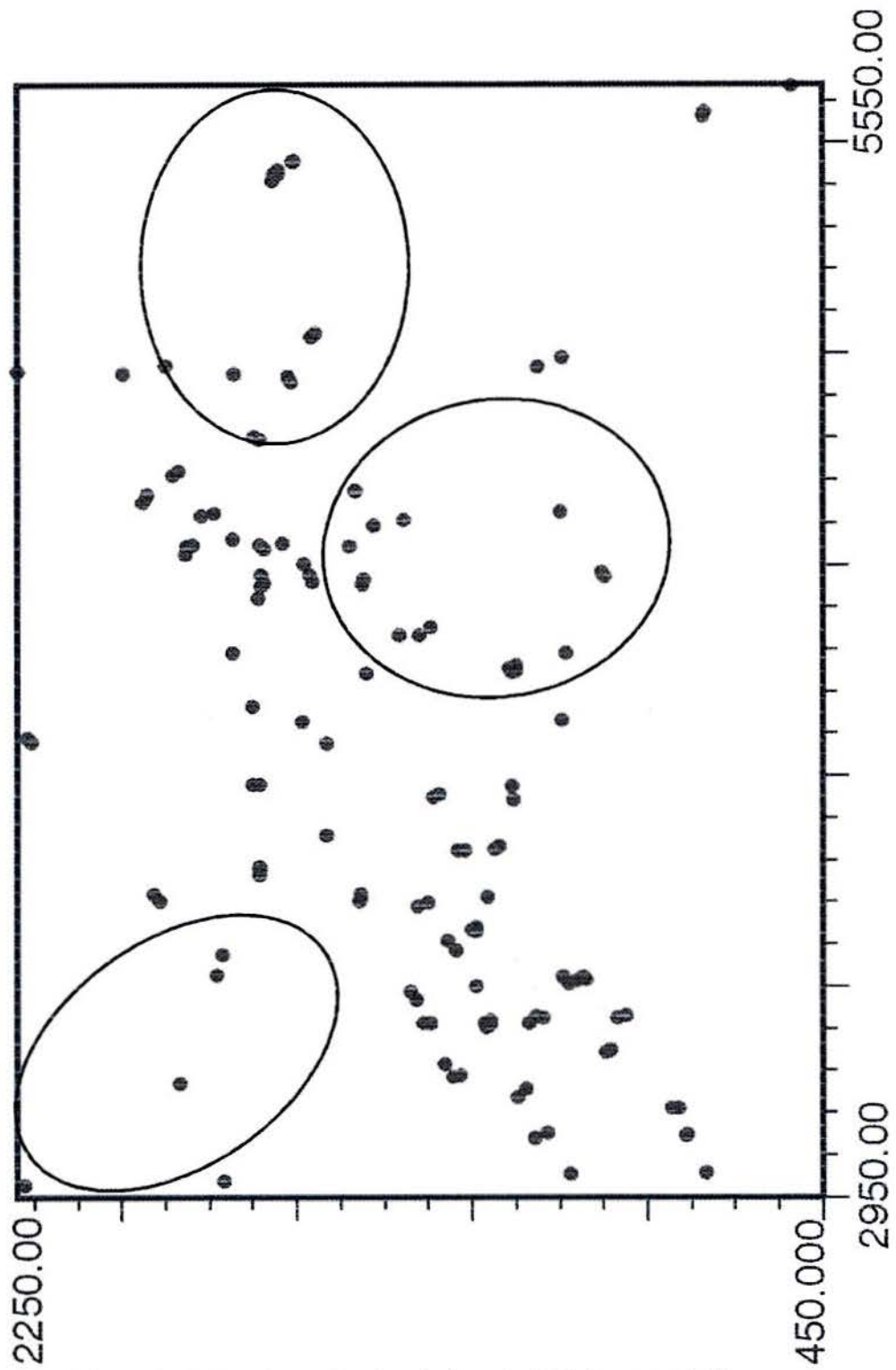


Figura 4.14 (b) - Locação dos dados de SPT da camada II.

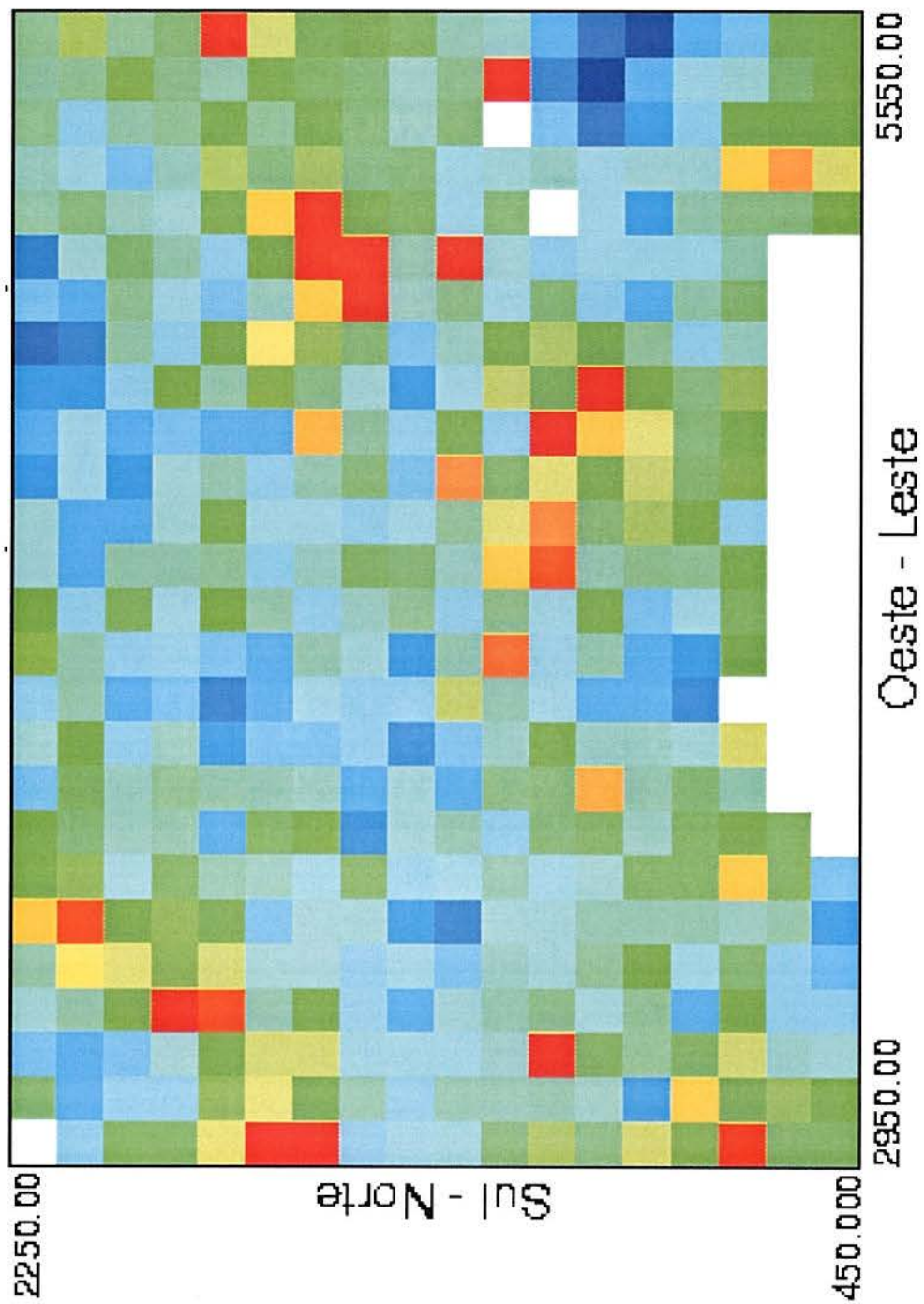
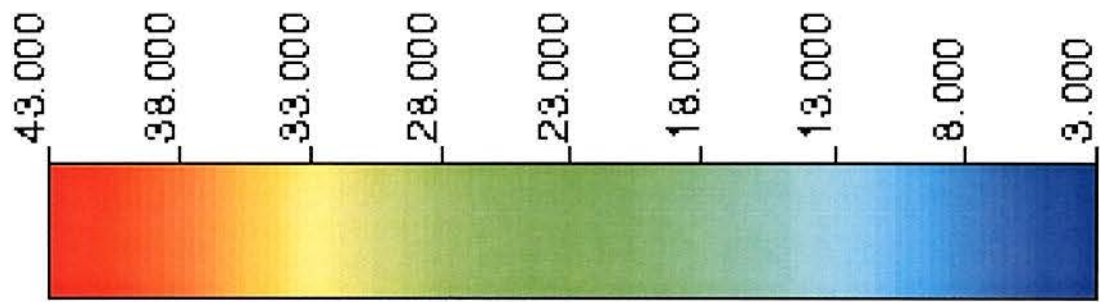


Figura 4.14 (c) - Realização nº39, para dados de SPT da camada II.

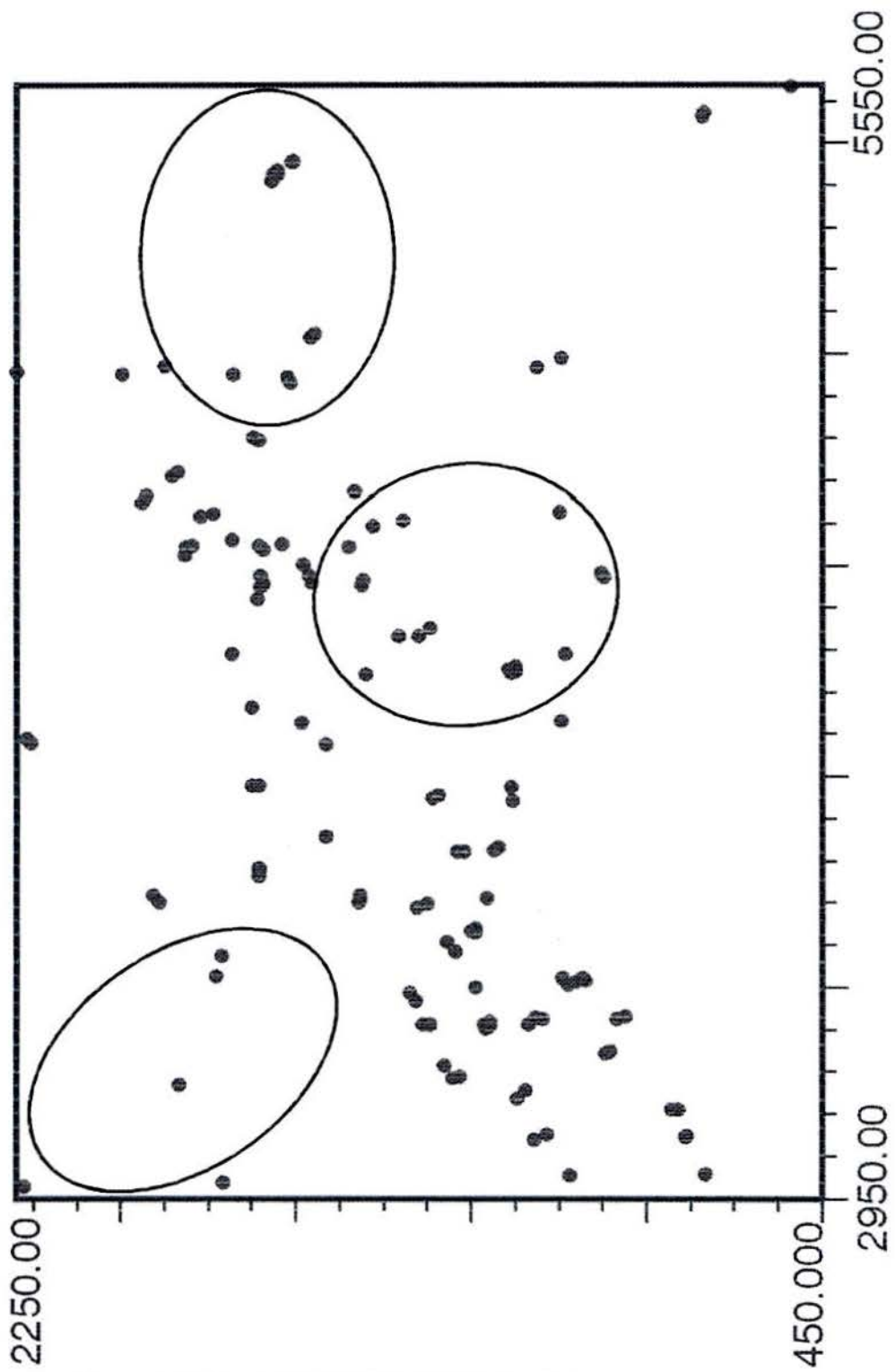


Figura 4.15 (b) - Locação dos dados de SPT da camada II.

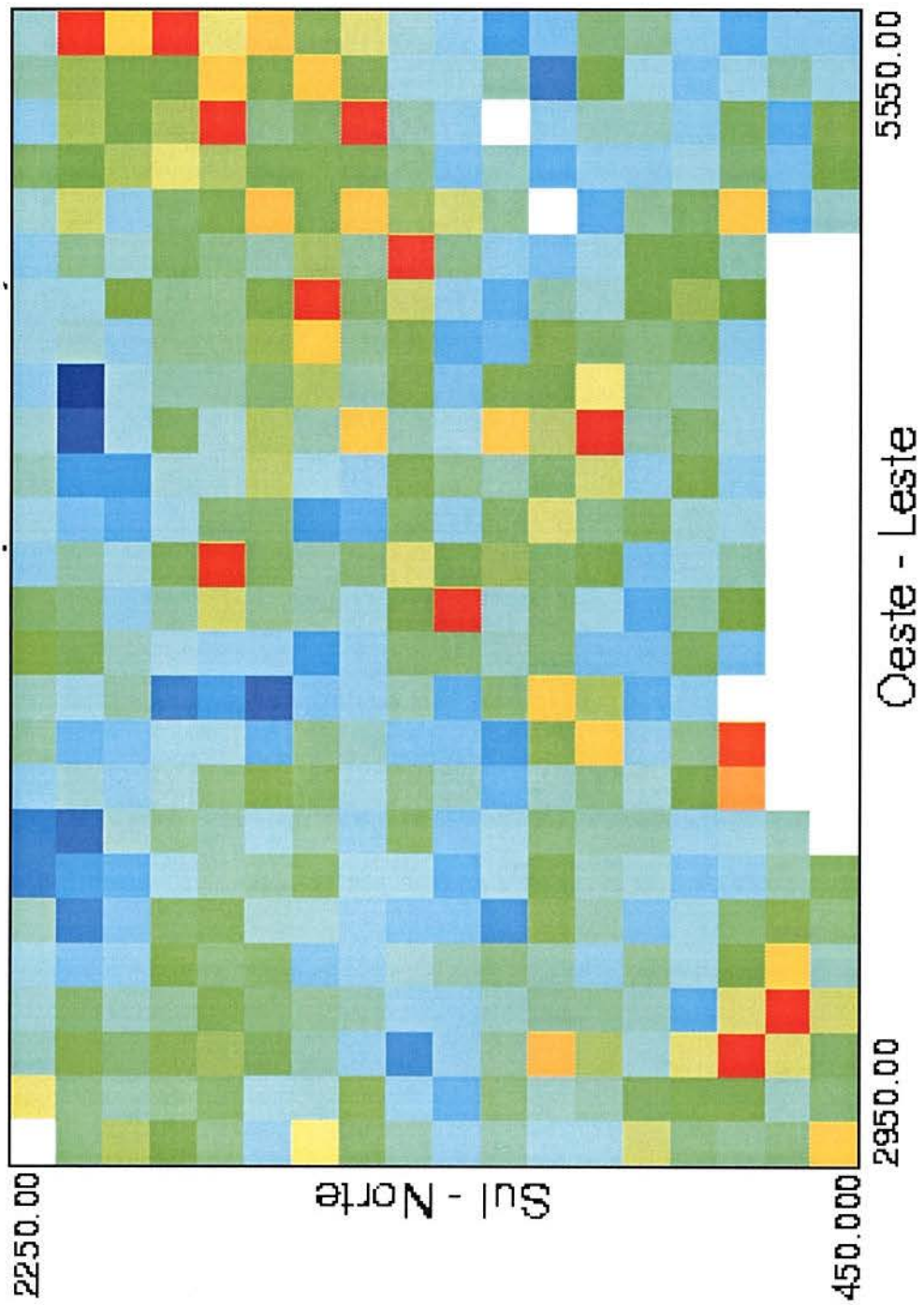
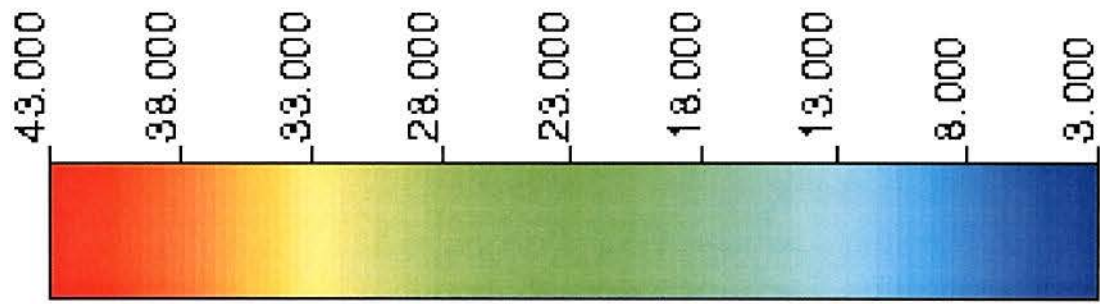


Figura 4.15 (c) - Realização n°43, para dados de SPT da camada II.

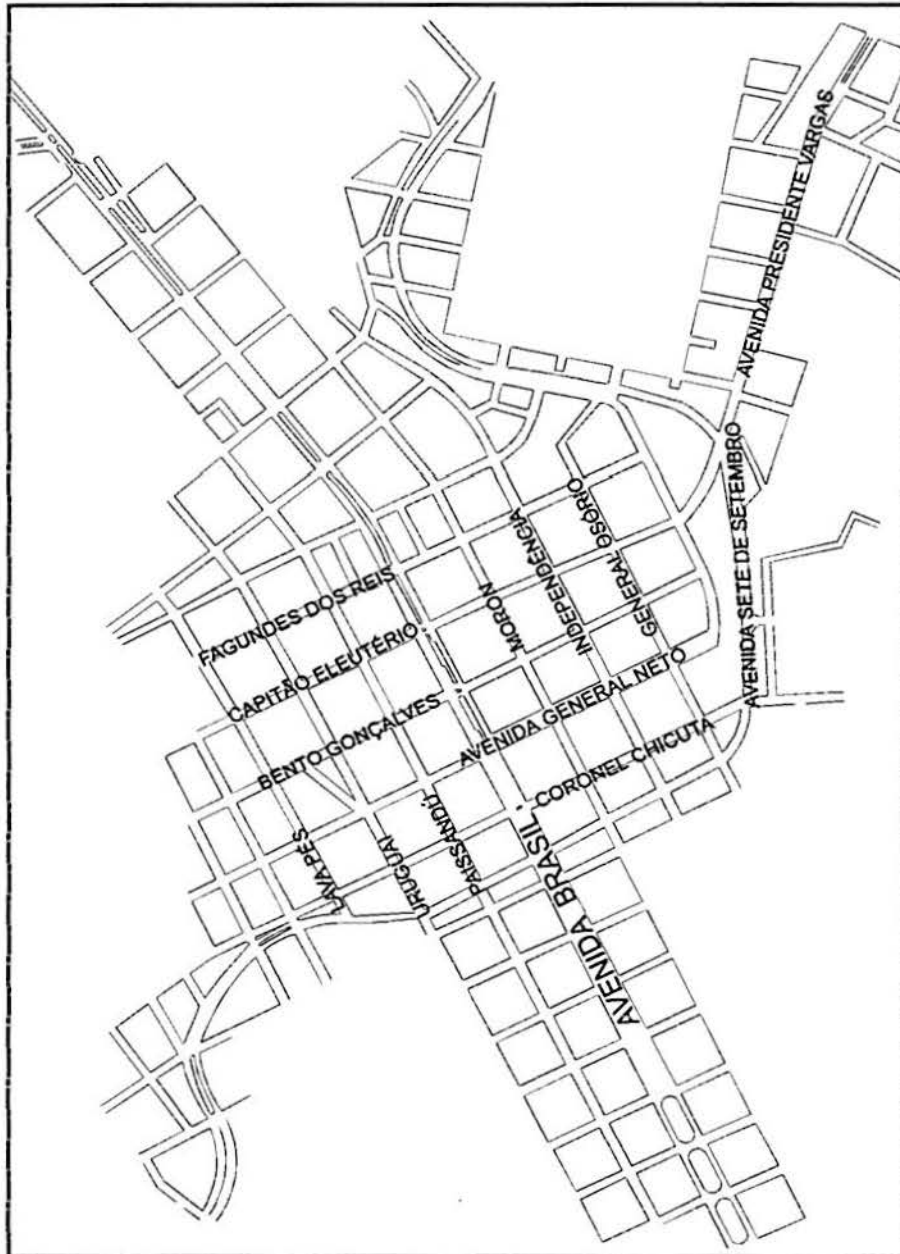


Figura 4.16 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

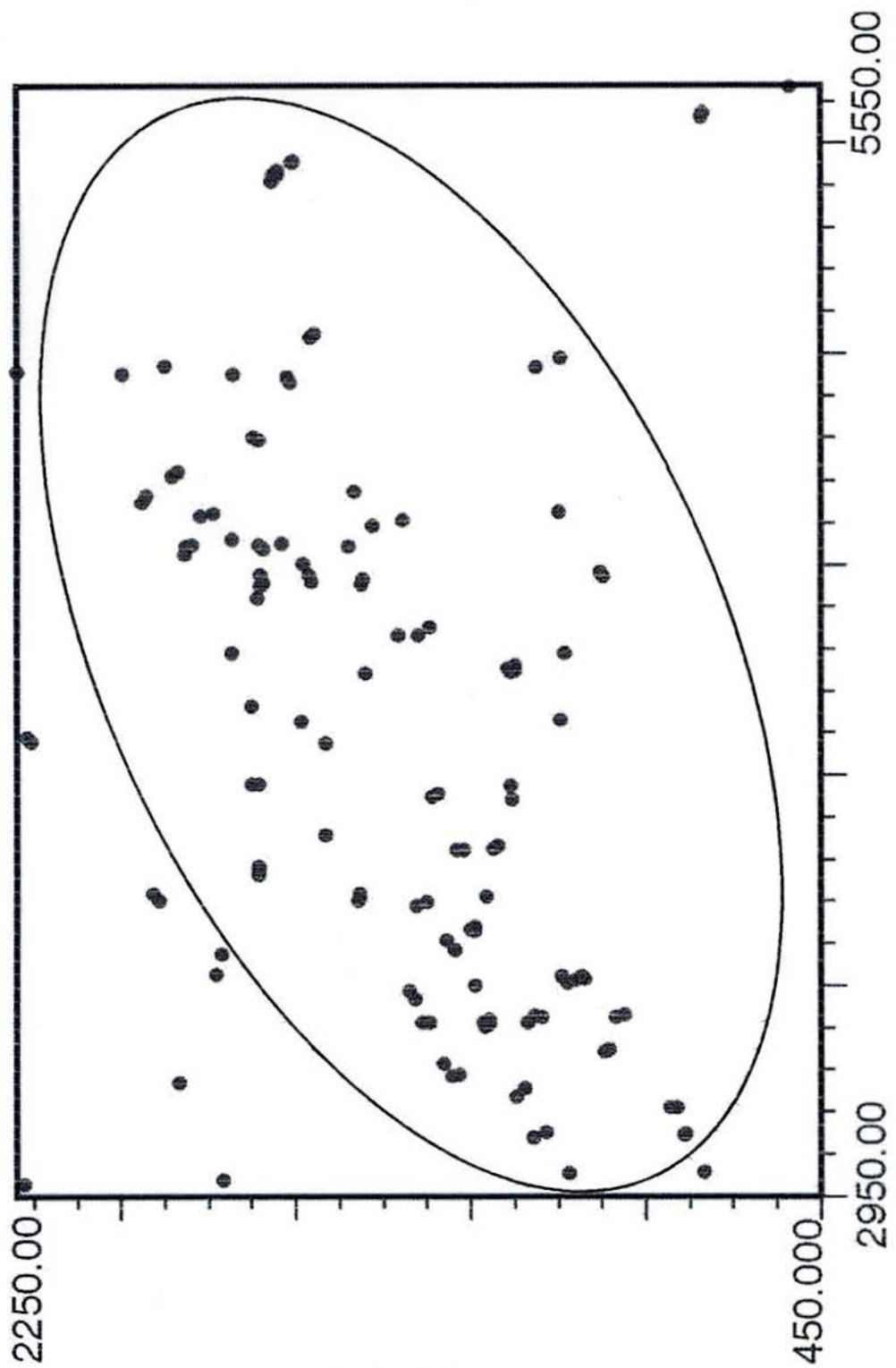


Figura 4.16 (b) - Locação dos dados de SPT da camadalll.

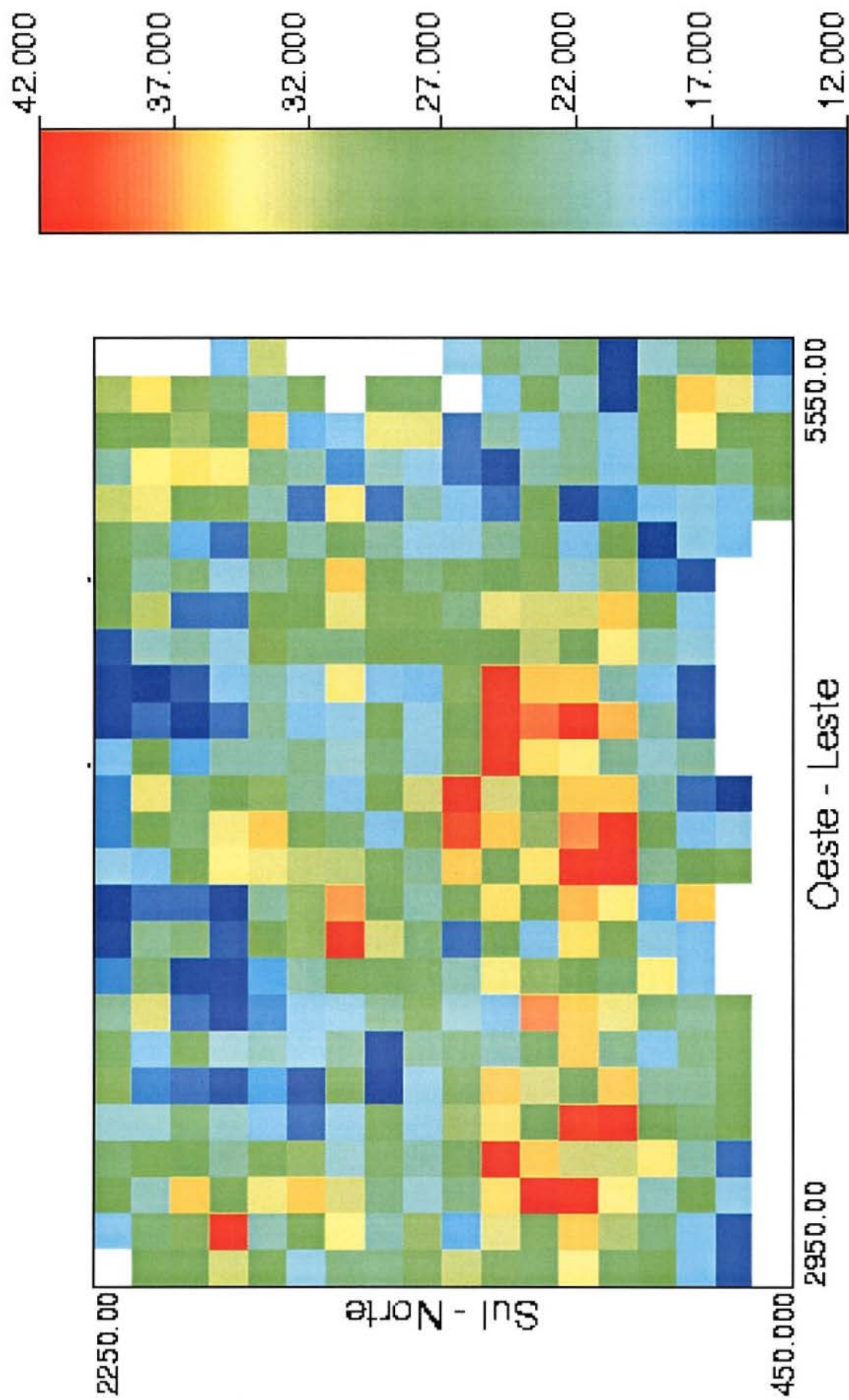


Figura 4.16 (c) - Realização nº03, para dados de SPT da camada III.

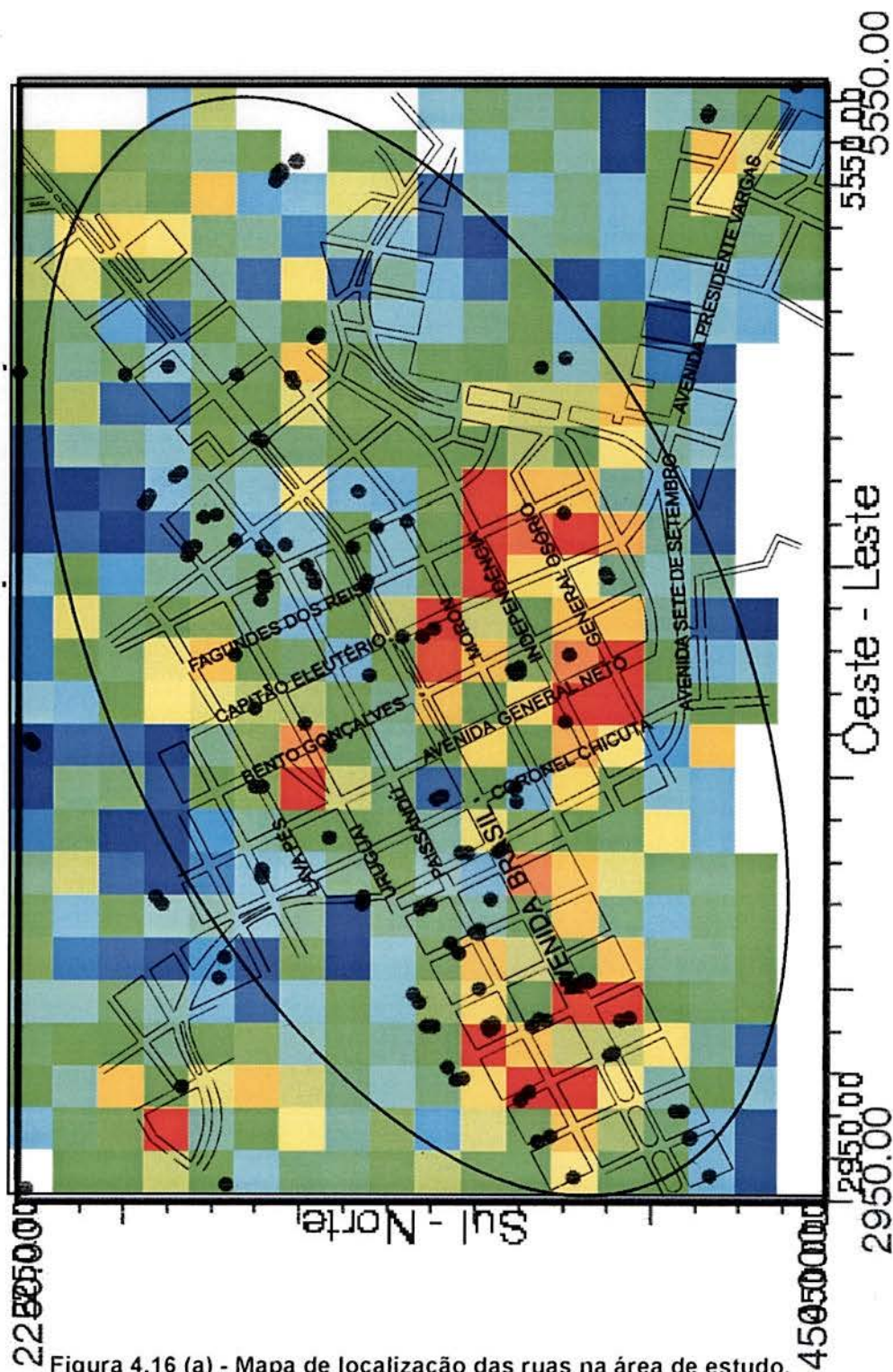
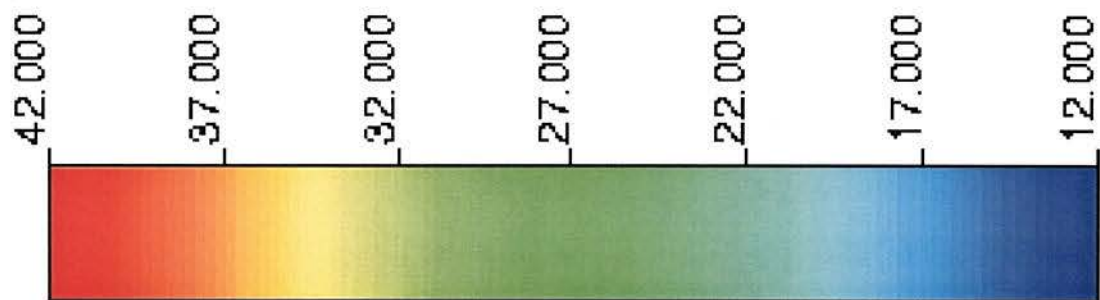


Figura 4.16 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.
Figura 4.16 (b) - Realização dos dados de SPT de campo.

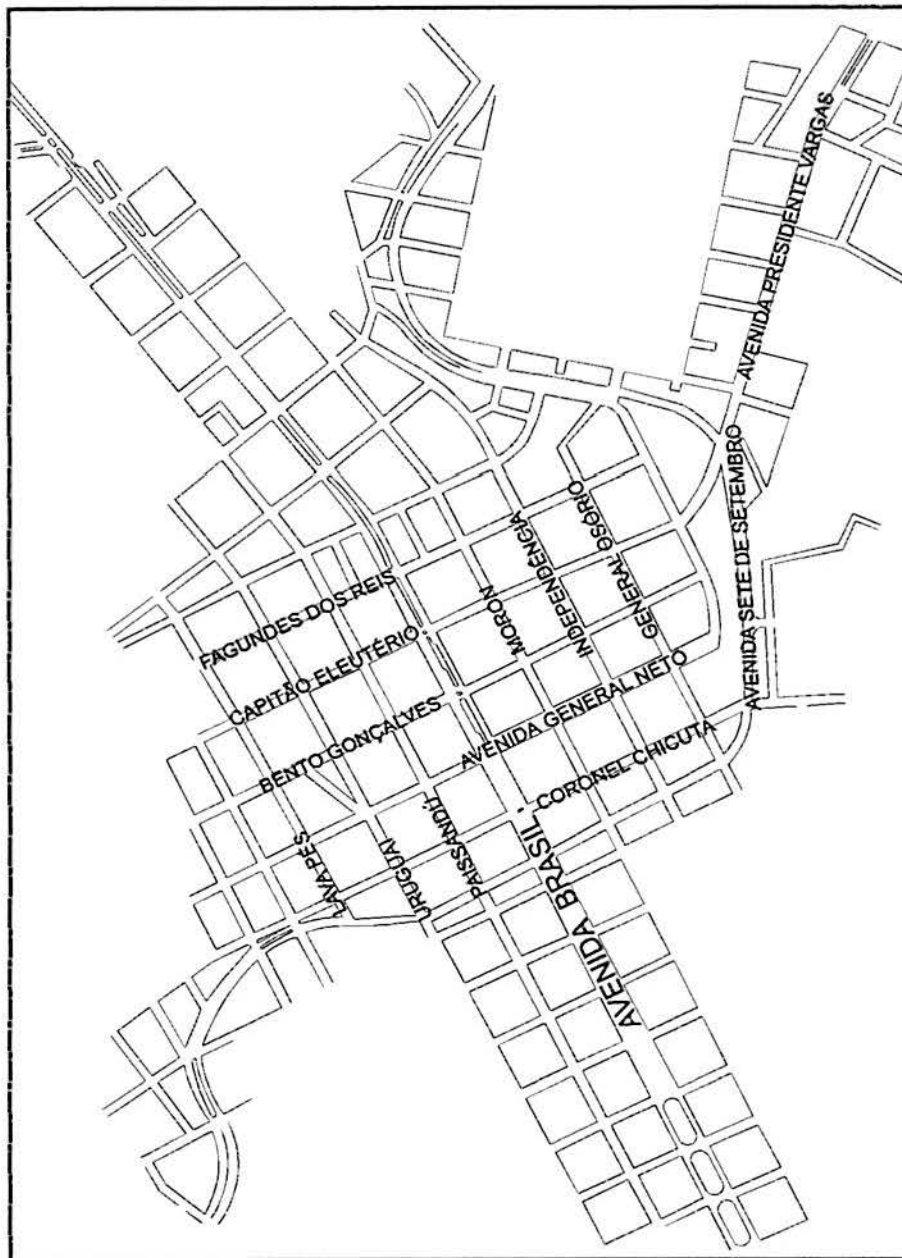


Figura 4.17 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

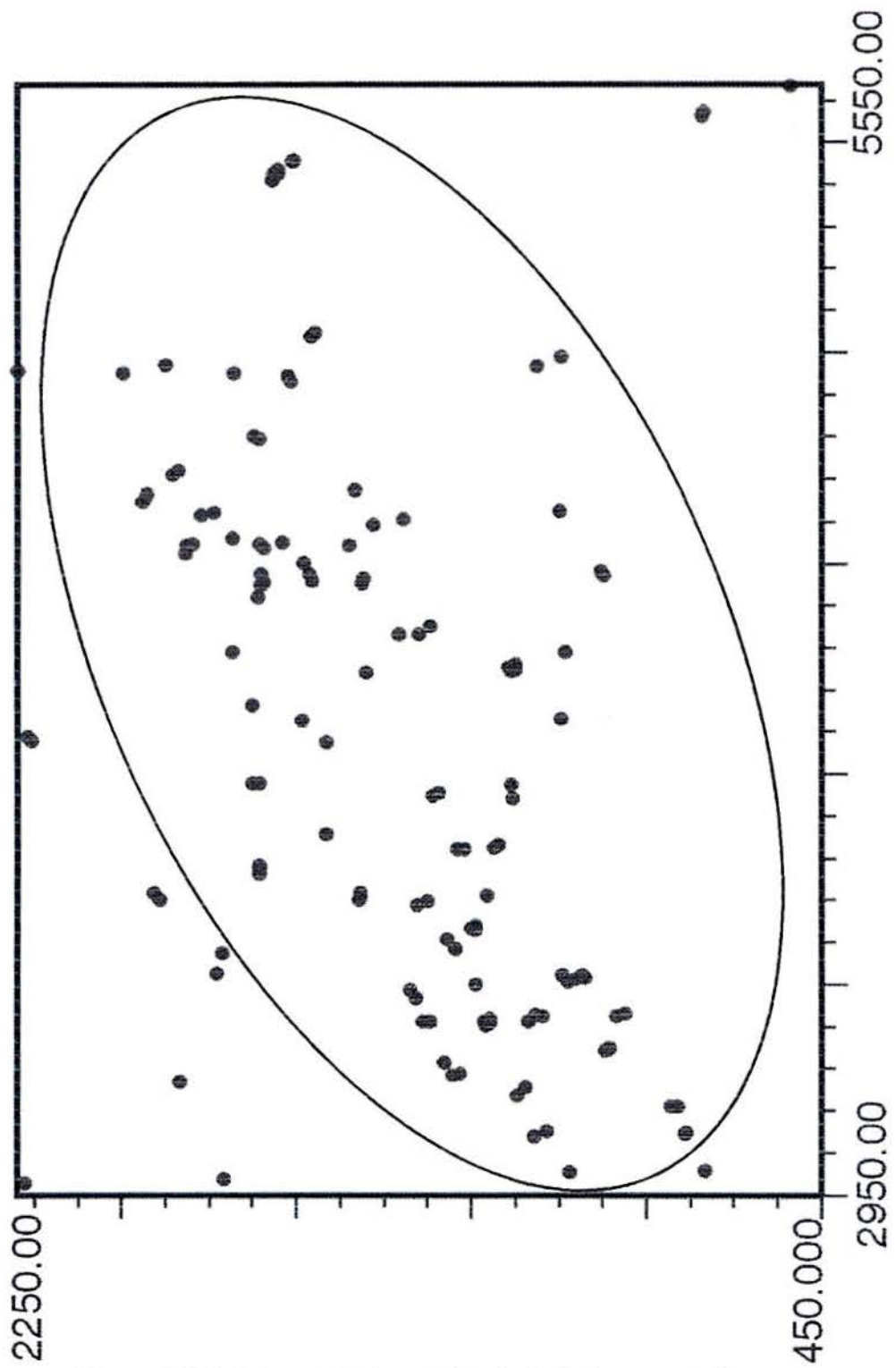


Figura 4.17 (b) - Locação dos dados de SPT da camada III.

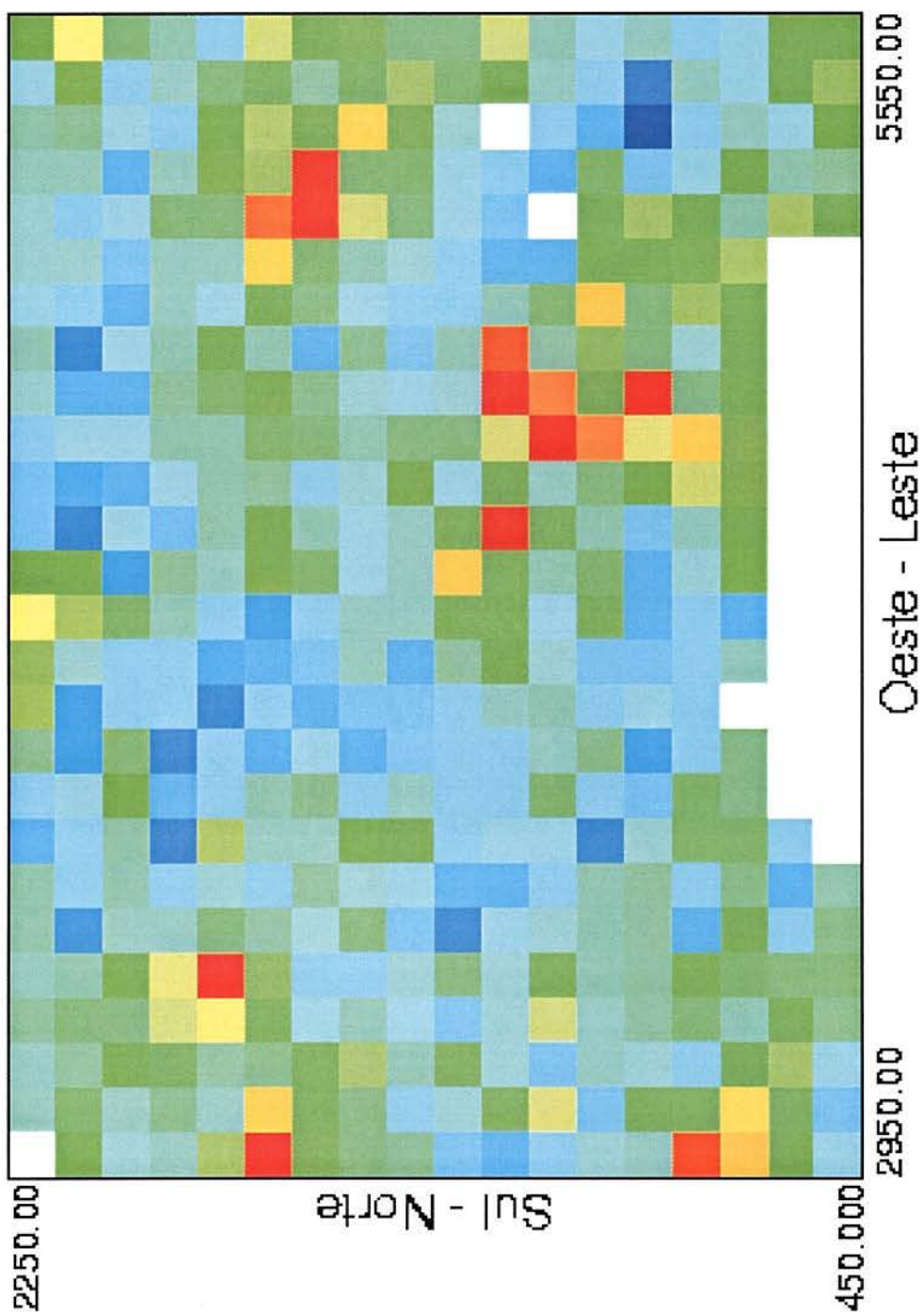
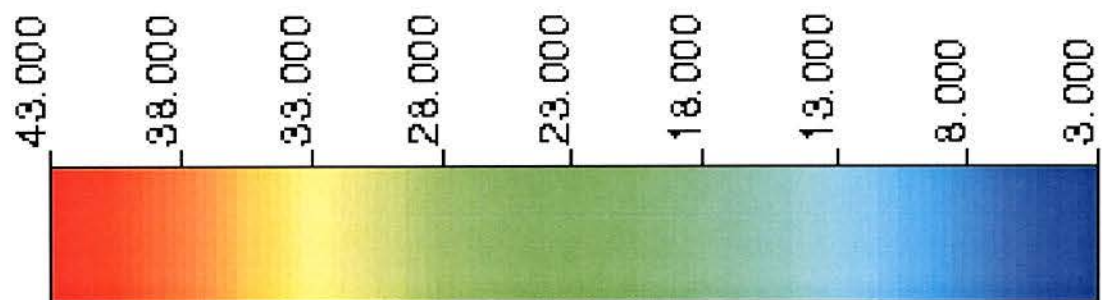


Figura 4.17 (c) - Realização nº18, para dados de SPT da camada III.

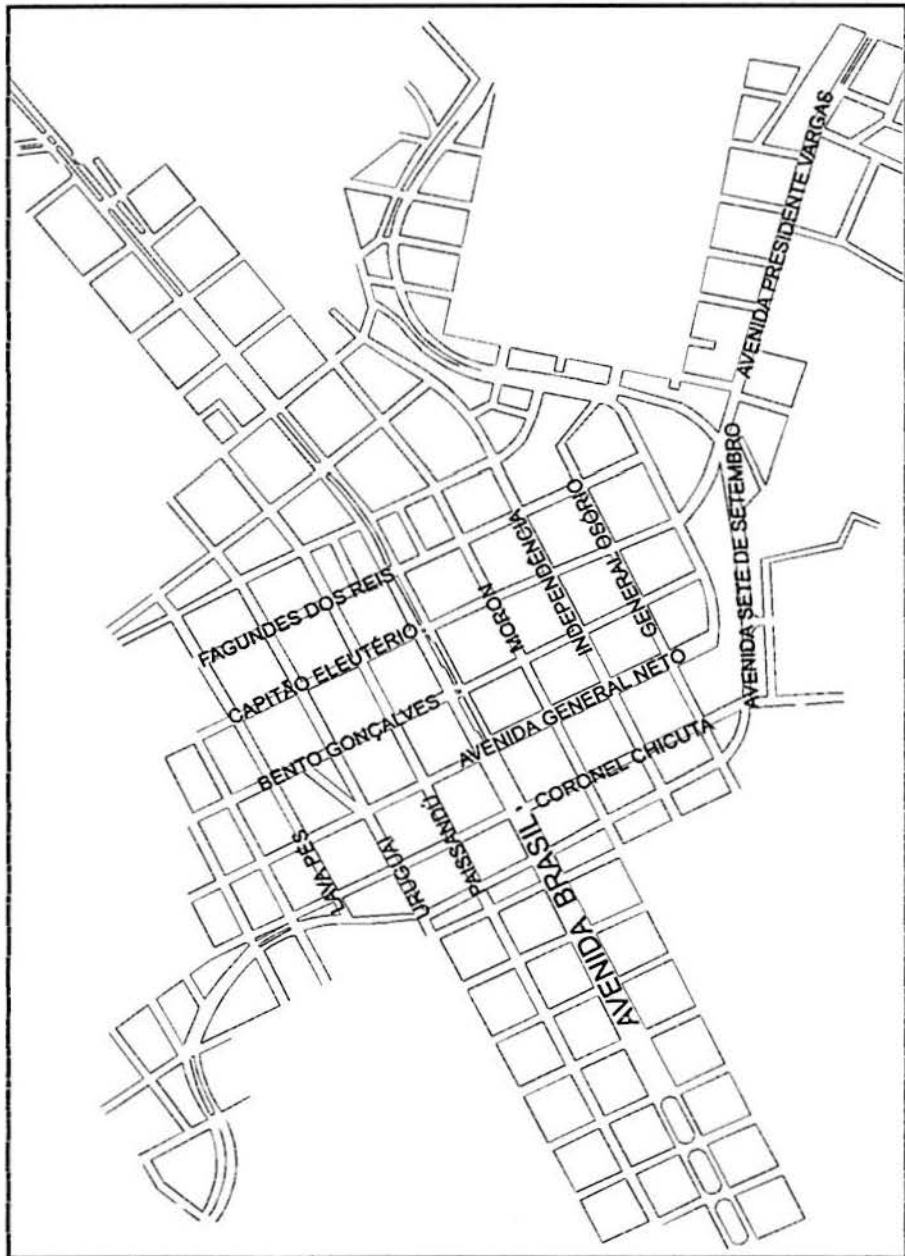


Figura 4.18 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

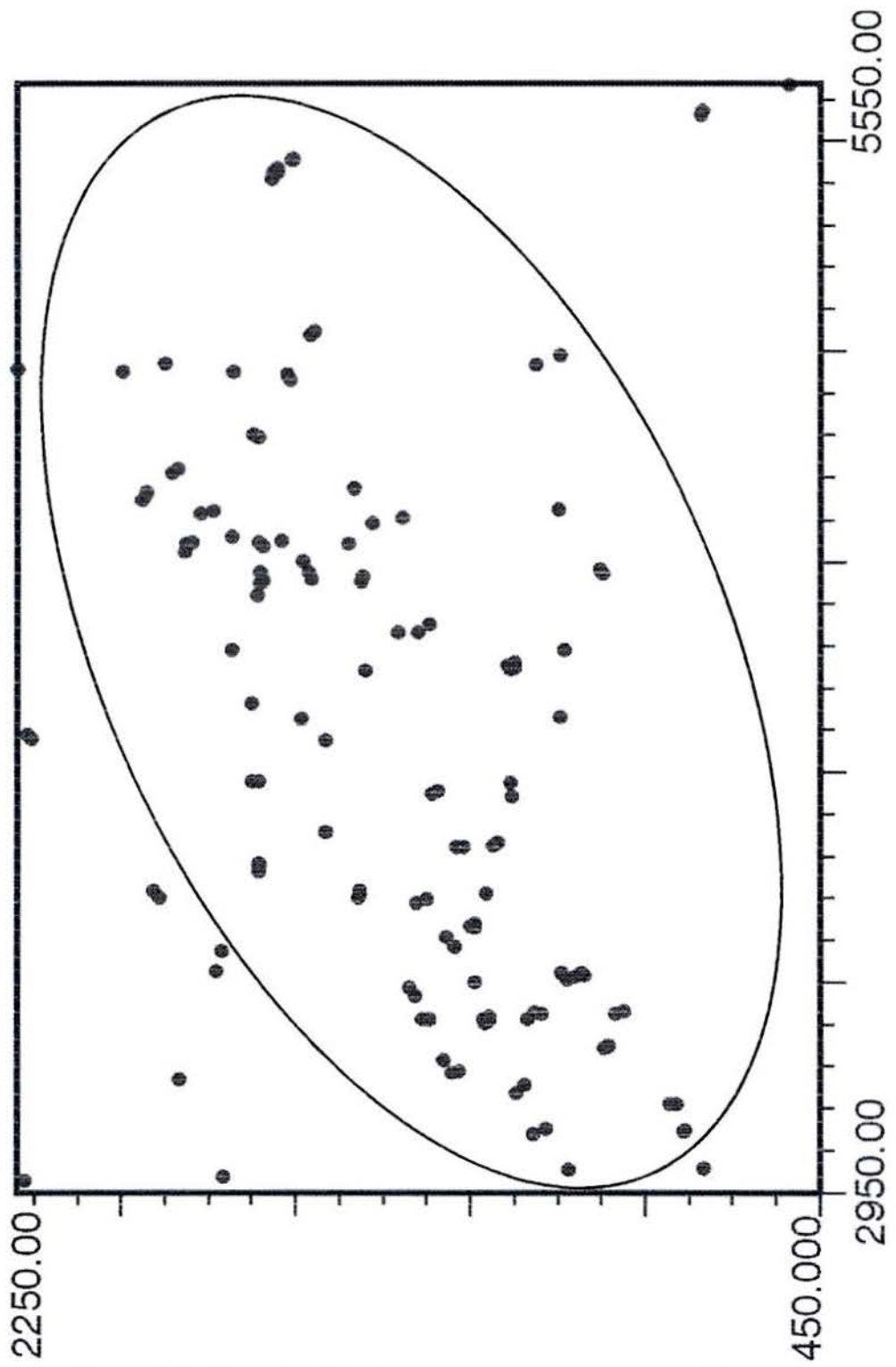


Figura 4.18 (b) - Locação dos dados de SPT da camada III.

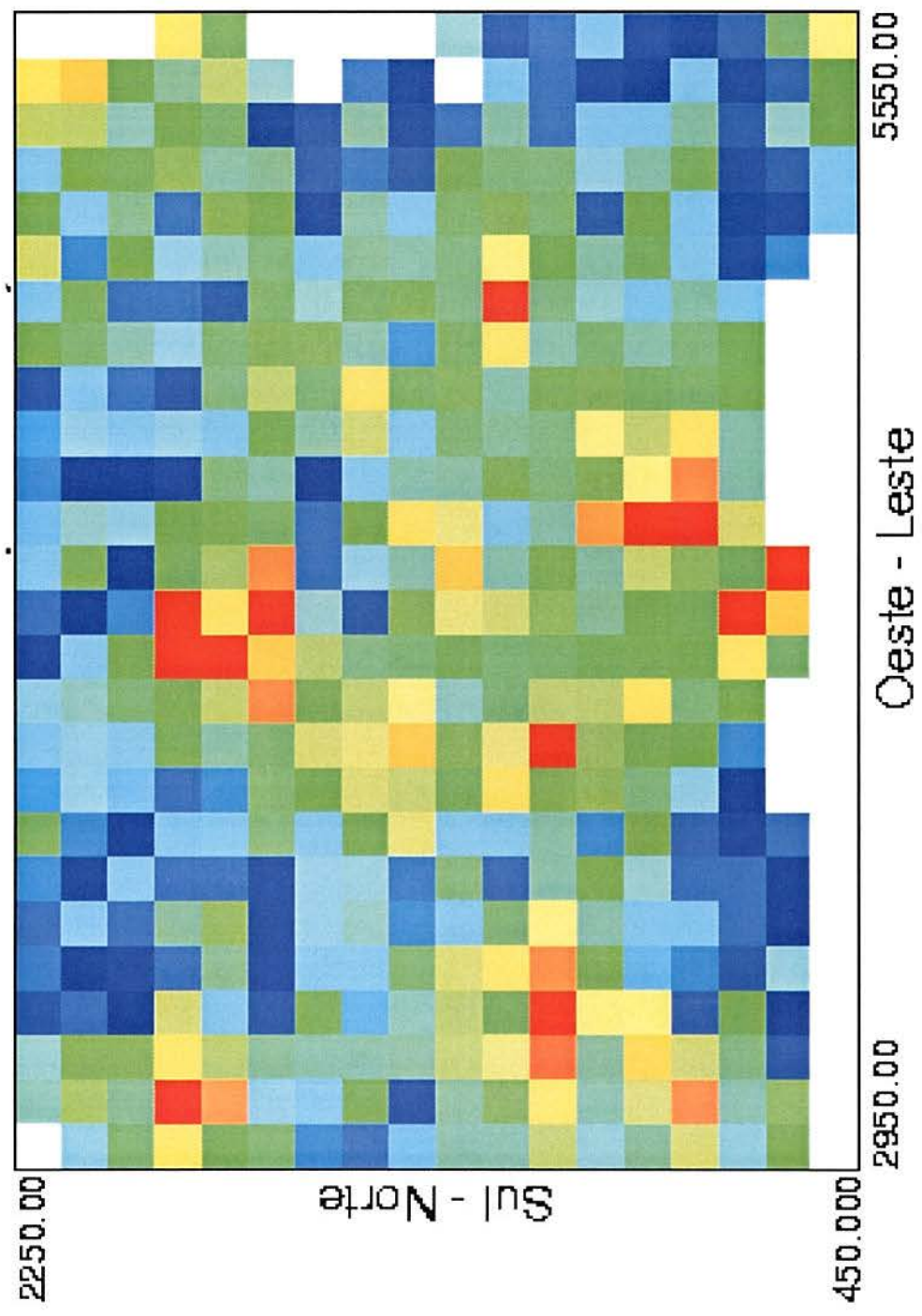
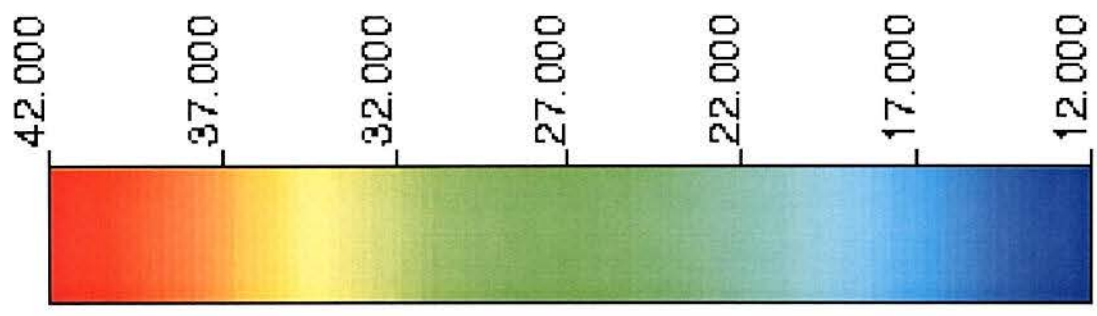


Figura 4.18 (c) - Realização n°24, para dados de SPT da camada III.

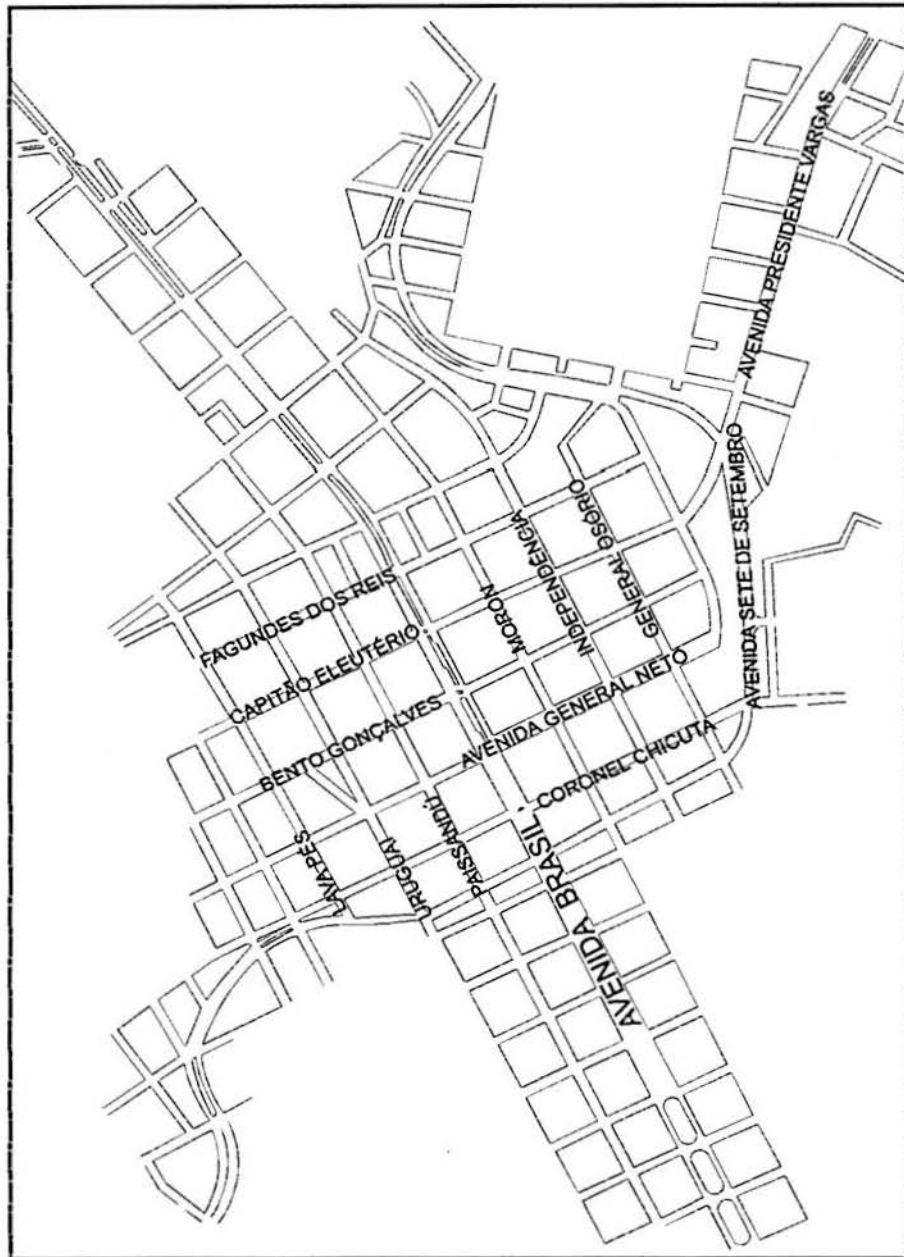


Figura 4.19 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

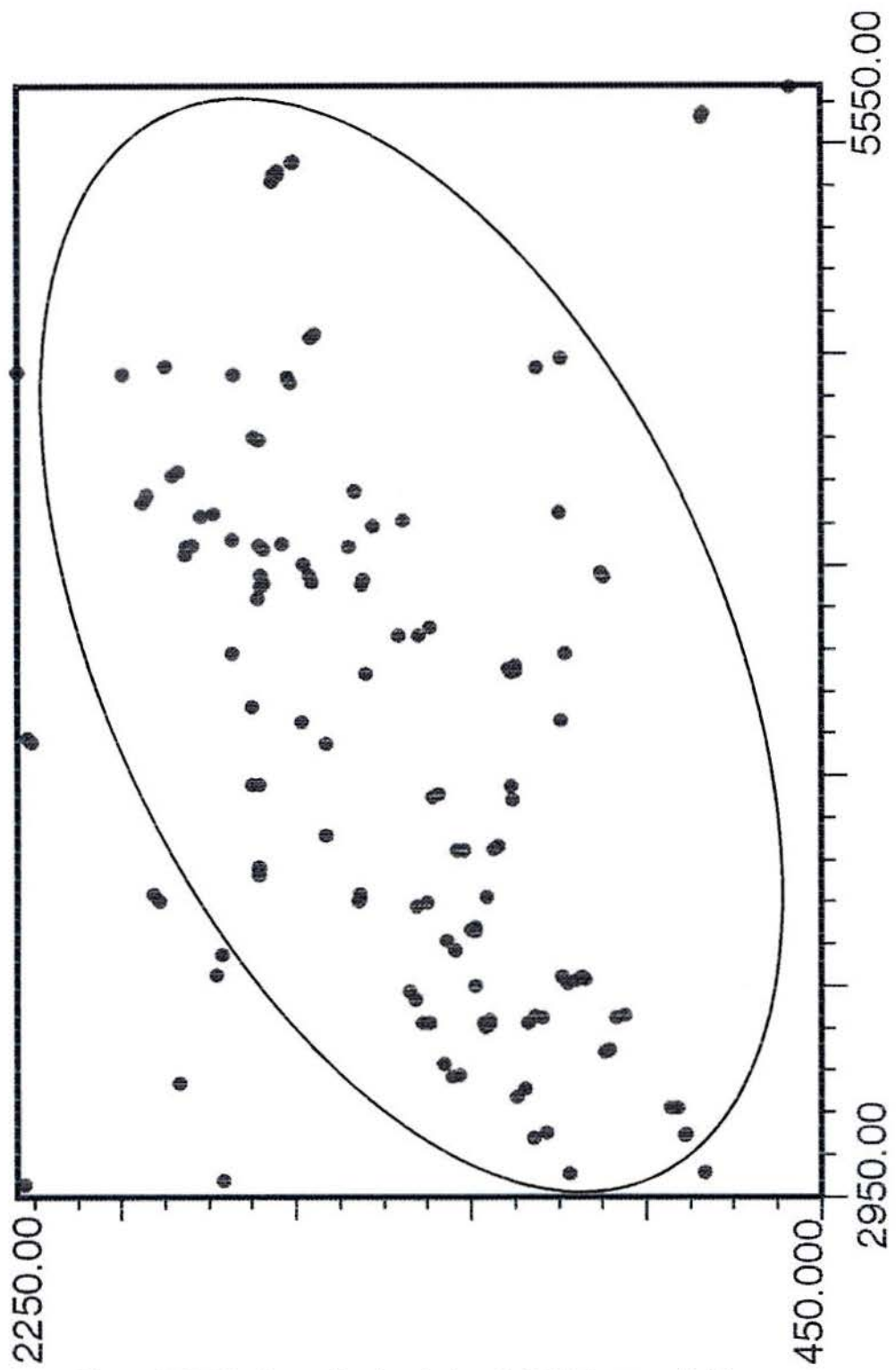


Figura 4.19 (b) - Locação dos dados de SPT da camada III.

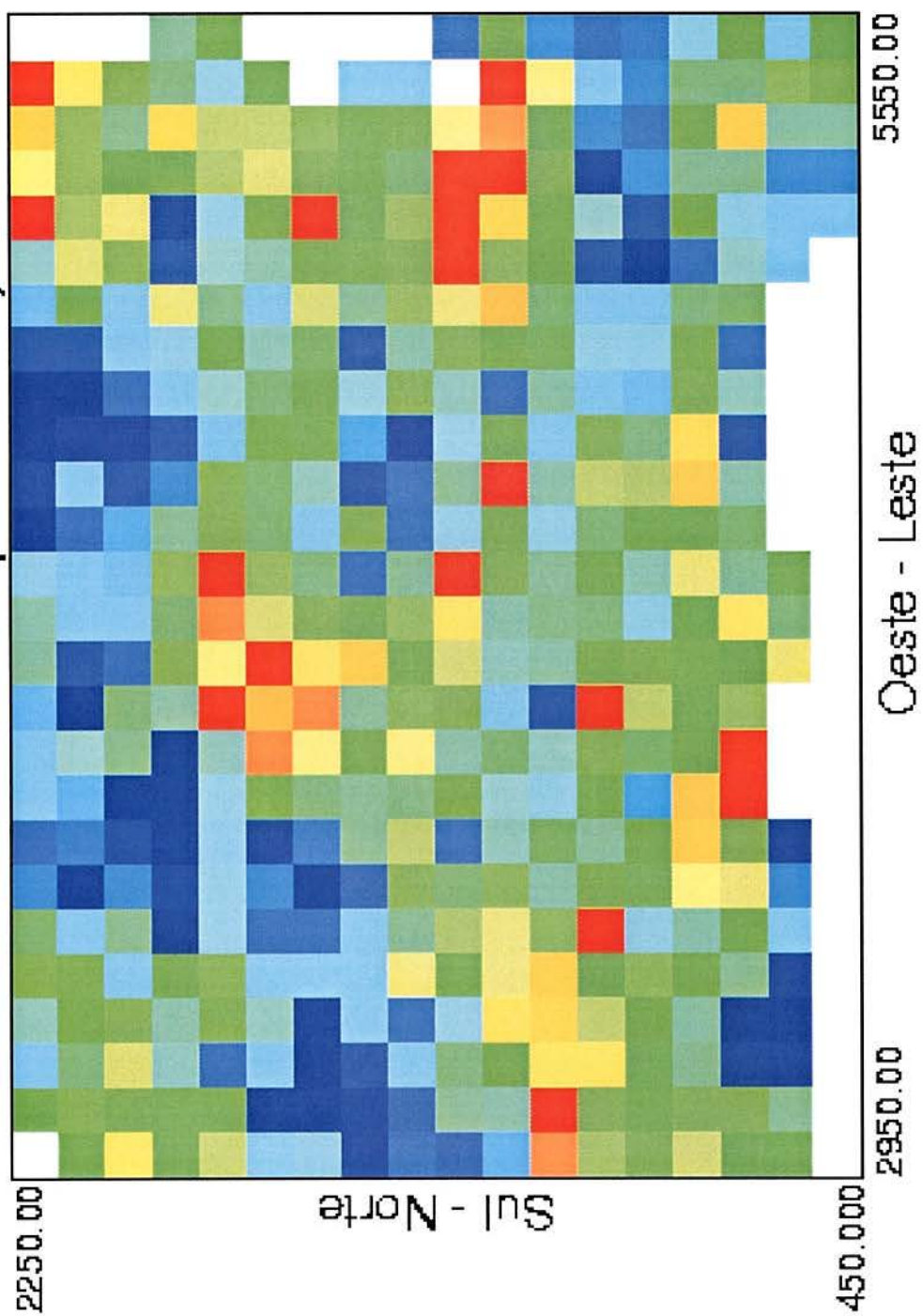
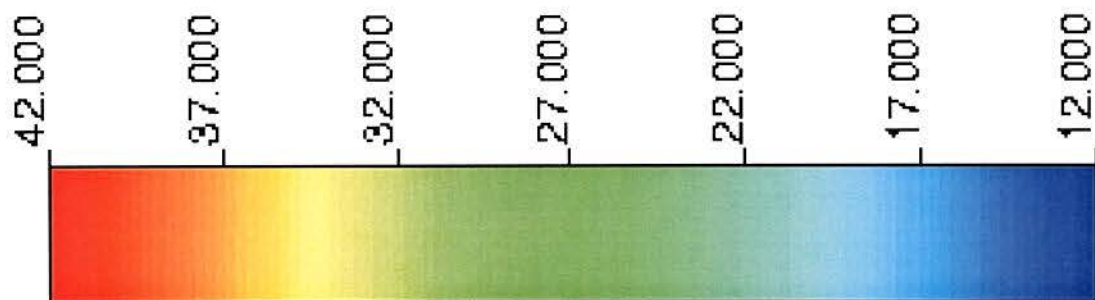


Figura 4.19 (c) - Realização n°39, para dados de SPT da camada III.

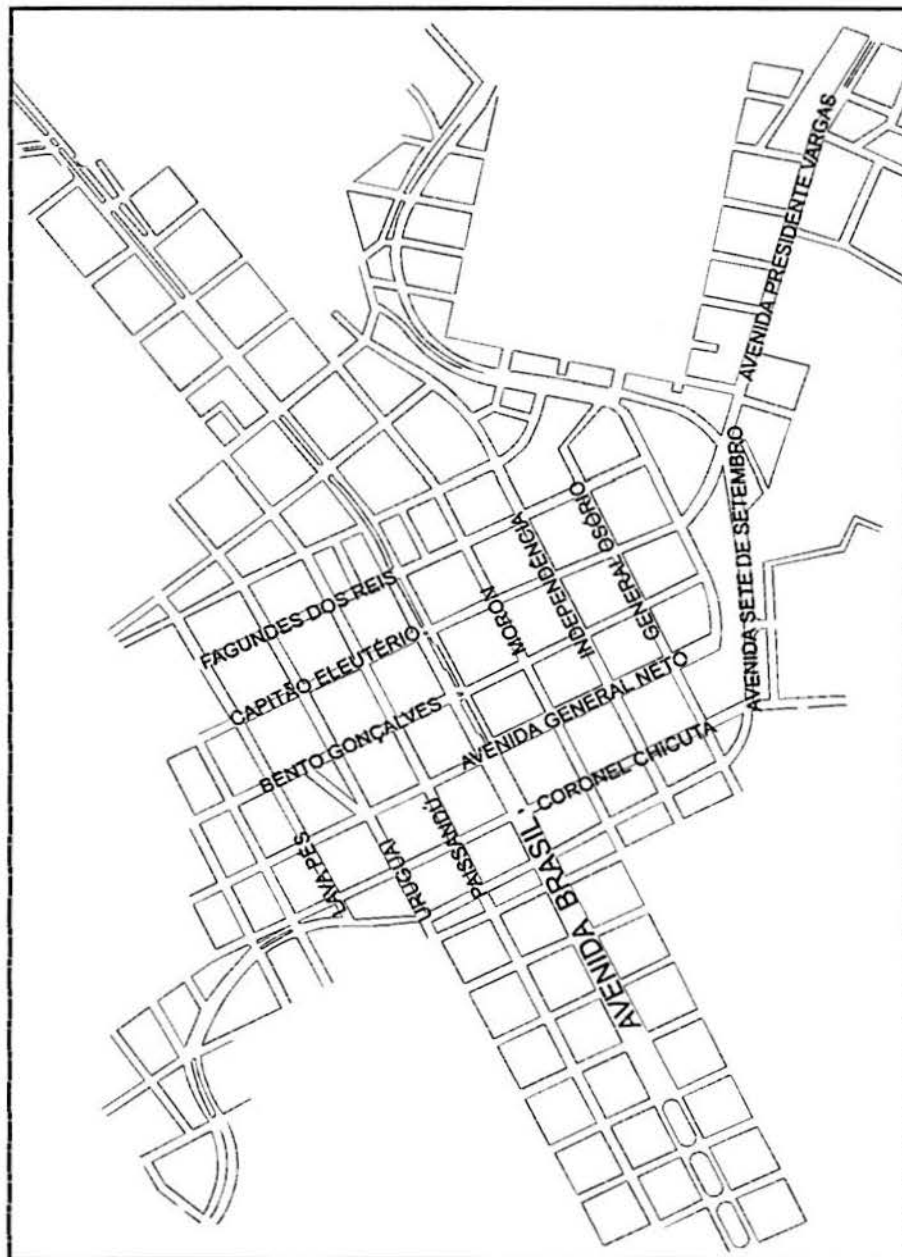


Figura 4.20 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

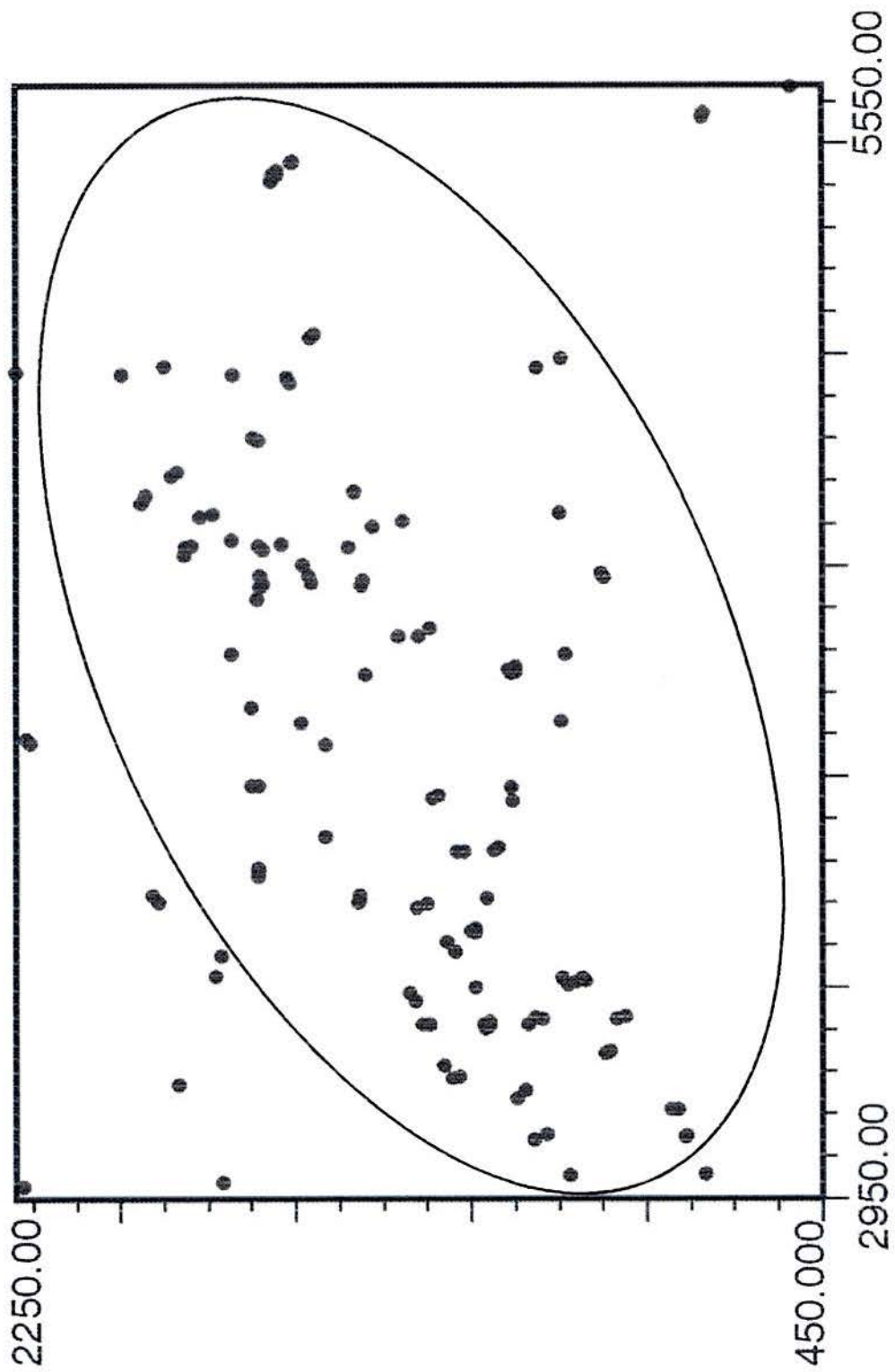


Figura 4.20 (b) - Localização dos dados de SPT da camada III.

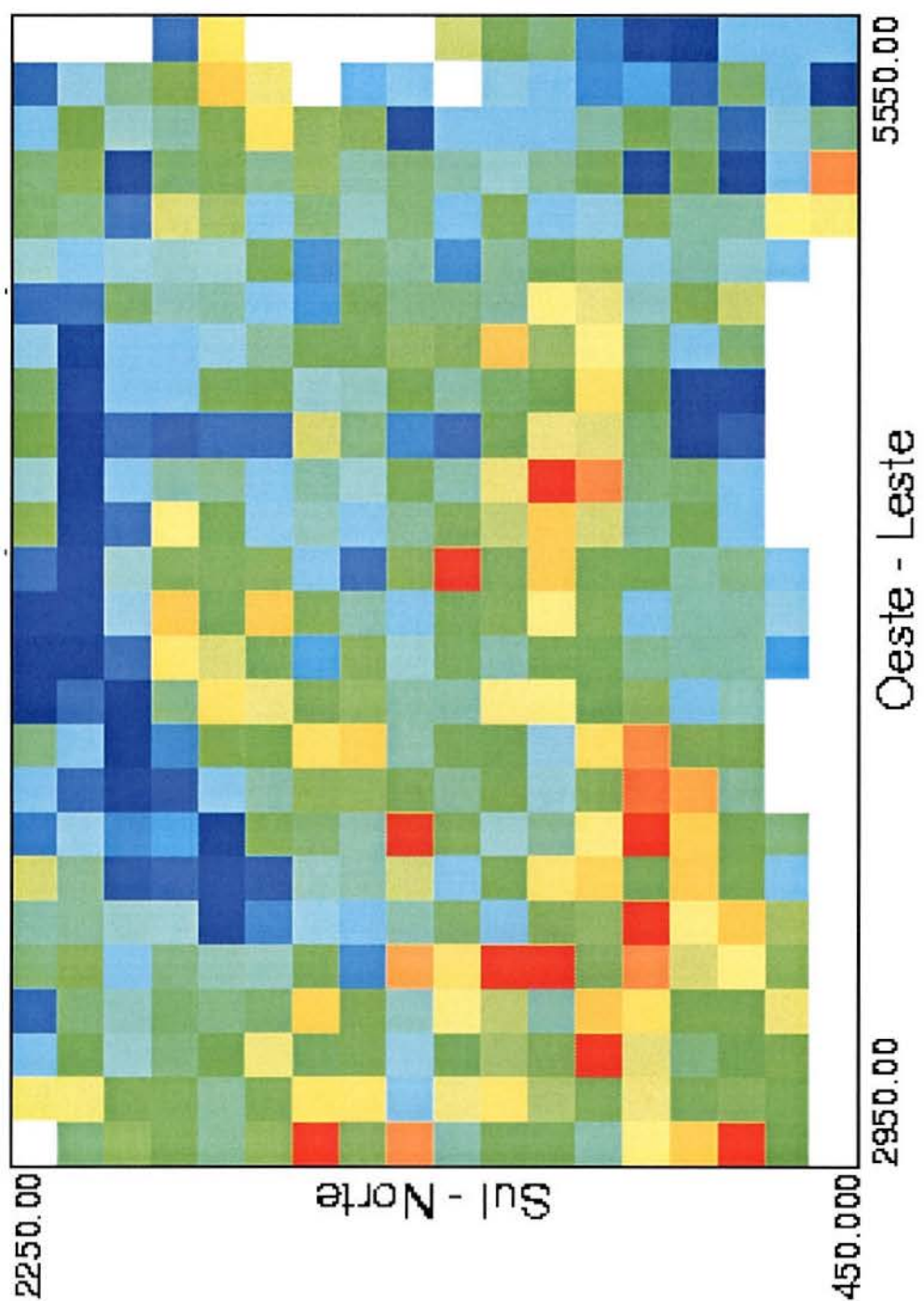
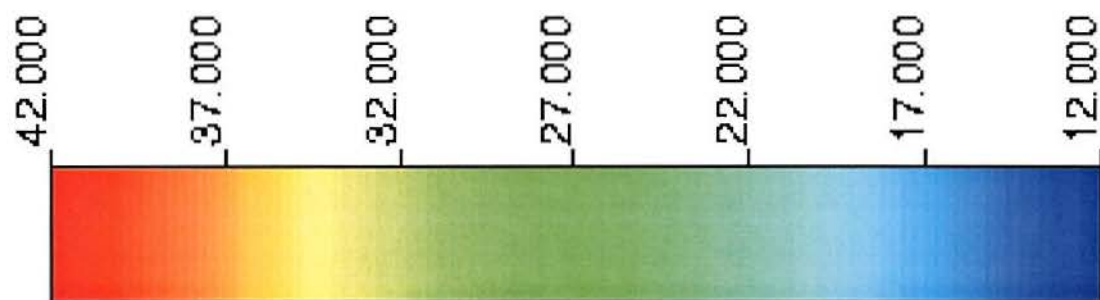


Figura 4.20 (c) - Realização nº43, para dados de SPT da camada III.

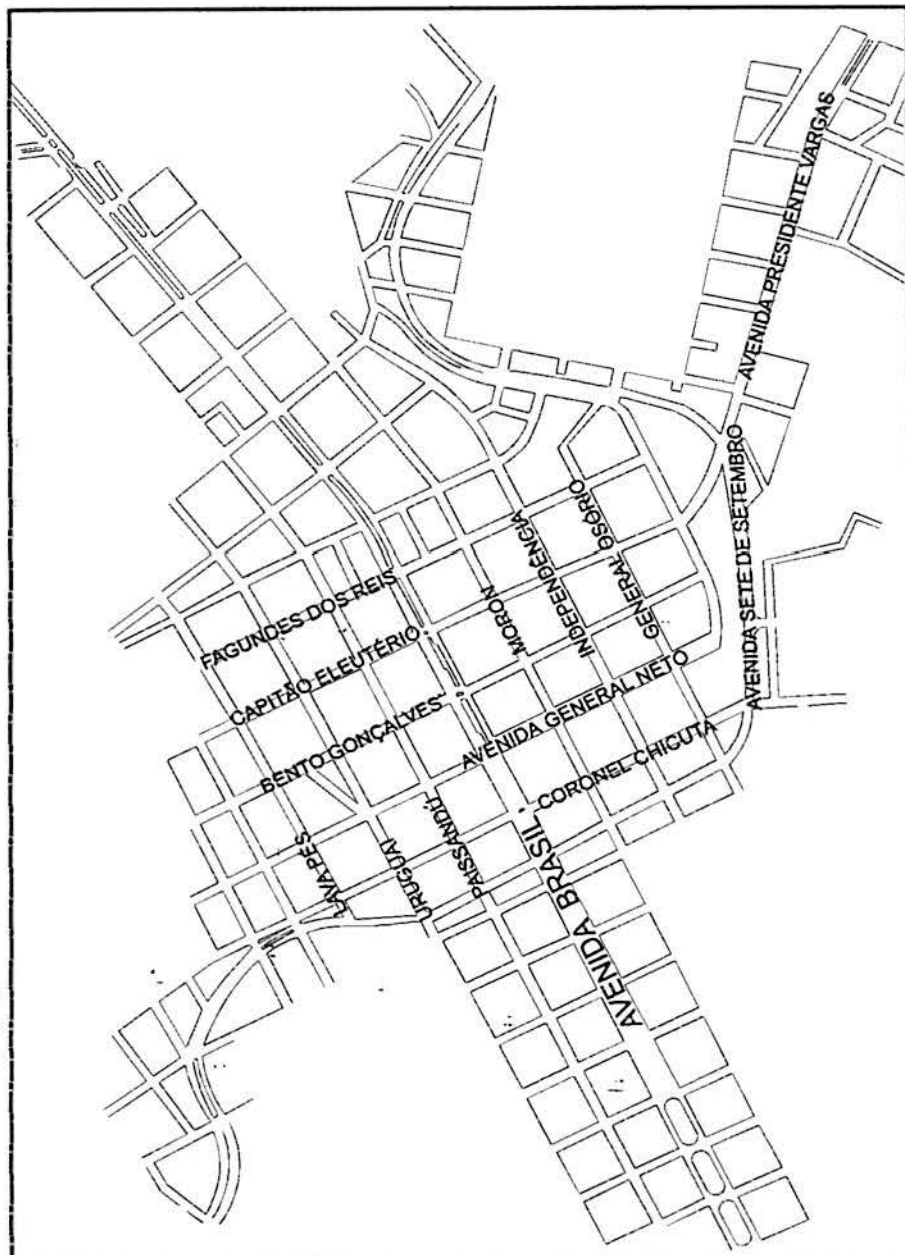


Figura 4.21 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

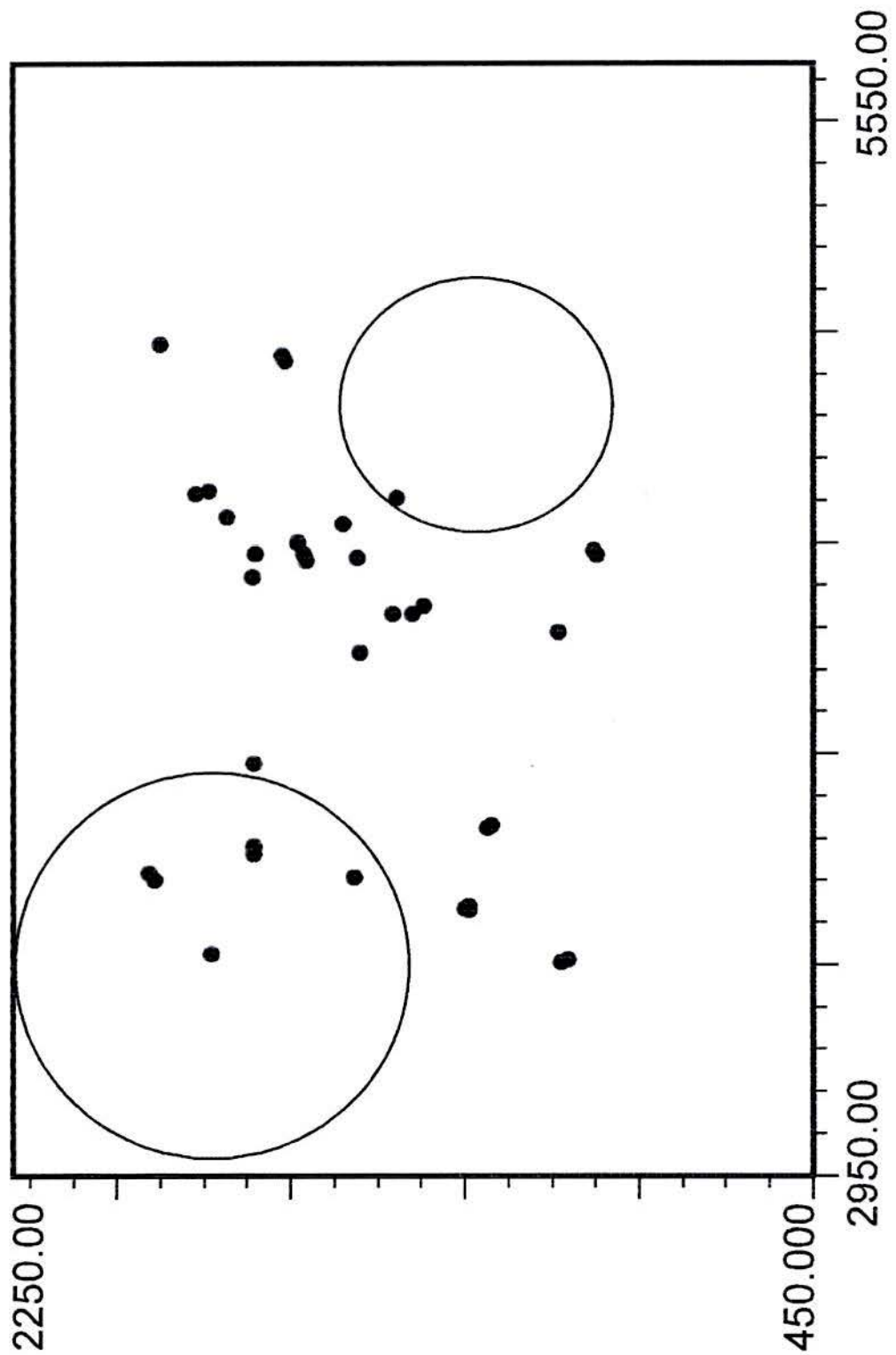


Figura 4.21 (b) - Localização dos dados de SPT da camada IV.

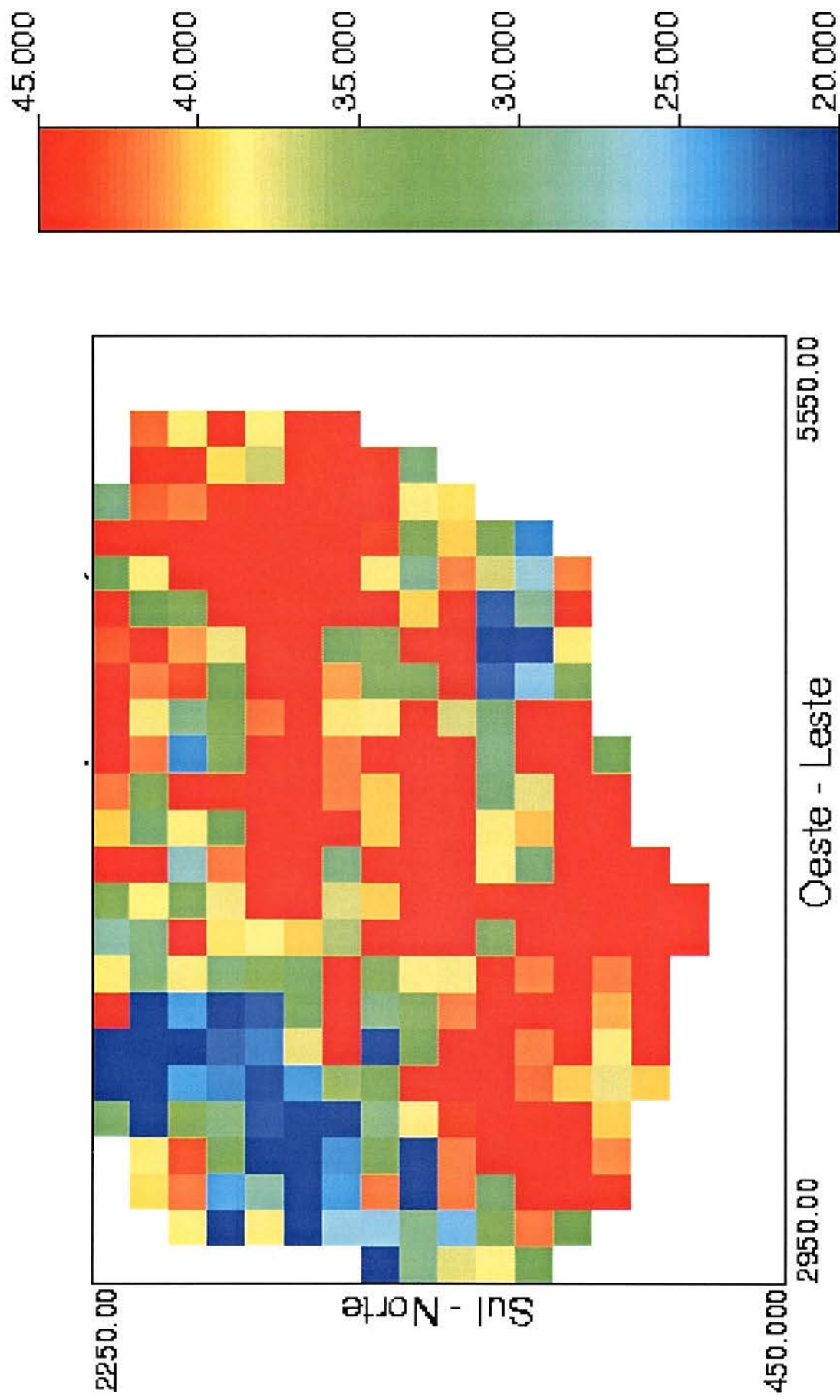


Figura 4.21 (c) - Realização nº03, para dados de SPT da camada IV.

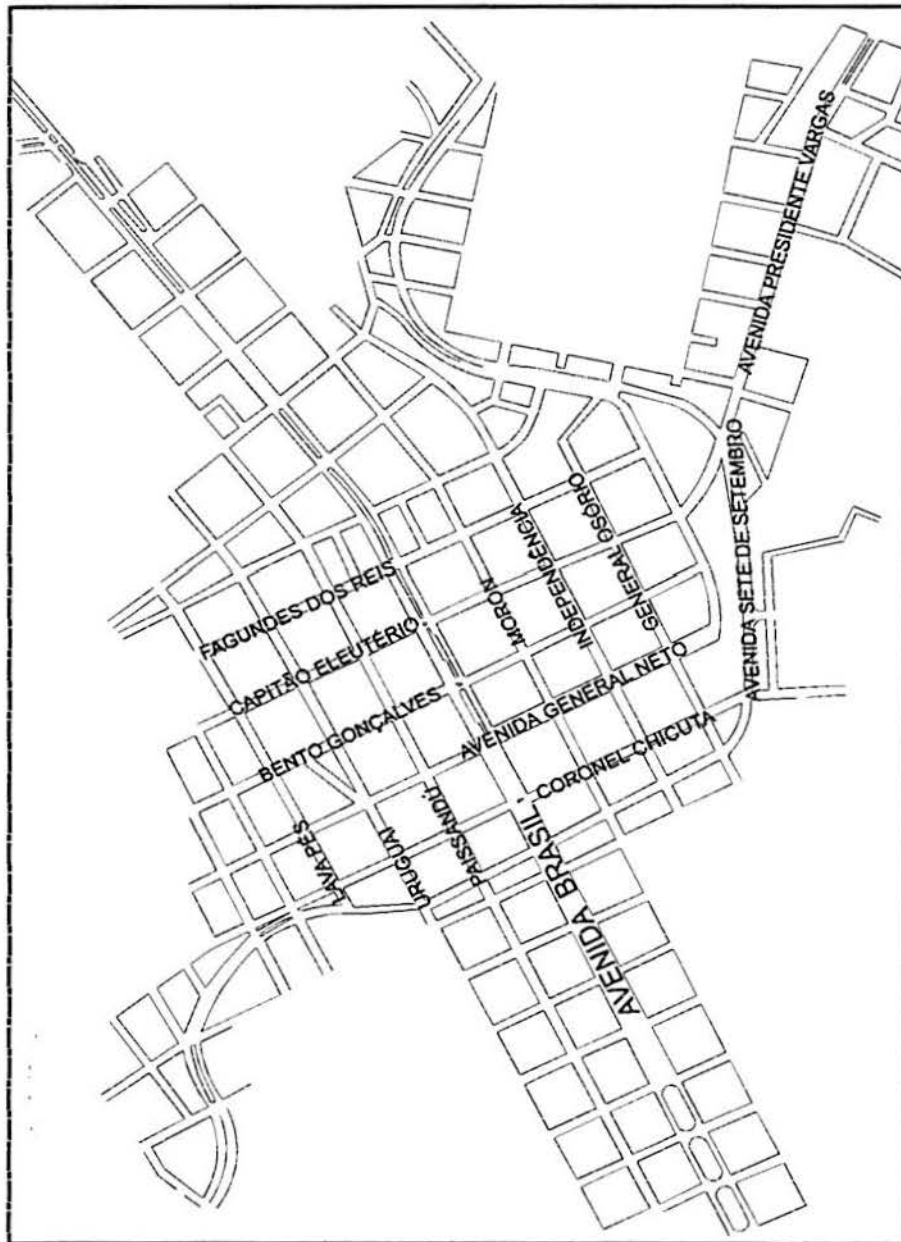


Figura 4.22 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

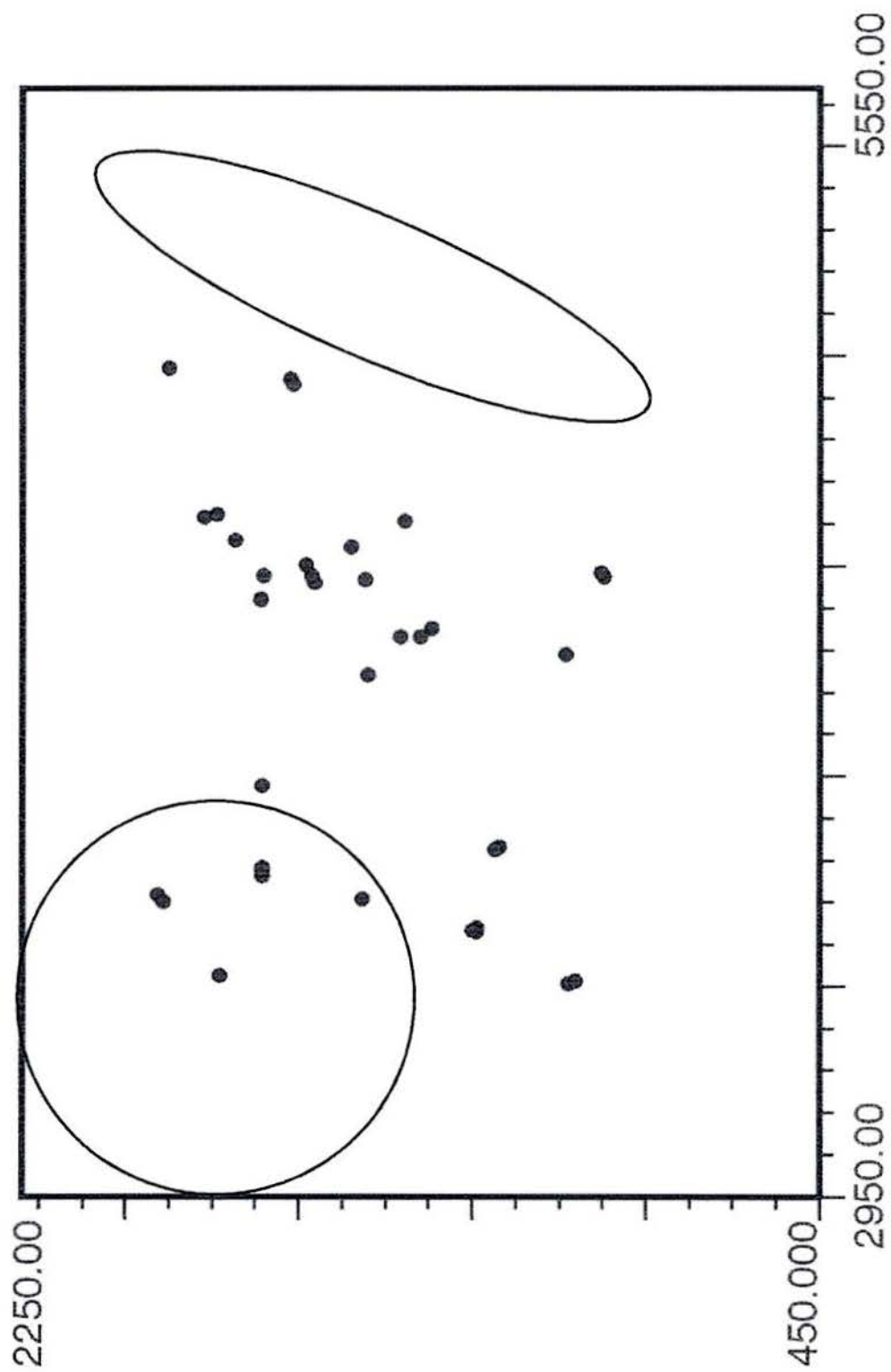


Figura 4.22 (b) - Locação dos dados de SPT da camada IV.

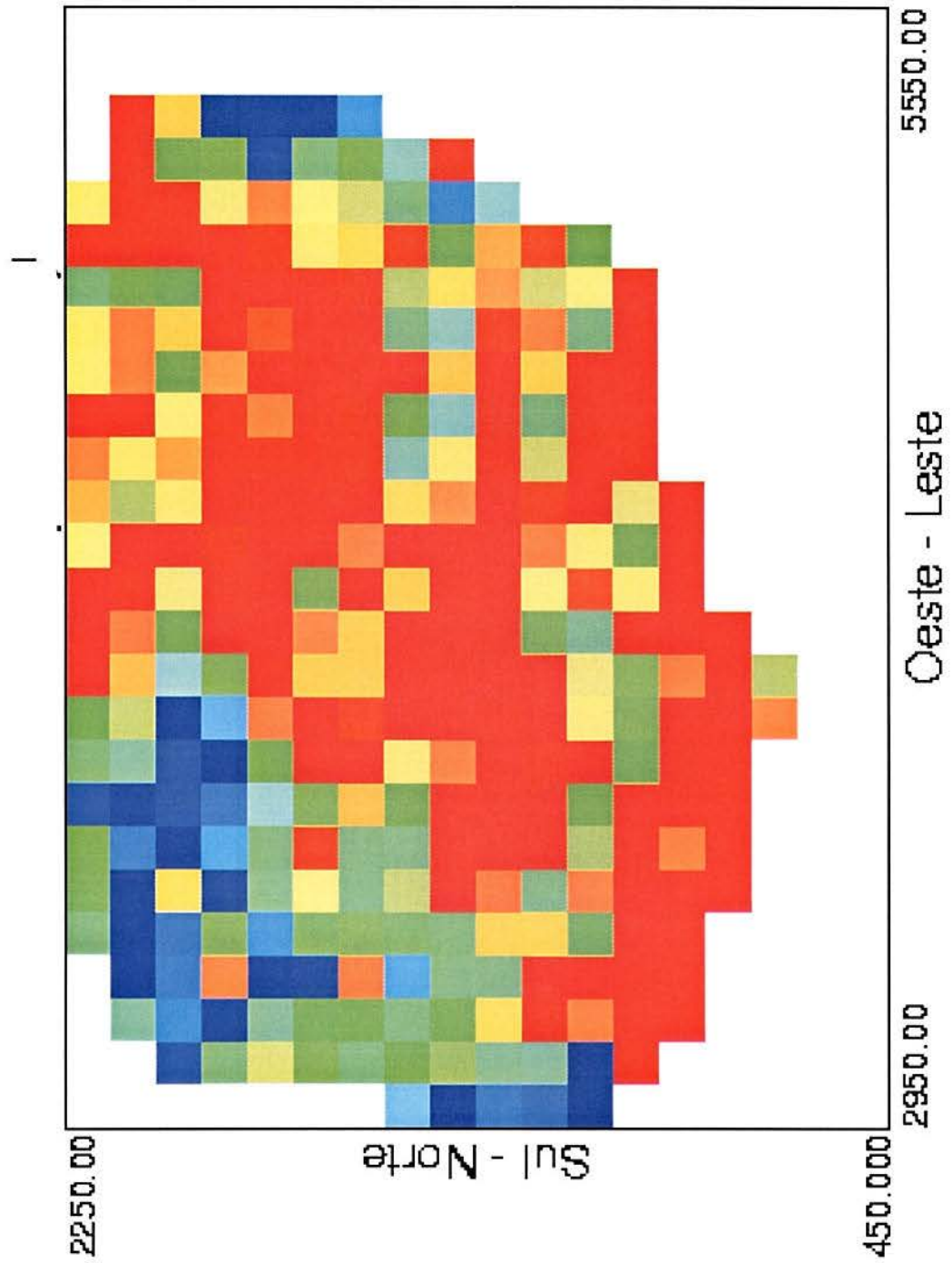
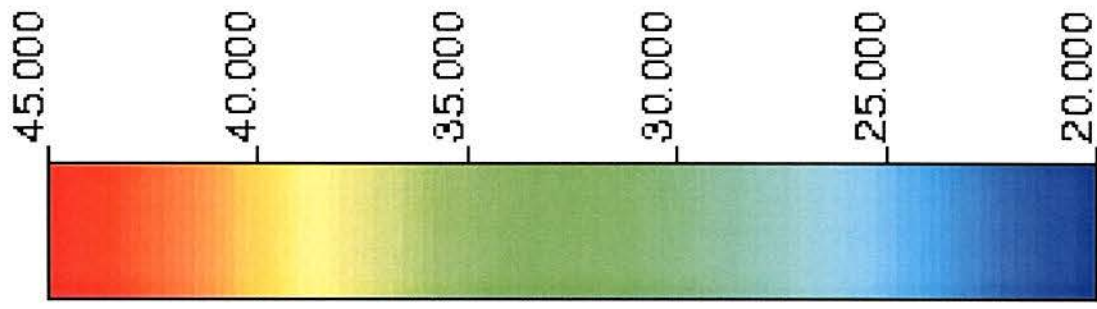


Figura 4.22 (c) - Realização nº18, para a camada IV.

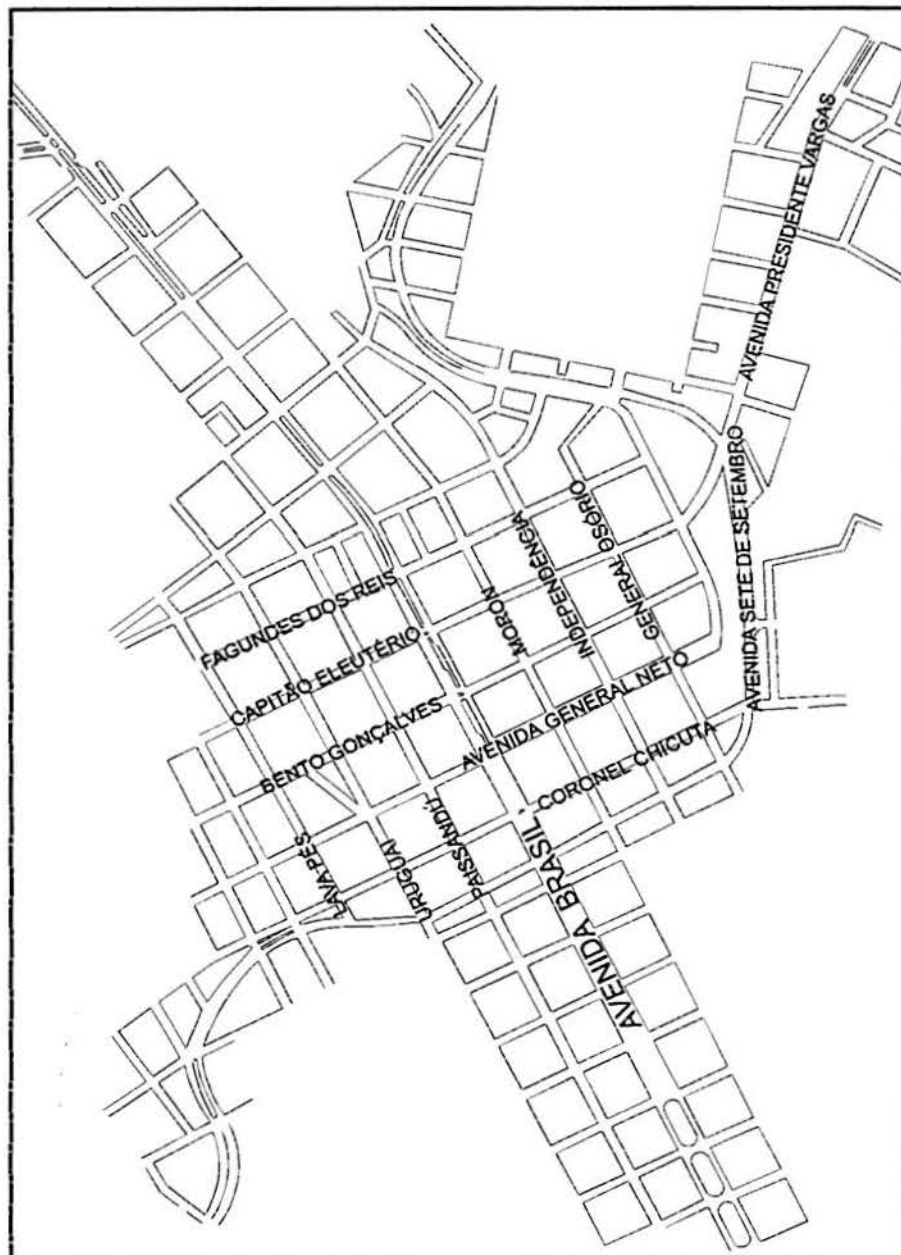


Figura 4.23 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.

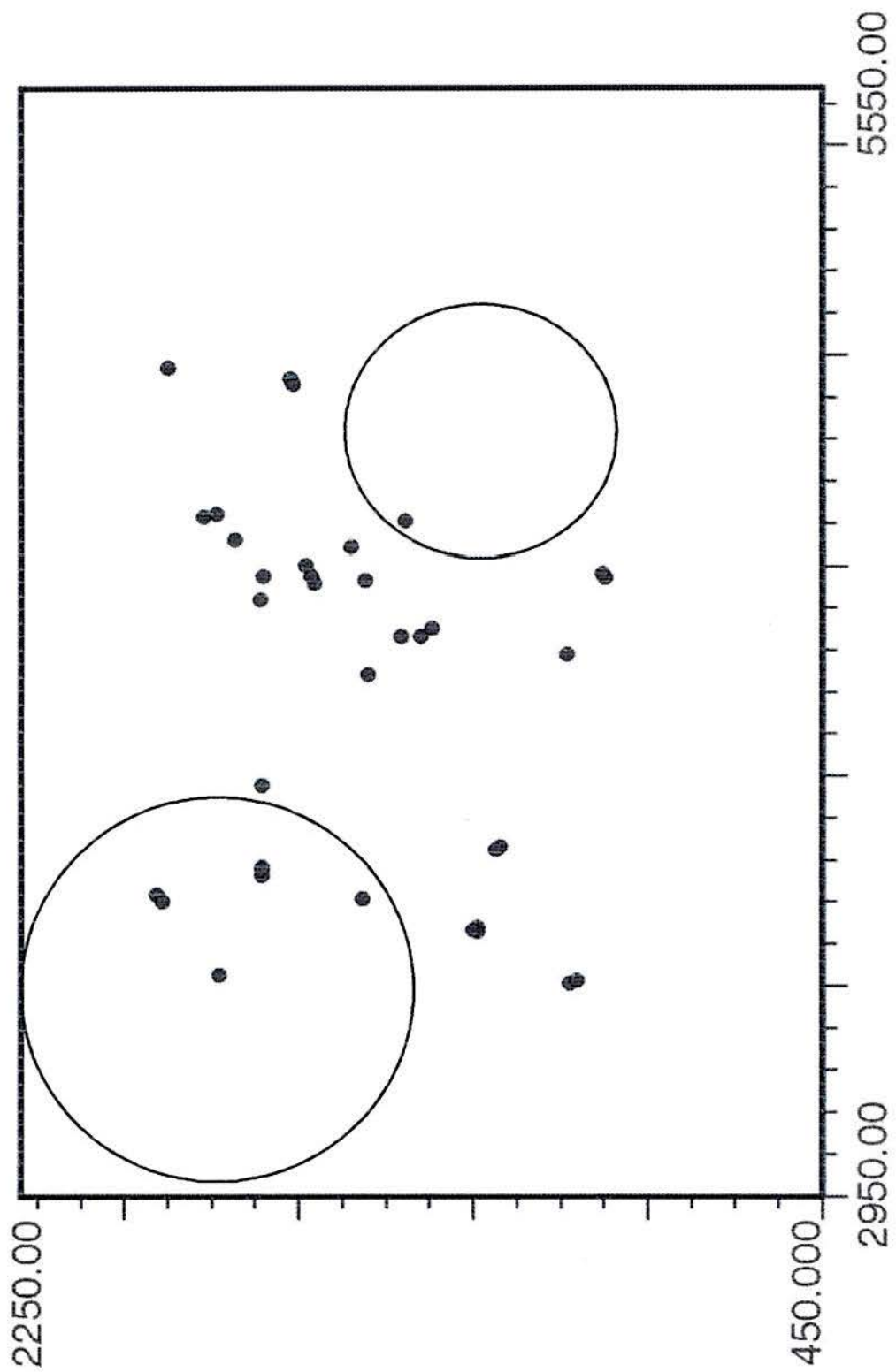


Figura 4.23 (b) - Locação dos dados de SPT da camada IV.

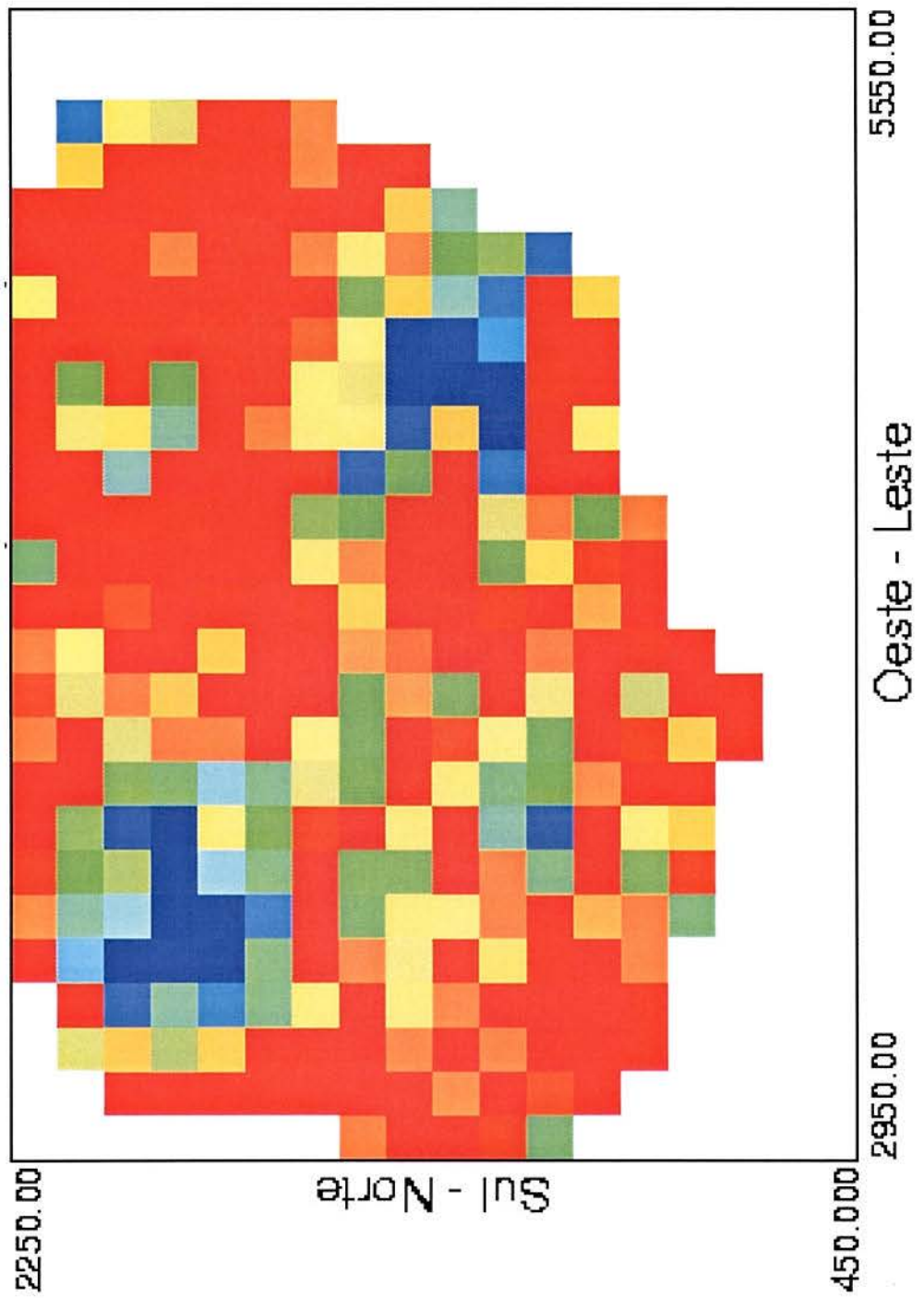
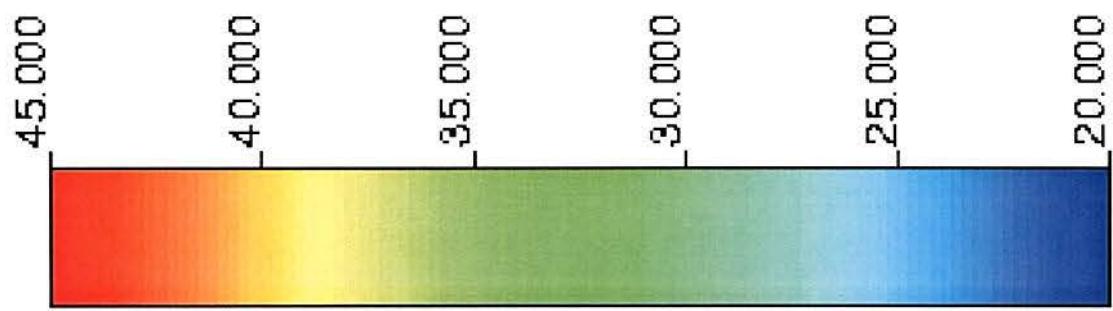


Figura 4.23 (c) - Realização n°24, para a camada IV.

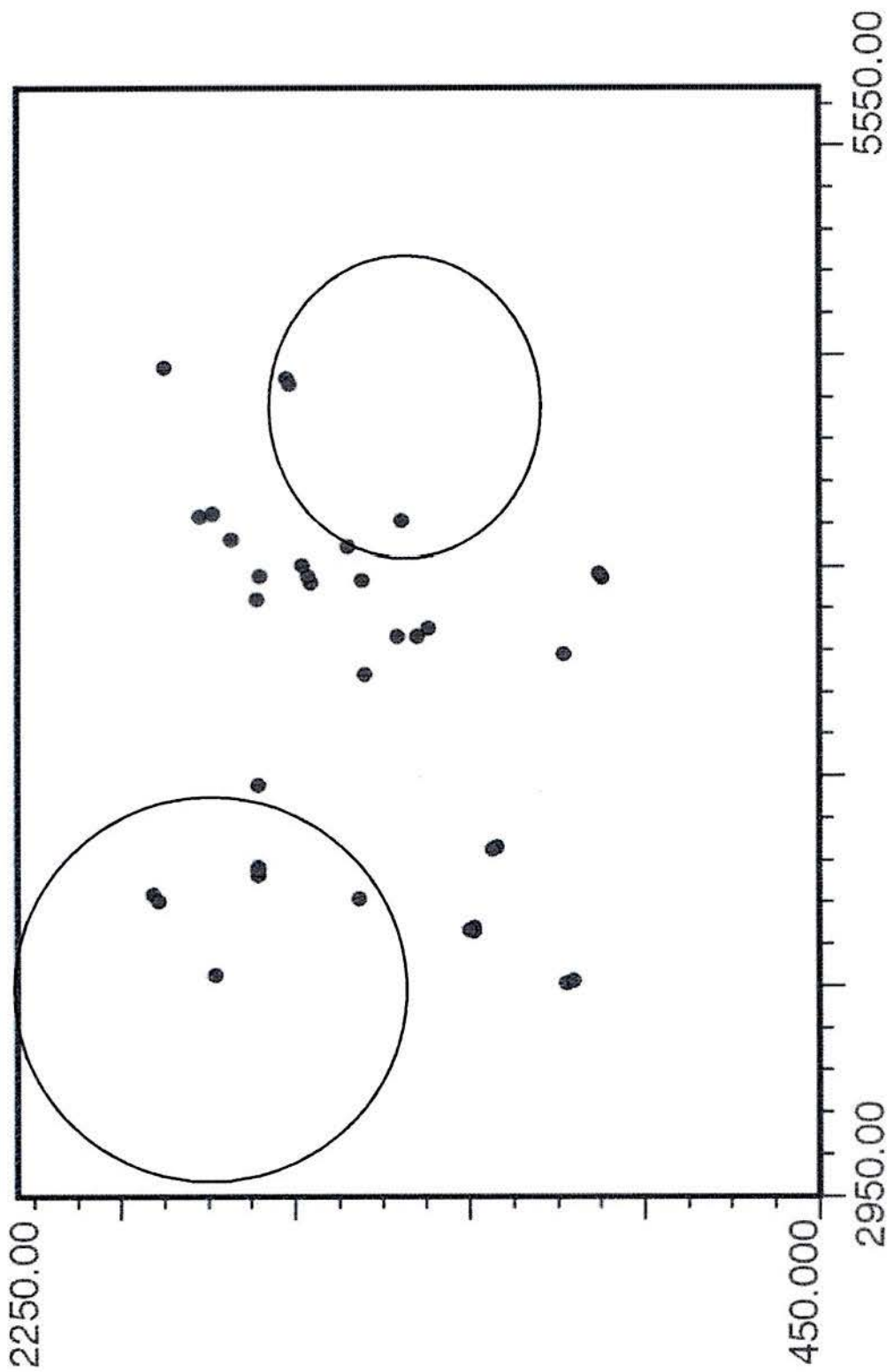


Figura 4.24 (b) - Localização dos dados de SPT da camada IV.

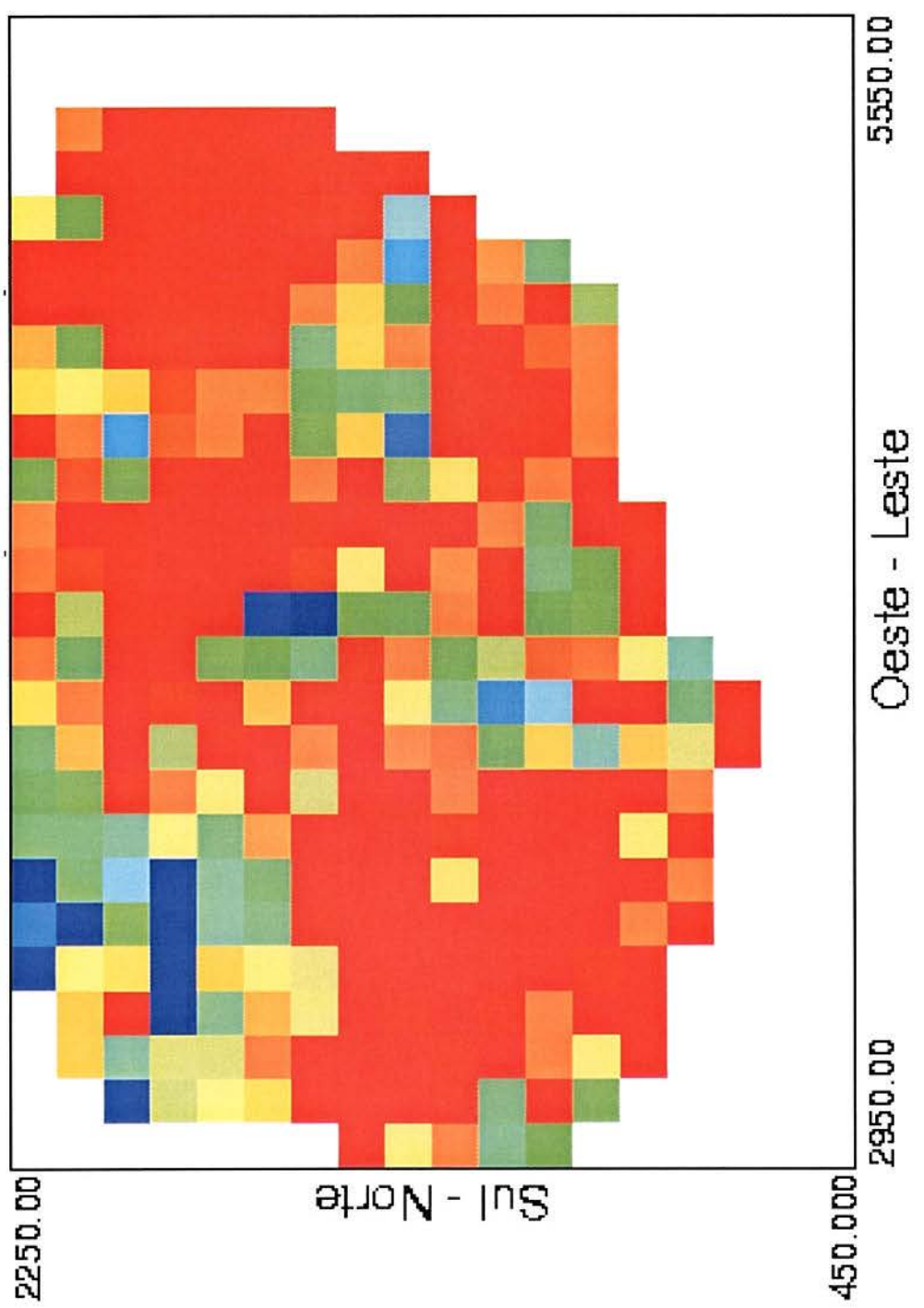
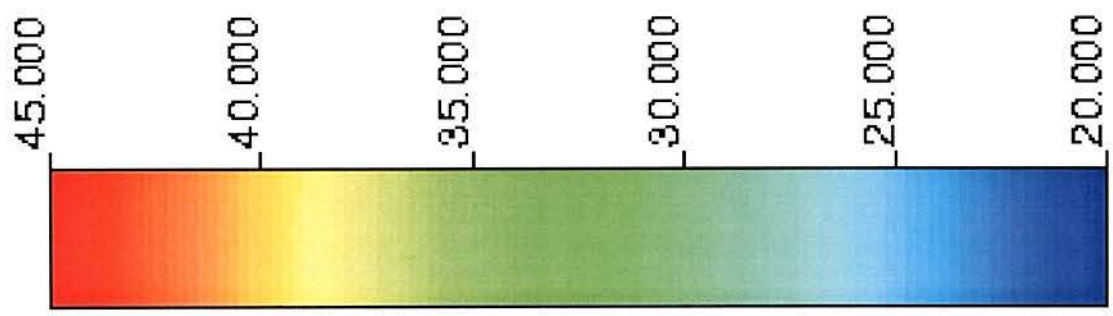


Figura 4.24 (c) - Realização n°39, para a camada IV.

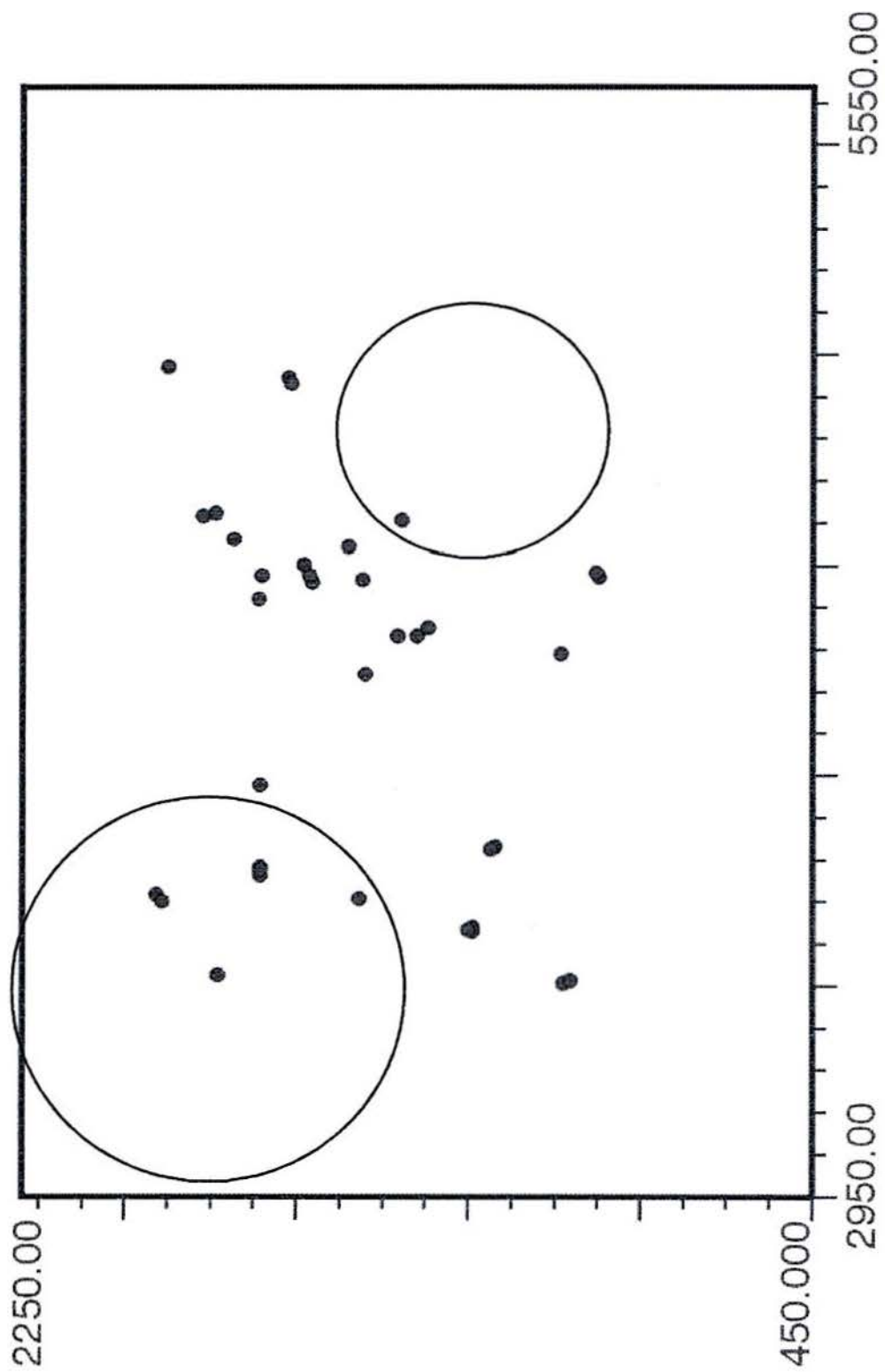


Figura 4.25 (b) - Locação dos dados de SPT da camada IV.

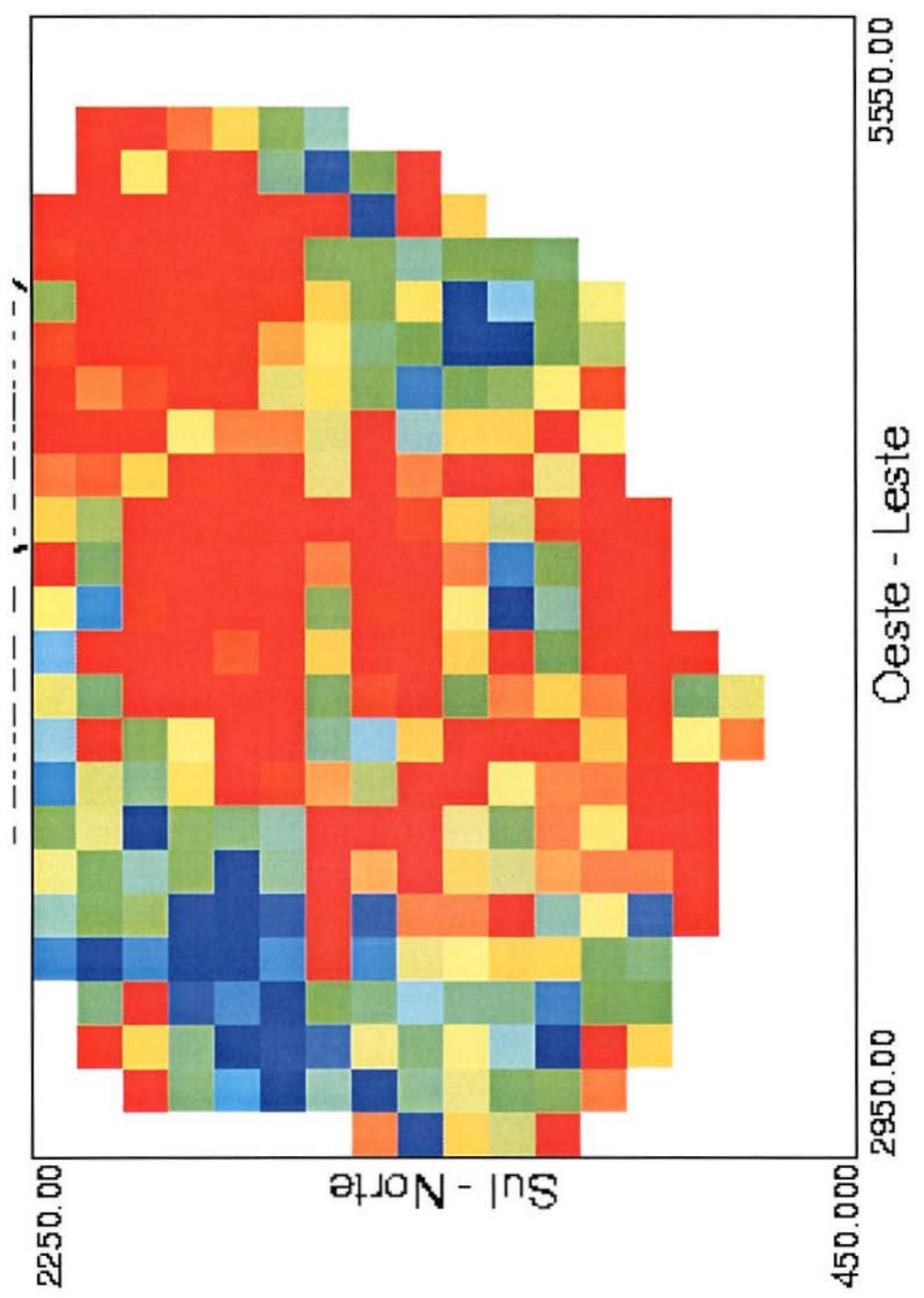
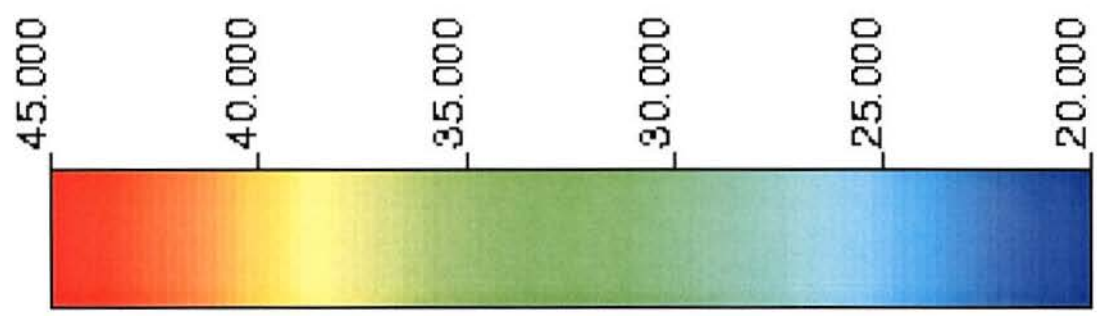


Figura 4.25 (c) - Realização n°43, para a camada IV.

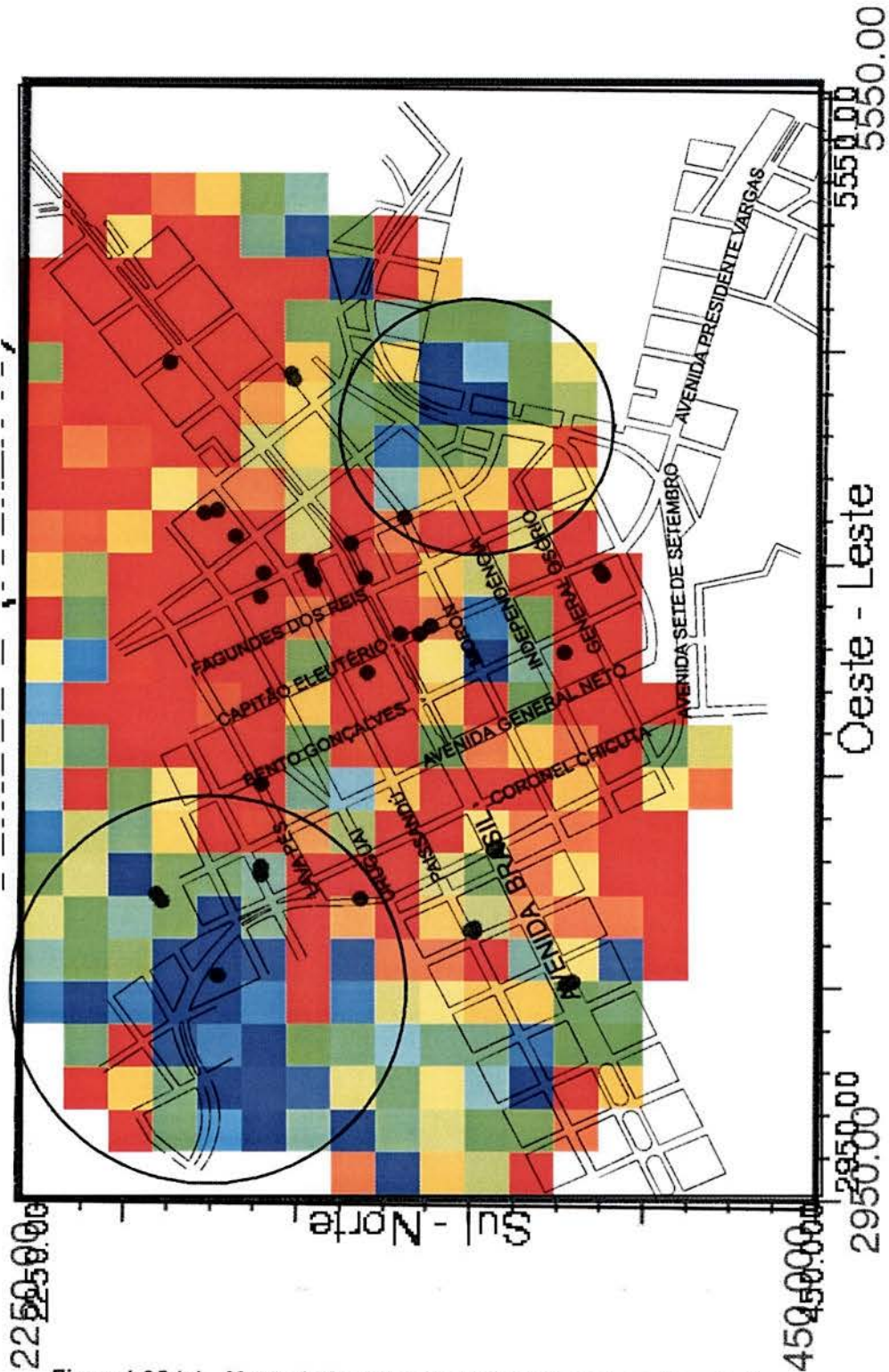
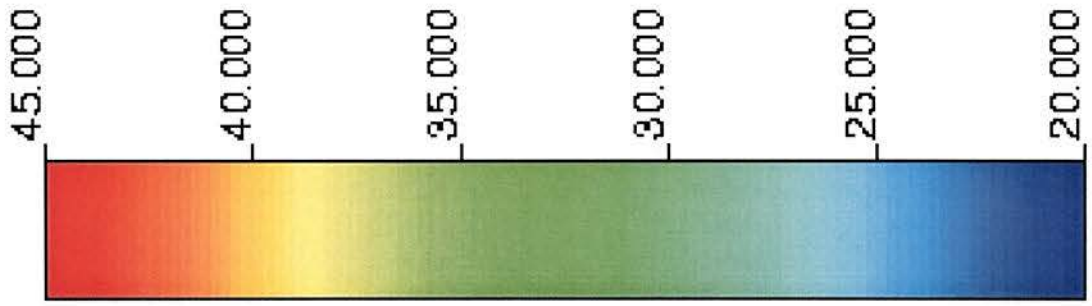


Figura 4.25 (a) - Mapa de localização das ruas na área de estudo.
Figura 4.25 (c) - Realização nº43 para a camada IV.

4.4.1 Variabilidade do N_{spt}

Após as análises feitas com as cinco realizações selecionadas para cada camada, partiu-se para o processo chamado de pós-simulação, onde gerou-se mapas correspondentes as variabilidades locais dos valores de N_{spt} . Existem vários métodos para avaliar e visualizar essas incertezas locais utilizando resultados de simulações condicionais, que são apresentados por Srivastava (1994) e Goovaerts (1997, p.333-340).

Duas medidas de incerteza foram adotadas para o presente estudo, analisando a dispersão do atributo em questão bloco-a-bloco, isto é, cinqüenta valores de N_{spt} em cada bloco. Primeiramente utilizou-se o coeficiente de variação (CV) e posteriormente o desvio padrão das estimativas, gerando mapas de variabilidade.

Os mapas correspondentes aos valores de CV para cada camada são apresentados nas Figuras 4.27, 4.30, 4.33 e 4.36, respectivamente **I**, **II**, **III** e **IV**. Os valores de CV são obtidos conforme Equação 4.7, sendo que esses valores representam a dispersão dos valores simulados para cada bloco em torno da média desses, isto é, o valor esperado de cada bloco. Assim:

$$CV_{bl} = \frac{\sigma_s}{\bar{X}_s} \quad (4.7)$$

onde:

CV_{bl} = é o coeficiente de variação bloco-a-bloco;

σ_s = é o desvio padrão dos cinqüenta valores simulados para cada bloco;

\bar{X}_s = é a média desses cinqüenta valores (E-type).

Já o σ_s foi obtido extraindo-se a raiz dos valores de variância condicional, ou seja:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma^2} \quad (4.8)$$

A investigação da variabilidade dos valores N_{spt} para cada camada é importante, a fim de guiar o engenheiro em campo, quanto ao nível de incerteza a que se está tratando cada área, possibilitando auxiliar a locação de novas sondagens.

As Figuras 4.26, 4.29, 4.32 e 4.35, mostram mapas contendo as médias dos cinquenta valores simulados para cada bloco (E-type). Tais médias correspondem aos valores esperados para cada um desses blocos, os quais tendem a ser muito próximos dos valores obtidos por krigagem ordinária em blocos.

Verifica-se que para as quatro camadas, as áreas circuladas nas Figuras 3.12 a 3.15 correspondentes a krigagem ordinária, podem ser comparadas às figuras de E-type resultantes do processo de pós-simulação. Onde se observa que todas as estimativas geraram valores praticamente idênticos.

Quanto à análise do coeficiente de variação (CV), pode-se dizer que para duas camadas (**I** e **III** – Figuras 4.27 e 4.33), a região central da área de estudo, densamente amostrada em relação ao todo, apresenta valores de CV baixos, variando em torno de 20%. Já a camada **IV** (Figura 4.36), apresenta esta mesma área variando em 10% apenas, e as demais regiões no entorno oscilam em 20%. A camada **II** (Figura 4.30) é a que apresenta maiores variabilidades num todo, sendo 50% na maioria das áreas extremas, e de 20 a 40% na área mais central.

O desvio padrão dá uma idéia de quanto os valores de N_{spt} variam em relação aos valores estimados, ou seja, sua variabilidade. Para as quatro camadas em questão, a variância máxima apresentada é de 12 golpes, sendo que esta aparece apenas na camada **II** em alguns pontos isolados.

De maneira geral, a camada **I** apresenta um desvio padrão em sua maior parte oscilando entre 0 e 3 golpes, que pode ser assumido como uma baixa variabilidade. Para a camada **II**, essas variações podem ser consideradas altas, pois giram em torno de 9 a 10 golpes. A camada **III**, uma das mais importantes para este estudo, pois é nela que são assentadas a maior parte das fundações profundas da área em questão, apresenta uma variabilidade mediana, em torno de 6 a 8 golpes em sua maioria. Da mesma forma, a última camada (**IV**), apresenta variações de 5 a 8 golpes num todo, e variações de apenas 2 em algumas regiões mais isoladas ao centro da área. Essas regiões são correspondes aos locais mais densamente amostrados.

Após essas análises, ao capítulo 5 caberá apresentar as principais conclusões decorrentes dos capítulos precedentes, assim como mostrar a

finalização dos objetivos inicialmente propostos. Incluem-se ainda, as recomendações e motivações para próximos trabalhos.

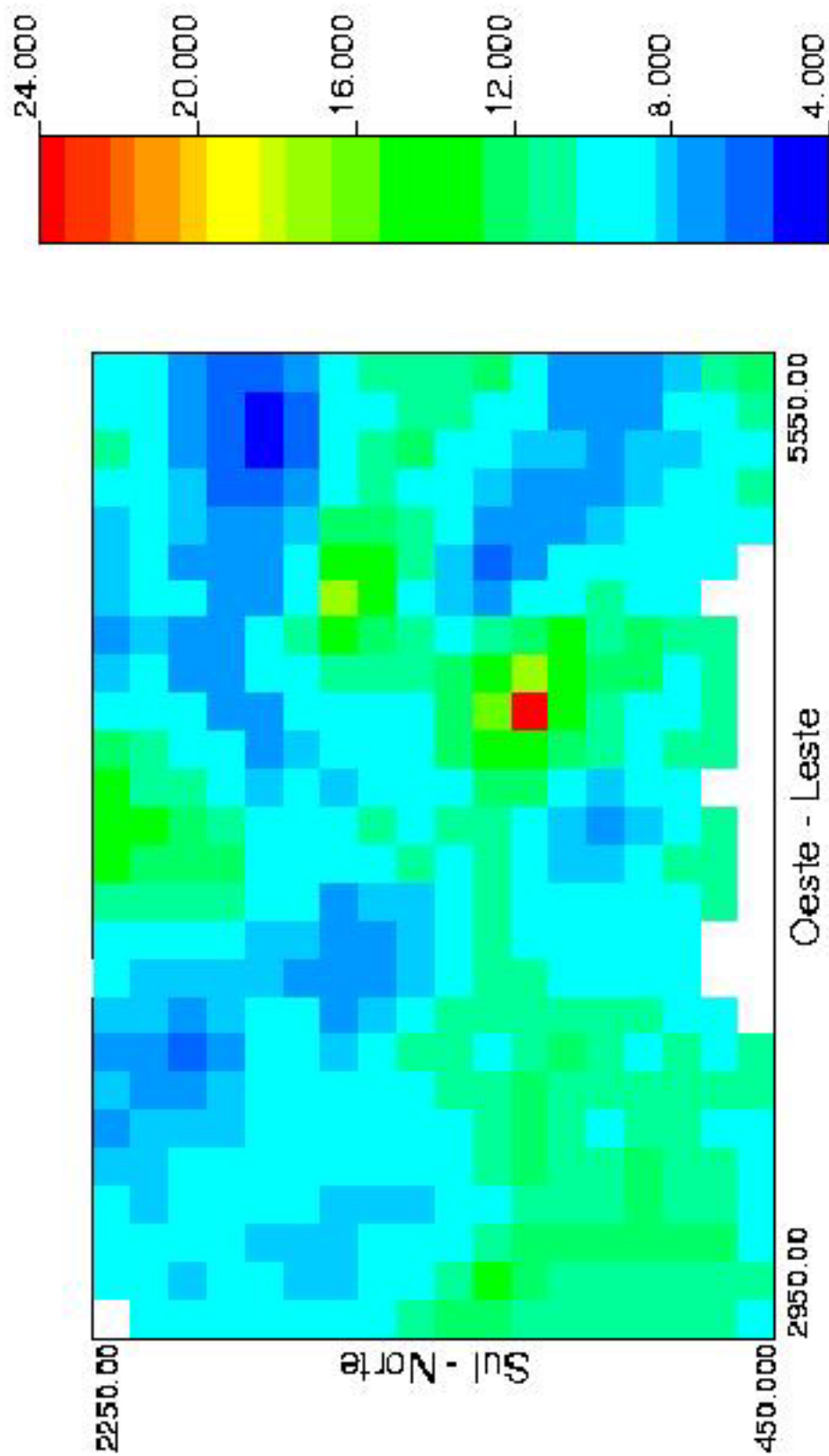


Figura 4.26 – Imagem mostrando os valores de Nspt considerando 50 realizações, para a camada I, média de cada bloco.

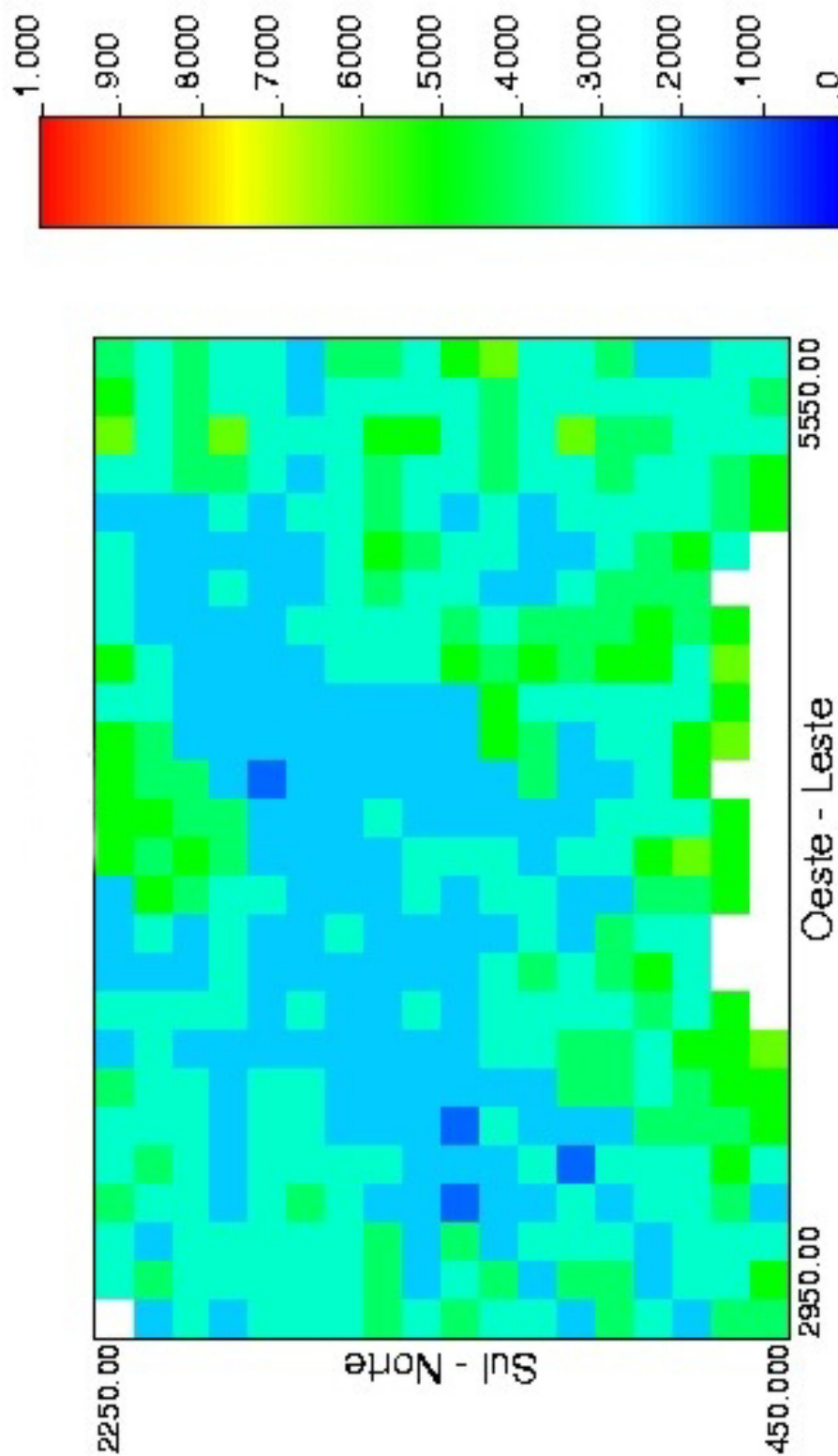


Figura 4.27 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} da camada I.

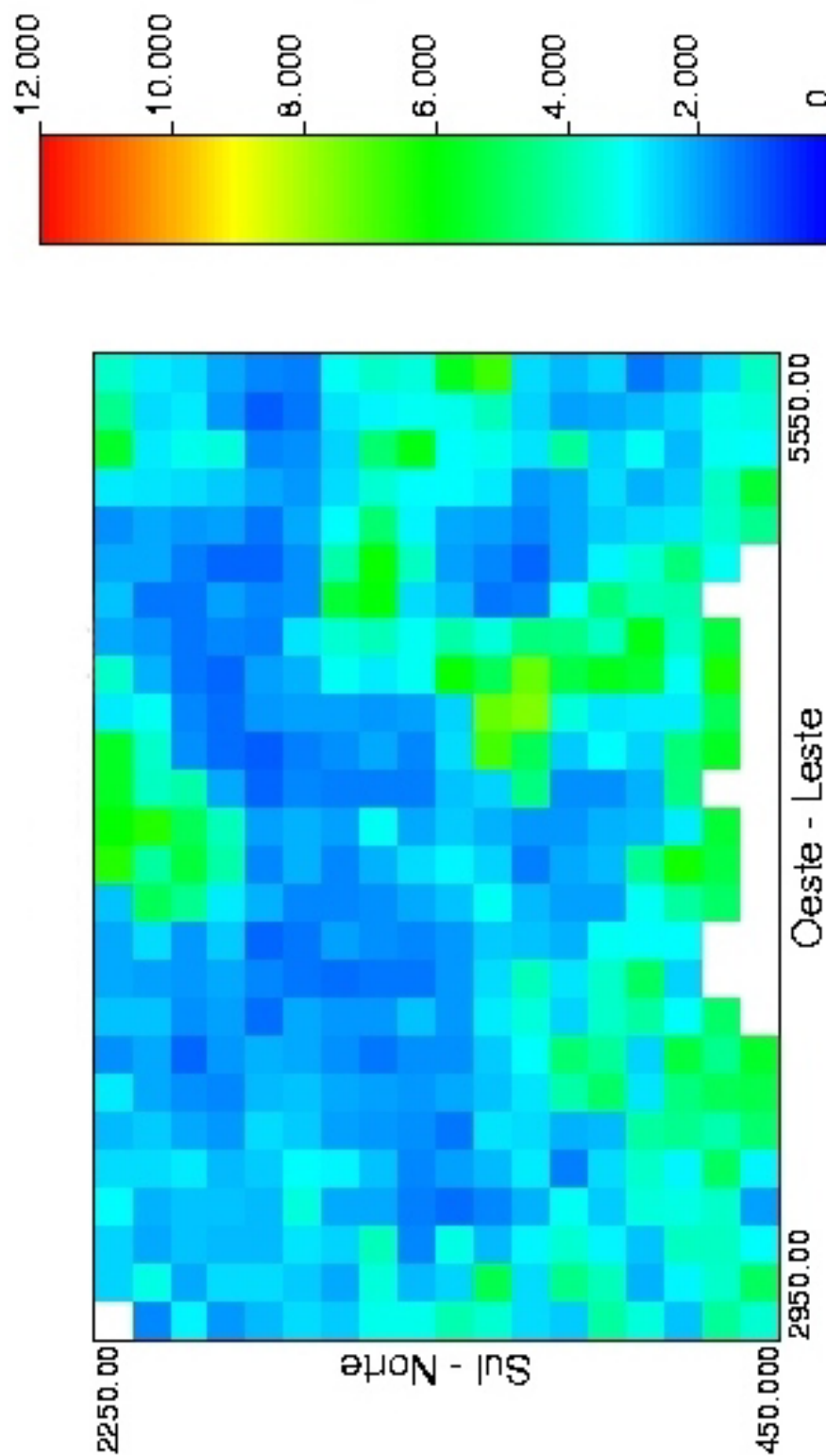


Figura 4.28 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} da camada I.

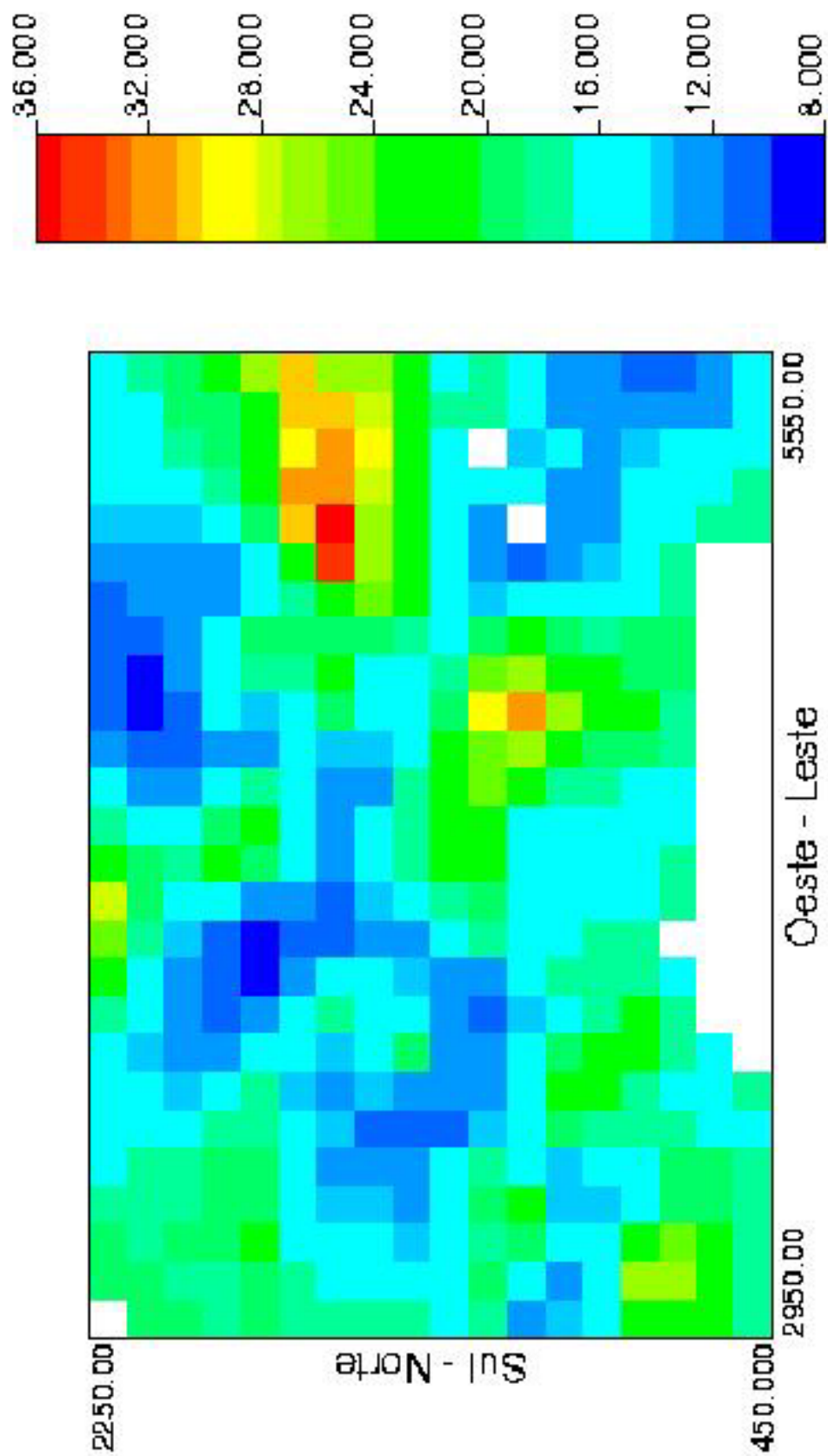


Figura 4.29 – Imagem mostrando os valores de Nspt considerando 50 realizações, para a camada II, média de cada bloco.

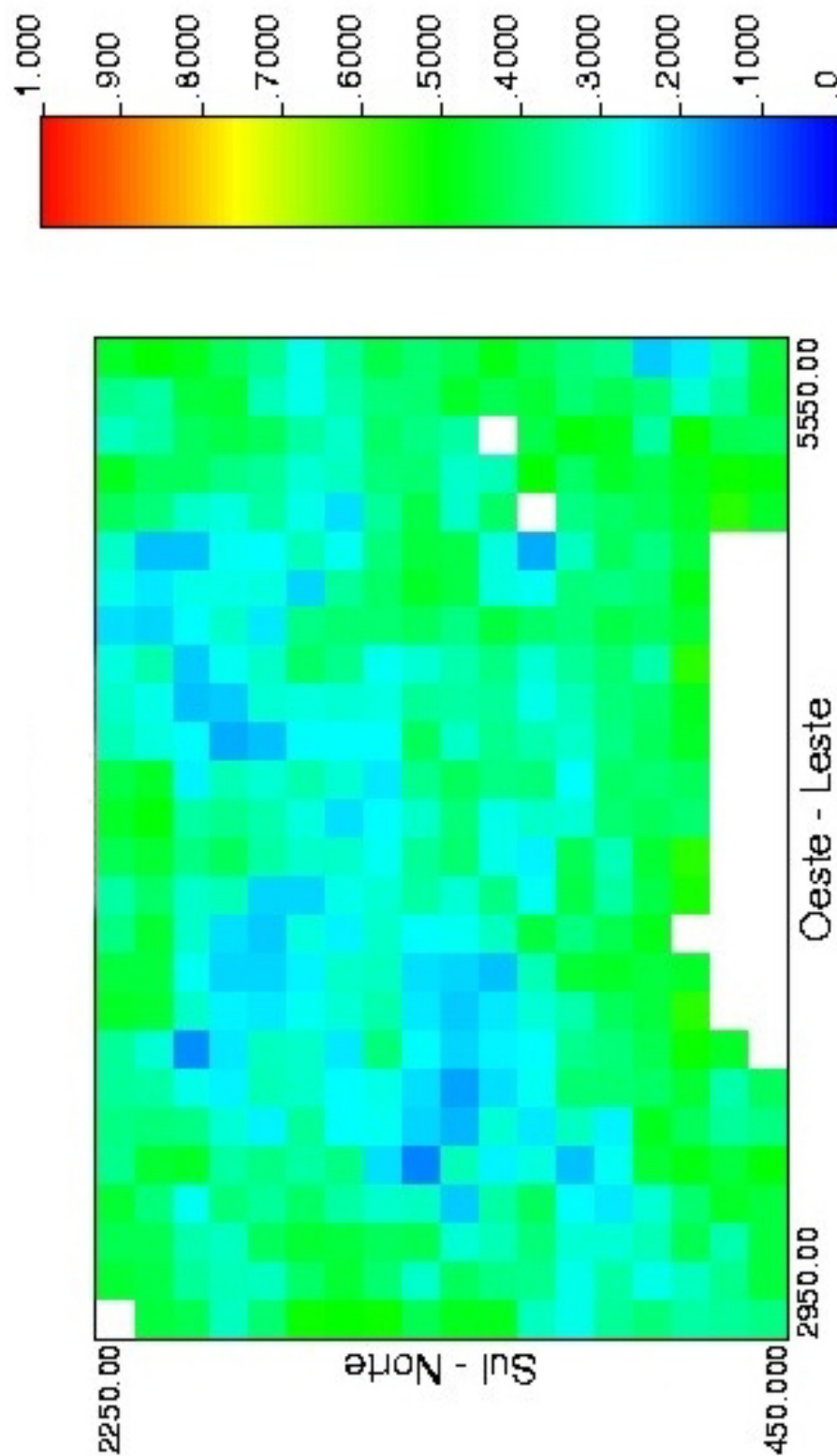


Figura 4.30 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} da camada II.

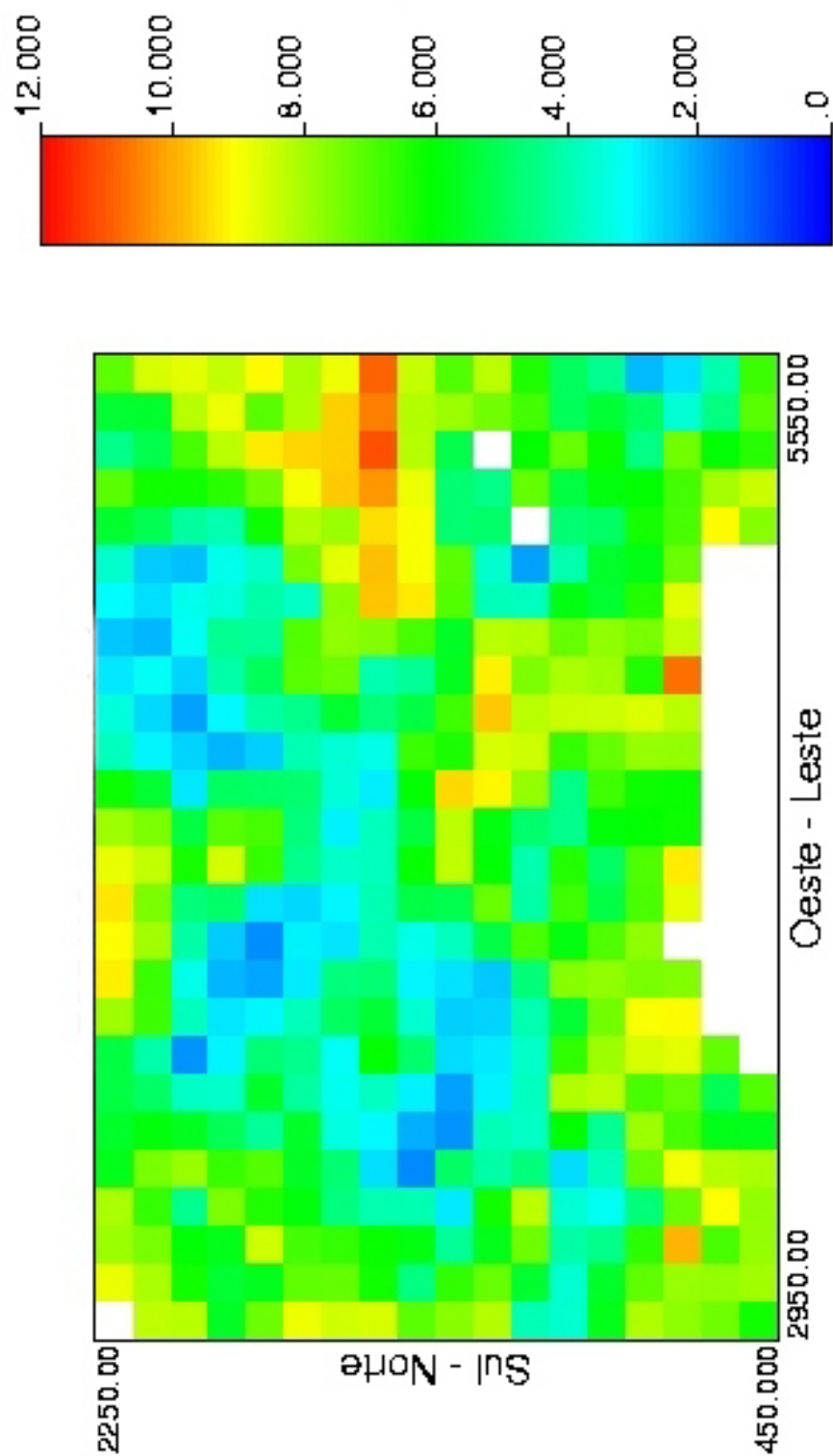


Figura 4.31 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} da camada II.

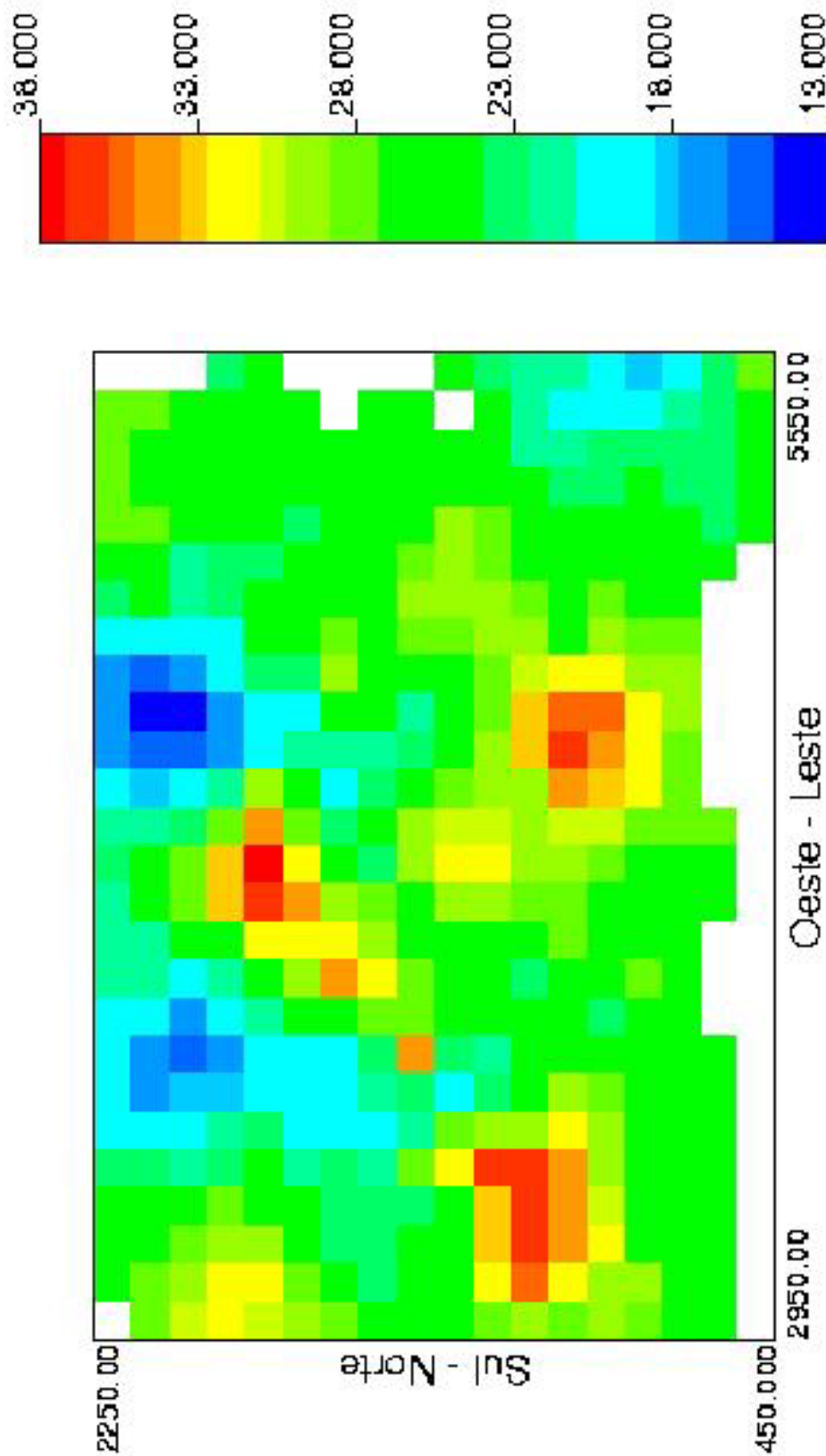


Figura 4.32 – Imagem mostrando os valores de Nspt considerando 50 realizações, para a camada III, média de cada bloco.

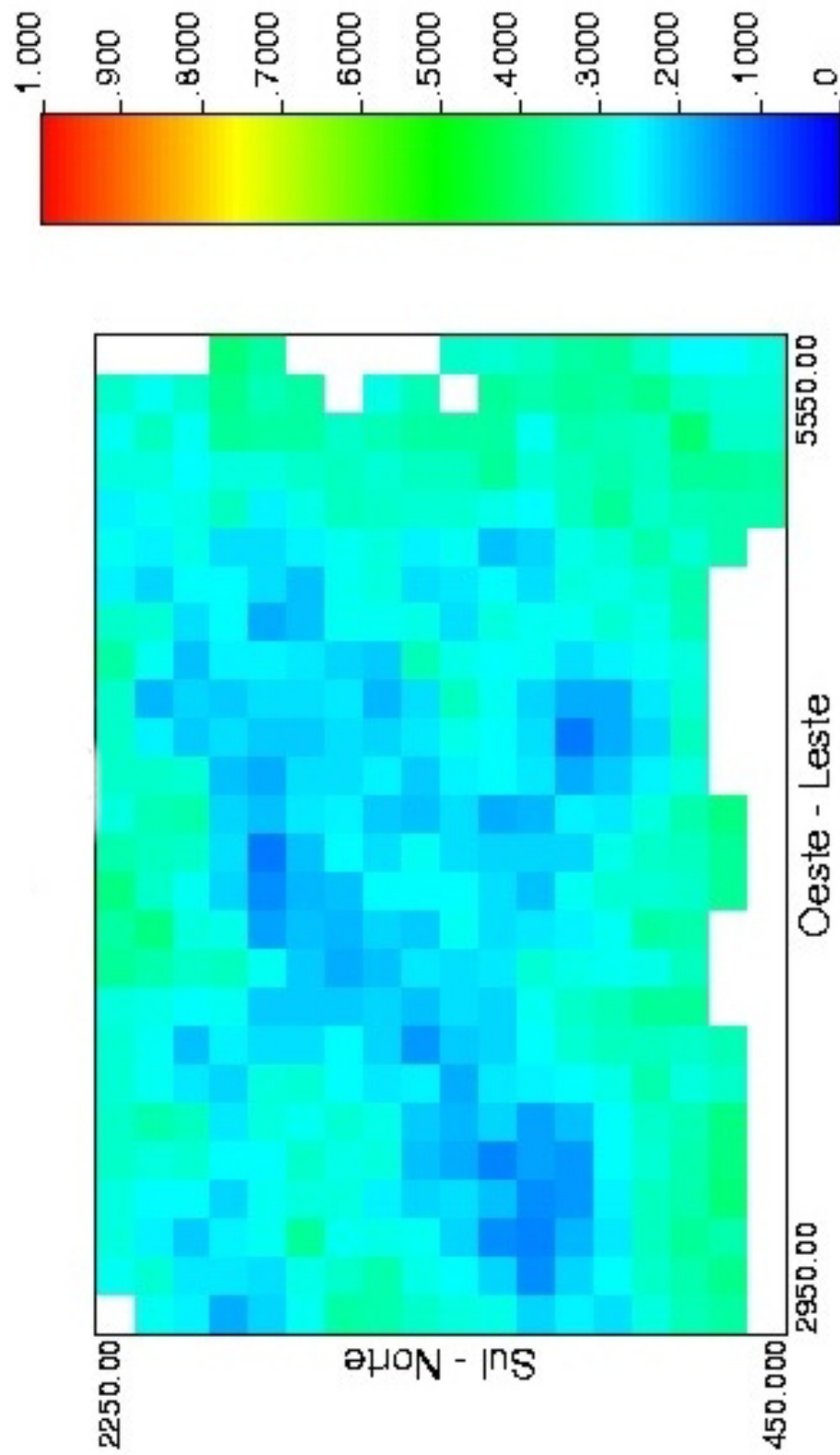


Figura 4.33 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} , da camada III.

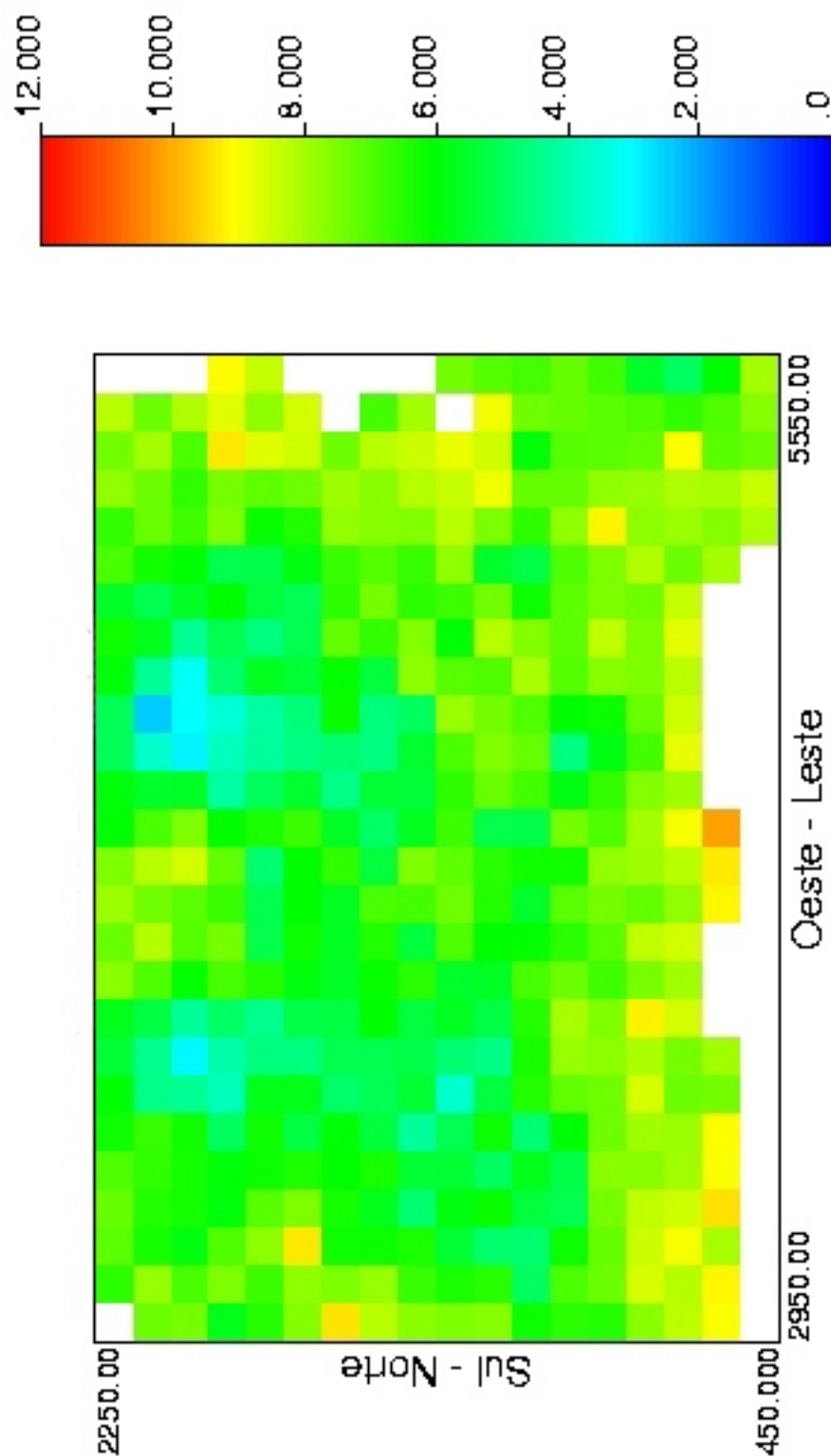


Figura 4.34 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} , da camada III.

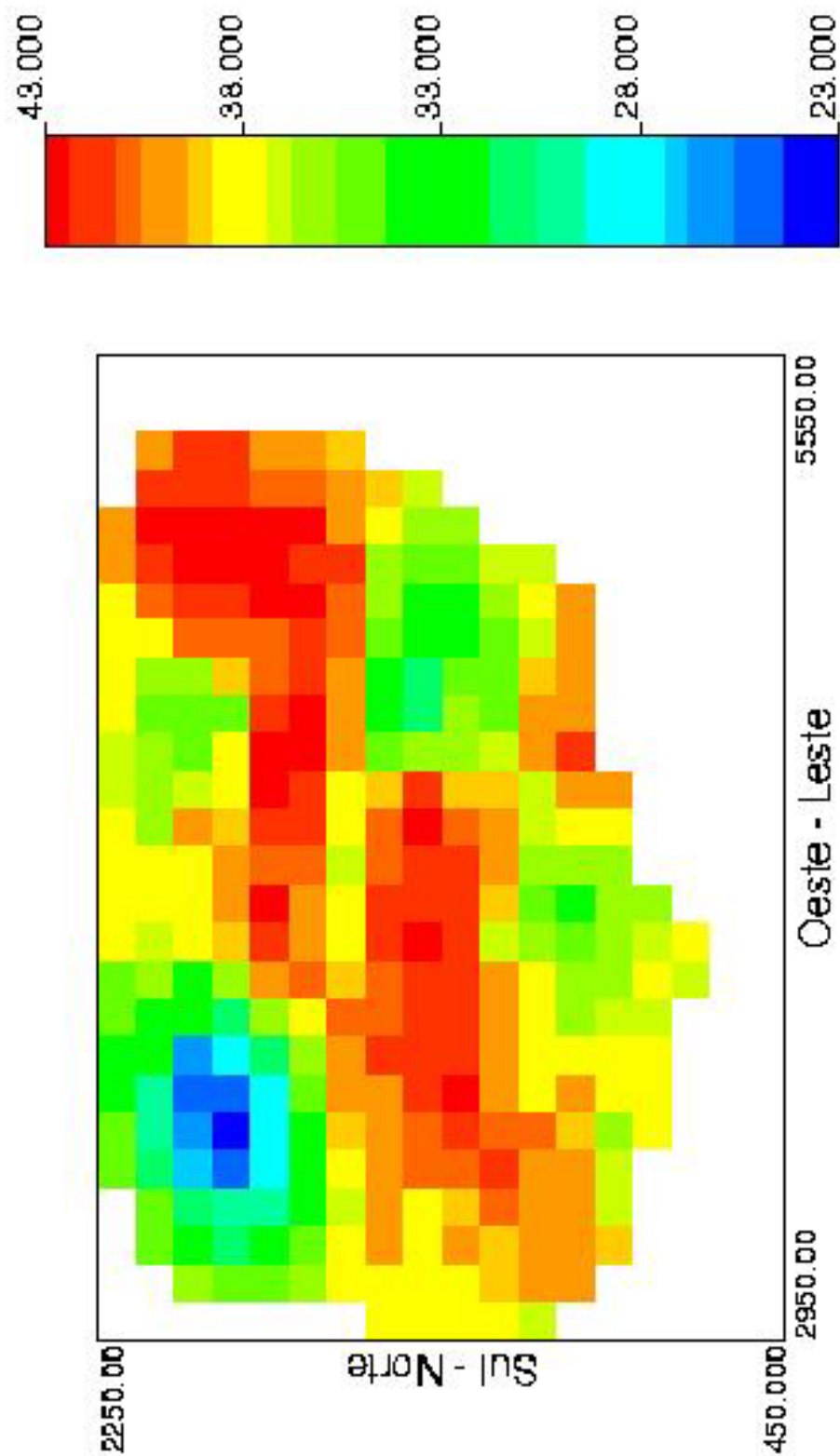


Figura 4.35 – Imagem mostrando os valores de Nspt considerando 50 realizações, para a camada IV, média de cada bloco.

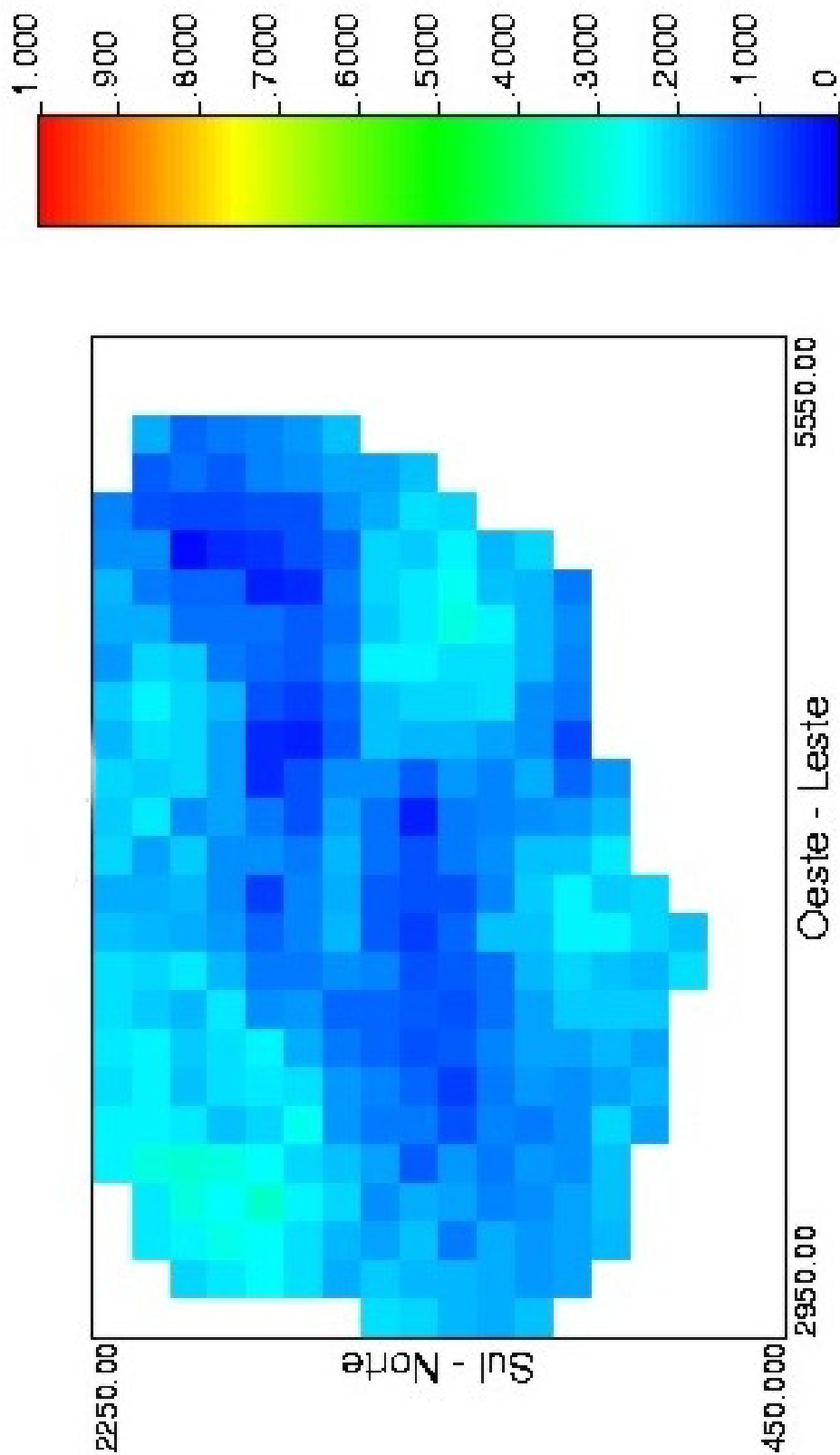


Figura 4.36 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de coeficiente de variação (CV) dos valores de N_{spt} , da camada IV.

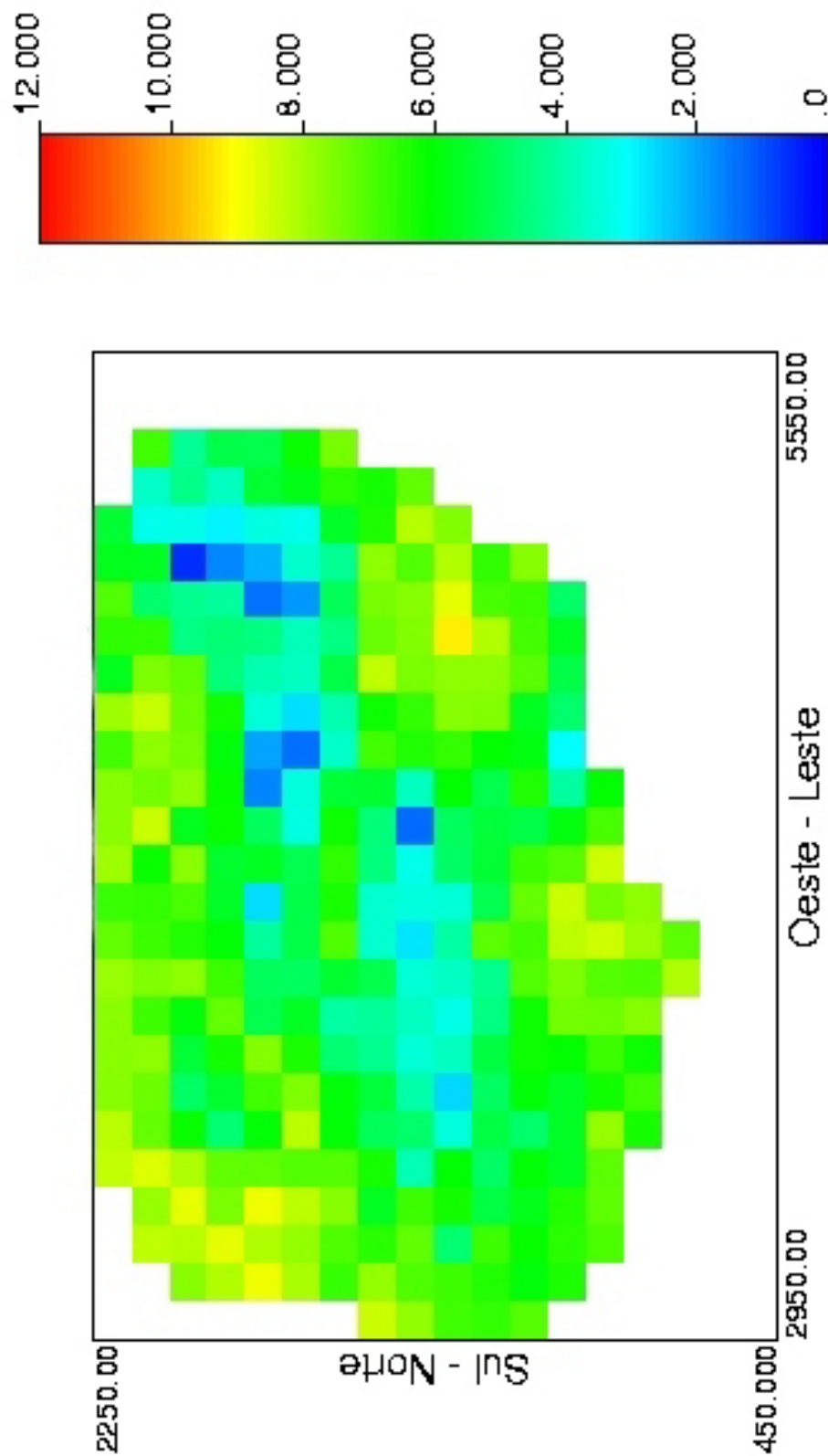


Figura 4.37 – Mapa da variabilidade mostrando bloco-a-bloco valores de desvio padrão (σ) dos valores de N_{spt} , da camada IV.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

Nesta etapa final, serão apresentadas as considerações finais. Primeiramente um resumo dos resultados obtidos, com posterior descrição da proposta metodológica apontada no capítulo 1. Após, serão discutidos os objetivos inicialmente apresentados (1.3), encerrando com as recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Resumo dos Resultados Obtidos

Os procedimentos desenvolvidos ao longo da dissertação tornaram possível a obtenção de mapas de estimativas de valores de N_{spt} para a área em estudo. Levou-se em conta para isso, o uso de uma variável regionalizada, que foram os valores de resistência do solo (N_{spt}) obtidos a partir de sondagens a percussão SPT.

Posteriormente, foram realizadas simulações estocásticas, que permitiram uma análise a respeito das incertezas referentes às estimativas realizadas. Porém, pode-se concluir que a geoestatística juntamente com suas ferramentas, neste caso, krigagem ordinária em blocos e simulações seqüenciais Gaussianas, é perfeitamente aplicável a este tipo de dado, produzindo informações pertinentes para uso em engenharia geotécnica.

5.2 Proposta Metodológica

O principal objetivo dessa dissertação, conforme apresentado no item 1.2, consistia basicamente em avaliar o uso da geoestatística como ferramenta para geração de mapas que pudessem auxiliar no conhecimento prévio do solo em subsuperfície, com base em um banco de dados de SPT.

Para isso, delineou-se uma seqüência metodológica (Figura 1.1) que foi utilizada para desenvolver tal objetivo. Essa proposta metodológica foi cumprida conforme segue:

- (i) coleta e análise dos perfis de sondagens da área em estudo;
- (ii) revisão e preparação do banco de dados para tratamento geoestatístico;
- (iii) busca de informações geológicas e demais comportamentos e estruturas características a respeito do subsolo da área;
- (iv) definição dos domínios geoestatísticos, conforme feito no capítulo 3 (item 3.2);
- (v) análise exploratória dos dados: mapas amostrais, histogramas, análise de correlação entre as variáveis (SPT x profundidade);
- (vi) análise estrutural – variografia;
- (vii) krigagem ordinária em blocos pré-definidos, para fim de geração das estimativas e posterior análise da variabilidade dessas estimativas;
- (viii) realização de simulações estocásticas em suporte considerado pontual, mudando este posteriormente para o mesmo suporte usado na krigagem ordinária;
- (ix) validação das simulações;
- (x) análise da variabilidade das estimativas SPT bloco-a-bloco.

5.3 Avaliação dos Objetivos Específicos

Mediante todos os resultados obtidos ao longo da dissertação, serão apresentadas a seguir as conclusões finais, tendo como meta o cumprimento dos objetivos específicos propostos no item 1.3.

- A compreensão do comportamento do solo em subsuperfície é de suma importância para posterior qualidade no modelamento variográfico, assim como das estimativas e simulações que seguem. Uma metodologia para subdivisão do banco de dados foi aqui proposta, baseada na bibliografia existente. Acredita-se ser uma boa alternativa para delimitação de subdomínios homogêneos, evitando de certa forma a mistura de populações de características estatísticas distintas. Com isso há uma minimização de possíveis tendenciosidades nas estimativas;
- O método tradicional geoestatístico de krigagem ordinária em blocos, aplicada a essa dissertação, levando em conta sua característica de minimização do erro da estimativa e o suporte de blocos utilizado, mostra-se eficiente na geração de mapas de estimativas de valores de resistência N_{spt} na área avaliada. Tais mapas podem orientar a avaliação e locação de novas amostras, no caso do estudo da área como um todo, ou mesmo para um terreno apenas em específico. A respeito da mudança de suporte, considerou-se ao final, que o tamanho de bloco aplicado na pesquisa, 100m x 100m, foi satisfatório. Afirma-se no entanto, que as incertezas decorrentes em cada processo seriam minimizadas a partir de um incremento do número de sondagens no banco de dados;
- As simulações seqüenciais Gaussianas possuem a característica imprescindível de proporcionar a análise das incertezas quanto as estimativas. As oscilações observadas nos mapas de estimativas podem ser melhor avaliadas a partir do uso dessa ferramenta, que se apresentou perfeitamente aplicável. O processo de validação dos resultados é imprescindível para que se possa avaliar o quão representativos serão os resultados finais. É importante salientar que não se tem o conhecimento do uso em outras publicações, de simulações geoestatísticas para dados de N_{spt} , enquanto no meio mineiro ela é mais aplicada;
- Os mapas gerados nessa dissertação possuem grande aplicabilidade na área geotécnica. Os usos se darão de uma forma mais global devido as dimensões dos blocos de estimativas (100m x 100m), ou seja, o conhecimento do solo em um terreno em específico deveria preceder de

uma análise geoestatística local partindo de informações que circundem essa área a ser estudada.

5.4 Recomendações

São apresentadas a seguir as sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos, dando continuidade e aprimorando a metodologia proposta nessa dissertação.

- Correlacionar os valores de estimativas de SPT obtidos nessa dissertação, com formulações e parâmetros de resistência e capacidade de suporte do solo utilizados na geotecnia;
- Aplicar krigagem indicativa e simulações dos indicadores, verificando a potencialidade dessas na geração de mapas de tipologia de solo, assim como de tipologia de fundações;
- Aplicar a cokrigagem verificando a potencialidade desta na geração de mapas do nível d'água no subsolo e topo do impenetrável, combinando-as com uma variável secundária como a superfície topográfica da área em estudo.

Referências Bibliográficas

ABNT, 1980. Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos. NBR 6484/80.

Belincanta, A., Alvin, F.M., Navaja, S.S., Ramires Sobrinho, R., 1984. Métodos para medida de energia dinâmica no SPT. *Solos e Rochas*, ABMS, vol.17, n.2, p.93-110, ago.

Belincanta, A., Dionisi, A., Machado, J.R.A., Alvin, F.M., Ramires Sobrinho, R., Navaja, S.S., Tachibana, L.S., 1994. Medidas de energia dinâmica no SPT, sistema IPT. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, 10, Foz do Iguaçu, Anais, ABMS, vol.2, p.507-514.

Bernardes, G., 1989. *Dynamic And Static Testing of Large Model Piles in Sand* – Thesis od Doctor of Enginneering - Institutt fot Geotsknikk – Norweigian Institute of Tecnology.

Bonato, F. S., 2000. *Desenvolvimento de Metodologia Baseada em Simulação Geoestatística para Incorporação da Incerteza no Planejamento de Lavra*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 87p.

Broms, B.B., Flodim, N., 1988. History of penetration testing. In: *International Symposium on Penetration Testing*, 1, ISOPT I, Orlando, Proceedings, vol.1, p. 157-220.

Butler, J.J., Caliendo, J.A., Goble, G.G., 1998. Comparison of SPT energy measurement methods. In: *International Conference on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, Proceedings, vol.2, p.901-906.

Calle, E.O.F., 1987. Experimental Verification by Field Measurements of Covariance Models for a Geotechnical Property. *5th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, Vancouver, BC, Can, vol.2, p. 885-892.

Campanella, R.I.G., Sy, A., 1994. Recent development in energy calibration of penetration tests at UBC. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 13, New Delhi, Proceedings, vol.1, p.151-157.

Chilès, J.P. & Delfiner, P., 1999. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. New York: Wiley-Interscience, 695p.

Costa, J.F., 1997. *Developments in Recoverable Reserves and Ore Body Modeling*. PhD Thesis, WH Bryan Mining Geology Research Centre, The University of Queensland, 333p.

Cromer, M.C., 1996. Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications: A Technology transferred. *Symposium on Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*, Phoenix, AZ, USA, p.3-12.

Cromer, M.C., Rautman, C.A., Zelinski, W.P., 1996. Geostatistical Simulation of Rock Quality Designation (RQD) to Support Facilities Design at Yucca Mountain, Nevada. *Symposium on Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*. Phoenix, AZ, USA, p.218-235.

David, M., 1977. *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Developments in Geomathematics 2. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 364p.

David, M., 1988. *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Developments in Geomathematics 6. Elsevier Scientific Publishers B.V., Amsterdam, 216p.

Décourt, L., Quaresma Filho, A.R., 1994. Practical applications of the standard penetration test complemented test complemented by torque measurement SPT-T, present stage and future trends. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 13, New Delhi, Proceedings, vol.1, p.143-146.

Deutsch, C.V. & Journel, A.G., 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 345p.

Dimitrakopoulos, R., 1998. Conditional Simulation Algorithms for Modelling Orebody Uncertainty in Open Pit Optimization. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 12, n. 4, p.173-179.

Farrar, J.A., 1998. Summary of Standard Penetration Test (SPT) energy measurement experience. In: *International Conference on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, Proceeding, vol.2, p.919-926.

Fletcher, G.F.A., 1965. Standard Penetration test: its uses and abuses. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.91, n.SM4, p.67-75, july.

Folle, D., Costa, J.F.C.L., Koppe, J.C., 2001. *Geração de Mapas de SPT: uma abordagem geoestatística*. INFOGEO – Simpósio brasileiro de aplicações de informática em geotecnia – CD-Rom. Curitiba/PR, setembro.

Geisser, R.F., 1966. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.92, n.SM2, p.184-185, mar.

Gonçalves, C., Andreo, C.S., Bernardes, G.P., Fortunato, S.G.S., 2000. *Controle de Fundações Profundas Através de Métodos Dinâmicos*. Livro editado pelos próprios autores.

Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 464p.

Hegazy, Y.A., Mayne, P.W., Rouhani, S., 1996. Geostatistical Assessment of Spatial Variability in Piezocone Tests. *Conference on Uncertainty in the Geologic Environment, UNCERTAINTY'96*, Madison, WI, USA, p.254-268.

Huijbregts, C.J., 1975. *Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data*. In: Davis, J.C. & MC Cullagh, M.J. (ed.) *Display and analysis of spatial data*. New York: John Wiley, p.38-53.

Ireland, H.O., 1966. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.92, n.SM2, p.189-190, mar.

Ireland, H.O.; Moreto, O.; Vargas, M., 1970. The dynamic penetration test: A standard that is not standardized. *Géotechnique*, 20, n.2, p.185-192.

Isaaks, E.H. & Srivastava, M.R., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561p.

Isaaks, E.H., 1990. *The Application of Monte Carlo Methods to the Analysis of Spatially Correlated Data*. Ph.D. Thesis, Stanford University, USA, 213p.

ISSMFE, 1989. Technical Committee on Penetration Testing of Soils, TC 16. Report on Reference Test Procedure CPT-SPT-DP-WST, Rio de Janeiro.

Journel, A.G. & Huijbregts, C.J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, 600p.

Journel, A.G., 1974. *Geostatistics for conditional simulation of ore bodies*. *Economic Geology*, vol. 69, n. 5, p.673-687.

Kovacs, W.D., 1979. Velocity measurement of free-fall SPT hammer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol.105, n.GT1, p.1-10, Jan.

Kovacs, W.D., Evans, S.C., Griffith, A.L., 1977. Towards a more standardized SPT. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 9, Tokio, Proceedings, vol.2, p.269-276.

Kovacs, W.D., Salomone, L.A., 1982. SPT hammer energy measurements. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol.108, n.GT4, p.599-620, apr.

Krige, D.G., 1951. A Statistical Approach to some Mine Valuations and Allied Problems at the Witwatersrand. Master's thesis, University of Witwatersrand, South Africa.

Liang, R.Y., Sheng, Y., 1993. Wave equation parameters from driven rod test. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol.119, n.6, p.1037-1057, Jun.

Lo Pinto, V., 1966. Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.92, n.SM1, p. 195-196.

Mackean, R.A.N. & Rosenbaum, M.S., 1990. Geostatistical Characterisation of the SPT. *6th International Congress, International Association of Engineering Geology (IAEG)*, Balkema, Rotterdam, p. 317-322.

Marcuson, W.F., Bieganousky, W.A., 1977. Laboratory standard penetration test on fine sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol.103, n.GT6, p.565-588, Jun.

Matheron, G., 1963. *Principles of Geostatistics*. Economic Geology, vol. 58, p. 1246-1266.

Matsumoto, T., Serigushi, H., Yoshida, H., Kita, K., 1992. Significance of two point strain measurement in SPT. *Soil and Foundation, ISSMFE*, vol.32,n.2, p.67-82, jun.

Mello, V.F.B., 1971. State of the art: The standard penetration test. In: *Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4, Porto Rico, Proceedings, vol.1, p.1-87.

Mohr, H.A., 1966. Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol.92, n.SM1, p.196-199, Jan.

Naime, R., 1999. *Uso das sondagens à percussão e sondagens penetrométricas na investigação dos solos – Estimativa da capacidade de carga dos solos de Porto Alegre e Passo Fundo*. Qualificação de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, 417p.

Odebrecht, E., Bernardes, G.de P., Schnaid, F., 2000. *Medida de Energia no Ensaio SPT*. Caderno de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 103p., abr.

Olea, R.A., 1974. Optimal contour mapping using universal kriging. *Journal of Geophysical Research, USA*, vol. 79, n. 5, p.695-702.

Olea, R.A., 1991. *Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary*. Oxford University Press, New York, 177p.

Olea, R.A., 1999. *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 303p.

Palacios, A., 1977. *The Theory and Measurement of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling*. Florida . Dissertation for the degree of doctor in philosophy – University of Florida.

Parson, J.D., 1966. Discussion of “Standard penetration test: its uses and abuses”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, n.SM3, p.103-105, may.

Pilger, G.G., 2000. *Crêterios para Loca o Amostral Baseados em Simula o Estocástica*. Disserta o de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 127p.

Projeto RADAMBRASIL, 1986. Mapa exploratório de Solos. Folhas SH/SI.22/21*. Esc: 1.100.000. vol. 33.

Projeto RADAMBRASIL, 1986. Mapa Geológico. Folhas SH/SI.22/21*. Esc: 1.100.000. vol. 33.

Rauche, F., Theadean, G., Abou-Matar, H., Likens, G., Goble, G., (1994). Investigation of dynamic and static pile behavior from modified standard penetration test. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Funda es*, Cobramsef, 10, Foz do Iguaçu. Anais, ABMS, vol.p s-congresso, p.3-32.

Renau, F.F., 1966. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol.92, n.SM2, p.187-189, mar.

Schmertmann, J.H., 1966. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, n.SM5, p.130-133.

Schmertmann, J.H., 1979. Statics of SPT. *Journal of the geotechnical engineering division, ASCE*, vol.105, n.GT5, p.655-670, may.

Schmertmann, J.H., Palacios, A., 1979. Energy dynamics of SPT. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol.105, n.GT8, p.909-926, aug.

Schnabel, J.J., 1966. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.92, n.SM2, p.184, mar.

Seed, R.B., Harder, L.F. Jr., Youd, T.L., 1988. Effects of Borehole Fluid on Standard Penetration Test Results. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, vol.11, n.4, p.248-256, dec.

Skempton, A. W., 1986. Standard penetration test procedures and effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and over consolidation. *Géotechnique*, vol.36, n.3, p.425-447.

Soulie, M., 1984. Geostatistical Applications in Geotechnics. *Mathematical and Physical Sciences*, p. 703-730.

Soulie, M., Montes, P., Silvestri, V., 1990. Modelling Spatial Variability of Soil Parameters. *Canadian Geotechnical Journal*, Montreal, Que, Can, vol. 27, n.5, p.617-630.

Stangler, R.L., 2001. *Abordagem Probabilística na Avaliação de Depósitos de Argila Cerâmica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 192p.

Stubbings, J., 1966. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.92, n.SM2, p. 185-189, mar.

Sturaro, J.R., Landim, P.M.B., Riedel, P.S., 2000. O Emprego da Técnica Geoestatística da Krigagem Indicativa em Geotecnia Ambiental. *Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia*, ABMS, vol.23, n.3, p.157-164, dez.

Teixeira, A. H., 1947a. A padronização da sondagem de simples reconhecimento. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos*, 5, São Paulo, Anais, ABMS, vol.3, p. 1-22.

Teixeira, A. H., 1947b. Sondagens - Relato. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos*, 5, São Paulo, Anais, ABMS, vol.4, p.32-42.

Teixeira, A. H., 1977. Sondagens. *Prospecção do Subsolo*, Recife. Anais, ABMS-NE, vol.único, p.39-61.

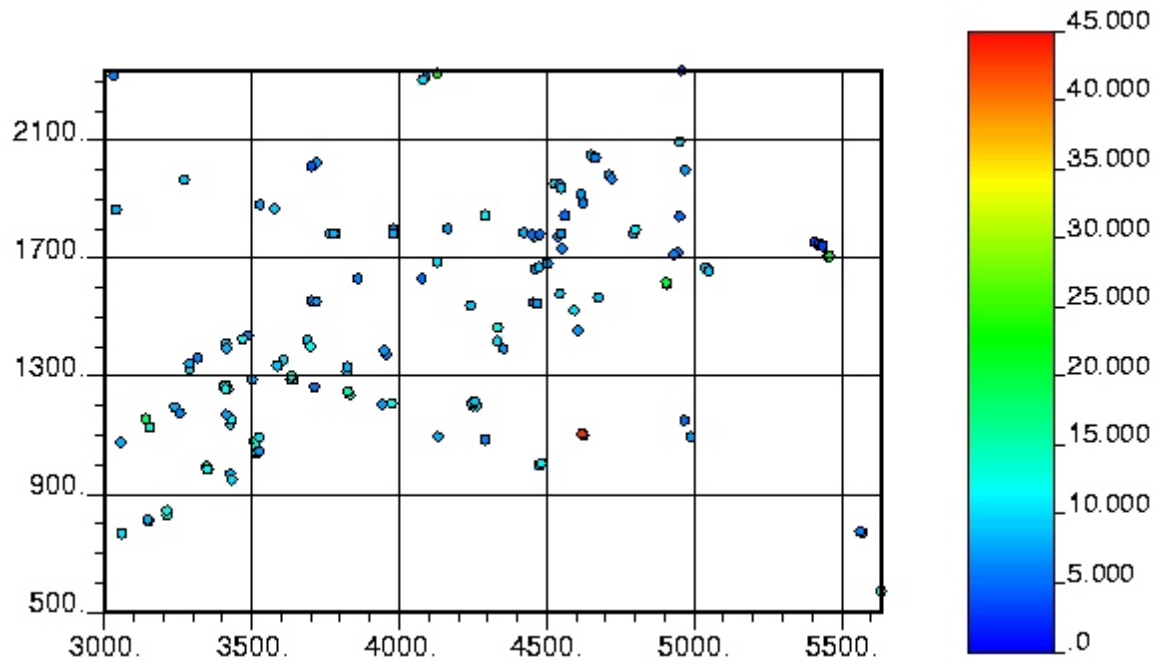
Teixeira, A. H., 1993. *Solos do Interior de São Paulo. Um aperfeiçoamento das sondagens de simples reconhecimento à percussão*. São Carlos, ABMS, cap. 4, p.77-93.

Xavier, S.R., 1999. *Estudo Geoestatístico do Subsolo da Usina Nuclear de Angra 2, RJ*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 229p.

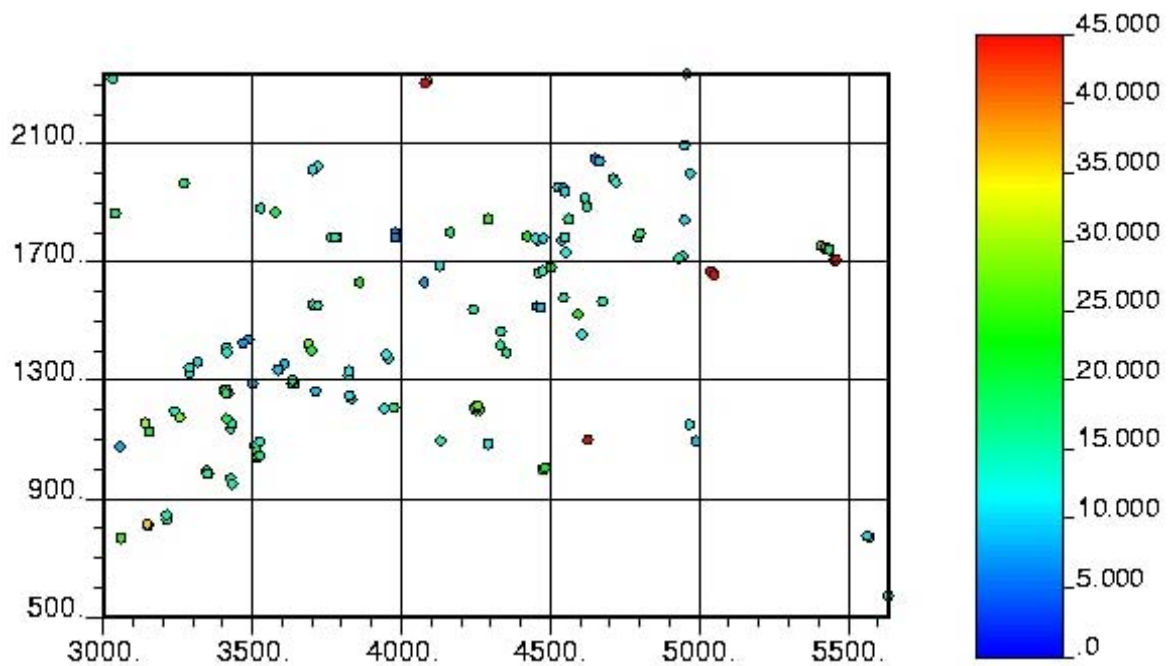
Yoon, G.L., O'Neill, M.W., 1999. Estimation of Driven Pile Resistance Using Geostatistical Methods. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Ahn Yang, South Korea, vol.14, p.205-211.

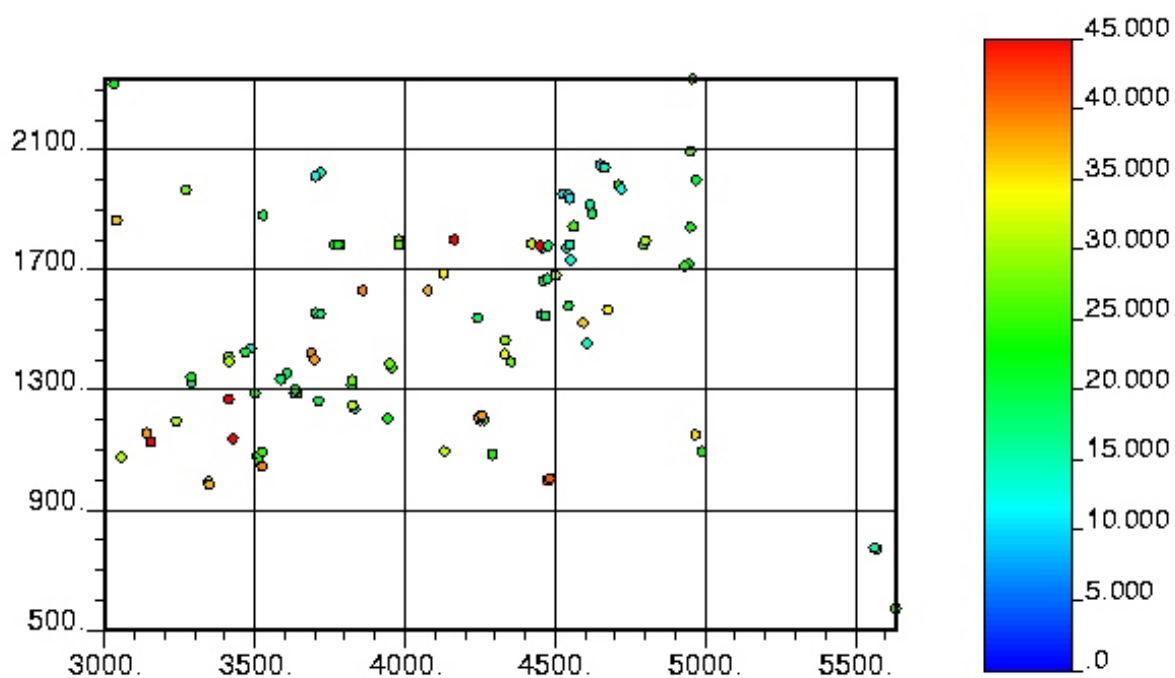
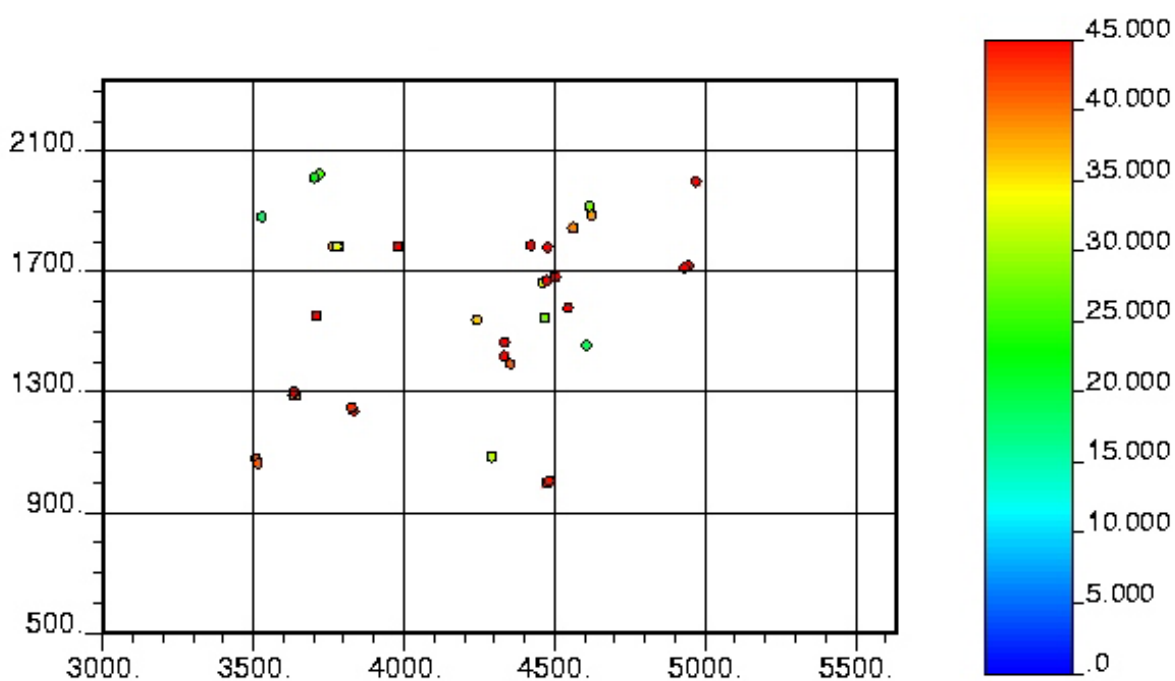
Apêndice A

Mapa de localização dos dados de SPT para a camada I



Mapa de localização dos dados de SPT para a camada II.



Mapa de localização dos dados de SPT para a camada III.**Mapa de localização dos dados de SPT para a camada IV.**

Apêndice B

Resultado do estudo variográfico dos dados originais da camada I, onidirecional e nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/90/3500/0/50/8 - (omni)	140	14	3,0	22,70	583,90	Sph
0/22.5/300/0/50/8 - (0°)	140	14	3,0	22,70	492,70	Sph
90/22.5/300/0/50/8 - (90°)	140	14	3,0	22,70	857,60	Sph

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \times Sph\left(\frac{h}{a}\right)$$

$$\gamma(h) = 3,0 + 22,70 \times Sph\left(\frac{N0^\circ}{492,70} + \frac{N90^\circ E}{857,60}\right)$$

Resultado do estudo variográfico dos dados originais da camada II, onidirecional e nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/90/3500/0/50/8 - (omni)	140	14	6	70,40	775,50	Sph
0/22.5/300/0/50/8 - (0°)	140	14	6	70,40	547,40	Sph
90/22.5/300/0/50/8 - (90°)	140	14	6	70,40	821,10	Sph

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \times Sph\left(\frac{h}{a}\right)$$

$$\gamma(h) = 6 + 70,40 \times Sph\left(\frac{N0^\circ}{547,40} + \frac{N90^\circ E}{821,10}\right)$$

Resultado do estudo variográfico dos dados originais da camada III, onidirecional e nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/90/3500/0/50/8 - (omni)	140	14	10	75,90	474,40	Sph
0/22.5/300/0/50/8 - (0°)	140	14	10	75,90	556,50	Sph
90/22.5/300/0/50/8 - (90°)	140	14	10	75,90	757,20	Sph

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \times Sph\left(\frac{h}{a}\right)$$

$$\gamma(h) = 10 + 75,90 \times Sph\left(\frac{N0^\circ}{757,20} + \frac{N90^\circ E}{556,50}\right)$$

Resultado do estudo variográfico dos dados originais da camada IV, onidirecional e nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	Nº Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/90/3500/0/50/8 - (omni)	140	14	10	55,10	675,10	Sph
0/22.5/300/0/50/8 - (0°)	140	14	10	55,10	547,40	Sph
90/22.5/300/0/50/8 - (90°)	140	14	10	55,10	775,50	Sph

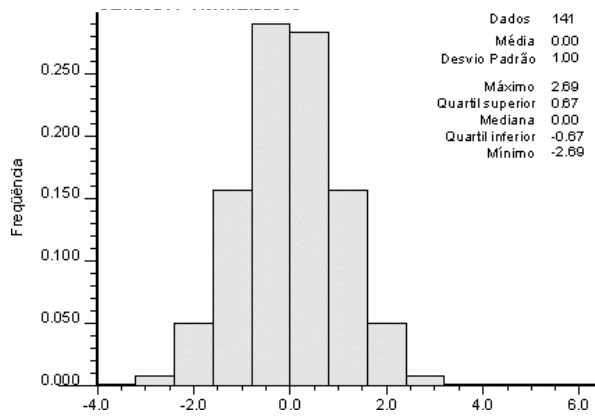
$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \times Sph\left(\frac{h}{a}\right)$$

$$\gamma(h) = 10 + 55,10 \times Sph\left(\frac{N0^\circ}{547,40} + \frac{N90^\circ E}{775,50}\right)$$

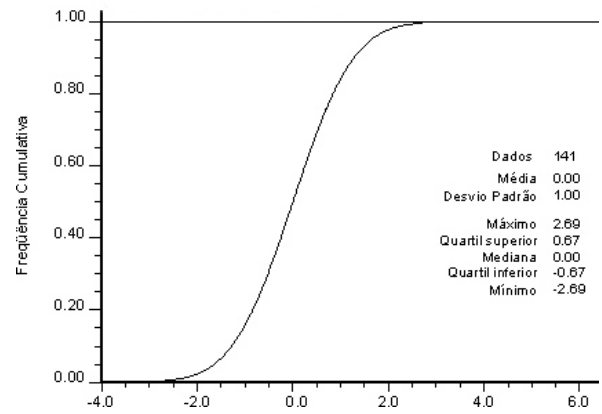
Apêndice C

Histograma dos dados normalizados da camada I (a). Histograma dos dados cumulativos desta mesma camada (b).

(a)

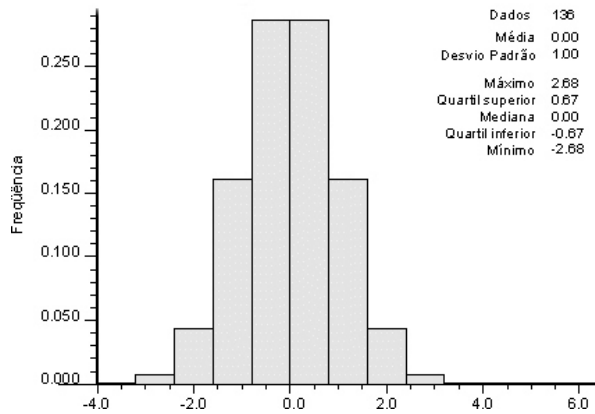


(b)

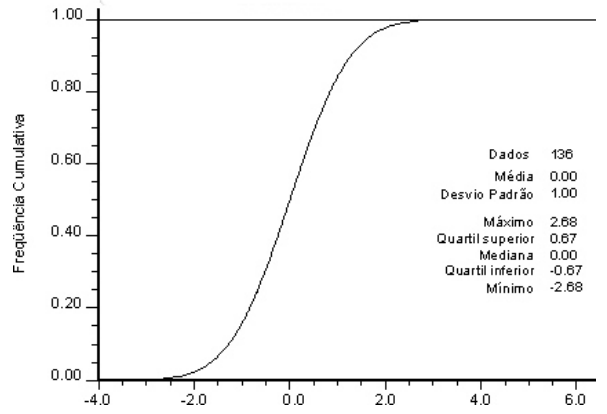


Histograma dos dados normalizados da camada II (a). Histograma dos dados cumulativos desta mesma camada (b).

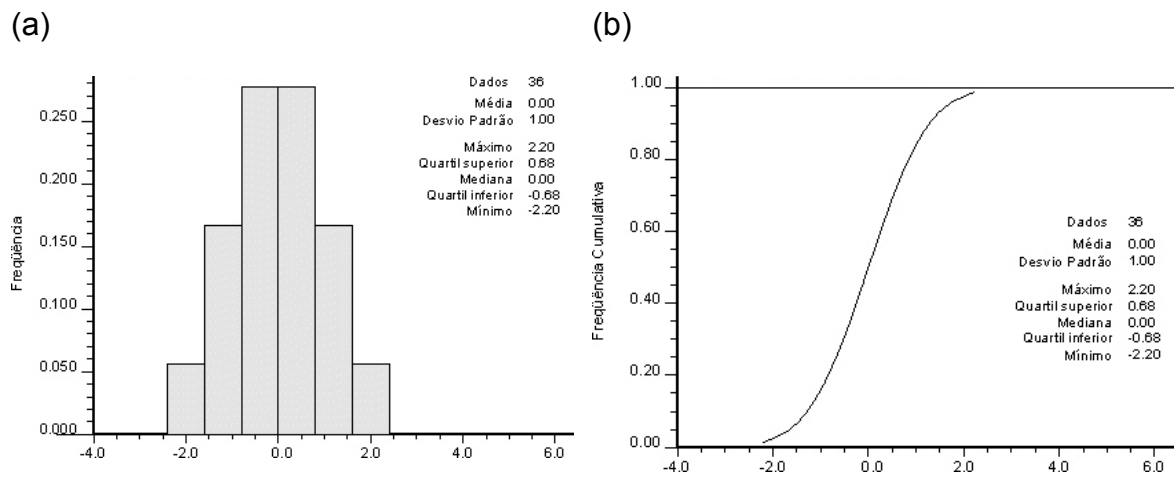
(a)



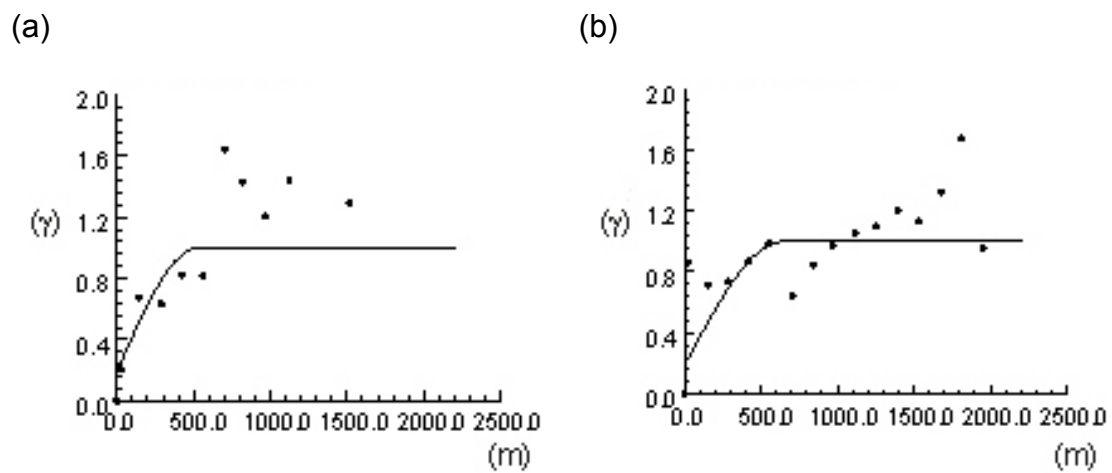
(b)



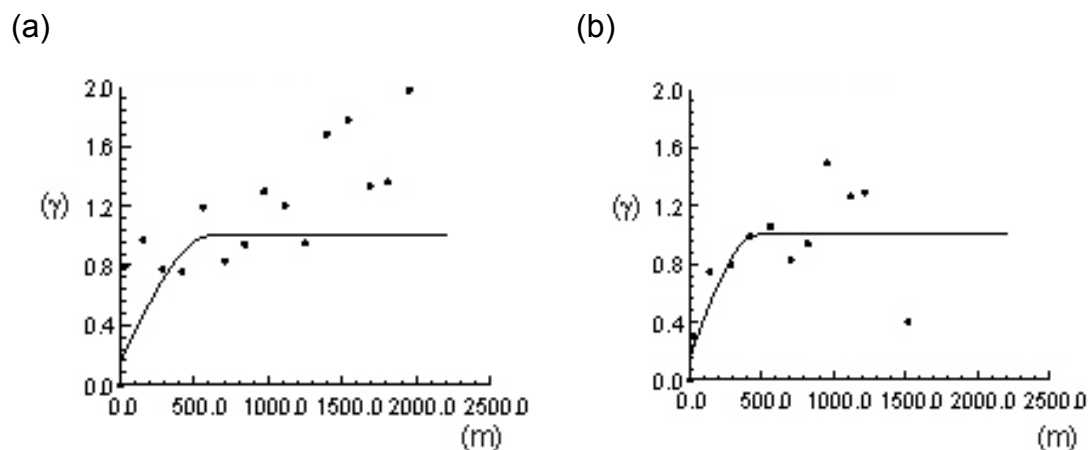
Histograma dos dados normalizados da camada IV (a). Histograma dos dados cumulativos desta mesma camada (b).



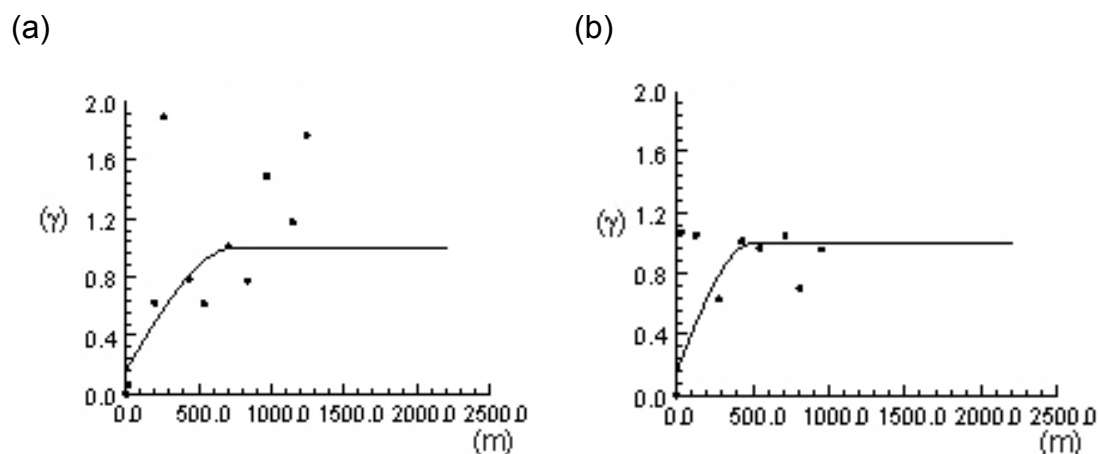
Variograma direcional dos dados normalizados da camada I a 0° (a), e 90° (b).



Variograma direcional dos dados normalizados da camada II a 0° (a), e 90° (b).



Variograma direcional dos dados normalizados da camada IV a 0° (a), e 90° (b).



Resultado do estudo variográfico dos dados normalizados da camada I, nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/22.5/300/0/50/8 – (0°)	140	14	0,183	0,817	492,70	Sph
90/22.5/300/0/50/8 – (90°)	140	14	0,183	0,817	647,81	Sph

Resultado do estudo variográfico dos dados normalizados da camada II, nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/22.5/300/0/50/8 – (0°)	140	14	0,25	0,75	465,33	Sph
90/22.5/300/0/50/8 – (90°)	140	14	0,25	0,75	638,68	Sph

Resultado do estudo variográfico dos dados normalizados da camada III, nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/22.5/300/0/50/8 – (0°)	140	14	0,25	0,75	437,95	Sph
90/22.5/300/0/50/8 – (90°)	140	14	0,25	0,75	620,44	Sph

Resultado do estudo variográfico dos dados normalizados da camada IV, nas direções de maior e menor continuidade.

Az/Atol/Band/Dip/Dtol/Bandv	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0/22.5/300/0/50/8	140	14	0,125	0,875	474,45	Sph
90/22.5/300/0/50/8	140	14	0,125	0,875	647,81	Sph

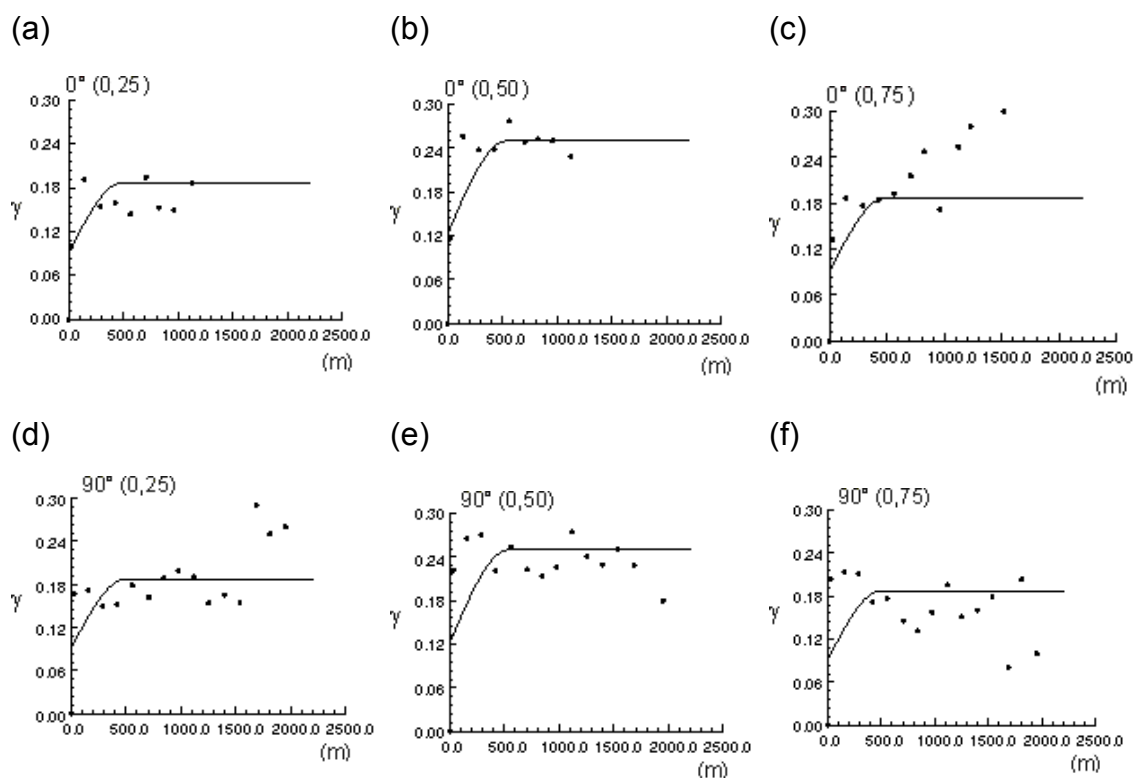
Apêndice D

TESTES DE MULTINORMALIDADE:

1º teste - Bigaus:

Considerando os resultados apresentados abaixo, verifica-se que os variogramas da indicatriz (pontos) reproduzem o modelo de gerado pelo bigaus (modelo variográfico).

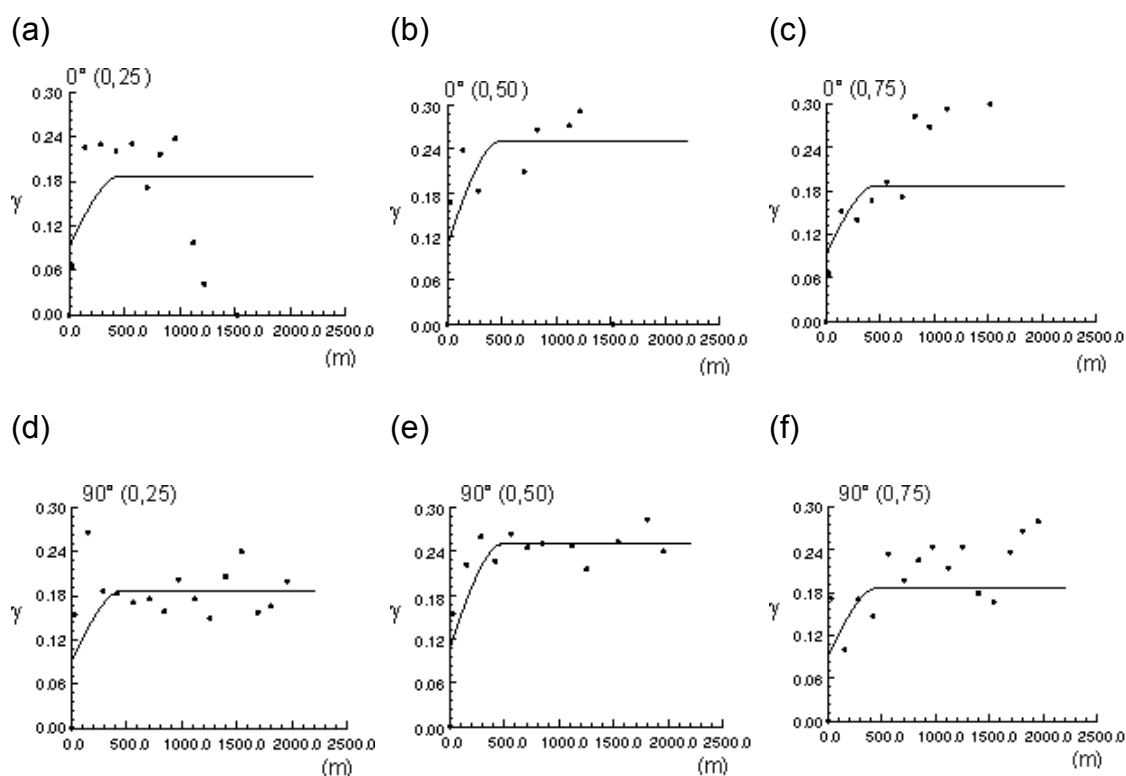
Variogramas teóricos representativos das direções 0° e 90° da camada I para o quantil 0,25 (a), mediana 0,50 (b) e quantil 0,75 (c) (linha contínua), e para os três casos os variogramas experimentais da indicatriz são representados por pontos.



Teste de multinormalidade bigaus (0.25, 0.50, 0.75) para as direções de 0° e 90° da camada I.

Parâmetro - Ângulo	Lag	Nº Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0,25 – 0°	140	14	0,09125	0,09625	492,70	Sph
0,50 – 0°	140	14	0,1225	0,1275	538,30	Sph
0,75 – 0°	140	14	0,09125	0,09625	492,70	Sph
0,25 – 90°	140	14	0,09125	0,09625	492,70	Sph
0,50 – 90°	140	14	0,1225	0,1275	538,30	Sph
0,75 – 90°	140	14	0,09125	0,09625	492,70	Sph

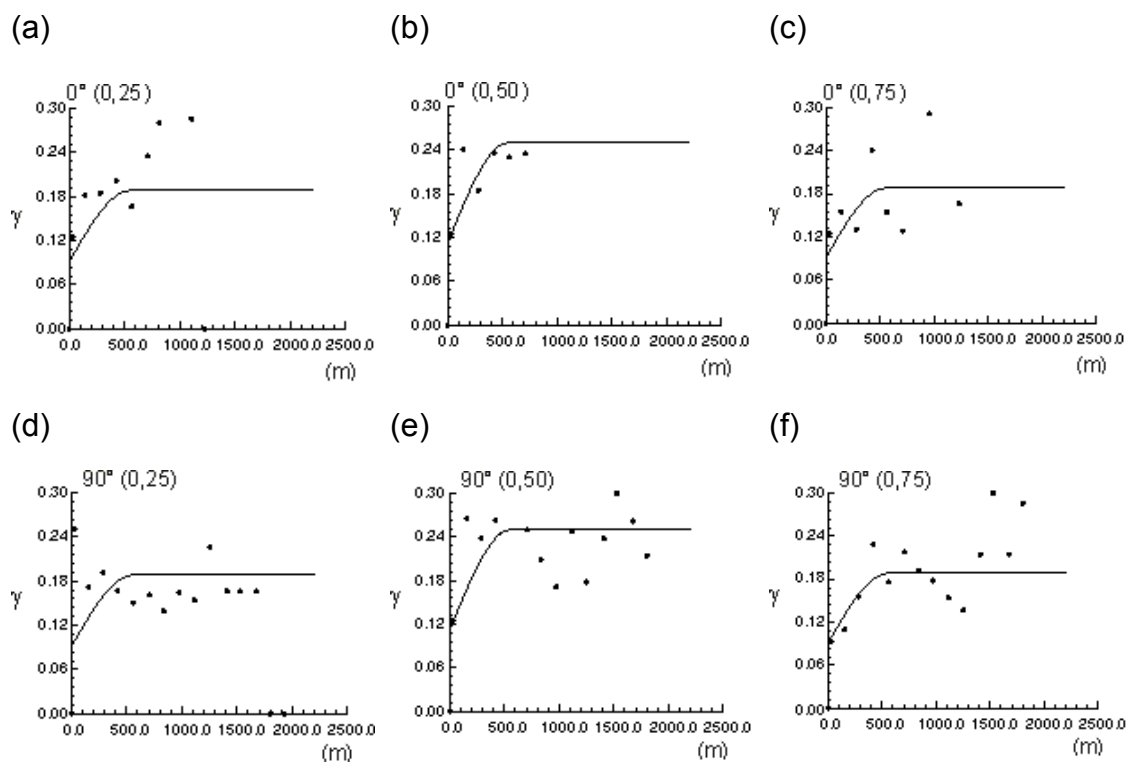
Variogramas teóricos representativos das direções 0° e 90° da camada II para o quantil 0,25 (a), mediana 0,50 (b) e quantil 0,75 (c) (linha contínua), e para os três casos os variogramas experimentais da indicatriz são representados por pontos.



Teste de multinormalidade bigaus (0.25, 0.50, 0.75) para as direções de 0° e 90° da camada II.

Parâmetro - Ângulo	Lag	Nº Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0,25 – 0°	140	14	0,0925	0,095	465,30	Sph
0,50 – 0°	140	14	0,10875	0,14125	483,50	Sph
0,75 – 0°	140	14	0,0925	0,095	465,30	Sph
0,25 – 90°	140	14	0,0925	0,095	465,30	Sph
0,50 – 90°	140	14	0,10875	0,14125	483,50	Sph
0,75 – 90°	140	14	0,0925	0,095	465,30	Sph

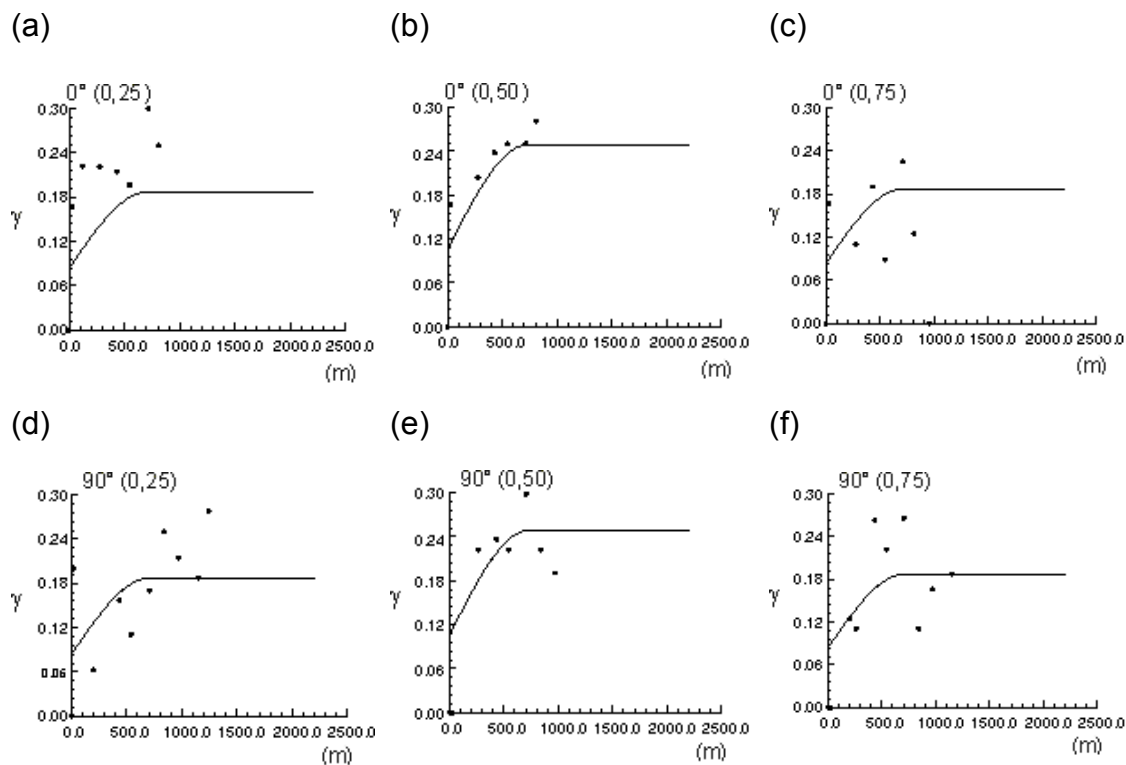
Variogramas teóricos representativos das direções 0° e 90° da camada III para o quantil 0,25 (a), mediana 0,50 (b) e quantil 0,75 (c) (linha contínua), e para os três casos os variogramas experimentais da indicatriz são representados por pontos.



Teste de multinormalidade bigaus (0.25, 0.50, 0.75) para as direções de 0° e 90° da camada III.

Parâmetro - Ângulo	Lag	Nº Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0,25 – 0°	140	14	0,091667	0,096667	554,70	Sph
0,50 – 0°	140	14	0,1125	0,1375	554,70	Sph
0,75 – 0°	140	14	0,091667	0,096667	554,70	Sph
0,25 – 90°	140	14	0,091667	0,096667	554,70	Sph
0,50 – 90°	140	14	0,1125	0,1375	554,70	Sph
0,75 – 90°	140	14	0,091667	0,096667	554,70	Sph

Variogramas teóricos representativos das direções 0° e 90° da camada IV para o quantil 0,25 (a), mediana 0,50 (b) e quantil 0,75 (c) (linha contínua), e para os três casos os variogramas experimentais da indicatriz são representados por pontos.



Teste de multinormalidade bigaus (0.25, 0.50, 0.75) para as direções de 0° e 90° da camada IV.

Parâmetro - Ângulo	Lag	N° Lag	Nugget	Sill	Range	Modelo
0,25 – 0°	140	14	0,084167	0,10333	708,00	Sph
0,50 – 0°	140	14	0,10625	0,1425	729,90	Sph
0,75 – 0°	140	14	0,084167	0,10333	708,00	Sph
0,25 – 90°	140	14	0,084167	0,10333	708,00	Sph
0,50 – 90°	140	14	0,10625	0,1425	729,90	Sph
0,75 – 90°	140	14	0,084167	0,10333	708,00	Sph

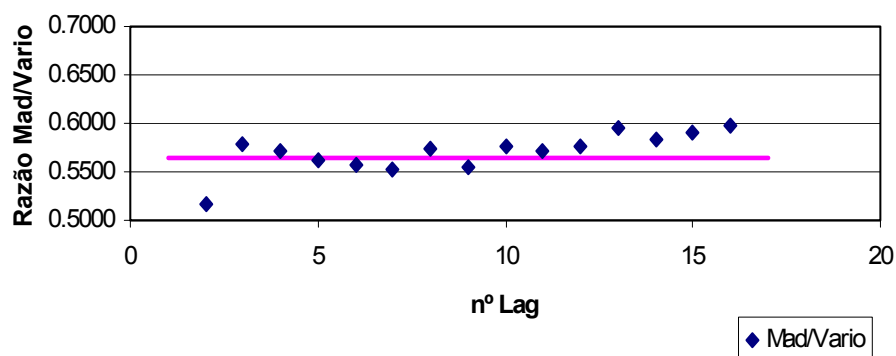
2º teste - relação madograma/variograma:

Esse segundo teste foi realizado para várias distâncias (lags) nas direções de maior e menor continuidade espacial, além da onidirecional. As figuras que seguem, apresentam os resultados da equação (4.3) quando aplicados para vários lags (h). Pode-se observar que o valor calculado é

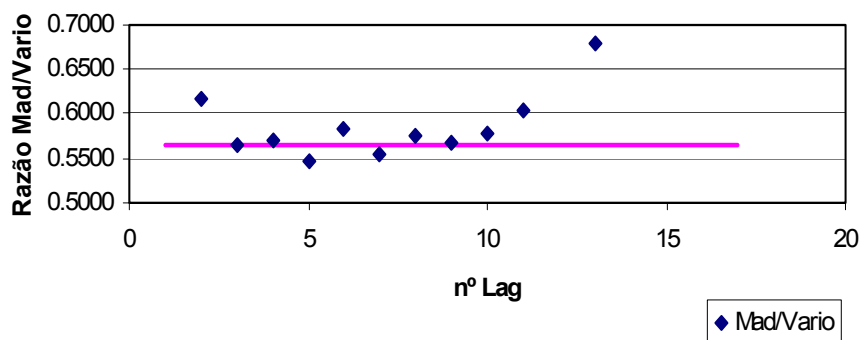
próximo do desejado na maioria dos lags (h), satisfazendo a questão de binormalidade.

Teste de binormalidade razão madograma/variograma para os madogramas/variogramas onidirecional (a), direção 0° (b) e direção 90° (c), para a camada I. A linha horizontal em magenta, representa o valor ideal para a relação da equação 4.3 (capítulo 4).

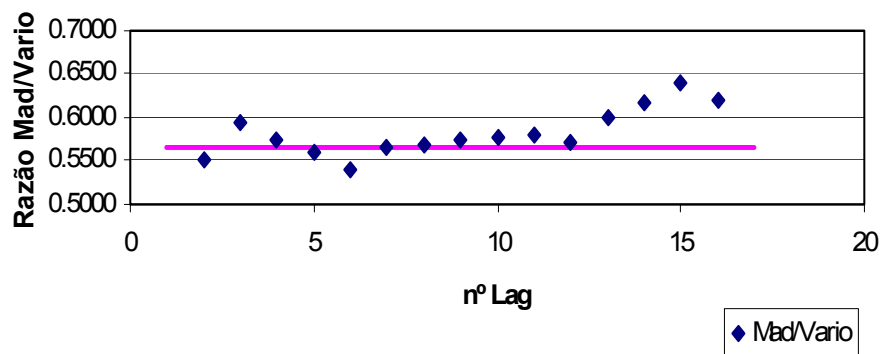
(a)



(b)

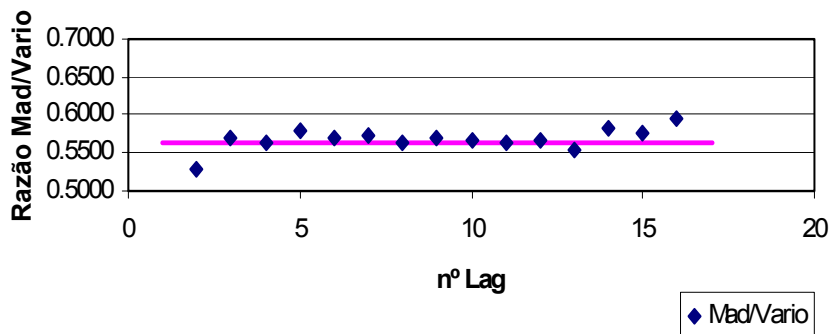


(c)

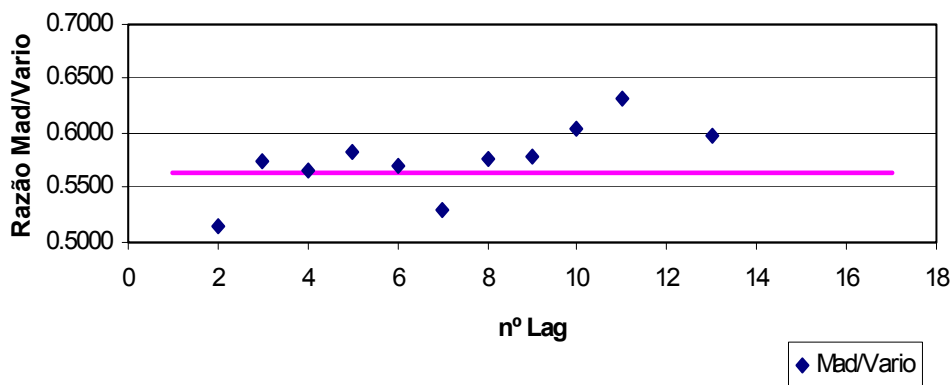


Teste de binormalidade razão madograma/variograma para os madogramas/variogramas onidirecional (a), direção 0° (b) e direção 90° (c), para a camada II. A linha horizontal em magenta, representa o valor ideal para a relação da equação 4.3 (capítulo 4).

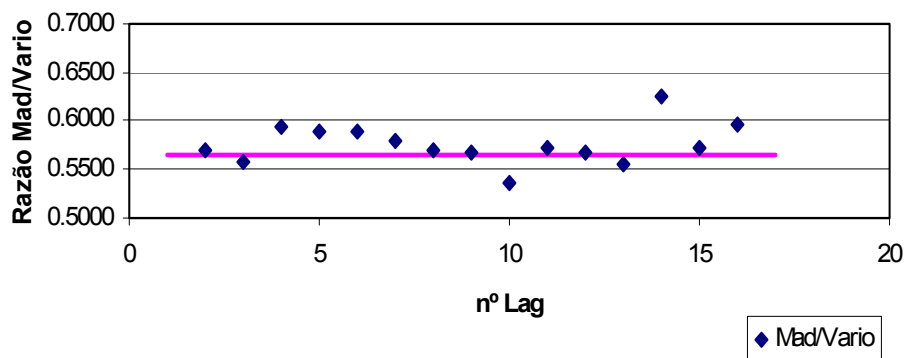
(a)



(b)

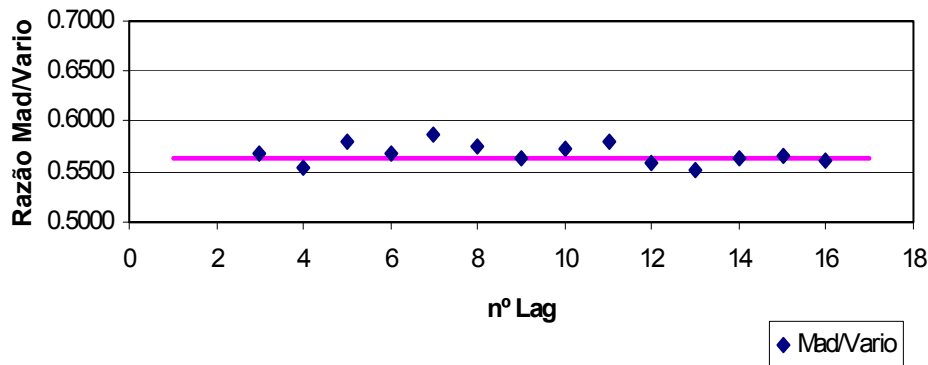


(c)

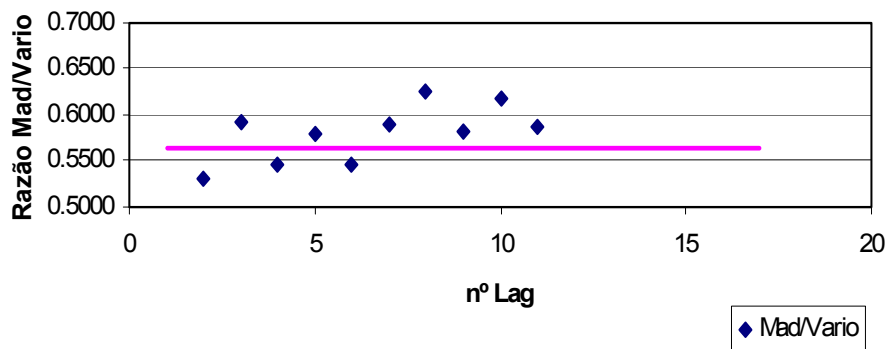


Teste de binormalidade razão madograma/variograma para os madogramas/variogramas onidirecional (a), direção 0° (b) e direção 90° (c), para a camada III. A linha horizontal em magenta, representa o valor ideal para a relação da equação 4.3 (capítulo 4).

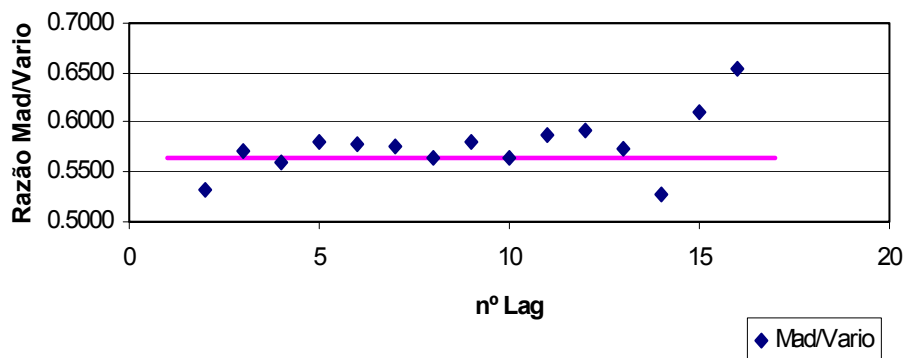
(a)



(b)

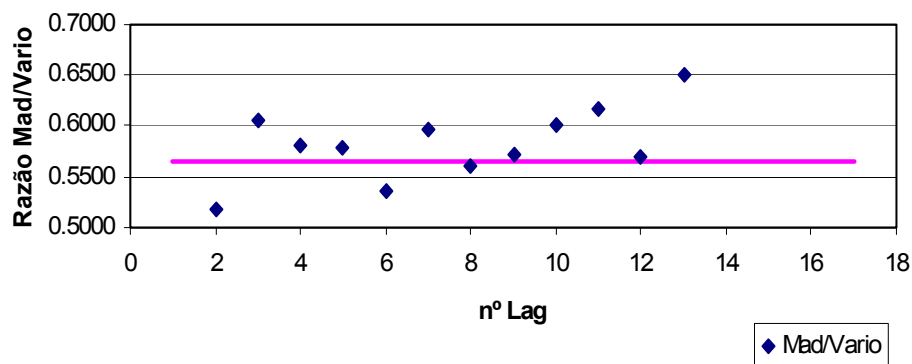


(c)

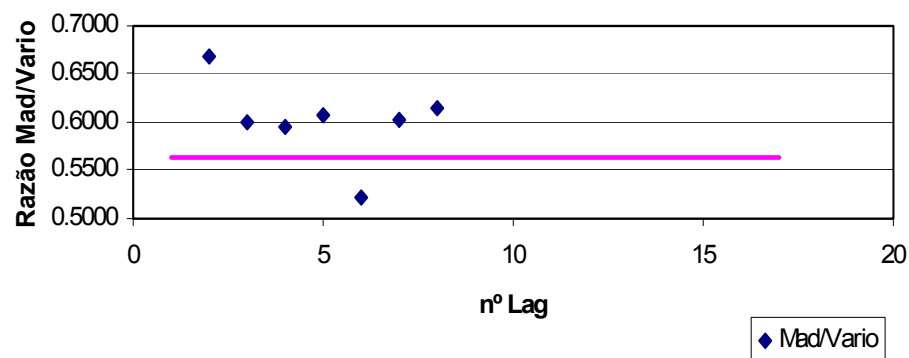


Teste de binormalidade razão madograma/variograma para os madogramas/variogramas onidirecional (a), direção 0° (b) e direção 90° (c), para a camada IV. A linha horizontal em magenta, representa o valor ideal para a relação da equação 4.3 (capítulo 4).

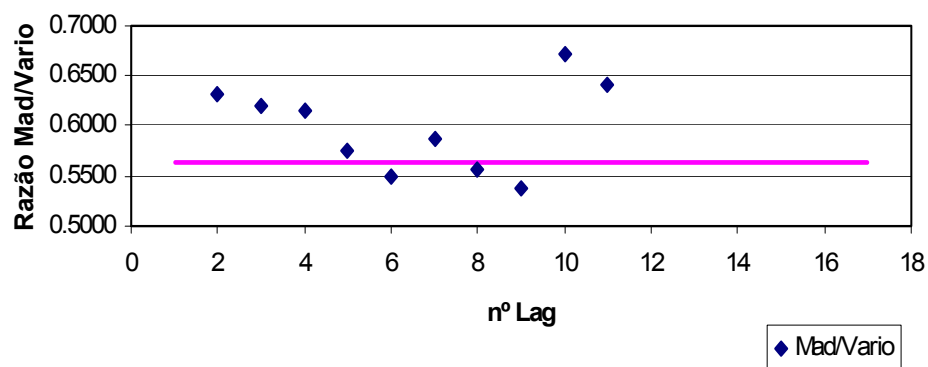
(a)



(b)



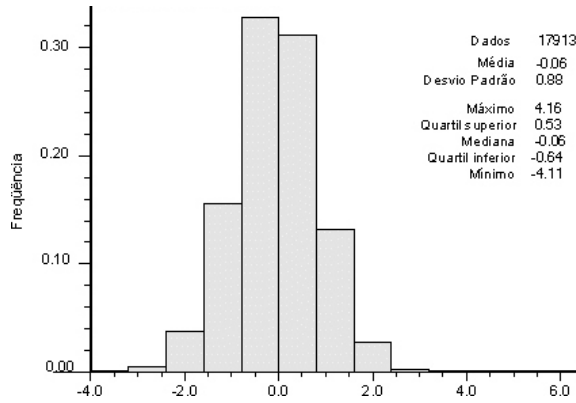
(c)



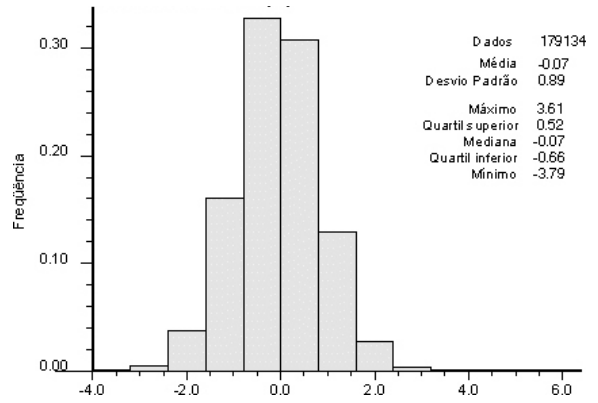
Apêndice E

Histograma de cinco simulações selecionadas aleatoriamente representativas da camada I, dos dados normalizados [3 (a), 18 (b), 24 (c), 39 (d) e 43 (e)].

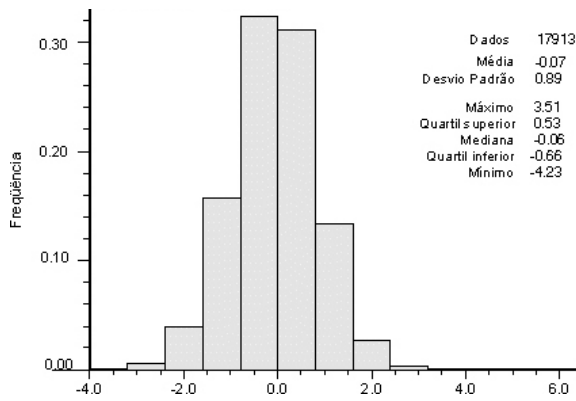
(a)



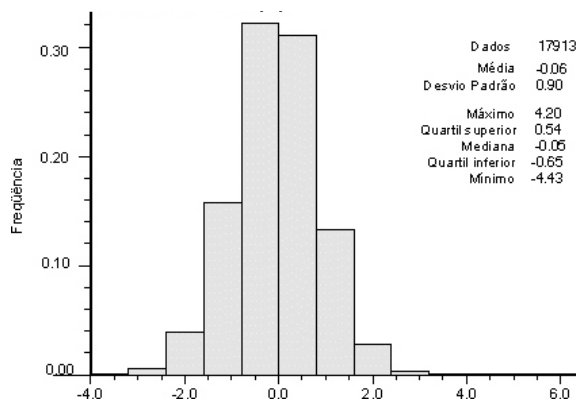
(b)



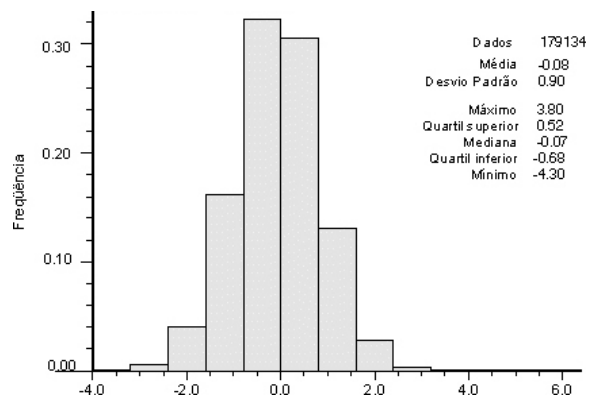
(c)



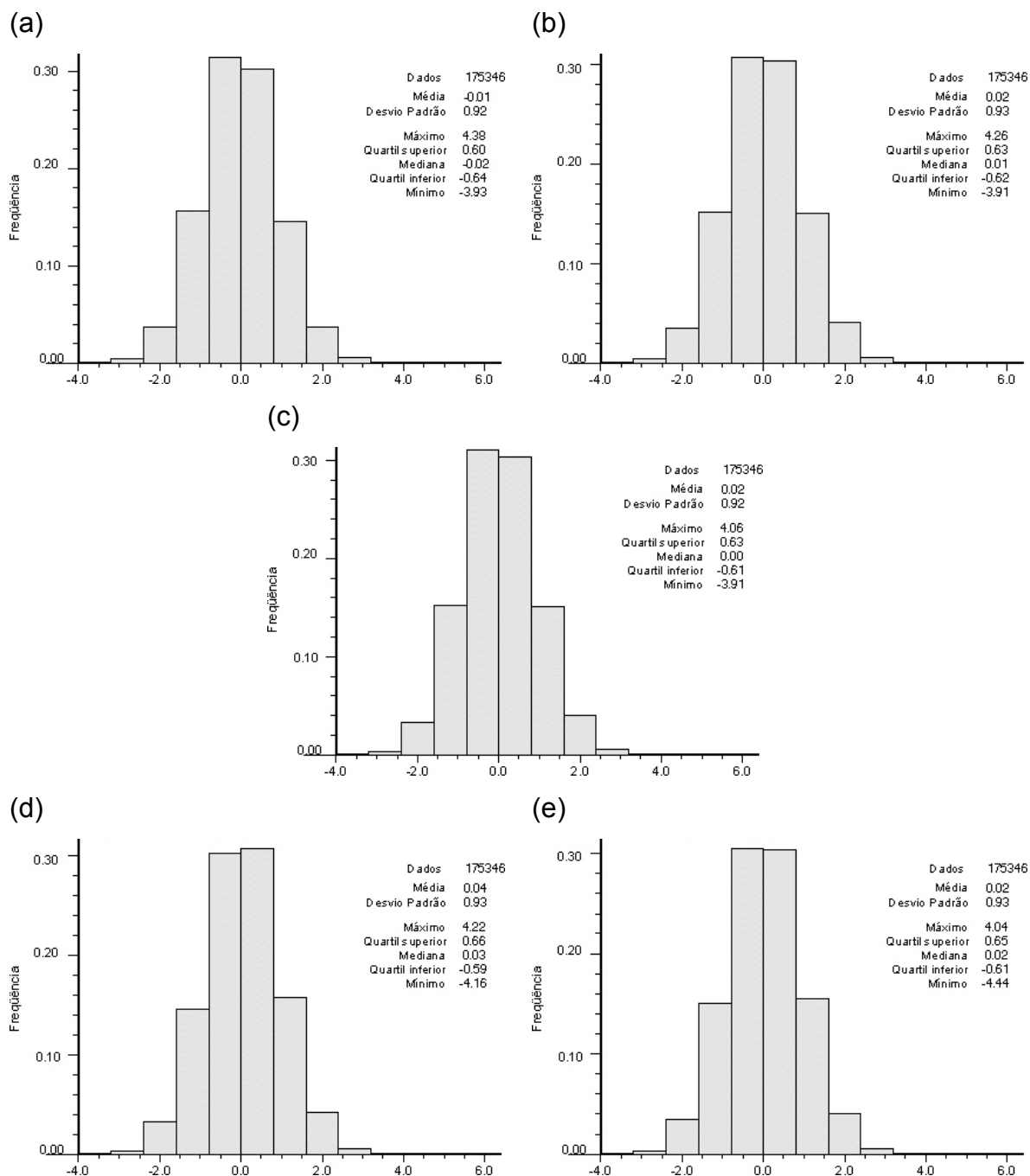
(d)



(e)

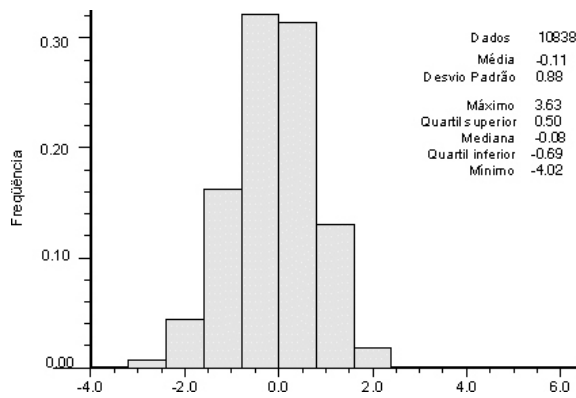


Histograma de cinco simulações selecionadas aleatoriamente representativas da camada II, dos dados normalizados [3 (a), 18 (b), 24 (c), 39 (d) e 43 (e)].

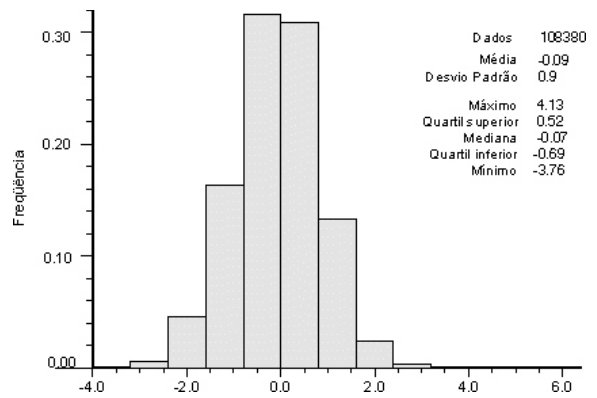


Histograma de cinco simulações selecionadas aleatoriamente representativas da camada IV, dos dados normalizados [3 (a), 18 (b), 24 (c), 39 (d) e 43 (e)].

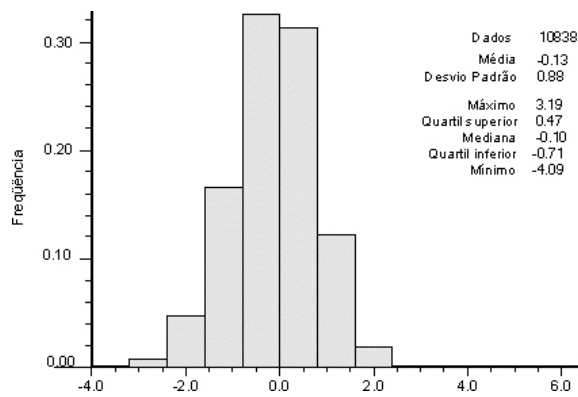
(a)



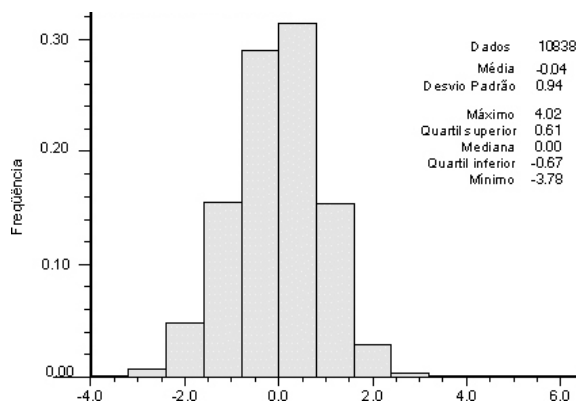
(b)



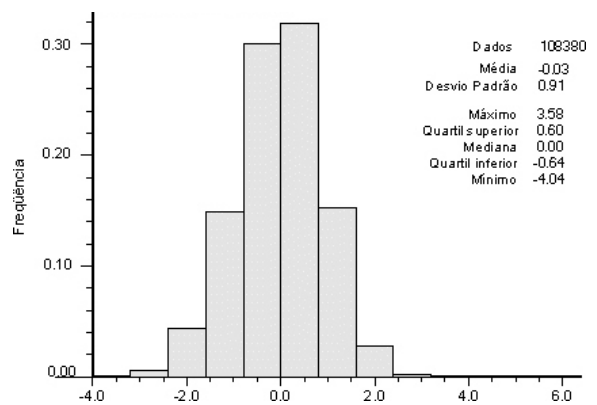
(c)



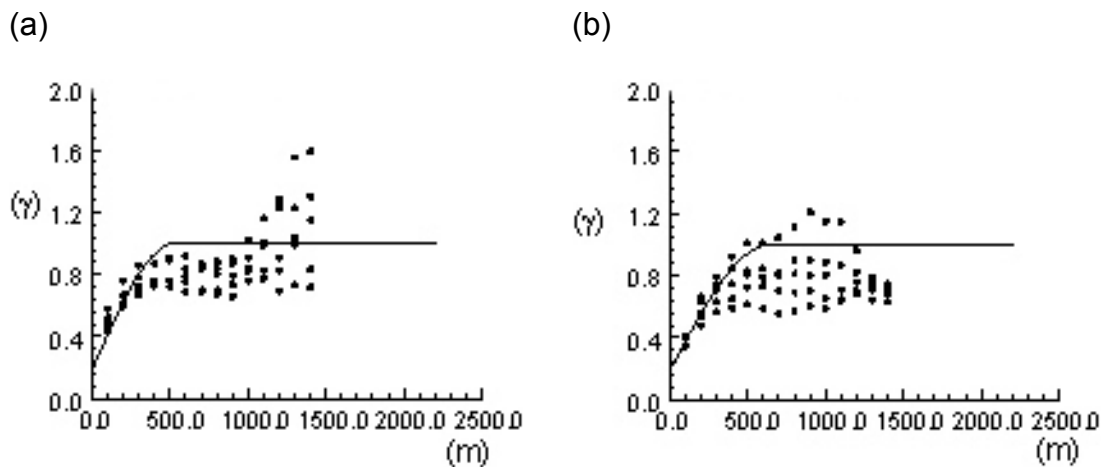
(d)



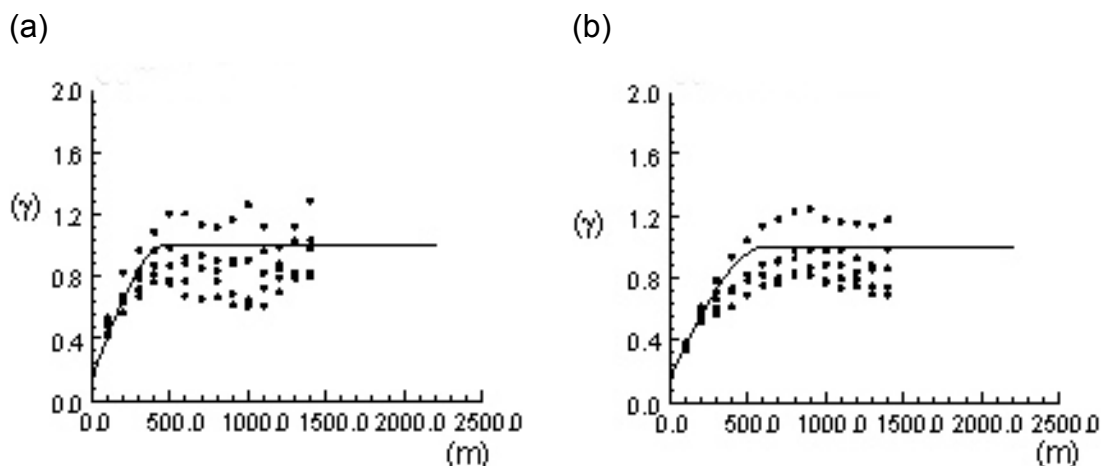
(e)



Flutuações nas direções de maior e menor continuidade espacial dos dados normalizados da camada I.



Flutuações nas direções de maior e menor continuidade espacial dos dados normalizados da camada II.



Flutuações nas direções de maior e menor continuidade espacial dos dados normalizados da camada IV.

