

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

**BANCO DE DADOS GEOTÉCNICO COM BASE EM SONDAGENS À
PERCUSSÃO E USO DO SIG: ANÁLISE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS
CAMADAS DE SOLO E DO N_{SPT} EM UMA ÁREA DO SUPERPORTO DE RIO
GRANDE-RS.**

BRUNO MARIANO CERQUEIRA DA SILVA

Dissertação apresentada à Coordenação de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves

Rio Grande, fevereiro de 2015.

À minha família, em especial à minha
esposa Andréia Alves Pires.

AGRADECIMENTOS

À Professora **Tatiana Silva da Silva** por ter me iniciado no assunto, ainda no curso de Geomática.

Ao orientador **Antônio Alves** por toda a disposição, suporte e confiança depositados.

Ao Professor **Cezar Bastos** e a toda equipe do **Laboratório da Escola de Engenharia** por terem proporcionado a estrutura e o acervo para que este trabalho fosse realizado.

Ao Projeto 600-PNO-12 (FURG/FAURG) pela aquisição do software ArcGIS empregado nessa dissertação.

À Christian **Enríquez** e a equipe do **Laboratório de Topografia da FURG**, em nome do seu coordenador **Prof. José Antiquiera**, por ter cedido as imagens utilizadas nesse trabalho e pelo suporte no uso do ArcGIS.

Ao Geógrafo **Rafael Rechia Andrada** e à Técnica em Geoprocessamento e futura Engenheira Civil **Beatriz Machado Farias** pelo suporte e sugestões de metodologias no uso do ArcGIS.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo organizar, em um ambiente SIG, um banco de dados georreferenciado baseado em informações obtidas nos boletins e plantas de locação de sondagem à percussão do tipo SPT, executados em uma área na região do Superporto do Rio Grande-RS, onde foi construído o Estaleiro Rio Grande, o qual dispõe de um dique seco. A metodologia empregada é flexível, podendo ser aplicada a outros locais. O *software* de geoprocessamento empregado foi o ArcGIS, que possibilita a criação de produtos visuais com base na entrada de informações na forma de tabelas, e possui ferramentas para tratamento e edição dos dados de entrada. As informações coletadas nos boletins de sondagem dizem respeito à resistência à penetração e tipo de solo, distribuição das camadas ao longo da profundidade e ocorrências como gás natural, presença de conchas e matéria orgânica. A organização espacial dessas informações no ambiente SIG permitiu, através de métodos de interpolação, criar modelos tridimensionais do terreno, além de mapas temáticos e gráficos dedicados a tipos específicos de observação como histogramas, mapas de distribuição do N_{SPT} , cotas das camadas do terreno e cota do lençol freático. Dados obtidos com o tratamento externo das informações presentes nos boletins de sondagem também foram tratados no ambiente SIG. Uma planilha eletrônica, contendo a estimativa da capacidade de carga das estacas de fundação da laje de fundo do dique com base nos furos de sondagem localizados espacialmente, permitiu através da interpolação desses resultados criar mapas temáticos mostrando a distribuição espacial dessa estimativa. É constante a necessidade de aprimoramento dos procedimentos e do conhecimento direcionados às atividades de planejamento e gestão, principalmente no que diz respeito à execução de obras costeiras. A metodologia do presente trabalho pode colaborar com a realização de projetos mais precisos, facilitando o planejamento e execução de estruturas, evitando desperdício, minimizando imprevistos, auxiliando estudos de viabilidade e contribuindo para um manejo consciente do espaço costeiro.

Palavras-chave: SIG, SPT, Superporto de Rio Grande, Estratigrafia, Capacidade de Carga.

ABSTRACT

This study aims to organize, in a GIS environment, a geotechnical database using information obtained from borehole logs and location plans of SPT tests, performed in an area of the Rio Grande harbour. The applied methodology is flexible and can be used elsewhere. ArcGIS software and its extensions allow the creation of visual products based on the input information in the form of tables, and also offer a set of tools to process and edit the input data. The data collected from the borehole logs contain information about the strength and type of soil, its distribution of layers along the depth and may contain information regarding events such as natural gas occurrences, presence of shells and organic matter. The spatial organization of this information in the GIS environment allows, through deterministic interpolation methods such as IDW (Inverse Distance Weighted) or geostatistical (Ordinary Kriging), create three-dimensional terrain models, as well as thematic maps and charts dedicated to specific types of observation like histograms, N_{SPT} distribution maps, depth of soil layers and depth of the water table. Data obtained from external treatment of the information present in the borehole logs can also be processed in the GIS environment. A spreadsheet containing the estimated carrying capacity of the foundation piles of the bottom slab of the dry dock based on borehole logs holes spatially located allow, by interpolating these results to create thematic maps showing the spatial distribution of this estimate. It is a constant need to improve the procedures and expound the knowledge directed to the planning and management activities, particularly with regard to the implementation of coastal enterprises. The methodology of this study can contribute to the realization of more accurate projects, for providing data that will facilitate planning and implementation of structures, avoiding waste, minimizing unforeseen, supporting feasibility studies and contributing to a conscious management of coastal areas.

Keywords: GIS, SPT, Superport of Rio Grande, Stratigraphy, Carrying Capacity.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO GERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 STANDARD PENETRATION TEST – SPT.....	22
2.2 GEOPROCESSAMENTO E OS SIG.....	26
2.3 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO espacial.....	27
2.3.1 Inverso da distância ponderado (IDW).....	28
2.3.2 Krigagem.....	31
2.4 CAPACIDADE DE CARGA DAS ESTACAS.....	32
2.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE sig A BANCOS DE DADOS GEOTÉCNICOS.....	35
2.5.1 Aguiar (2005).....	35
2.5.2 Mendes & Lorand: (2006).....	37
2.5.3 Schuler (2007).....	39
2.5.4 Ribeiro (2010).....	40
2.5.5 Soares (2011).....	41
2.5.6 Wari-Mohammad & Abdul-Ghani: (2011).....	43
3. ÁREA DE ESTUDO.....	45
3.1 OBRA.....	45
3.2 ESTUDOS GEOTÉCNICOS ANTERIORES.....	48
4. METODOLOGIA.....	51
4.1 BASE DE DADOS.....	51

4.1.1	Coordenadas das sondagens.....	54
4.1.2	Dados dos boletins de sondagem.....	55
4.1.3	Capacidade de carga das estacas.....	57
4.2	INSERÇÃO DOS DADOS NO ARCGIS.....	58
4.2.1	Tabelas de cotas e interpolação do N_{SP}	61
4.2.2	Tabelas de topo de camadas e mapas das camadas.....	64
4.2.3	N_{SP} médio e localização das trocas de camadas.....	66
4.2.4	Inserção da tabela de capacidade de carga e geração dos gráficos.....	67
4.2.5	Mapas temáticos de ocorrências de gás e conchas.....	68
5.	RESULTADOS.....	70
5.1	OCORRÊNCIA DE CONCHAS E GÁS.....	70
5.2	INTERPOLAÇÕES.....	72
5.2.1	Superfície freática.....	72
5.2.2	Superfície do topo das camadas.....	75
5.2.3	Visa das camadas em corte.....	90
5.2.4	Imagens tridimensionais a partir das superfícies interpoladas.....	93
5.2.5	Mapas da distribuição do N_{SP} nas cotas de transição entre as camadas.....	95
5.2.6	Mapas de distribuição do N_{SP} na região central da camada I.....	118
5.3	COMPARAÇÃO DO MODELO COM UMA SONDADEGEM REAL.....	121
5.4	GRÁFICO N_{SP} MÉDIO X PROFUNDIDADE.....	123
5.5	COMPARAÇÃO N_{SP} REALIZADOS ANTES E DEPOIS DA ESCAVAÇÃO.....	124
5.6	CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS DENTRO DO DIQUE.....	125
5.6.1	Capacidade de carga – compressão.....	126
5.6.2	Capacidade de carga - tração.....	132
6.	CONCLUSÕES.....	138
7.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	141
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

APÊNDICE A. DISTRIBUIÇÃO DO N_{spr} A CADA METRO.....	146
APÊNDICE B – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA DISTRIBUIÇÃO DO N_{spr}	256

LISTA DE SÍMBOLOS

α : razão de atrito;

β : coeficiente função do processo executivo, tipo de solo e material da estaca;

$\tau_{s,p}$: atrito unitário da estaca;

τ_{cone} : atrito unitário medido no ensaio de cone

ΔL : comprimento do segmento da estaca;

A_b : área da base da estaca;

F1 e F2: coeficientes de correlação entre estaca e amostrador do SPT e modo de execução da estaca;

k: correlação entre N_{SPT} e q_{cone} em função do tipo de solo,

L: comprimento enterrado da estaca;

N_{10} : parâmetro de penetração correspondente ao número de golpes necessário para um avanço de 10 cm no ensaio DPL;

$\bar{N}_b$: média entre o N_{SPT} correspondente à profundidade da ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior;

$\bar{N}_s$: média entre os valores de N_{SPT} ao longo do fuste, excluindo os valores utilizados para o cálculo de $\bar{N}_b$;

N_{SPT} : número de golpes necessários para cravar os 30 cm finais do amostrador padrão no ensaio SPT;

U: Perímetro da seção transversal;

$Q_{b,u}$: capacidade de carga da ponta da estaca;

$q_{b,u}$: tensão de ruptura na base da estaca;

q_{cone} : resistência da ponta medida no ensaio de cone;

$Q_{s,u}$: capacidade de carga por atrito lateral da estaca.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Anexo A da norma 6484 (2001), tabela dos estados de compactidade e de consistência.	24
Tabela 2.2 – Parâmetros relativos ao tipo de solo para o método de Aoki & Velloso segundo Laprovitera (1988).	34
Tabela 2.3 – Parâmetros relativos ao tipo de solo para o método de Decourt & Quaresma,	34
Tabela 2.4 – Parâmetros F1 e F2 para o método de Aoki & Velloso segundo Laprovitera (1988) e Benegas (1993).	34
Tabela 2.5 – Parâmetros α e β para o método de Decourt & Quaresma segundo Decourt et al. (1999).	35
Tabela 3.1 – Perfis de aço W Gerdau (Gerdau, 2007).	48
Tabela 4.1 – Arredondamento da cota da boca do furo.	55
Tabela 4.2 – Atributos qualitativos e quantitativos da sondagem 137 ao longo da profundidade.	56
Tabela 4.3 – Cálculo dos parâmetros de capacidade de carga na sondagem 137.	58
Tabela 5.1 – Parâmetros estatísticos do NA 72	72
Tabela 5.2 – Parâmetros estatísticos do topo das camadas.	90
Tabela 5.3 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} na cota -6m.	98
Tabela 5.4 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} na cota -8m 102	102
Tabela 5.5 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} na cota -14m 106	106
Tabela 5.6 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} a cota -22m.	109
Tabela 5.7 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} a cota -24m.	113
Tabela 5.8 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} na cota -41m.	117
Tabela 5.9 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} na cota -33 m.	118
Tabela 5.10 – Comparação sondagem real com valores de N_{SP1} por interpolação.	122
Tabela 5.11 – Parâmetros estatísticos – Capacidade de carga à compressão.	126
Tabela 5.12 – Parâmetros estatísticos – Capacidade de carga à tração 132	132
Tabela B.1 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} a cada metro, parte 1.	256
Tabela B.2 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} a cada metro, parte 2.	257

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema do equipamento utilizado na realização do ensaio SPT (SCHNAID, 2000).....	23
Figura 2.2 – Retirada de material do amostrador para descrição tátil-visual. (fonte: acervo do Laboratório da Escola de Engenharia da FURG).	23
Figura 2.3- Boletim de sondagem SPT.	25
Figura 2.4- Mapa do bairro de Solih em Londres, mostrando as incidências dos casos de cólera segundo John Snow (Rogers, 2013).	26
Figura 2.5 - Atribuição dos pesos do IDW (ESRL, 2012).	29
Figura 2.6 – Representação do método de interpolação IDW (UIFUS, 2014).	30
Figura 2.7 – Valores de N_{SPT} interpolados pelo método IDW.	30
Figura 2.8 – Representação da interpolação pelo método de Krigagem: pode exceder o valor dos pontos de origem, mas não passará através dos pontos (UFES, 2014).	31
Figura 2.9 - Valores de N_{SPT} interpolados pelo método Krigagem.	32
Figura 2.10 –As cores representam diferentes tipos de solo em cada camada (Aguib, 2005). 36	
Figura 2.11 – Mapas probabilísticos de lençol freático, N_{SPT} , fração silte e integração dos três mapas mostrando melhores e piores áreas para construção da fundação padrão (adaptado de Mendes & Lorandi, 2006).	38
Figura 2.12 – Exemplo da distribuição das sondagens SPI na obra em estudo em 2007 (Schuler, 2007).	40
Figura 2.13 – Modelo tridimensional da estratigrafia da área de estudo (Ribeiro, 2010).....	41
Figura 2.14 – Interpolação por krigagem do N_{SPT} a 10m de profundidade (Soares, 2012) ...	43
Figura 2.15 – Tipo de solo a 5 metros de profundidade em Seri Iskandar, Perak, Malásia (Wan-Mohamad & Abdul-Ghani, 2011).	44
Figura 3.1 – Área do estudo.	45
Figura 3.2 – Escavação do dique seco em 2007.	46
Figura 3.3 - Composição dos 4 tipos de estaca utilizados.	47
Figura 3.4 - Legenda das dimensões das estacas (Gordreu, 2007).	48
Figura 3.5 – Perfil estratigráfico para a região do Superporto de Rio Grande (Dias, 1993). ...	49
Figura 3.6 – Perfil representativo do subsolo da área de estudo com valores médios de N_{SPT} (Dias et al., 2008).	50
Figura 3.7 – Perfil estratigráfico atualizado da região do Superporto de Rio Grande, do ginásio CTI-FURG até Molhes da Barra (Dias, 2010).	51

Figura 3.8 – Figura CPTu 18 com a nova subdivisão das camadas (Bastos, 2014).....	52
Figura 4.1- Mapa das sondagens organizado pela empresa executora do empreendimento....	54
Figura 4.2 - Locação dos furos de sondagem.....	60
Figura 4.3 - Interface do ArcGIS: seleção por atributo.....	61
Figura 4.4 - Interface do ArcGIS: apenas atributos selecionados.....	62
Figura 4.5 - Interpolação de N_{SP}	63
Figura 4.6 – Geração do mapa temático do N_{SP} para cota -15 m pelo método IDW.....	63
Figura 4.7 – Identificação do topo das camadas.....	64
Figura 4.8 – Distribuição das camadas representadas tridimensionalmente no ArcSCENE. ..	65
Figura 4.9 - Estatística: N_{SP} - médio da cota	66
Figura 4.10 - Interpolação da capacidade de carga.....	67
Figura 4.11 – Exemplo de seleção de mais de um atributo.....	68
Figura 4.12 - Montagem de feição completa.....	69
Figura 5.1 – Ocorrência de conchas e gás natural.....	71
Figura 5.2 - Nível da água pelo método IDW.....	73
Figura 5.3 - Nível da água pelo método Krigagem.....	74
Figura 5.4 - Cota do topo da camada A pelo método IDW.....	76
Figura 5.5 - Cota do topo da camada B pelo método IDW.....	77
Figura 5.6 – Cota do topo da camada C pelo método IDW.....	78
Figura 5.7 – Cota do topo da camada D pelo método IDW.....	79
Figura 5.8 – Cota do topo da camada E pelo método IDW.....	80
Figura 5.9 – Cota do topo da camada F pelo método IDW.....	81
Figura 5.10 – Cota do topo da camada G pelo método IDW.....	82
Figura 5.11 – Cota do topo da camada A pelo método Krigagem.....	83
Figura 5.12 – Cota do topo da camada B pelo método Krigagem.....	84
Figura 5.13 – Cota do topo da camada C pelo método Krigagem.....	85
Figura 5.14 – Cota do topo da camada D pelo método Krigagem.....	86
Figura 5.15 – Cota do topo da camada E pelo método Krigagem.....	87
Figura 5.16 – Cota do topo da camada F pelo método Krigagem.....	88
Figura 5.17 – Cota do topo da camada G pelo método Krigagem.....	89
Figura 5.18 - Cortes transversal e longitudinal.....	91
Figura 5.19 - Identificação das camadas interpoladas por IDW no corte longitudinal.....	91
Figura 5.20 - Identificação das camadas interpoladas por IDW no corte transversal.....	92
Figura 5.21 Identificação das camadas interpoladas por Krigagem no corte longitudinal.....	92

Figura 5.22- Identificação das camadas interpoladas por Krigagem no corte transversal.....	93
Figura 5.23 – Sobreposição das camadas do subsolo gerada através do método IDW.....	94
Figura 5.24 - Sobreposição das camadas do subsolo gerada através do método Krigagem.....	94
Figura 5.25 – Distribuição do N_{SPT} na cota -6m pelo método IDW.....	96
Figura 5.26– Distribuição do N_{SPT} na cota -6m pelo método Krigagem.....	97
Figura 5.27 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -6 m.....	98
Figura 5.28 – Distribuição do N_{SPT} na cota -8m pelo método IDW.....	100
Figura 5.29 – Distribuição do N_{SPT} na cota -8m pelo método Krigagem.....	101
Figura 5.30 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -8 m.....	102
Figura 5.31– Distribuição do N_{SPT} na cota -14m pelo método IDW.....	104
Figura 5.32– Distribuição do N_{SPT} na cota -14m pelo método Krigagem.....	105
Figura 5.33 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -14 m.....	106
Figura 5.34– Distribuição do N_{SPT} na cota -22m pelo método IDW.....	107
Figura 5.35– Distribuição do N_{SPT} na cota -22 m pelo método Krigagem.....	108
Figura 5.36 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -22 m.....	109
Figura 5.37– Distribuição do N_{SPT} na cota -24 m pelo método IDW.....	111
Figura 5.38– Distribuição do N_{SPT} na cota -24 m pelo método Krigagem.....	112
Figura 5.39 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -24 m.....	113
Figura 5.40– Distribuição do N_{SPT} na cota -41 m pelo método IDW.....	115
Figura 5.41– Distribuição do N_{SPT} na cota -41 m pelo método Krigagem.....	116
Figura 5.42 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -41 m.....	117
Figura 5.43 – Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -33 m.....	118
Figura 5.44 - Distribuição do N_{SPT} na cota -33 m pelo método IDW.....	119
Figura 5.45 - Distribuição do N_{SPT} na cota -33 m pelo método Krigagem.....	120
Figura 5.46 – Sondagem em verde excluída da análise.....	121
Figura 5.47 – Gráfico do N_{SPT} x Cota com base nos novos dados de sondagem.....	124
Figura 5.48 - N_{SPT} médio x Cota antes e depois da escavação.....	125
Figura 5.49 – Histograma de distribuição da capacidade de carga à compressão pelo método de Aoki & Velloso.....	126
Figura 5.50 - Histograma de distribuição da capacidade de carga à compressão pelo método de Decourt & Quaresma.....	127
Figura 5.51 – Capacidade de carga (compressão) por Aoki & Velloso interpolada pelo método IDW.....	128

Figura 5.52 – Capacidade de carga (compressão) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método IDW.....	129
Figura 5.53 – Capacidade de carga (compressão) por Aoki & Velloso interpolada pelo método Krigagem.....	130
Figura 5.54 – Capacidade de carga (compressão) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método Krigagem.....	131
Figura 5.55 - Histograma de distribuição da capacidade de carga à tração pelo método de Aoki & Velloso.....	132
Figura 5.56 - Histograma de distribuição da capacidade de carga à tração pelo método de Decourt & Quaresma.....	133
Figura 5.57 - Capacidade de carga (tração) por Aoki & Velloso interpolada pelo método IDW.	134
Figura 5.58 - Capacidade de carga (tração) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método IDW.....	135
Figura 5.59 - Capacidade de carga (tração) por Aoki & Velloso interpolada pelo método Krigagem.....	136
Figura 5.60 - Capacidade de carga (tração) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método Krigagem.....	137
Figura A.0.1 - Distribuição do N_{SP} na cota -4 m pelo método IDW.....	147
Figura A.0.2 - Distribuição do N_{SP} na cota -3 m pelo método IDW.....	148
Figura A.0.3 - Distribuição do N_{SP} na cota -2 m pelo método IDW.....	149
Figura A.0.4 - Distribuição do N_{SP} na cota -1 m pelo método IDW.....	150
Figura A.0.5 - Distribuição do N_{SP} na cota 0 m pelo método IDW.....	151
Figura A.0.6 - Distribuição do N_{SP} na cota -1 m pelo método IDW.....	152
Figura A.0.7 - Distribuição do N_{SP} na cota -2 m pelo método IDW.....	153
Figura A.0.8 - Distribuição do N_{SP} na cota -3 m pelo método IDW.....	154
Figura A.0.9 - Distribuição do N_{SP} na cota -4 m pelo método IDW.....	155
Figura A.0.10 - Distribuição do N_{SP} na cota -5 m pelo método IDW.....	156
Figura A.0.11 - Distribuição do N_{SP} na cota -6 m pelo método IDW.....	157
Figura A.0.12 - Distribuição do N_{SP} na cota -7 m pelo método IDW.....	158
Figura A.0.13 - Distribuição do N_{SP} na cota -8 m pelo método IDW.....	159
Figura A.0.14 - Distribuição do N_{SP} na cota -9 m pelo método IDW.....	160
Figura A.0.15 - Distribuição do N_{SP} na cota -10 m pelo método IDW.....	161

Figura A.0.16 - Distribuição do N_{SP}	na cota -11 m pelo método IDW.....	162
Figura A.0.17 - Distribuição do N_{SP}	na cota -12 m pelo método IDW.....	163
Figura A.0.18 - Distribuição do N_{SP}	na cota -13 m pelo método IDW.....	164
Figura A.0.19 - Distribuição do N_{SP}	na cota -14 m pelo método IDW.....	165
Figura A.0.20 - Distribuição do N_{SP}	na cota -15 m pelo método IDW.....	166
Figura A.0.21 - Distribuição do N_{SP}	na cota -16 m pelo método IDW.....	167
Figura A.0.22 - Distribuição do N_{SP}	na cota -17 m pelo método IDW.....	168
Figura A.0.23 - Distribuição do N_{SP}	na cota -18 m pelo método IDW.....	169
Figura A.0.24 - Distribuição do N_{SP}	na cota -19 m pelo método IDW.....	170
Figura A.0.25 - Distribuição do N_{SP}	na cota -20 m pelo método IDW.....	171
Figura A.0.26 - Distribuição do N_{SP}	na cota -21 m pelo método IDW.....	172
Figura A.0.27 - Distribuição do N_{SP}	na cota -22 m pelo método IDW.....	173
Figura A.0.28 - Distribuição do N_{SP}	na cota -23 m pelo método IDW.....	174
Figura A.0.29 - Distribuição do N_{SP}	na cota -25 m pelo método IDW.....	175
Figura A.0.30 - Distribuição do N_{SP}	na cota -26 m pelo método IDW.....	176
Figura A.0.31 - Distribuição do N_{SP}	na cota -27 m pelo método IDW.....	177
Figura A.0.32 - Distribuição do N_{SP}	na cota -28 m pelo método IDW.....	178
Figura A.0.33 - Distribuição do N_{SP}	na cota -29 m pelo método IDW.....	179
Figura A.0.34 - Distribuição do N_{SP}	na cota -30 m pelo método IDW.....	180
Figura A.0.35 - Distribuição do N_{SP}	na cota -31 m pelo método IDW.....	181
Figura A.0.36 - Distribuição do N_{SP}	na cota -32 m pelo método IDW.....	182
Figura A.0.37 - Distribuição do N_{SP}	na cota -33 m pelo método IDW.....	183
Figura A.0.38 - Distribuição do N_{SP}	na cota -34 m pelo método IDW.....	184
Figura A.0.39 - Distribuição do N_{SP}	na cota -35 m pelo método IDW.....	185
Figura A.0.40 - Distribuição do N_{SP}	na cota -36 m pelo método IDW.....	186
Figura A.0.41 - Distribuição do N_{SP}	na cota -37 m pelo método IDW.....	187
Figura A.0.42 - Distribuição do N_{SP}	na cota -38 m pelo método IDW.....	188
Figura A.0.43 - Distribuição do N_{SP}	na cota -39 m pelo método IDW.....	189
Figura A.0.44 - Distribuição do N_{SP}	na cota -40 m pelo método IDW.....	190
Figura A.0.45 - Distribuição do N_{SP}	na cota -41 m pelo método IDW.....	191
Figura A.0.46 - Distribuição do N_{SP}	na cota -42 m pelo método IDW.....	192
Figura A.0.47 - Distribuição do N_{SP}	na cota -43 m pelo método IDW.....	193
Figura A.0.48 - Distribuição do N_{SP}	na cota -44 m pelo método IDW.....	194

Figura A.0.49 - Distribuição do N_{SP} na cota -45 m pelo método IDW.....	195
Figura A.0.50 - Distribuição do N_{SP} na cota -46 m pelo método IDW.....	196
Figura A.0.51 - Distribuição do N_{SP} na cota -47 m pelo método IDW.....	197
Figura A.0.52 - Distribuição do N_{SP} na cota -48 m pelo método IDW.....	198
Figura A.0.53 - Distribuição do N_{SP} na cota -49 m pelo método IDW.....	199
Figura A.0.54 - Distribuição do N_{SP} na cota -50 m pelo método IDW.....	200
Figura A.0.55 - Distribuição do N_{SP} na cota +4 m pelo método Krigagem.....	201
Figura A.0.56 - Distribuição do N_{SP} na cota +3 m pelo método Krigagem.....	202
Figura A.0.57 - Distribuição do N_{SP} na cota +2 m pelo método Krigagem.....	203
Figura A.0.58 - Distribuição do N_{SP} na cota +1 m pelo método Krigagem.....	204
Figura A.0.59 - Distribuição do N_{SP} na cota 0 m pelo método Krigagem.....	205
Figura A.0.60 - Distribuição do N_{SP} na cota -1 m pelo método Krigagem.....	206
Figura A.0.61 - Distribuição do N_{SP} na cota -2 m pelo método Krigagem.....	207
Figura A.0.62 - Distribuição do N_{SP} na cota -3 m pelo método Krigagem.....	208
Figura A.0.63 - Distribuição do N_{SP} na cota -4 m pelo método Krigagem.....	209
Figura A.0.64 - Distribuição do N_{SP} na cota -5 m pelo método Krigagem.....	210
Figura A.0.65 - Distribuição do N_{SP} na cota -6 m pelo método Krigagem.....	211
Figura A.0.66 - Distribuição do N_{SP} na cota -7 m pelo método Krigagem.....	212
Figura A.0.67 - Distribuição do N_{SP} na cota -8 m pelo método Krigagem.....	213
Figura A.0.68 - Distribuição do N_{SP} na cota -9 m pelo método Krigagem.....	214
Figura A.0.69 - Distribuição do N_{SP} na cota -10 m pelo método Krigagem.....	215
Figura A.0.70 - Distribuição do N_{SP} na cota -11 m pelo método Krigagem.....	216
Figura A.0.71 - Distribuição do N_{SP} na cota -12 m pelo método Krigagem.....	217
Figura A.0.72 - Distribuição do N_{SP} na cota -13 m pelo método Krigagem.....	218
Figura A.0.73 - Distribuição do N_{SP} na cota -14 m pelo método Krigagem.....	219
Figura A.0.74 - Distribuição do N_{SP} na cota -15 m pelo método Krigagem.....	220
Figura A.0.75 - Distribuição do N_{SP} na cota -16 m pelo método Krigagem.....	221
Figura A.0.76 - Distribuição do N_{SP} na cota -17 m pelo método Krigagem.....	222
Figura A.0.77 - Distribuição do N_{SP} na cota -18 m pelo método Krigagem.....	223
Figura A.0.78 - Distribuição do N_{SP} na cota -19 m pelo método Krigagem.....	224
Figura A.0.79 - Distribuição do N_{SP} na cota -20 m pelo método Krigagem.....	225
Figura A.0.80 - Distribuição do N_{SP} na cota -21 m pelo método Krigagem.....	226
Figura A.0.81 - Distribuição do N_{SP} na cota -22 m pelo método Krigagem.....	227

Figura A.0.82 - Distribuição do N_{SP-} na cota -23 m pelo método Krigagem.....	228
Figura A.0.83 - Distribuição do N_{SP-} na cota -24 m pelo método Krigagem.....	229
Figura A.0.84 - Distribuição do N_{SP-} na cota -25 m pelo método Krigagem.....	230
Figura A.0.85 - Distribuição do N_{SP-} na cota -26 m pelo método Krigagem.....	231
Figura A.0.86 - Distribuição do N_{SP-} na cota -27 m pelo método Krigagem.....	232
Figura A.0.87 - Distribuição do N_{SP-} na cota -28 m pelo método Krigagem.....	233
Figura A.0.88 - Distribuição do N_{SP-} na cota -29 m pelo método Krigagem.....	234
Figura A.0.89 - Distribuição do N_{SP-} na cota -30 m pelo método Krigagem.....	235
Figura A.0.90 - Distribuição do N_{SP-} na cota -31 m pelo método Krigagem.....	236
Figura A.0.91 - Distribuição do N_{SP-} na cota -32 m pelo método Krigagem.....	237
Figura A.0.92 - Distribuição do N_{SP-} na cota -33 m pelo método Krigagem.....	238
Figura A.0.93 - Distribuição do N_{SP-} na cota -34 m pelo método Krigagem.....	239
Figura A.0.94 - Distribuição do N_{SP-} na cota -35 m pelo método Krigagem.....	240
Figura A.0.95 - Distribuição do N_{SP-} na cota -36 m pelo método Krigagem.....	241
Figura A.0.96 - Distribuição do N_{SP-} na cota -37 m pelo método Krigagem.....	242
Figura A.0.97 - Distribuição do N_{SP-} na cota -38 m pelo método Krigagem.....	243
Figura A.0.98 - Distribuição do N_{SP-} na cota -39 m pelo método Krigagem.....	244
Figura A.0.99 - Distribuição do N_{SP-} na cota -40 m pelo método Krigagem.....	245
Figura A.0.100 - Distribuição do N_{SP-} na cota -41 m pelo método Krigagem.....	246
Figura A.0.101 - Distribuição do N_{SP-} na cota -42 m pelo método Krigagem.....	247
Figura A.0.102 - Distribuição do N_{SP-} na cota -43 m pelo método Krigagem.....	248
Figura A.0.103 - Distribuição do N_{SP-} na cota -44 m pelo método Krigagem.....	249
Figura A.0.104 - Distribuição do N_{SP-} na cota -45 m pelo método Krigagem.....	250
Figura A.0.105 - Distribuição do N_{SP-} na cota -46 m pelo método Krigagem.....	251
Figura A.0.106 - Distribuição do N_{SP-} na cota -47 m pelo método Krigagem.....	252
Figura A.0.107 - Distribuição do N_{SP-} na cota -48 m pelo método Krigagem.....	253
Figura A.0.108 - Distribuição do N_{SP-} na cota -49 m pelo método Krigagem.....	254
Figura A.0.109 - Distribuição do N_{SP-} na cota -50 m pelo método Krigagem.....	255

1. INTRODUÇÃO

A ciência que relaciona fenômenos e dados geotécnicos com a sua localização espacial é conhecida como cartografia geotécnica. Ao longo dos anos, estudos da constituição do subsolo da região do Superporto do Rio Grande foram realizados de forma pontual e, num período relativamente recente, começaram a ser organizados e relacionados através de ferramentas de geoprocessamento.

A atribuição de localização espacial referenciada recebe o nome de georreferenciamento, e tem como objetivo principal relacionar a localização do elemento de estudo a coordenadas conhecidas, a fim de possibilitar a correlação com outros fenômenos e estudos, gerando assim um banco de dados geotécnico crescente e interativo.

As possibilidades do georreferenciamento ainda não desenvolveram todo o seu potencial dentro da área da engenharia no que diz respeito à aplicação em campo da cartografia geotécnica. Além da espacialização, a correlação entre dados e possibilidade do desenvolvimento de modelos baseados nas informações localizadas espacialmente aumenta ainda mais as possibilidades de aplicação dos estudos na construção costeira.

Quando se pensa em geoprocessamento de dados, a função mais básica do Sensoriamento Remoto e do Sistema de Informações Georreferenciadas (SIG) é catalogar e armazenar dados da região a fim de criar a base para o desenvolvimento de estudos de correlação, mudança, preservação e viabilidade dos mais diversos empreendimentos, ou seja, os SIG permitem aos usuários não só catalogar e monitorar dados de sondagens, mas também explorar possíveis relações espaciais entre os dados coletados.

A melhoria de um SIG é progressiva e constante, e cresce conforme são feitos e acrescentados mais estudos e análises do ambiente. Dados geotécnicos como os de sondagens já apresentam naturalmente alta variabilidade entre si mesmo quando obtidos muito próximos uns dos outros. Quanto mais informações puderem ser espacializadas, mais ricos e completos serão os produtos de interação entre as informações, e mais preciso se tornará qualquer modelo de correlação.

1.1 OBJETIVO GERAL

A aplicação das tecnologias de geoprocessamento em estudos de geotecnia vem crescendo na região de Rio Grande ao longo dos últimos anos, muito devido à grande quantidade de dados que os empreendimentos do Polo Naval proporcionam, outro tanto devido ao grande avanço do poder de processamento dos computadores nas últimas décadas e acesso a softwares especializados, como ArcGIS, Idrisi, QGIS, RockWorks e tantos outros.

Este estudo tem como objetivo realizar a compilação de dados geotécnicos, organizá-los espacialmente e estudar sua relação a fim de criar um banco de dados com informações suficientes para analisar a constituição do subsolo na área do Estaleiro Rio Grande, localizado no Superporto de Rio Grande RS, através das ferramentas de SIG e de sondagens do tipo *Standard Penetration Test* (SPT) e a partir daí gerar gráficos de distribuição espacial do N_{SPT} e das camadas de solo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Realizar um levantamento das sondagens do tipo SPT realizadas na área do Estaleiro Rio Grande;
- ii. Relacionar as informações das sondagens com uma proposta de classificação do subsolo da região;
- iii. Estimar a capacidade de carga das estacas da laje de fundo do dique seco do estaleiro, através dos dados das sondagens;
- iv. Criar um SIG para armazenamento das informações obtidas;
- v. Gerar modelos de interpolação com base nos dados informados;
- vi. Mostrar graficamente a organização do subsolo com base nas sondagens e modelos interpolados.
- vii. Mostrar graficamente a distribuição da capacidade de carga do terreno nas cotas previstas de assentamento das estacas metálicas da obra em apreço.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente estudo está dividido em seis capítulos conforme se segue:

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica abrangendo uma breve explicação da técnica de prospecção do subsolo que serve de base para a geração do SIG, a sondagem do tipo SPT, e também um esclarecimento dos parâmetros e técnicas geoestatísticas utilizadas na geração dos modelos. Neste capítulo são abordados também os critérios para a estimativa de capacidade de carga das estacas utilizadas como fundação da laje de fundo do dique seco e também seis estudos de caso mostrando a aplicação das técnicas de geoprocessamento na cartografia geotécnica.

O Capítulo 3 apresenta a área de estudo e seu subsolo através da demonstração dos resultados de estudos geotécnicos anteriores.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada nesse trabalho para o tratamento de dados geotécnicos, inserção no ambiente SIG e geração de modelos e produtos.

O Capítulo 5 apresenta os mapas temáticos, gráficos, tabelas e modelos gerados através das análises no ambiente SIG.

O Capítulo 6 discute as principais conclusões do estudo, finalizando o trabalho.

O Capítulo 7 apresenta sugestões para trabalhos posteriores.

O Capítulo 8 traz as referências bibliográficas citadas no estudo.

O Apêndice A mostra todos os mapas temáticos gerados por interpolação dos valores de N_{SPT} a cada metro de profundidade, da cota +4 m até a cota -50 m. As Figuras A.1 até A.54 apresentam os mapas interpolados pelo método IDW. As Figuras A.55 até A.106 apresentam os mapas interpolados pelo método Krigagem.

O Apêndice B mostra duas tabelas contendo os parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SPT} a cada metro de profundidade. A Tabela B.1 mostra os valores máximo, mínimo, médio, desvio padrão e coeficiente de variação da cota +4 m até a -29 m. A Tabela B.2 mostra os mesmos dados da cota -30 m até -51 m.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 STANDARD PENETRATION TEST – SPT

São conhecidos como sondagens os procedimentos geotécnicos de campo utilizados para a investigação do subsolo, através do recolhimento de amostragem do material ou outras correlações. Neste estudo, as características do subsolo são determinadas através da sondagem de simples reconhecimento com realização do ensaio de penetração padrão, ou *Standard Penetration Test – SPT*, que é um procedimento que relaciona a resistência do solo à energia aplicada necessária para cravação de um cilindro amostrador padrão (também conhecido como hamlete) e observação do material recolhido durante o ensaio e avanço do furo.

O ensaio do tipo SPT é o ensaio de prospecção geotécnica do subsolo mais amplamente utilizado em todo mundo. A citação mais antiga ao termo que se tem notícia remonta a um artigo de 1947 assinado por Terzaghi, e mais ou menos na mesma época passou a aparecer pelo Brasil.

Segundo a norma técnica NBR 6484 (2001), a finalidade da sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT para as aplicações na Engenharia Civil são:

- A determinação dos tipos de solo em suas respectivas profundidades de ocorrências;
- A posição do nível da água;
- Os índices de penetração a cada metro.

Para tanto, o procedimento normatizado consiste na perfuração e cravação dinâmica do amostrador padrão de aproximadamente 50 mm de diâmetro externo, 35 mm de diâmetro interno e 45 cm de comprimento útil, através de golpes de um martelo de massa padronizada em 65 kg, lançado por um sistema de tripé, cabo e roldana, em queda livre sobre um conjunto de hastes a uma altura de 75 cm (Figura 2.1). O amostrador é cravado em três avanços de 15 cm, cujo número de golpes é anorado. A energia do impacto do martelo sobre o amostrador necessária para cravá-lo irá resultar no índice de resistência N_{SPT} , que consiste na soma dos golpes necessários para a cravação dos últimos 30 cm úteis do amostrador.

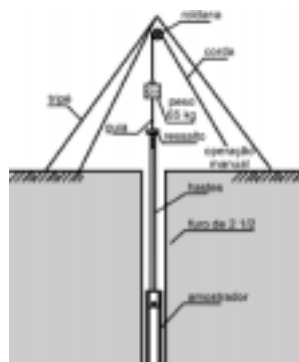


Figura 2.1 - Esquema do equipamento utilizado na realização do ensaio SPT (SCHNAID, 2000).

A cravação do amostrador padrão é interrompida sempre que um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação, em qualquer um dos três segmentos de 15m o número de 30 golpes seja ultrapassado ou não se observar avanço do amostrador durante a aplicação de cinco golpes sucessivos.

A construção vazada do amostrador permite que durante a cravação, seja recolhido dentro de seu corpo oco, o material que compõe o solo analisado. As amostras assim obtidas (Figura 2.2) são avaliadas *in situ* através de análise tátil-visual e armazenadas para permitir futuras análises feitas em laboratório.



Figura 2.2 – Retirada de material do amostrador para descrição tátil-visual. (fonte: acervo do Laboratório da Escola de Engenharia da FURCI).

De acordo com a norma NBR 6484 (2001), deve-se observar nas amostras a granulometria (solos grossos ou solos finos), plasticidade, cor e ainda se são originados de solos residuais, transportados, como fluviais e marinhos, ou aterros.

A relação entre o índice de resistência N_{60PT} e identificação do tipo de solo através da análise tátil-visual permite estimar o estado de compactação ou consistência do solo amostrado, conforme mostrado no Anexo A da norma (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Anexo A da norma 6484 (2001), tabela dos estados de compactação e de consistência.

Anexo A (Informativo)
Tabela dos estados de compactação e de consistência

Solo	Índice de resistência à penetração N	Designação ¹⁾
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(s)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Mediamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Médica(o)
	11 a 16	Rija(o)
	> 16	Dura (s)

¹⁾ As expressões empregadas para a classificação da compactação das areias (fofa, compacta, etc.), referem-se à deformabilidade e resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não devem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compactação relativa das areias ou para a situação perante o índice de valores críticos, definidos na Mecânica dos Solos.

A estrutura dos boletins de sondagem é bastante similar, porém existem algumas diferenças entre as empresas executoras no que se refere a critérios de classificação da amostra, posicionamento dos valores nas cotas e quantidade de informações. No presente estudo, a maior diferença percebida foi nos critérios utilizados para definir a cor do material, onde ao todo cinco empresas executoras do ensaio utilizaram 21 variações diferentes de cor.

Os boletins apresentam no cabeçalho informações referentes à obra, contratante, endereço da obra e ou contratante, escala norma de referência, selo do Imetro (quando possui), número de referência ao laudo para controle interno da empresa e ainda dados referentes especificamente ao ensaio em questão, como número da sondagem, cota da boca do furo e, as vezes, coordenadas geográficas do furo. Essa última informação só vem sendo adicionada aos boletins de sondagens em casos que ou a empresa possui um aparelho de GPS, ou conseguiu tomar as coordenadas em relação a um marco geodésico reconhecido. O caso mais comum é que a coordenada venha apresentada em um croqui onde a informação é

amarrada a um ponto de referência do terreno, que não é necessariamente uma coordenada geográfica.

O corpo do laudo mostra a cota (em relação a boca do furo) e a profundidade da perfuração, o material que compõe o perfil geotécnico da camada, a descrição do material extraído no amostrador, a consistência ou compactação, o número de golpes SPT para aquele intervalo e um gráfico mostrando a variação do N_{SPT} .

As informações referentes a coordenadas, monitoramento do lençol freático e limite da sondagem geralmente se encontram no rodapé, bem como a assinatura do responsável técnico e data de emissão do laudo. Na Figura 2.3 encontra-se um exemplo de boletim de sondagem da área analisada no presente estudo.

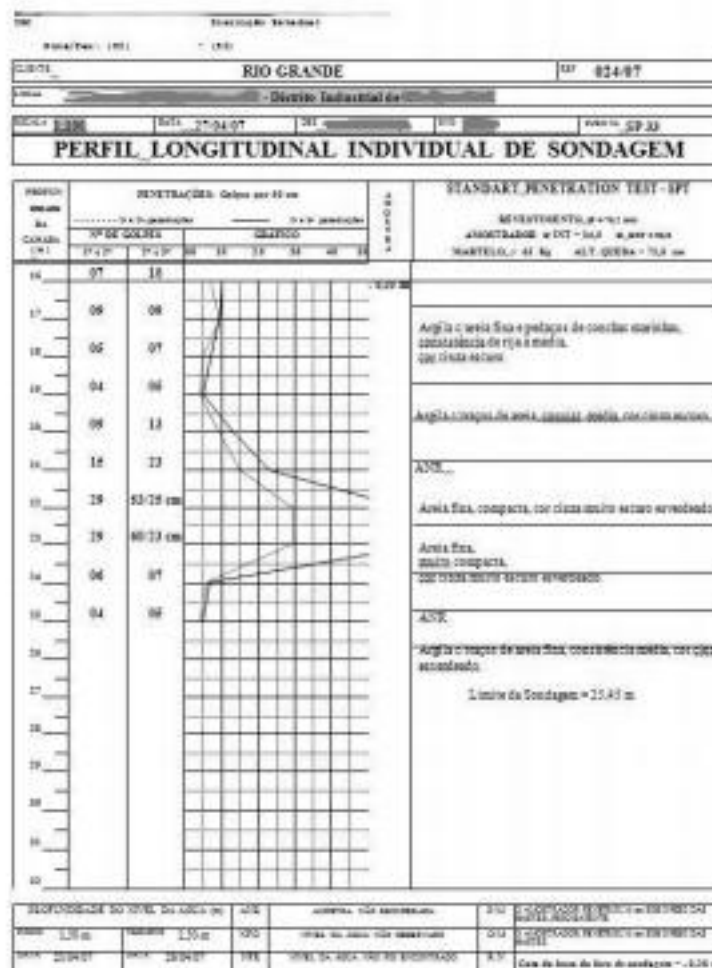


Figura 2.3- Boletim de sondagem SPT.

2.2 GEOPROCESSAMENTO E OS SIG

O termo geoprocessamento se refere à área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Entende-se por informação geográfica ou informação georreferenciada a informação que possui localização espacial. Para o estudo de dados espacialmente localizados (georreferenciados) é necessário a organização de um sistema de informações geográficas (SIG).

Demarqui (2009) define SIG como “sistemas constituídos por uma série de aplicativos e processos de análise, cuja característica principal é localizar o relacionamento de determinado fenômeno da realidade com sua localização espacial”. Estão incluídos no ambiente tecnológico chamado geoprocessamento, cuja área de atuação envolve a coleta e tratamento de informação espacial, assim como o desenvolvimento de novos sistemas e aplicações. Um software SIG permite o estudo, aquisição, manipulação de imagens armazenadas além da produção de novas imagens.

Um exemplo clássico do uso precursor de um SIG data de 1854, conforme é apresentado por uma matéria do jornal inglês *The Guardian* (Rogers, 2013), quando Londres passava por um surto de cólera. O médico John Snow passou a catalogar em um mapa os diversos casos de cólera que aconteceram na região e, através da análise das informações localizadas no espaço, foi capaz de triangular a localização de um poço específico, de onde provinha água contaminada causadora da doença (Figura 2.4).



Figura 2.4- Mapa do bairro de Soho em Londres, mostrando as incidências dos casos de cólera segundo John Snow (Rogers, 2013).

Através das tecnologias de geoprocessamento de *softwares* como o ArcGIS, é possível relacionar diferentes dados localizados espacialmente e gerar uma série de produtos, como mapas temáticos, análise espacial de fenômenos e a criação de bancos de dados com armazenamento de dados espaciais. Além de catalogar e monitorar dados de sondagem, é possível desenvolver estudos explorando as possíveis relações espaciais entre os dados armazenados, além de mudanças, correlações, previsões e análises de viabilidade.

A aplicação em campo da cartografia geotécnica para geração de modelos possibilita a geração de representações de diversas características do espaço estudado de maneira a destacar informações pertinentes ao estudo em questão, auxiliando uma tomada de decisões mais racional. Segundo Rogers & Luna (2004), ao longo das últimas quatro décadas os SIG surgiram como meio predominante para a representação gráfica de dados geoespaciais, incluindo informações geotécnicas, geológicas e hidroológicas rotineiramente usadas por engenheiros geotécnicos e geoambientais. Os SIGs permitem cruzar, pesar e classificar dados espaciais de formas ilimitadas com qualquer número de fatores físicos ou ambientais. Esses dados também podem ser combinados com valores estéticos e políticos ponderados para criar produtos gráficos híbridos capazes de influenciar a percepção pública e a tomada de decisão. A desvantagem de alguns produtos SIG é que a sua aparente eficácia e precisão podem ser ilusórias caso dados de pouca confiabilidade sejam adicionados à análise. Disparidades na idade e qualidade dos dados são comuns durante a compilação de dados geotécnicos e geoambientais. Apesar destas deficiências inerentes, os SIG vão continuar a crescer e evoluir como o principal meio técnico de comunicação no futuro próximo e os engenheiros serão forçados a preparar os produtos de seus trabalhos em formatos compatíveis com os SIG de forma que possam ser amplamente difundidos através da rede mundial de computadores.

2.3 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

A interpolação espacial é o processo de criação de um modelo de superfície dos fenômenos amostrados. Partindo da amostra de valores dos dados conhecidos e sua localização, são estimados os valores desconhecidos da superfície analisada. Os dados adicionados ao SIG estão incluídos no ponto a que se refere a sua coordenada geográfica. Tais dados passam a ocupar um pixel ou pequeno grupo de pixels, dependendo da resolução da

imagem. Para que seja possível relacionar tais dados, é preciso utilizar algum método de análise de interação de dados, conhecidos como métodos de interpolação.

Existem vários métodos de modo que a precisão e qualidade do método dependem dos tipos de dados que se deseja estudar, do tipo de resultado esperado, da quantidade de dados disponíveis e dos diversos parâmetros de calibração disponíveis para a geração do método.

O presente estudo apresenta não apenas uma análise dos resultados obtidos através da interpolação dos dados espacialmente localizados, mas também um comparativo entre dois dos mais populares métodos de interpolação utilizados: Krigagem e Inverso da distância ponderado (IDW). Segundo apresentado no material didático do Laboratório de Topografia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES, 2014), os métodos utilizados neste estudo têm em comum três parâmetros de interpolação:

- A autocorrelação espacial: Os métodos podem pesar a força da autocorrelação espacial de maneira diferente, mas ela é levada em consideração na geração do modelo.
- O tamanho da amostra se refere à quantidade de pontos mais próximos da célula de valor desconhecido que serão levados em consideração na estimativa do valor estimado a essa célula. A este parâmetro também está relacionada a velocidade de processamento. Quanto maior o tamanho da amostra, mais tempo e/ou poder de processamento será necessário para a realização da análise.
- O raio do tamanho da amostra se refere ao raio de pesquisa em relação à célula em que se encontram as amostras. Esse parâmetro serve para limitar a uma dada distância os pontos utilizados, evitando que pontos muito distantes passem a influenciar o resultado da interpolação.

2.3.1 Inverso da distância ponderado (IDW)

O método conhecido como IDW (*Inverse Distance Weighting – Inverso da distância ponderado*) é um método de interpolação determinístico, ou seja, que se baseia na área ao redor das células alvo. Este método admite que a influência de cada ponto da amostragem diminui em função da distância (ERSI, 2012). O IDW admite que os valores da amostra mais próximos da célula analisada têm mais influência no resultado do que os valores de amostras

mais afastadas. Como mostra a Figura 2.5, o IDW pesa os dados das amostras conforme a distância em que se encontram da célula alvo da análise, marcada no centro da cruz.

Os pesos são proporcionais ao inverso da distância entre o ponto de amostragem e o ponto a ser previsto, elevados à potência p . Isso faz com que conforme a distância aumenta, o peso decresça rapidamente. A taxa em que o peso decresce é função do valor de p , sendo o valor padrão de p igual a 2, daí o a justificativa para o método ser popularmente conhecido como inverso da distância ao quadrado.

O IDW é considerado um interpolador exato, pois os valores máximos e mínimos da superfície gerada na interpolação só irão ocorrer dentro dos dados das amostras de origem, ou seja, não serão estimados valores acima ou abaixo dos máximos e mínimos já existentes na resultante da interpolação. Isso faz com que os picos e vales resultantes só existam caso pertençam às amostras de origem.

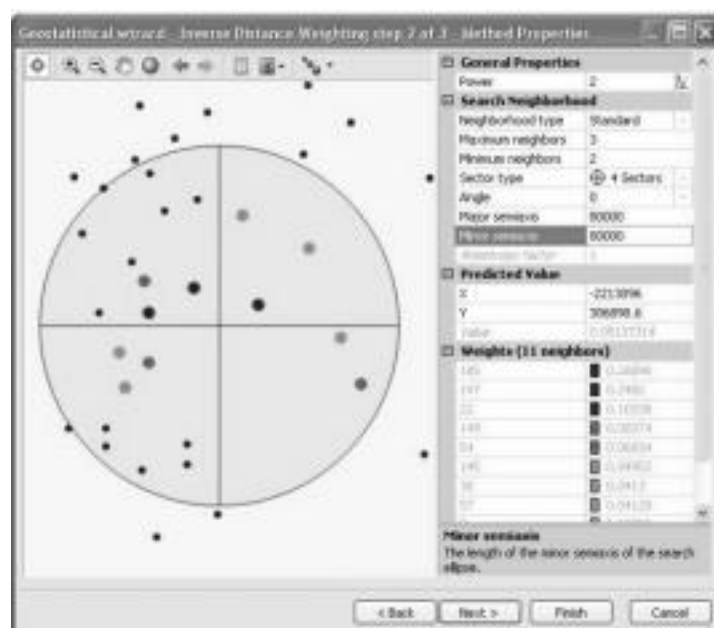


Figura 2.5 - Atribuição dos pesos do IDW (I:SR1, 2012).

O gráfico da Figura 2.6 mostra grosseiramente como o IDW distribui os valores da superfície interpolada em relação aos dados de origem. É possível perceber que o efeito do ponto de origem é mais forte de acordo com a proximidade, e também que nenhum dos valores cruza ou excede o valor desses dados (I:FEIS, 2014). As superfícies geradas mostram fortemente a influência de dados de origem desproporcionais, mas não suavizam essas discrepâncias.

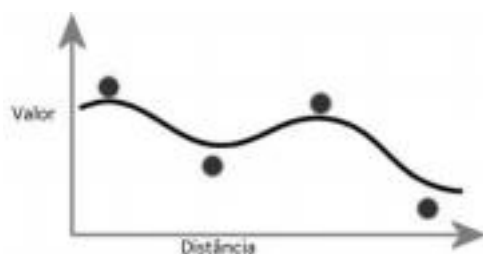


Figura 2.6 – Representação do método de interpolação IDW (UFES, 2014).

Como exemplo, na Figura 2.7 são mostrados os valores de N_{SPT} . Percebe-se no centro da imagem um valor de N_{SPT} de 9 cercado de valores bem maiores, como 78, 35 e 52. A mancha amarela que representa um valor de N_{SPT} mais baixo, próximo de 9, vai perdendo influência conforme a célula analisada vai se afastando, sempre proporcionalmente à distância entre um ponto de amostragem e o próximo.

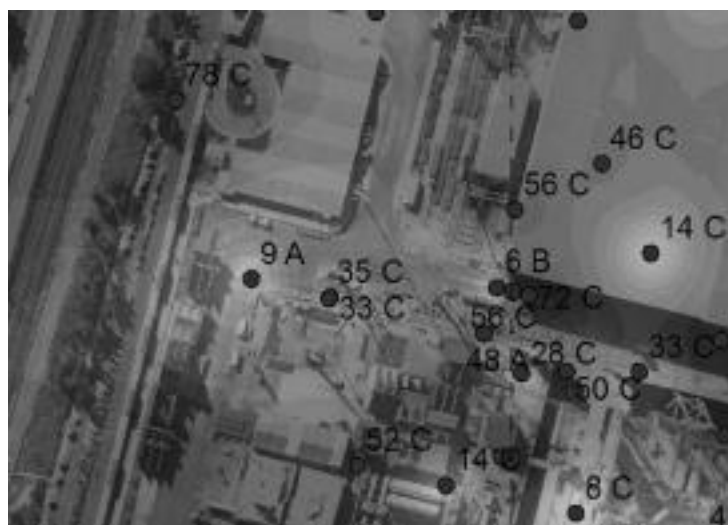


Figura 2.7 – Valores de N_{SPT} interpolados pelo método IDW.

O IDW é um excelente interpolador quando o fenômeno tem forte relação com a distância, mas fatores mais complexos podem ser ignorados. A possibilidade de controlar a potência (valor p) é uma excelente vantagem, já que permite controlar diretamente a influência da distância.

2.3.2 Krigagem

A Krigagem é um método de interpolação geostatístico, isto é, um método que se baseia na autocorrelação – a relação estatística entre os pontos de origem. Isto já define o método de Krigagem como sendo bastante avançado, já que usa de uma investigação interativa do comportamento espacial do fenômeno a ser interpolado. A Krigagem é um processo de várias etapas que mede a distância entre todos os pares de pontos e atribui, a partir daí, o peso que cada um desses pontos irá desempenhar na superfície interpolada. Não se baseia somente na distância entre os pontos, mas no arranjo geral de como esses pontos se organizam espacialmente (Figura 2.8).

Dois métodos de Krigagem amplamente utilizados são (UFES, 2014):

- Krigagem Ordinária: Considera que a tendência é uma constante desconhecida. A menos que não seja este o caso e se conheça tendências ou forçantes, esse normalmente é o caso mais utilizado.
- Krigagem Universal: Admite uma tendência conhecida nos dados, como alguma forçante ou fenômeno conhecido influenciar os resultados além da própria autocorrelação entre os pontos de amostragem.

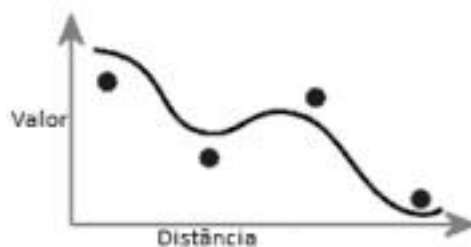


Figura 2.8 – Representação da interpolação pelo método de Krigagem: pode exceder o valor dos pontos de origem, mas não passará através dos pontos (UFES, 2014).

Os resultados interpolados por Krigagem podem exceder o valor dos pontos de origem e normalmente resulta numa superfície suavizada em relação ao método IDW. A Krigagem esférica, utilizada neste estudo, admite que a autocorrelação decresce progressivamente até certa distância e a partir daí será considerada zero.

Na Figura 2.9 é possível observar como a superfície resultante da interpolação por Krigagem é bem suavizada em relação ao IDW. O valor de N_{PT} igual a 9, cercado por

valores de N_{SPI} bem mais altos como 78, 35, 33 e 52, tem seu peso na geração da superfície interpolada diminuído em relação aos demais. A superfície resultante não passa no ponto, mas o excede, atribuindo um valor baseado na ocorrência muito mais frequente de valores superiores a 45 nos seus arredores. A Krigagem é um excelente interpolador quando a superfície interpolada pode apresentar erros e anomalias, já que minimiza o peso dos mesmos na superfície resultante.

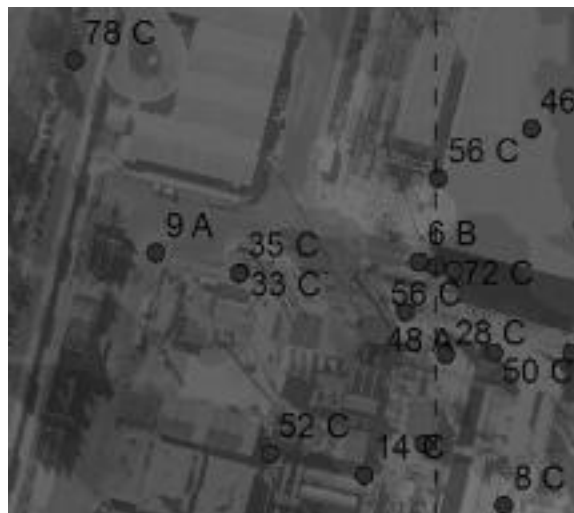


Figura 2.9 - Valores de N_{SPI} interpolados pelo método Krigagem.

2.4 CAPACIDADE DE CARGA DAS ESTACAS

Nas estimativas de capacidade de carga, realizadas no presente estudo, foram utilizados os métodos semi-empíricos para fundações profundas mais amplamente utilizados no Brasil: Aoki & Veloso (1975) (com contribuições posteriores de Laprovitera, 1988, e Benegas, 1993) e Decourt & Quaresma (1978) (também Decourt et al., 1999).

Ambos os métodos se baseiam em parâmetros extraídos dos boletins de sondagem e da constituição das estacas e coeficientes em função do tipo de solo, tipo de estaca e método de cravação da estaca. A seguir são descritas as variáveis que aparecem nas equações dos dois métodos.

$Q_{b,u}$: Representa a resistência da base ou ponta da estaca.

$Q_{s,u}$: Representa o atrito lateral da estaca com o solo, ou resistência do fuste.

A_b : área da base da estaca. Neste caso, foi adotado o retângulo envolvente da ponta do perfil.

$q_{b,u}$: tensão de ruptura na base da estaca.

$\bar{N}_b$: É a média entre o N_{SPT} correspondente à profundidade da ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior.

$\bar{N}_s$: É a média entre os valores de N_{SPT} ao longo do fuste, excluindo os valores utilizados para o cálculo de $\bar{N}_b$.

ΔL : Comprimento da estaca até a cota considerada.

L : comprimento enterrado da estaca

α , β e k : Coeficiente referente ao tipo de solo.

F1 e F2: Coeficientes de correlação entre estaca e amostrador do SPT e modo de execução da estaca.

A Equação 2.1 mostra resistência de ponta da estaca segundo o método de Aoki & Velloso:

$$Q_{b,u} = A_b \cdot q_{b,u} = A_b \cdot \frac{q_{cons}}{F1} = A_b \cdot \frac{k_{AV} \cdot \bar{N}_b}{F1} \quad (2.1)$$

A Equação 2.2 mostra a resistência de ponta da estaca segundo o método de Decourt & Quaresma:

$$Q_{b,u} = A_b \cdot q_{b,u} = A_b \cdot u_{DQ} \cdot k_{DQ} \cdot \bar{N}_b \quad (2.2)$$

A Equação 2.3 mostra o atrito lateral da estaca segundo o método de Aoki & Velloso.

$$Q_{s,u} = \sum U \cdot \Delta L \cdot \tau_{s,u} = \sum U \cdot \Delta L \cdot \frac{u_{cons}}{F2} = \sum U \cdot \Delta L \cdot \frac{u_{AV} \cdot u_{cons}}{F2} = \sum U \cdot \Delta L \cdot \frac{u_{AV} \cdot k_{AV} \cdot N_{SPT}}{F2} \quad (2.3)$$

A Equação 2.4 mostra o atrito lateral da estaca segundo o método de Decourt & Quaresma:

$$Q_{s,u} = \sum U \cdot \Delta L \cdot \tau_{s,u} = U \cdot L \cdot \beta_{DQ} \cdot 10 \cdot \left(\frac{\bar{N}_s}{3} + 1 \right) \quad (2.4)$$

Os parâmetros utilizados pelos métodos de estimativa da capacidade do solo se encontram nas Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, já adaptados para as classificações usadas nesse estudo.

Tabela 2.2 – Parâmetros relativos ao tipo de solo para o método de Aoki & Velloso segundo Laprovitera (1988).

Tipo de Solo	k (kN/m ²)	α (%)
Areia	600	1,4
Areia siltosa	530	1,9
Areia silto-argilosa	530	2,4
Areia argilo-siltosa	530	2,8
Areia argilosa	530	3,0
Silte arenoso	480	3,0
Silte areno-argiloso	380	3,0
Silte	480	3,0
Silte argilo-arenoso	380	3,0
Silte argiloso	300	3,4
Argila arenosa	480	4,0
Areia areno-siltosa	300	4,5
Argila silto-arenosa	300	5,0
Argila siltosa	250	5,5
Argila	250	6,0

Tabela 2.3 - Parâmetros relativos ao tipo de solo para o método de Decourt & Quaresma.

Tipo de Solo	k (kN/m ²)
Areia	400
Silte arenoso	250
Silte argiloso	200
Argila	120

Tabela 2.4 – Parâmetros F1 e F2 para o método de Aoki & Velloso segundo Laprovitera (1988) e Benegas (1993).

Tipo de estaca	F1	F2
Tranki	2,5	3,0
Metálica	2,4	3,4
Pré Moldada de concreto	2,0	3,5
Escavada	4,5	4,5

Tabela 2.5 – Parâmetros α e β para o método de Decourt & Quaresma segundo Decourt et al. (1999).

Estaca	Cravada		Escavada (em geral)		Escavada (com bentonita)		Hélice Contínua		Raiz		Injetadas (alta pressão)	
Tipo de Solo	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
Argilas	1,00	1,00	0,85	0,85	0,85	0,90	0,30	1,00	0,85	1,50	1,00	3,00
Solos Intermediários	1,00	1,00	0,60	0,60	0,60	0,75	0,30	1,00	0,60	1,50	1,00	3,00
Arcillas	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,60	0,30	1,00	0,50	1,50	1,00	3,00

A soma do parâmetro $Q_{b,u}$ na cota final, ou seja, cota onde repousa a sua ponta, e $Q_{s,u}$ acumulado ao longo do corpo da estaca resulta na capacidade de carga total da estaca aos esforços de compressão. A capacidade de carga à tração pode ser estimada em 80% do atrito lateral ($Q_{s,u}$) na compressão. No caso estudado, é importante a determinação da capacidade de carga à tração, pois a laje de fundo fica submetida à subpressão exercida pela água do subsolo, quando o dique está vazio.

2.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE SIG A BANCOS DE DADOS GEOTÉCNICOS

Baseado no que o geoprocessamento e uso do SIG podem proporcionar, citam-se a seguir seis exemplos de aplicações das ferramentas SIG na análise de dados geotécnicos.

2.5.1 Aguiñ (2005)

Com sua base de estudos na área de 202410 metros quadrados ocupada pelo Museu Nacional Central no distrito de Morabaa em Riad, capital da Arábia Saudita, Aguiñ (2005) usou o ArcGIS para construir um SIG de dados geotécnicos com base em 30 furos de sondagem, testados em sua capacidade de modelar espacialmente os tipos e profundidade das camadas do solo. O procedimento foi baseado no uso das extensões do ArcGIS como 3D, Geostatistical, Spatial Analyst e ArcScene para aplicação dos métodos de interpolação e representação de resultados.

Aguib (2005) argumenta que a investigação geotécnica é uma tarefa importante e necessária para todos os projetos de planeamento e construção civil. Estudos preliminares do subsolo muitas vezes contêm recomendações do tipo de fundação que pode ser usada nos projetos baseadas na extrapolação dos dados obtidos através de furos de sondagem. Normalmente esta extrapolação é baseada principalmente na experiência do engenheiro responsável pela análise dos boletins de sondagem, porém há sempre a questão de quantos furos de sondagem serão suficientes e até qual profundidade deverão ser executados.

Aguib desenvolveu um procedimento de sobreposição com objetivo de exibir as camadas do solo em 3D, resultando em um modelo de informação interativo para qualquer ponto ao longo de sua profundidade. O método de interpolação por Krigagem foi utilizado para prever a distribuição das camadas do solo por toda a área de estudo. A descrição qualitativa do solo foi transformada em dados quantitativos para que pudessem ser interpolados.

Os 30 furos de sondagem realizados variam a profundidade entre 10 e 20 metros. A classificação das camadas do solo (areia, pedregulho, argila, calcário e uma mistura de areia calcária e argila) foi codificada de 1 a 5. A tabela contendo os dados analisados conta com identificação do furo, código da camada, profundidade da camada, elevação da camada e descrição do furo de sondagem.

Aguib (2005) ordenou a estratigrafia do solo da área de estudo, da mais superficial à mais profunda, em 5 camadas e apontou nas tabelas que foram lançadas no ArcGIS qual o tipo de solo que ocorre em cada camada e em que profundidade ocorre. Foram aplicadas técnicas de interpolação nos valores de elevação do fundo de cada camada a fim de gerar mapas mostrando a distribuição espacial contínua e, posteriormente, foram organizadas no ArcScene para exibição do conjunto sobreposto de camadas (Figura 2.10).

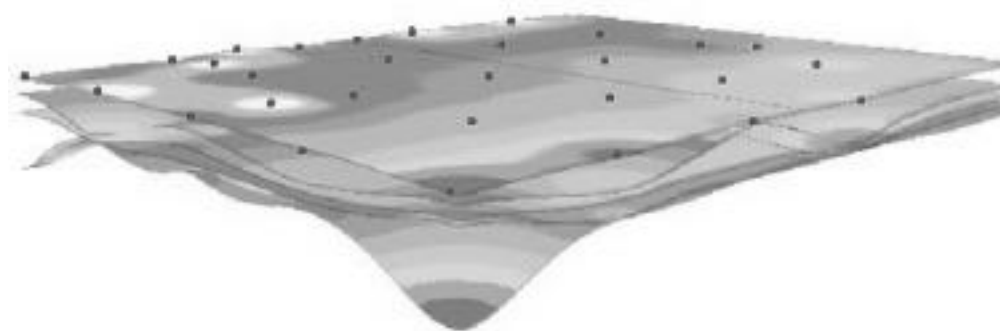


Figura 2.10 – As cores representam diferentes tipos de solo em cada camada (Aguib, 2005).

Aguib (2005) utilizou três métodos de interpolação em seus estudos: IDW, RTB (*Radial Bases Function*) e Krigagem, todos utilizando, para fins de comparação, os parâmetros padrão do ArcGIS. A fim de determinar o efeito do número de furos de sondagem na previsão dos valores de outros furos de sondagem conhecidos, foram usados subconjuntos contendo 40%, 50% e 60% do total de furos de sondagem e os 60%, 50% e 40% restantes de cada subconjunto foram utilizados para testar a precisão dos produtos gerados por cada um dos três métodos de interpolação, não encontrando diferenças significativas entre as profundidades previstas e medidas nos pontos do teste.

Aguib (2005) concluiu que o ArcGIS e suas extensões podem ser considerados como uma boa base para o desenvolvimento de um SIG para investigações geotécnicas da estratigrafia do subsolo e criação de modelos tridimensionais interativos. O controle da codificação dos tipos de solo e a distribuição espacial de dados podem apresentar resultados promissores.

2.5.2 Mendes & Lorandi (2006)

Neste estudo foi utilizado o *software* desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, para estimar a função de distribuição cumulativa de probabilidade de três variáveis: O M_{SPT} , o nível do lençol freático e o potencial para colapso do solo. O objetivo foi gerar mapas temáticos mostrando a probabilidade de ocorrência dessas variáveis.

Os autores apontam a necessidade de entender as incertezas associadas aos dados espacializados que ocorrem na modelagem matemática dentro de um ambiente SIG. Caso essas incertezas não sejam levadas em consideração, a interpretação das informações apresentadas no produto final (como mapas e cartas) pode ser afetada.

A base de dados foi obtida através de 241 furos de sondagem executados na zona urbana de São José do Rio Preto, SP, e resultados de ensaios de adensamento em amostras indeformadas de solo coletadas na região. Os dados das sondagens contendo coordenadas geográficas foram inseridos no ambiente SIG do SPRING 4.0.

Em seguida, foi escolhido um tipo de fundação padrão cujo conjunto de parâmetros fosse aceitável para a geração do mapa probabilístico. A fundação selecionada, do tipo

tubulão, é uma das mais utilizadas na área de estudo, com sua base a 8,5 metros de profundidade.

O terceiro passo foi identificar, através de parâmetros obtidos no ensaio de adensamento de amostras indeformadas e a correlação com o valor de N_{5PT} , o potencial para colapso do solo. Todos os pontos, na cota da fundação adotada (8,5m) que apresentavam N_{5PT} abaixo de 5, ausência de fração silte, grau de saturação abaixo de 60% e porosidade acima de 40% foram considerados potencialmente colapsíveis.

Os mapas indicativos das três variáveis foram integrados para produzir um mapa probabilístico da avaliação quantitativa de áreas mais favoráveis para execução de fundações profundas. A Figura 2.11 mostra o conjunto dos principais resultados obtidos por Mendes & Lorandi (2006). O mapa superior esquerdo mostra a cota do lençol freático. O mapa superior direito mostra a variação do N_{5PT} na cota da fundação, 8,5m. O mapa inferior esquerdo mostra a distribuição da fração de silte na região do estado e finalmente o mapa inferior direito mostra a integração das variáveis gerando uma estimativa da capacidade de carga, mostrando as melhores e piores regiões para execução do dado tipo de fundação padrão.

Mendes & Lorandi (2006) concluem que os SIG são ferramentas poderosas, mas que devem ser usadas para guiar investigações geotécnicas locais direcionadas a problemas específicos.

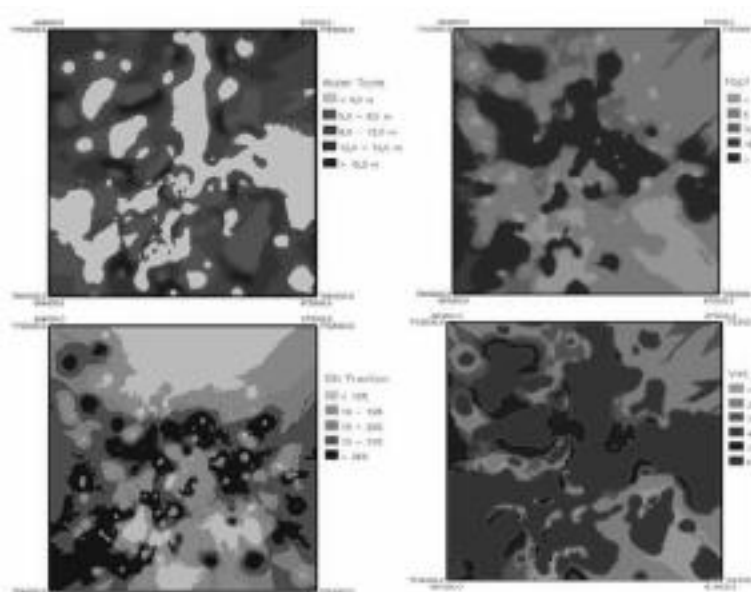


Figura 2.11 – Mapas probabilísticos do lençol freático, N_{5PT} , fração silte e integração dos três mapas mostrando melhores e piores áreas para construção da fundação padrão (adaptado de Mendes & Lorandi, 2006).

2.5.3 Schuler (2007)

Este estudo apresentou o desenvolvimento de um SIG para o armazenamento e gerenciamento de dados de sondagem tanto do tipo SPT quanto do Ensaio de Conc Dinâmico Leve (DPL – *Dynamic Probing Light*) aliado a análises estatísticas e a processos de modelagem geoespacial para o mapeamento do subsolo da área urbana e portuária de Rio Grande – RS.

A base cartográfica utilizada contou com fotos aéreas do município provenientes de um convênio CEEE/FURG de cadastramento da rede de distribuição elétrica organizada em uma base cartográfica produzida no *Datum* WGS 84. O acervo de sondagens DPL e SPT contou ao todo com 350 furos de sondagem distribuídos irregularmente pela área urbana e portuária do município. Desses, 161 são sondagens do tipo SPT e 189 do tipo DPL adquiridos junto ao acervo de mais de 20 anos do Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG. Das sondagens do tipo SPT, 53 fazem parte das 147 utilizadas neste estudo.

O levantamento das coordenadas das sondagens foi realizado com o uso de duas metodologias: realizado primeiramente a coleta *in loco* das coordenadas das sondagens do tipo DPL e posteriormente fotointerpretação de acordo com os croquis dos boletins. Para o levantamento das coordenadas das sondagens do tipo SPT foi utilizado somente a fotointerpretação.

O *software* utilizado foi o *ArcView 3.3a*, componente do *ArcGIS 9.2a*. A metodologia para análise dos dados foi similar, utilizando as ferramentas do programa para destacar os dados pertinentes a cada etapa do estudo. Foram gerados histogramas de frequência relativa e gráficos de correlação das médias da resistência a penetração (N_{SPT} e N_{10}) com a profundidade, visando a separação dos níveis ou camadas para então serem gerados os variogramas e malhas.

Os resultados foram a geração de duas malhas por interpolação pelo método de Krigagem ordinária, cujas camadas representam profundidades consideradas de interesse para a Engenharia de Fundações. Uma foi feita com dados resultantes das sondagens DPL em profundidades de 2 a 4 m e outra com sondagens SPT a uma profundidade de 4 a 11 metros.

Outro resultado, o mais importante para comparação, foi um estudo de caso da mesma obra portuária deste estudo, mas com as sondagens disponíveis na época: 53 das 147. Schuler (2007) previa que o número de sondagens deveria triplicar até a conclusão do

empreendimento, já que em 2007 o dique ainda estava em escavação e as estruturas sendo construídas (Figura 2.12).



Figura 2.12 – Exemplo da distribuição das sondagens SPT na obra em estudo em 2007 (Schuler, 2007).

2.5.4 Ribeiro (2010)

Ribeiro (2010) teve como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de utilização de diagramas de cravação de estacas com a finalidade de previsão da capacidade de carga das mesmas. Para isso, foi criado um banco de dados com informações de 28 ensaios SPT e boletins de cravação de 60 estacas com o *software* *ROCKWORKS®*. O método de interpolação adotado foi o do inverso da distância anisotrópico, já que o programa não trabalha com a interpolação por Krigagem.

O procedimento do estudo consistiu modelar tridimensionalmente a estratigrafia do subsolo a partir das sondagens SPT (conforme apresentado na Figura 2.13) e comparar o modelo gerado com o diagrama de cravação das estacas metálicas. Foram obtidas correlações entre o número de golpes para cravação das estacas e o N_{SPT} para as diferentes camadas que compõe o subsolo da obra em questão. As correlações possibilitaram a transformação dos diagramas de cravação em resultados equivalentes de ensaios SPT, que podem ser usados, analogamente ao que é feito no presente estudo, para analisar a capacidade de carga das estacas com base em métodos semi-empíricos.

Ribeiro (2010) também realizou dois exercícios para previsão de capacidade de carga nas estacas através da transformação do diagrama de cravação de estacas em boletim de sondagem SPT equivalente e utilizou esse boletim para prever a capacidade de carga de duas estacas através do método de Aoki & Velloso. Os resultados obtidos foram ainda comparados com provas de carga estáticas.

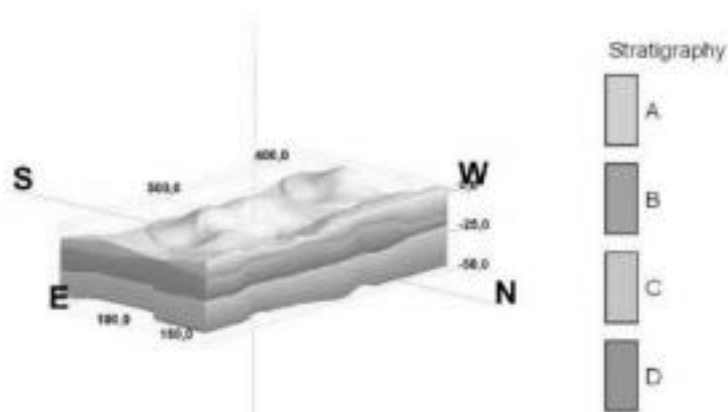


Figura 2.13 – Modelo tridimensional da estratigrafia da área de estudo (Ribeiro, 2010).

2.5.5 Soares (2011)

Este estudo teve por objetivos a criação de um banco de dados contendo o mapeamento do subsolo e cota do lençol freático na região de João Pessoa – PB, a criação de mapas temáticos mostrando a distribuição da tensão admissível para dois tipos de fundação mais comuns e a criação de um modelo digital do terreno, com uso das ferramentas de geoprocessamento do software ArcGIS.

Para tanto, a metodologia utilizada consistiu na digitalização e georreferenciamento das folhas constituintes das cartas topográficas fornecidas pela INTERPA – Instituto de Terras e Planejamento Agrícola do Estado da Paraíba. As curvas de nível foram utilizadas para geração do MDT (modelo digital do terreno), junto com dados auxiliares fornecidos pelas Secretarias de Meio Ambiente e de Planejamento do Município. Também foram acrescentados ao MDT as redes de drenagem e os boletins de sondagem, estes últimos de maneira análoga ao presente estudo.

A partir desse modelo foi gerado o Mapa de declividade, com objetivo de destacar restrições potenciais ao parcelamento dos solos como áreas de preservação permanente, controle de erosão e auxílio na implantação de serviços, entre outros. Também foi gerado o Mapa de Bacias Hidrográficas, através do módulo *Arc Hydro*, especializado nessa função. Esse mapa serviu de subsídio à análise do lençol freático da área estudada.

O banco de dados das sondagens SPT foi organizado de maneira bastante similar ao presente estudo, contendo os dados informados pelas empresas e todas as informações presentes nos boletins. Dos 1881 furos de sondagens disponíveis, foram acrescentados ao banco de dados 705 furos, cerca de um por lote, devido à escala de trabalho do estudo, pois segundo a autora ao realizar a interpolação com todos os furos de sondagem disponíveis, a Krigagem informava a presença de furos muito próximos e solicitava tratamento inicial dos dados.

Na geração da superfície freática através de interpolações, os furos de sondagem foram divididos em período de chuvas (março – agosto) e períodos de seca (setembro – fevereiro) da região por data de execução presente no boletim de sondagem.

Para a interpolação dos valores de N_{SPT} (Figura 2.14) a autora preferiu separar a área em três setores, já que devido a grande extensão da área analisada, muitas sondagens se encontravam isoladas passavam a gerar valores irreais para setores mais afastados das mesmas. Foram interpolados apenas os valores de N_{SPT} em profundidades mais adequadas para o suporte de fundações conforme proposto por Zuquete (1987). Os mapas temáticos contendo a capacidade de suporte para fundações superficiais foram gerados com base na formulação empírica de Cintra et al. (2003), que estima a tensão admissível como sendo o valor de N_{SPT} dividido por 20. A fundação padrão adotada foi uma sapata quadrada de 2 metros de lado e 1 metro de profundidade de assentamento. Para os mapas temáticos contendo a capacidade de suporte para fundações profundas, tendo como base estacas tipo Franki, foram utilizadas as médias no N_{SPT} de 6 e 14 metros, de 9, 11 e 12 metros, dependendo do setor analisando.

As interpolações foram realizadas pelos métodos de Krigagem e Topo To Raster, a fim de comparação de resultados.

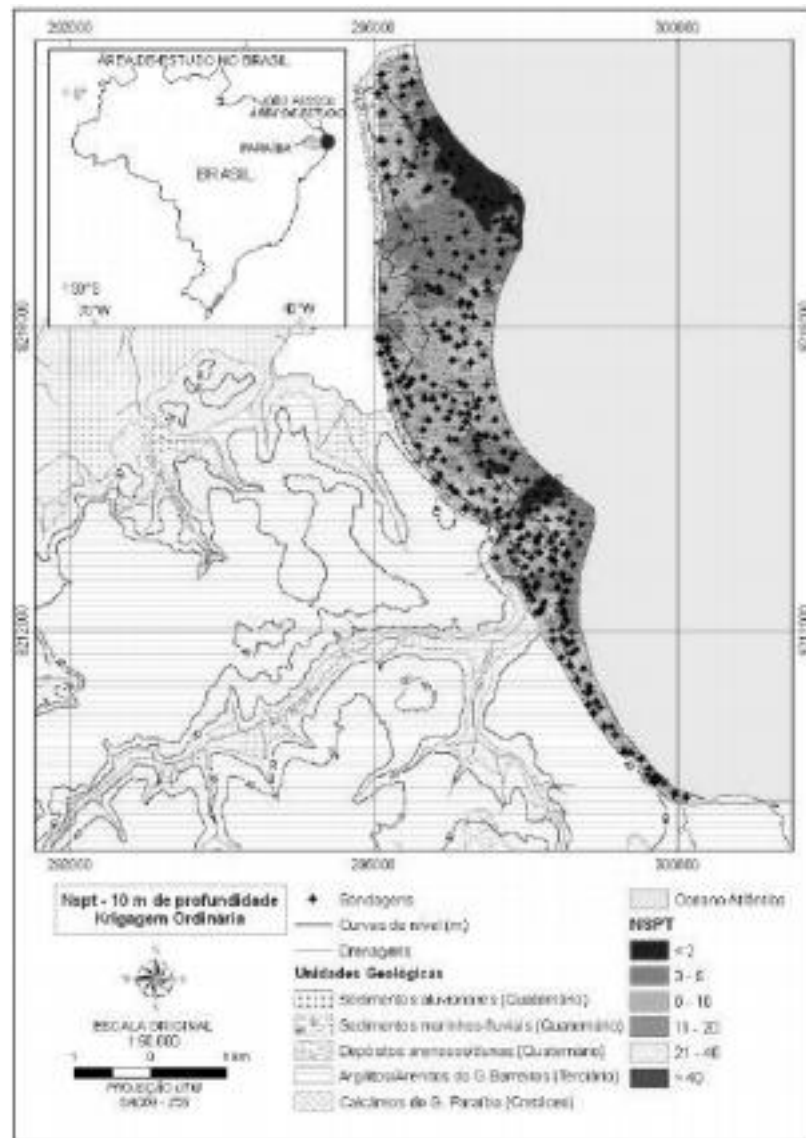


Figura 2.14 – Interpolação por krigagem do N_{SPT} a 10m de profundidade (Soares, 2012).

2.5.6 Wan-Mohamad & Abdul-Ghani (2011)

Um exemplo de uso do SIG para avaliação de dados de ensaio SPT pode ser encontrado em Wan-Mohamad & Abdul-Ghani (2011), onde os autores, com base em dados obtidos de sondagens SPT executadas em Seri Iskandar, em Perak, Malásia, aplicaram o uso do SIG para processar e apresentar dados geotécnicos como tipo de solo e valor de N_{SPT} através de ferramentas do ArcGIS.

Os autores dividiram o subsolo nas profundidades de 3, 5, 10, 20 e 25 metros. Em cada uma dessas profundidades foi informado, de acordo com os boletins de sondagem analisados, dados qualitativos do tipo de solo (areia, silte, argila, turfa, etc) e quantitativos mostrando o valor do N_{SPT} . Em seguida foi criado através do ArcMap um polígono de thiessem, que através da análise baseada na distância da ocorrência, determina a área de influência tanto do tipo de solo quanto para o valor de N_{SPT} . A Figura 2.15 mostra a distribuição do tipo de solo a 5 metros de profundidade.

Segundo os autores, as ferramentas de SIG são importantes ferramentas no auxílio da tomada de decisões e podem oferecer meios de armazenar, analisar e atualizar dados de maneira eficiente.

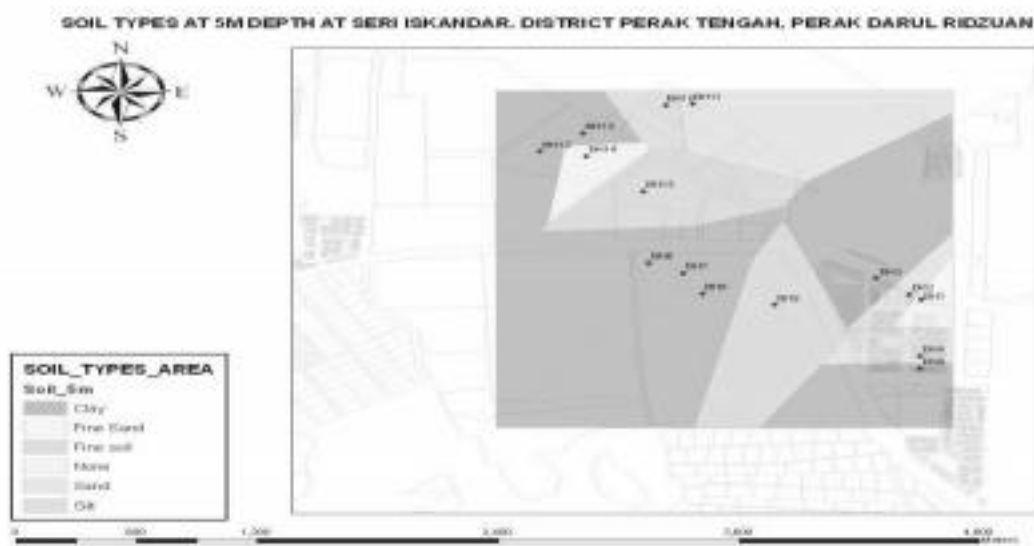


Figura 2.15 – Tipo de solo a 5 metros de profundidade em Seri Iskandar, Perak, Malásia (Wan-Mohamad & Abdul-Ghani, 2011).

3. ÁREA DE ESTUDO.

3.1 OBRA

O cenário do presente estudo está localizado na área portuária do município de Rio Grande/RS (Figura 3.1). Único porto marítimo do estado, o Porto de Rio Grande recebe a implantação de um Polo Naval para a construção e reparo de cascos, plataformas de petróleo e outras embarcações de grande porte. O Estaleiro Rio Grande, com 500 mil metros quadrados, começou a ser construído na região no ano de 2006 (Figura 3.2) e conta com um dique seco de 350 x 133 metros de área e 14 metros de profundidade. As oficinas têm capacidade de processamento de aproximadamente 12 mil toneladas de aço por ano e o complexo ainda conta com dois eais para acabamento e finalização das plataformas. Os dados de projeto, assim como os resultados das sondagens, foram obtidos junto à equipe de fiscalização da obra.

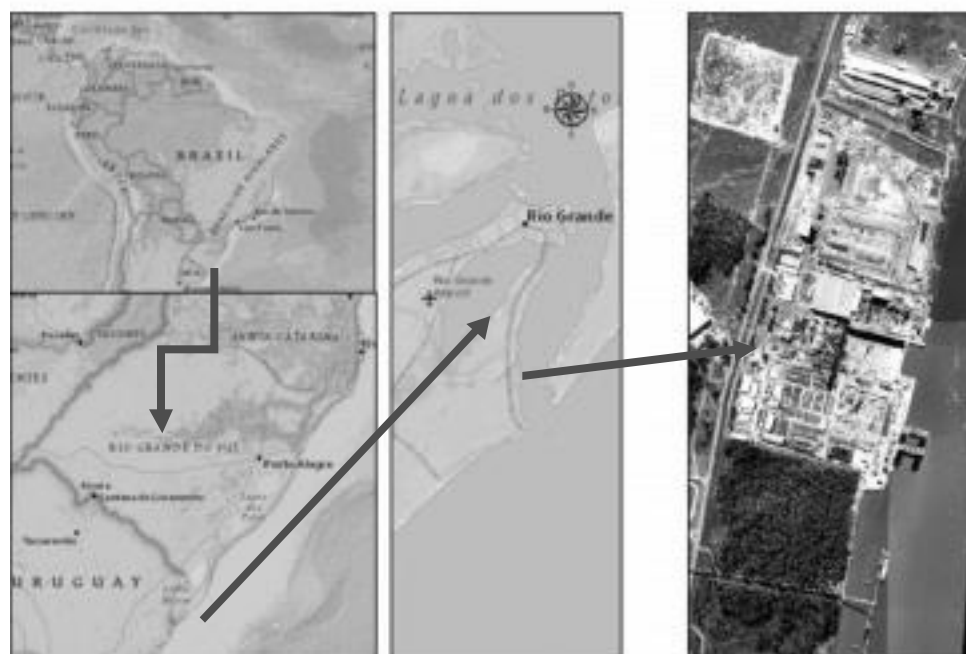


Figura 3.1 – Área do estudo.

Rio Grande é a cidade mais antiga do estado e com seus pouco mais de 200 mil habitantes, ainda preserva traços da colonização portuguesa na arquitetura do centro histórico. Desde o começo das obras de implantação do Polo Naval, a cidade tem vivenciado uma profunda agitação em diversos setores econômicos como imobiliário, hoteleiro, comercial e de transportes.



Figura 3.2 – Escavação do dique seco em 2007.

O dique seco do estaleiro é formado basicamente pela porta batel, paredes de contenção (formadas por cortinas de estacas-prancha metálicas atirantadas) e laje de fundo. A porta batel é uma grande estrutura metálica flutuante que serve para abrir e fechar a comunicação do dique com a Lagoa dos Patos para entrada e saída dos módulos, cascos e plataformas. Durante a operação são utilizados rebocadores para movimentar a porta batel. As paredes de contenção são constituídas por estacas-prancha atirantadas, cravadas antes da escavação total do dique.

O dique seco conta com uma laje de fundo de concreto armado, montada sobre estacas metálicas constituídas de perfis de aço dos tipos W610, padrão GERDAU. As dimensões totais da laje são de 361 x 133 m. A espessura varia de 70 cm no eixo central até 56 cm nas laterais e junto às paredes. Em alguns pontos destinados a receber canaletas, tubos de drenagem e caixas de inspeção, a laje tem sua espessura aumentada. O mesmo acontece para regiões de grande concentração de carga como os locais que receberiam a quilha dos navios.

O volume de concreto total consumido foi de 44616 metros cúbicos, com cerca de 5630 estacas metálicas de 36m de comprimento total cada. O espaçamento típico adotado entre as estacas foi de 3,30 x 3,30 m e foram ajustadas de acordo com a variação de carga no piso. As cargas admissíveis estruturais nos 4 tipos de estacas utilizados são:

- Perfil W 610 x 140 – carga admissível estrutural N = 294 tf;
- Perfil W 610 x 125 – carga admissível estrutural N = 249 tf;
- Perfil W 610 x 101 – carga admissível estrutural N = 216 tf;
- Perfil W 610 x 113 – carga admissível estrutural N = 183 tf.

Conforme ilustrado na Figura 3.3 as cerca de 5630 estacas metálicas são compostas de três segmentos de perfis metálicos do tipo I, de 12 metros de comprimento cada, unidos através de placas metálicas soldadas.

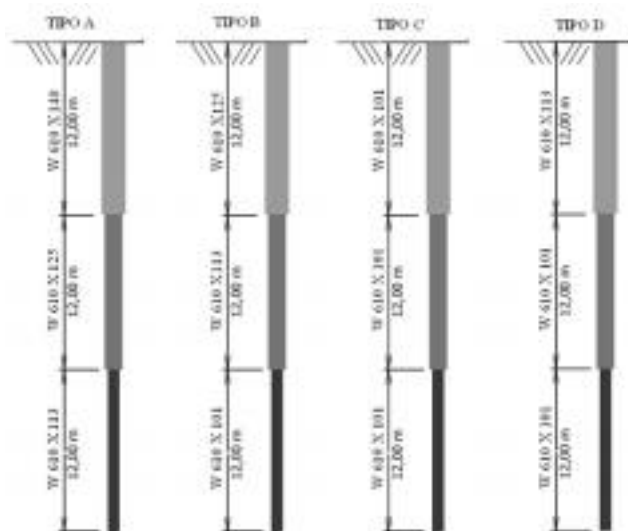


Figura 3.3 - Composição dos 4 tipos de estaca utilizados.

Cada estaca é formada por três dos quatro tipos de perfis metálicos utilizados, soldados em quatro combinações diferentes, distribuídas ao longo da área da laje de fundo.

Dados dos perfis como área e perímetro foram retirados do Manual para Estacas Metálicas da Gerdau (Tabela 3.1 e Figura 3.4). Os perfis utilizados são o W610X101, W610X113, W610X125 e W610X140.

Tabela 3.1 - Perfis de aço W Gerdau (Gerdau, 2007).

CARGA ADMISSÍVEL ESTRUTURAL														A.R. Peso máx. ad. Perfuração	Resistência Estatística	Fórmula Limit de acordo com o NBR 8800				Cargas admissíveis características de acordo com a NBR 8800		NOTA
SEÇÃO	Dimensão	a	b	Espessura				Área Bruta		Perfuração	Class. II - A					Área Placa	Peso	Área	Carga Perf.			
mm x mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
W 150 x 22,5	150	225	113	5,0	5,0	1,08	1,08	20,0	30	1.000	143	307	31	30,7	143	1,13	20,0	1,00	1,00	1,00	1,00	
W 150 x 25,0	150	250	113	5,0	5,0	1,10	1,10	20,0	30	1.100	157	336	31	33,6	157	1,23	22,0	1,10	1,10	1,10	1,10	
W 150 x 27,5	150	275	113	5,0	5,0	1,13	1,13	20,0	30	1.200	171	365	31	36,5	171	1,37	24,0	1,20	1,20	1,20	1,20	
W 200 x 25,0	200	250	125	5,0	5,0	1,35	1,35	25,0	40	1.400	207	400	35	40,0	207	1,50	28,0	1,35	1,35	1,35	1,35	
W 200 x 27,5	200	275	125	5,0	5,0	1,38	1,38	25,0	40	1.500	221	429	35	42,9	221	1,64	30,0	1,50	1,50	1,50	1,50	
W 200 x 30,0	200	300	125	5,0	5,0	1,41	1,41	25,0	40	1.600	235	458	35	45,8	235	1,78	32,0	1,60	1,60	1,60	1,60	
W 200 x 32,5	200	325	125	5,0	5,0	1,44	1,44	25,0	40	1.700	249	487	35	48,7	249	1,92	34,0	1,70	1,70	1,70	1,70	
W 200 x 35,0	200	350	125	5,0	5,0	1,47	1,47	25,0	40	1.800	263	516	35	51,6	263	2,06	36,0	1,80	1,80	1,80	1,80	
W 250 x 25,0	250	250	135	5,0	5,0	1,62	1,62	30,0	50	2.000	307	500	40	50,0	307	2,25	40,0	2,00	2,00	2,00	2,00	
W 250 x 27,5	250	275	135	5,0	5,0	1,65	1,65	30,0	50	2.100	321	529	40	52,9	321	2,39	42,0	2,10	2,10	2,10	2,10	
W 250 x 30,0	250	300	135	5,0	5,0	1,68	1,68	30,0	50	2.200	335	558	40	55,8	335	2,53	44,0	2,20	2,20	2,20	2,20	
W 250 x 32,5	250	325	135	5,0	5,0	1,71	1,71	30,0	50	2.300	349	587	40	58,7	349	2,67	46,0	2,30	2,30	2,30	2,30	
W 250 x 35,0	250	350	135	5,0	5,0	1,74	1,74	30,0	50	2.400	363	616	40	61,6	363	2,81	48,0	2,40	2,40	2,40	2,40	
W 300 x 25,0	300	250	145	5,0	5,0	1,89	1,89	35,0	60	2.600	407	650	45	65,0	407	3,15	50,0	2,60	2,60	2,60	2,60	
W 300 x 27,5	300	275	145	5,0	5,0	1,92	1,92	35,0	60	2.700	421	679	45	67,9	421	3,29	52,0	2,70	2,70	2,70	2,70	
W 300 x 30,0	300	300	145	5,0	5,0	1,95	1,95	35,0	60	2.800	435	708	45	70,8	435	3,43	54,0	2,80	2,80	2,80	2,80	
W 300 x 32,5	300	325	145	5,0	5,0	1,98	1,98	35,0	60	2.900	449	737	45	73,7	449	3,57	56,0	2,90	2,90	2,90	2,90	
W 300 x 35,0	300	350	145	5,0	5,0	2,01	2,01	35,0	60	3.000	463	766	45	76,6	463	3,71	58,0	3,00	3,00	3,00	3,00	
W 350 x 25,0	350	250	155	5,0	5,0	2,16	2,16	40,0	70	3.200	507	800	50	80,0	507	4,05	60,0	3,20	3,20	3,20	3,20	
W 350 x 27,5	350	275	155	5,0	5,0	2,19	2,19	40,0	70	3.300	521	829	50	82,9	521	4,19	62,0	3,30	3,30	3,30	3,30	
W 350 x 30,0	350	300	155	5,0	5,0	2,22	2,22	40,0	70	3.400	535	858	50	85,8	535	4,33	64,0	3,40	3,40	3,40	3,40	
W 350 x 32,5	350	325	155	5,0	5,0	2,25	2,25	40,0	70	3.500	549	887	50	88,7	549	4,47	66,0	3,50	3,50	3,50	3,50	
W 350 x 35,0	350	350	155	5,0	5,0	2,28	2,28	40,0	70	3.600	563	916	50	91,6	563	4,61	68,0	3,60	3,60	3,60	3,60	

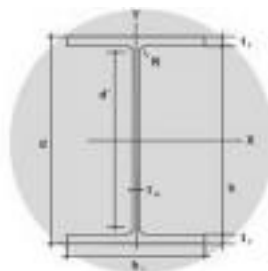


Figura 3.4 - Legenda das dimensões das estacas (Gerdau, 2007).

3.2 ESTUDOS GEOTÉCNICOS ANTERIORES

A planície costeira do Rio Grande do Sul, onde está localizado o Município de Rio Grande, tem como características as baixas cotas altimétricas (a maior a cerca de 5 metros acima do nível do mar), lençol freático pouco profundo e predominância dos ventos no sentido Nordeste-Sudoeste. A geomorfologia da região do município é formada por uma bacia de sedimentação com depósitos marinhos e lacustres, de acordo com Vieira (1970).

A partir de doze furos de sondagem executados ao longo de cerca de 12 km da costa do Superporto de Rio Grande, Dias (1993) apresentou um perfil longitudinal da área, conforme demonstrado na Figura 3.5.

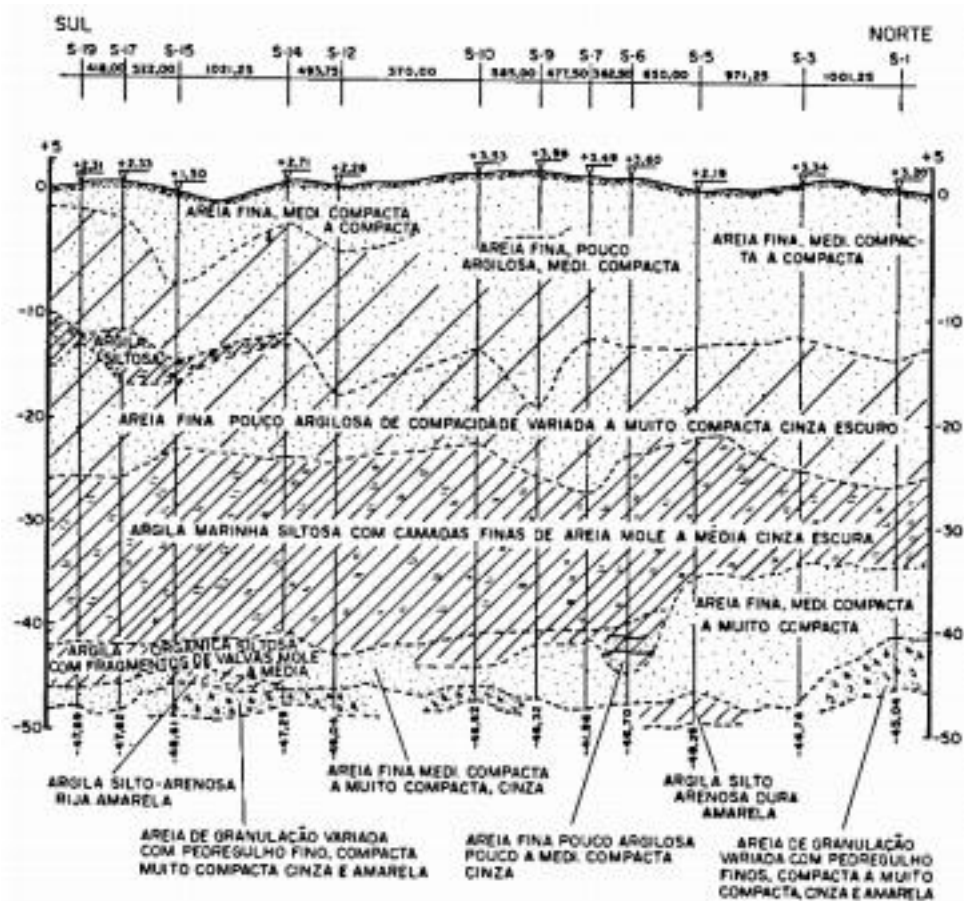


Figura 3.5 – Perfil estratigráfico para a região do Superporto de Rio Grande (Dias, 1993).

Com base em novas investigações geotécnicas conduzidas na região do Superporto de Rio Grande através de sondagens da percussão do tipo SPT e ensaios de cone (CPTU), Dias et al. (2008) sugeriram classificar o subsolo da área do Estaleiro Rio Grande em 4 macro camadas de sedimentos distintas, nomeadas de A a D:

- (A) depósito arenoso fino;
- (B) camada formada por estratos de argilas e areias intercaladas;
- (C) camada de argila siltosa de consistência média a rija e
- (D) camada basal de areia fina a média

A análise da estratigrafia do terreno a partir de sondagens SPT confirmou as descrições e foi gerado um perfil representativo dos valores médios de N_{60} em relação à profundidade, conforme ilustrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Perfil representativo do subsolo da área de estudo com valores médios de N_{SPT} (Dias et al., 2008).

Os dados de sondagens das grandes obras realizadas na região, como por exemplo, a ampliação dos Molhes da Barra, a construção do dique seco e a remodelação do cais do Porto Novo permitiriam o perfil longitudinal apresentado na Figura 3.5 fosse atualizado, conforme apresentado na Figura 3.7.

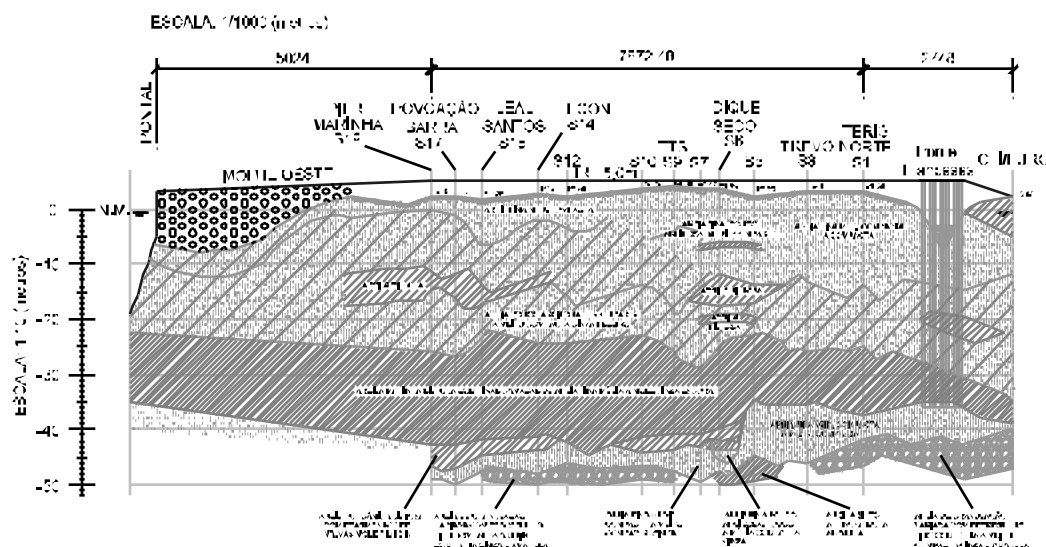


Figura 3.7 – Perfil estratigráfico atualizado da região do Superporto de Rio Grande, do ginásio CFI-EURG até Molhes da Barra (Dias, 2010).

Goularte (2012) apresentou um inventário com dados da região do Superporto de Rio Grande obtidos desde a década de 70 e a análise dos parâmetros geotécnicos da argila siltosa profunda da região. A autora utilizou a classificação proposta em Dias et al (2008): areia superficial com espessura em torno de 13m, sobre uma camada formada por várias subcamadas alternadas entre areia e argila que apresentam espessuras desde poucos centímetros até 3 metros, englobando uma espessura total de 11 metros. A terceira camada foi caracterizada como argila siltosa com alguns veios de areia fina em alguns pontos, sendo identificada no intervalo de profundidade de 27 m a 43 m. A última camada, posterior aos 43 metros de profundidade, constituída de areia fina de média a muito compacta. A autora analisou a variação dos parâmetros geotécnicos da argila siltosa em relação a localização ao longo do canal do Superporto e também quanto a profundidade, comprovando estatisticamente que 66% dos parâmetros analisados tem sua variação relacionada com a profundidade, 44% dos parâmetros tem sua variação explicada pela localização e 22% dos parâmetros analisados não possuem correlações explicadas por nenhuma das possibilidades anteriores.

Segundo Bastos (2014), os eventos de regressão e transgressão do nível do mar no Período Quaternário tiveram grande influência na constituição das camadas de deposição sedimentar. Bastos (2014) estudou, através de ensaios do tipo SPL e CPLn (Figura 3.8), a

estratigrafia do terreno onde se localiza o Estaleiro Rio Grande no Superporto do Rio Grande. Em seu estudo também foram empregadas técnicas de geocronologia, como medidas de datação por Carbono 14. Refere-se aos sedimentos quaternários da área de estudo como materiais inconsolidados predominantes em meio acuoso de ambiente marinho ou transicional, formados por processos sedimentares. Os sedimentos finos, argila e silte, concentram-se em baías fechadas, ambientes de pouca energia, enquanto os sedimentos arenosos são mais facilmente encontrados em ambientes de maior energia como praias e rios. O caso específico da região do Superporto é de um ambiente de transição com suas planícies e canais de maré. Nele ocorrem finas intercalações de materiais arenosos e silto-argilosos em função das correntes de marés.

Bastos (2014) afirma ainda que além da sua constituição, as características geotécnicas destes sedimentos estão ligadas também ao nível de pré-adensamento, principalmente dos pacotes argilosos que, em função de sua fina granulometria, teriam expulsado lentamente a água devido ao aumento de peso ocasionado pelas deposições sucessivas de camadas e pelo processo de adensamento secundário relacionado ao tempo de formação dessas camadas. Além dos processos de regressão marinha, o que justifica sedimentos depositados num mesmo ambiente apresentarem propriedades geotécnicas distintas de acordo com a época em que foram depositados.

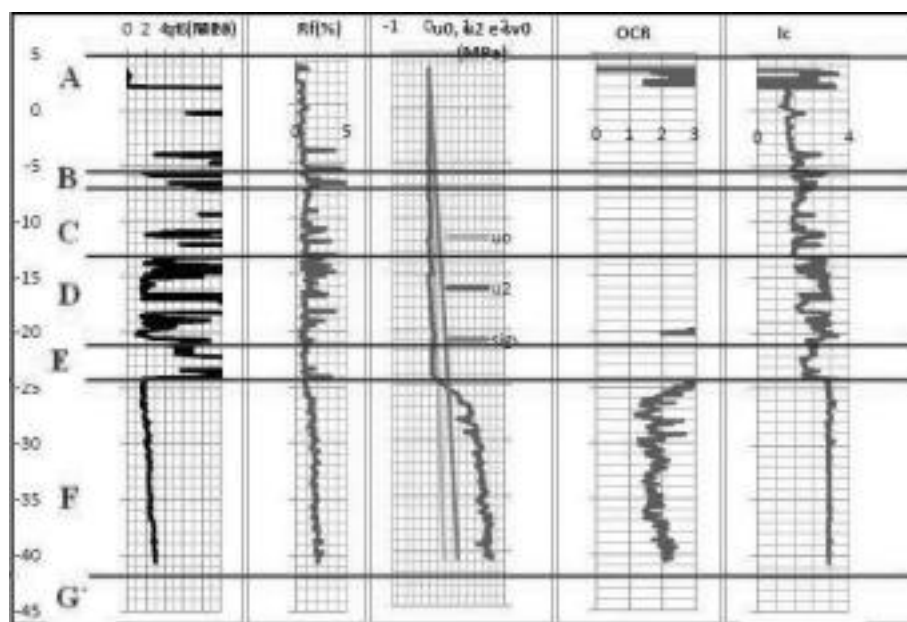


Figura 3.8 – Figura CPTu 18 com a rova subdivisão das camadas (Bastos, 2014).

Assim, Bastos (2014) ampliou a divisão do perfil proposto Dias et al. (2008), baseado na comparação com os perfis de Caravelas/BA. As macro camadas foram nomeadas de A até G:

- (A) areia regressiva medianamente compacta localizada entre as cotas -3,8 m e -5,5 m;
- (B) argila siltosa intercalada por finas camadas de areia, entre as cotas -5,5 m e -7m;
- (C) areia medianamente compacta a compacta com lentes de argila siltosa próximas a base, entre as cotas -7 m e -13 m;
- (D) argilas siltosas entremeadas por camadas de areia com grande variabilidade no perfil, entre as cotas -13 m e -21 m;
- (E) areia muito compacta entre as cotas -21 m e -24 m;
- (F) argila siltosa de comportamento não drenado, muito homogênea entre as cotas -24 m a -42 m;
- (G) arcias e argilas siltosas duras, solo turfoso ou presença de seixos e arcias grossas de cor amarela, entre -42 m e -60 m.

4. METODOLOGIA

4.1 BASE DE DADOS

4.1.1 Coordenadas das sondagens

O SIG, por definição, precisa de dados que contenham localização espacial para que possam ser locados e relacionados. Para o presente estudo, além dos boletins de sondagem, foi utilizado um mapa georreferenciado (WGS 84) onde se encontram a previsão de localização dos pontos de sondagem no terreno. Cada um desses pontos contém as coordenadas geográficas em que foram realizadas as sondagens. Também foi utilizado um mapa “as built”, contendo a informação de onde foram efetivamente executadas essas sondagens, com coordenadas algumas vezes diferentes das definidas no projeto (Figura 4.1). O mapa “as built” não estava georreferenciado, portanto foi preciso compatibilizar os dois mapas para extrair as coordenadas geográficas de cada sondagem. Os dois mapas foram sobrepostos, procurando-se um ponto do projeto que coincidissem com algum ponto dentro do mapa “as built”. Feito isso, obteve-se um mapa contendo as sondagens efetivamente realizadas com suas coordenadas geográficas reais. Com o uso do AutoCAD, extraíram-se então as coordenadas correspondente a cada sondagem, informadas no DATUM WGS 84.



Figura 4.1- Mapa das sondagens organizado pela empresa executora do empreendimento.

4.1.2 Dados dos boletins de sondagem

Com as coordenadas geográficas e os dados dos boletins de sondagem foi organizada uma planilha eletrônica com o programa Microsoft Excel contendo todas as informações presentes nos boletins e mais outras informações que puderam ser definidas posteriormente. Ao todo, foram utilizados os boletins de 147 sondagens executadas por cinco empresas diferentes, realizadas no período entre 2006 a 2008 sendo que 56 dessas sondagens foram executadas dentro da área dique. Um dos boletins, de uma sondagem realizada dentro do dique, foi reservado para servir de comparação com os modelos gerados.

As sondagens realizadas pelas diversas empresas informam a cota da boca do furo em relação à cota zero, o nível do mar. Este dado precisou ser compatibilizado: já que nem todas partiam de uma cota inteira, os valores foram arredondados ao dígito mais significativo, para que fosse possível trabalhar apenas com valores inteiros de cota. Com isso foi possível isolar com mais facilidade todas as sondagens de uma mesma cota inteira, para então gerar o mapa de interpolação referente a cada uma das 54 cotas. Conforme o fragmento de tabela abaixo é possível observar que o maior erro obtido na compatibilização das cotas foi de 50 cm, o que, para fins de posicionamento da camada e da resistência do solo, em proporções superiores a 40m, é aceitável. A Tabela 4.1 representa algumas das sondagens do estudo e um exemplo do resultado do arredondamento.

Tabela 4.1 - Arredondamento da cota da boca do furo.

Furo	Cota da Boca do Furo Original (m)	Cota da Boca do Furo Arredondada (m)	Erro (m)	Coordenadas	
				X	Y
1	1,5	5	-0,500	395110,50 E	6118918,76 N
2	4,7	4	0,700	395160,77 E	6448967,16 N
4	3,84	1	-0,160	395284,09 E	6119021,25 N
5	4,3	4	0,3	395164,74 E	6449052,39 N
6	4,34	4	0,340	395227,91 E	6449062,51 N
8	1,5	5	-0,100	395267,19 E	6119087,16 N
9	4,56	5	-0,440	395157,45 E	6449112,60 N
10	1,5	5	-0,390	395305,75 E	6119115,12 N
11	3,87	4	-0,180	395216,76 E	6449136,70 N
12	3,2	3	0,2	395176,50 E	6119158,41 N

Na tabela de dados principal deste trabalho, que serviu de base para as análises no ArcGIS, além das coordenadas do furo de sondagem, também foram organizados os valores de N_{6PT} , dados referentes à descrição, cor e granulometria observadas do material recuperado pela sondagem e, sempre que observado, a presença de conchas, matéria orgânica e gás, todos devidamente localizados espacialmente e na cota em que se observam. Consistência e compactidade foram definidas com base nas colunas de descrição e N_{6PT} , automaticamente por meio de uma fórmula programada no Microsoft Excel. A consistência compactidade e a descrição do tipo de material também foram usadas posteriormente nos parâmetros utilizados para a determinação da capacidade de carga das estacas. Ainda, as informações sobre granulometria e cor foram utilizadas como auxílio para a classificação do terreno em camadas, conforme a divisão proposta por Bastos (2014). A Tabela 4.2 mostra os dados referentes à sondagem identificada como 137. A forma de organização dos dados se repete para todas as outras sondagens.

Tabela 4.2 – Atributos qualitativos e quantitativos da sondagem 137 ao longo da profundidade.

FURO	COTA	N_{6PT}	CONSIST. OU COMPACT.	DESCRIÇÃO	COR	OBSERVAÇÃO	CAMADA
137	-11	50	MUITO COMPACTA	ARGILA	CINZA		C
137	-12	15	MEDIANAMENTE COMPACTA	ARGILA	VERDE		
137	-13	6	POUCO COMPACTA	ARGILA	VERDE		
137	-14	5	POUCO COMPACTA	ARGILA	VERDE		
137	-15	1	RTIA	ARGILA	CINZA ESCURO		D
137	-16	51	DURA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-17	43	MUITO COMPACTA	ARGILA	VERDE		
137	-18	7	POUCO COMPACTA	ARGILA	VERDE		
137	-19	7	MIDIA	ARGILA ARENOSA	CINZA ESCURO		
137	-20	7	MIDIA	ARGILA ARENOSA	CINZA ESCURO		
137	-21	53	DURA	ARGILA ARENOSA	CINZA ESCURO		
137	-22	37	COMPACTA	ARGILA	CINZA		
137	-23	17	MEDIANAMENTE COMPACTA	ARGILA	CINZA		
137	-24	4	RTIA	ARGILA ARGILOSA	CINZA ESCURO	CONCHAS	E
137	-25	7	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-26	3	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-27	9	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-28	9	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-29	12	RTIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-30	7	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-31	10	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-32	1	RTIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-33	9	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-34	10	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-35	9	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-36	11	RTIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-37	11	RTIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-38	12	RTIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-39	9	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-40	9	MIDIA	ARGILA	CINZA ESCURO		
137	-41	15	RTIA	ARGILA	PRETA	CONCHAS	
137	-42	75	MUITO COMPACTA	ARGILA	CINZA ESCURO		G

Em situações onde o amostrador do ensaio SPT penetra menos do que 45 cm, o valor de N_{SPT} é representado por uma fração, por exemplo 30/5, que representa 30 golpes para um avanço de 5 centímetros. Nestes casos, o valor de N_{SPT} foi extrapolado, para simular o número de golpes necessário para a penetração dos 30 cm finais do amostrador. No exemplo dado, o valor de N_{SPT} seria estimado em 180.

4.1.3 Capacidade de carga das estacas

Para o cálculo da capacidade de carga das estacas da laje de fundo do dique, foi organizada no Microsoft Excel uma planilha com todas as sondagens que atingiram a camada G (areia compacta) e se localizavam dentro do dique. Foram empregados dois métodos de determinação de capacidade de carga para fundações profundas mais utilizados no Brasil: Aoki & Velloso (1975) e Decourt & Quaresma (1978).

No cálculo da capacidade de carga das estacas, foi considerado com área de base o retângulo envolvente da área plena da estaca, hipótese adotada no projeto do empreendimento. O perímetro foi considerado variável com a profundidade, de acordo com os perfis das estacas mostrados na Figura 3.3. Os cálculos foram efetuados considerando a estaca do tipo A, a primeira das 4 combinações de perfis metálicos tipo I utilizados.

O fragmento de tabela apresentado na Tabela 4.3 mostra a sequência de cálculo da resistência de ponta e atrito lateral para a sondagem identificada como 137, que começou na cota -11 m e se estendeu até a cota -12 m. Para uniformizar os parâmetros do cálculo da capacidade de carga, todas as sondagens que atingiram a camada G foram extrapoladas até a cota -50.

Tabela 4.3 - Cálculo dos parâmetros de capacidade de carga na sondagem 137.

D	DATA	N _{5PT}	N ₅	N ₁	FAV	KDD	Alpha (%)	UA	QbnAV	QbnDQ	QsuAV	QsuDQ	COMPAV	COMPDQ	TRACAV	TRACDQ
137	2	3	887	2128	250	120	6%	2,00	1,25	1257	1,46	2042	2112	2136	3153	3157
137	25	3	1000	2000	250	120	6%	2,00	1,46	2070	1,55	2121	2216	2257	3153	3172
137	25	12	9,33	15,25	250	120	6%	2,00	1,35	2180	1,55	2159	2325	2325	3746	3735
137	30	7	9,77	16,50	250	120	6%	2,00	1,40	2240	1,51	2247	2364	2436	3735	3737
137	31	10	9,55	16,07	250	120	6%	2,00	1,35	2237	1,55	2241	2372	2335	3870	3879
137	32	11	10,00	17,36	250	120	6%	2,00	1,40	2320	1,55	2415	2563	2579	3551	3530
137	32	3	10,00	16,00	250	120	6%	2,00	1,40	2521	1,55	2521	2664	2557	3517	3520
137	32	10	8,35	16,11	250	120	6%	2,00	1,35	2611	1,55	2551	2770	2751	325	3277
137	32	9	10,00	16,21	250	120	6%	2,00	1,40	2607	1,55	2627	2801	2815	3177	3141
137	36	11	10,01	15,90	250	120	6%	2,00	1,39	2758	1,55	2735	2907	2937	3211	3215
137	37	11	11,31	15,77	250	120	6%	2,00	1,39	2800	1,55	2815	3063	3035	3120	3227
137	38	12	10,07	15,36	250	120	6%	2,00	1,39	3010	1,55	2915	3167	3130	3120	3172
137	38	9	10,00	15,77	250	120	6%	2,00	1,40	3051	1,55	3051	3277	3130	3172	3179
137	40	4	10,00	15,36	250	120	6%	2,00	1,40	3175	1,55	3175	3385	3385	3531	3532
137	41	10	9,11	15,80	250	120	6%	2,00	1,40	3225	1,55	3225	3485	3485	3531	3537
137	42	50	10,17	15,88	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	3585	3585	3531	3547
137	43	50	9,11	15,15	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	3685	3685	3531	3548
137	44	50	9,11	15,89	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	3785	3785	3531	3549
137	45	50	9,11	15,87	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	3885	3885	3531	3551
137	46	50	9,11	15,77	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	3985	3985	3531	3551
137	47	50	9,11	15,76	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	4085	4085	3531	3551
137	48	50	9,11	15,76	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	4185	4185	3531	3551
137	49	50	9,11	15,76	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	4285	4285	3531	3551
137	50	50	9,11	15,76	250	120	6%	2,00	1,40	3275	1,55	3275	4385	4385	3531	3551

A coluna “n_trunc” representa o valor de N_{5PT} truncado em 50, que é o valor utilizado pelos métodos de determinação de capacidade de carga. QbnAV é a resistência de ponta pelo método de Aoki & Velloso, enquanto QbnDQ é a resistência de ponta pelo método de Decourt & Quaresma. O mesmo raciocínio se aplica nas colunas QsuAV e QsuDQ, representando a resistência do fuste da estaca pelos métodos de Aoki & Velloso e Decourt & Quaresma, respectivamente. O mesmo se aplica a COMPAV, COMPDQ, TRACAV e TRACDQ, esforços de compressão e tração. A tabela final adicionada ao ArcGIS conta ainda com as coordenadas geográficas das sondagens.

4.2 INSERÇÃO DOS DADOS NO ARCGIS.

As tabelas utilizadas para o estado dentro do ambiente do ArcGIS contém, para todas as sondagens realizadas, as coordenadas geográficas dos furos de sondagem conforme exibido na Tabela 4.1 e informações exibidas nas Tabelas 4.2. A tabela para o cálculo da capacidade

de carga conta com as coordenadas geográficas de cada sondagem e ainda as informações descritas na Tabela 4.3.

Foi usado como base um mosaico composto por imagens aéreas da região do empreendimento datadas de 2012, ano em que boa parte da estrutura do estaleiro já estava construída, possibilitando uma fácil identificação dos dados do estudo no espaço. Essas imagens fazem parte de um banco de dados fornecido pelo Laboratório de Topografia da FURG. Todos os resultados obtidos no estudo foram lançados sobre essas imagens, com objetivo de criar mapas temáticos de fácil identificação, com uma referência espacial conhecida e bem definida. A resolução das imagens é de 60 cm. Praticamente todas as atuais estruturas presentes no empreendimento já estavam construídas no momento da aquisição das imagens, portanto é possível obter uma referência bem precisa e atualizada da posição das sondagens e dos dados obtidos. A Figura 4.2 mostra a localização dos furos de sondagem sobre o mosaico de imagens aéreas.



Figura 4.2 - Locação dos furos de sondagem.

4.2.1 Tabelas de cotas e interpolação de N_{SPT} .

O ArcGIS trabalha as tabelas no formato .dbf. É possível reconhecer no programa os dados no formato .xls e .xlsx (Microsoft Excel), mas percebeu-se maior estabilidade no programa convertendo para .dbf. Depois de convertida, a tabela pode ser tratada de várias maneiras. O primeiro passo é fazer com que o programa reconheça as colunas X e Y como coordenadas geográficas. Definidas as coordenadas, o ArcGIS já pode inserir, caso desejado, os pontos das coordenadas sobre o mapa, conforme apresentado na Figura 4.2. Além dos pontos, as “Features” ou “Feições” são os dados da tabela que podem ser apresentados junto aos pontos sobre a imagem. É possível apresentar os valores referentes a uma das colunas ou programar uma função lógica para representar um conjunto destes dados. Na Figura 4.2, é exibido junto ao ponto a identificação das sondagens conforme o projeto e “as built”, que é a mesma referência presente nos boletins de sondagem.

Um recurso importante foi a possibilidade de selecionar na tabela apenas as linhas ou colunas que possuem um atributo específico. Esse recurso, especificamente no ArcGIS, permite criar arquivos .dbf contendo apenas os itens que possuem um atributo específico. Por exemplo, na Figura 4.3 o programa foi instruído a mostrar apenas as linhas cuja cota correspondente é igual a -15m.



Figura 4.3 - Interface do ArcGIS: seleção por atributo.

Em seguida, foi ordenado ao programa exibir apenas as linhas que apresentam o valor de cota correspondente ao comando anterior. O resultado (Figura 4.4) é uma nova tabela contendo todas as sondagens e todas as informações correspondentes àquela sondagem, mas restritas à cota -15m. Com isso, foi possível analisar todas as ocorrências apenas naquela cota.

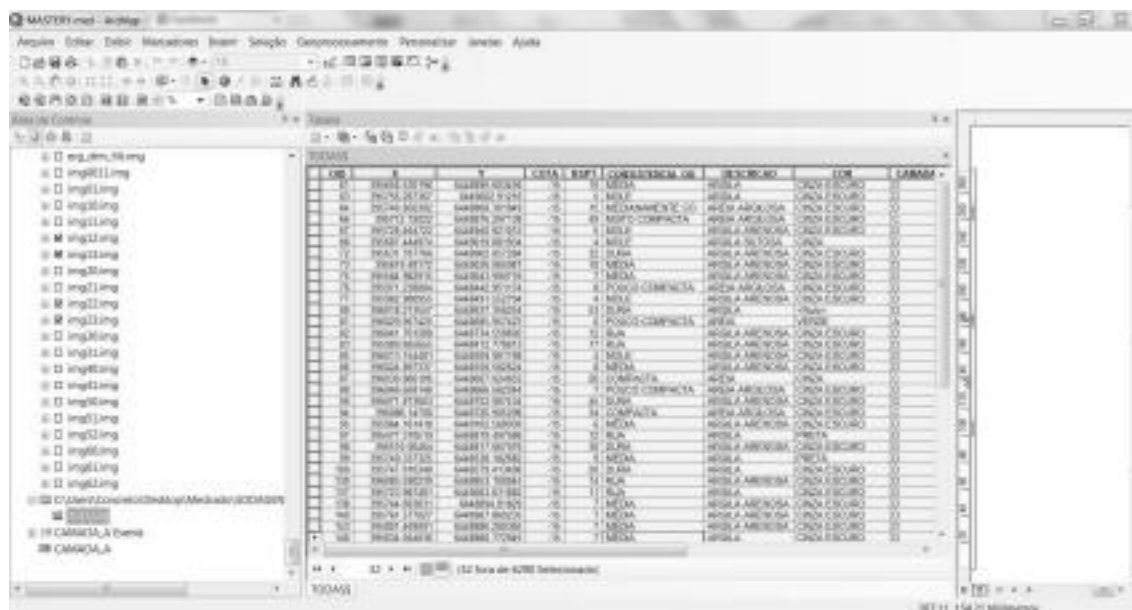
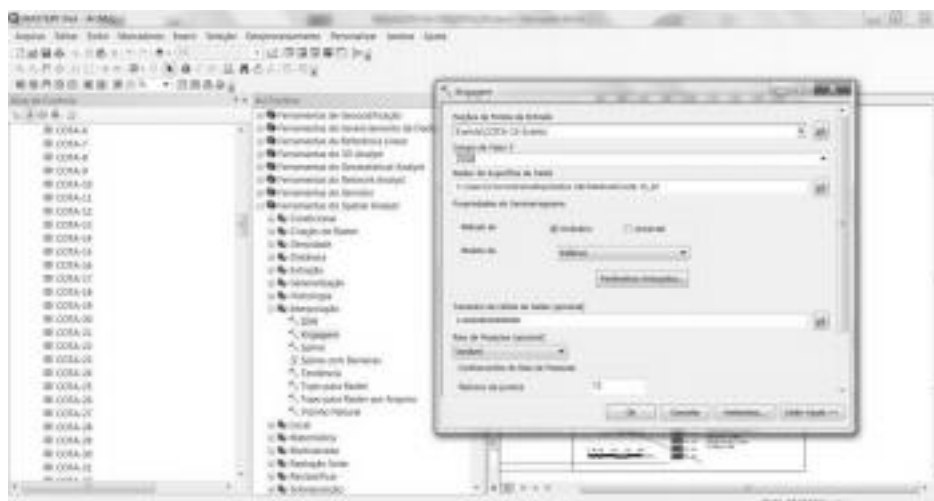


Figura 4.4 - Interface do ArcGIS: apenas atributos selecionados

O procedimento foi repetido para cada uma das cotas, gerando-se assim, com base na primeira tabela (exemplificada pela Tabela 4.2), 55 novas tabelas, cada uma para sua respectiva cota. Com as informações separadas por cota, foram utilizadas as ferramentas de interpolação para, em cada uma das cotas, informar ao ArcGIS qual parâmetro será interpolado. Na Figura 4.5, Feições dos Pontos de Entrada se refere a tabela base para a análise, no caso a tabela contendo informações para a cota -15. Campo de Valor % é o campo que será interpolado para geração do mapa temático, neste caso, o valor de N_{SPR} e em seguida o nome do arquivo que será gerado

Figura 4.5 - Interpolação de N_{SPT} .

Na Figura 4.5 também é possível perceber, na coluna da esquerda, o menu das tabelas referentes a cada cota. Neste estudo, para fins de comparação e análise dos resultados, foram utilizados dois métodos de interpolação: IDW (Inverse Distance Weighted – Inverso da Distância Ponderada) e o mais utilizado neste tipo de estudo, Krigagem Ordinária. O procedimento de interpolação foi realizado com cada método para cada uma das cotas, tendo-se então dois métodos para cada cota e 55 cotas, foram gerados ao todo 110 mapas temáticos mostrando a distribuição do valor de N_{SPT} no espaço entre as sondagens, atribuindo, através de cada método, valores de N_{SPT} aos pontos onde não existe sondagem, baseando-se na correlação entre as sondagens existente de acordo com cada método.

Figura 4.6 – Geração do mapa temático do N_{SPT} para cota -15 m pelo método IDW.

Na Figura 4.6 é possível observar o resultado gerado pela interpolação de N_{SPT} pelo método IDW na cota -15 conforme se apresenta no programa. A imagem interpolada, com o valor de N_{SPT} classificado por cor, aplicado em transparência sobre a imagem aérea, torna clara a distribuição espacial de N_{SPT} na dada cota.

4.2.2 Tabelas de topo de camadas e mapas das camadas.

Além da cota, para a localização espacial do início de cada uma das camadas classificadas conforme Bastos (2014), o mesmo procedimento de seleção por atributo foi utilizado, dessa vez referindo-se a coluna contendo o topo da camada em questão, conforme mostra a Figura 4.7.

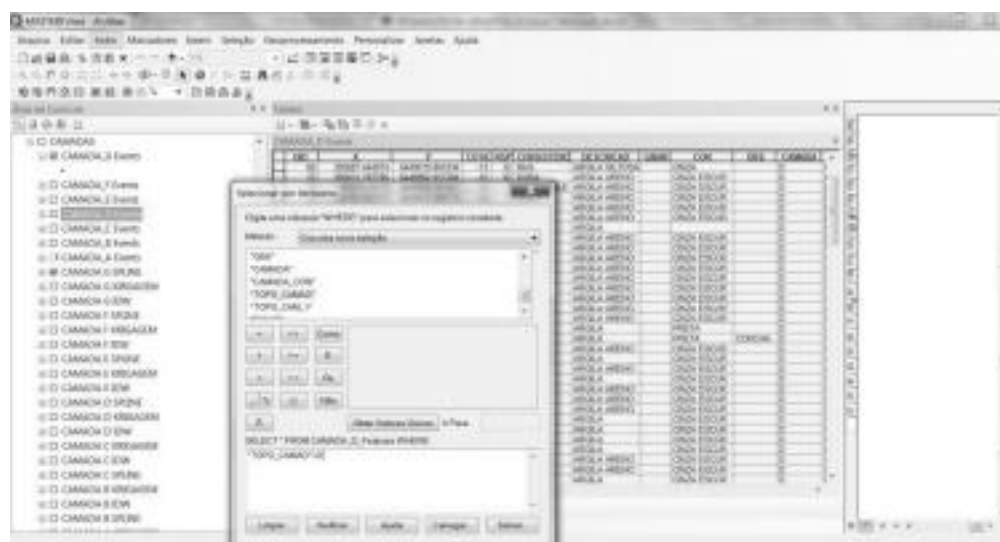


Figura 4.7 – Identificação do topo das camadas.

O programa separa apenas as linhas contendo a informação de que ali começa a camada em questão. Tem-se então uma tabela contendo a sondagem e todas as informações da cota correspondente ao início dessa camada. Mais uma vez, foi gerada uma nova tabela para cada topo de camada, conforme pode ser observado na coluna da esquerda. Analogamente ao procedimento com as cotas, criou-se então um mapa temático para cada uma das tabelas

contendo a cota do topo de cada uma das camadas. Para este resultado, além dos mapas contendo a distribuição das cotas através dos dois métodos de interpolação, também foram geradas, em outro módulo do ArcGIS, imagens tridimensionais mostrando a distribuição das cotas no espaço. O procedimento para a geração de tais imagens é baseado na geração dos mapas: os *layers* correspondentes à distribuição espacial foram inseridos no ArcScene, juntamente com as imagens aéreas e um arquivo contendo o perfil topográfico do terreno. Para que as diferenças de nível fossem mais bem observadas na escala da imagem em relação à área em que foram aplicadas, optou-se por extrapolar 10 vezes o valor de cada cota, procedimento demonstrado na Figura 4.8.

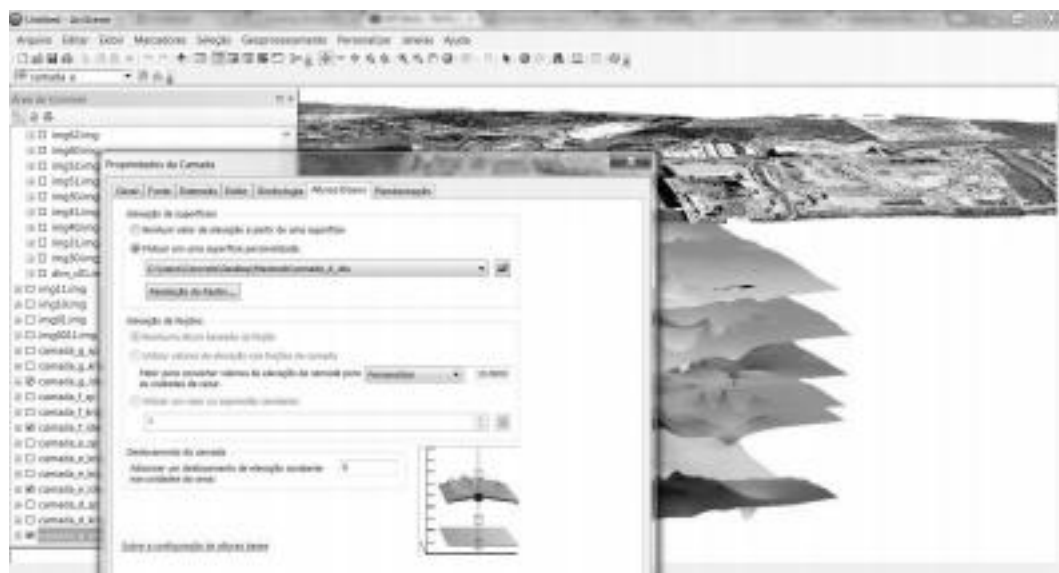


Figura 4.8 – Distribuição das camadas representadas tridimensionalmente no ArcSCENE.

O procedimento foi realizado com os dois tipos de interpolação, com objetivo de observar, também tridimensionalmente, como cada um deles se comporta, suavizando ou destacando variações.

4.2.3 N_{SPT} médio e localização das trocas de camadas

Outro recurso importante do ArcGIS é a possibilidade de exibir, com o recurso “Estatística”, dados referentes a qualquer conjunto de linhas ou colunas de uma tabela inserida no programa. Os dados referentes ao quantitativo, máximo, mínimo, média, desvio padrão e soma para cada coluna ou linhas aparecem organizados na janela, que conta ainda com um gráfico de distribuição de frequência. Obtendo-se, para cada camada o N_{SPT} médio, é possível gerar um gráfico mostrando sua distribuição da profundidade. O procedimento também foi aplicado sobre as 2 colunas COTA das tabelas referentes ao topo das camadas, assim foi possível determinar o valor, em média, das cotas onde ocorrem as mudanças entre as camadas. A Figura 4.9 mostra um exemplo de uso do recurso.

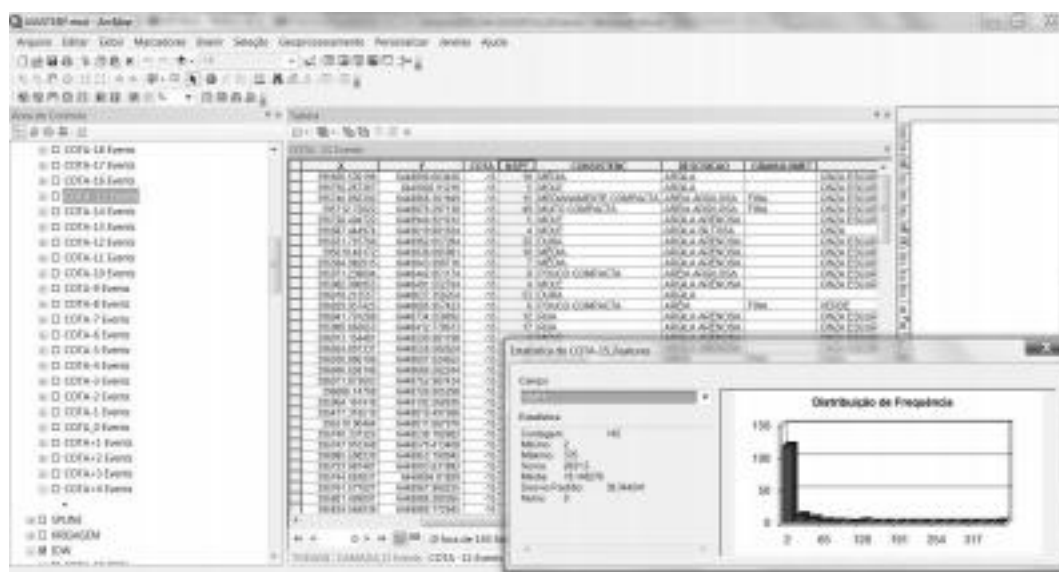


Figura 4.9 - Estatística; N_{SPT} médio da cota.

4.2.4 Inserção da tabela de capacidade de carga e geração dos gráficos

Foram consideradas nesta parte do estudo somente as sondagens onde foi possível identificar a camada G e, por se tratar justamente da capacidade de carga das estacas de fundação para a laje de fundo do dique, apenas as sondagens que foram feitas dentro da área do dique. A abordagem utilizada para a estimativa da capacidade de carga das foi extrapolar todas as sondagens até a cota -50 m (cota prevista para o assentamento das estacas), considerando o valor de N_{SPT} no trecho extrapolado igual a 50.

A tabela contendo então os dados de capacidade de carga em cada uma dessas sondagens, devidamente georreferenciadas, gerou através de interpolação os mapas mostrando a distribuição da capacidade de carga na área interna do dique. A Figura 4.10 mostra a inserção das informações para a geração dos mapas temáticos na interface do ArcMAP.

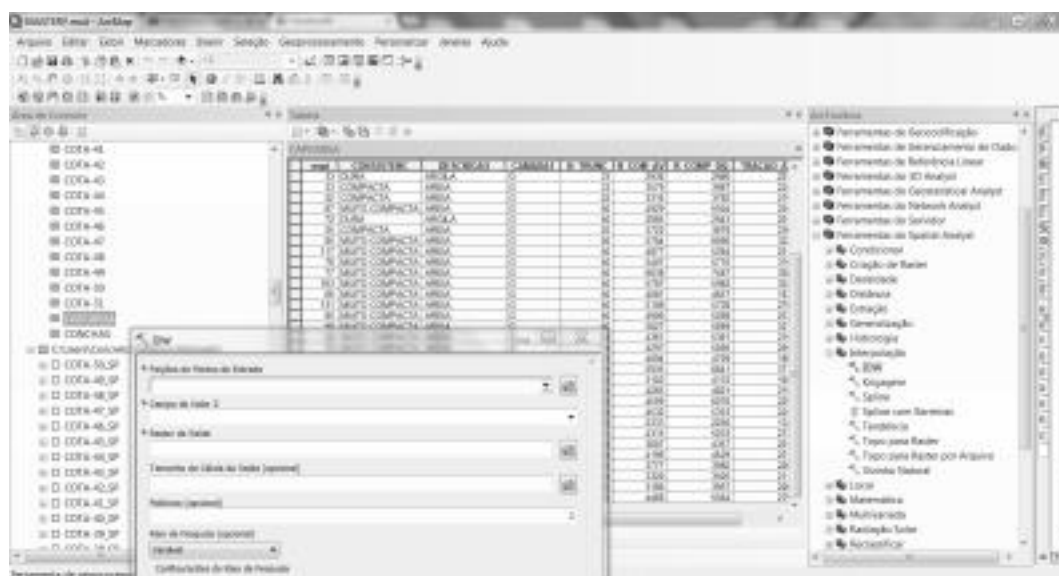


Figura 4.10 - Interpolação da capacidade de carga.

4.2.5 Mapas temáticos de ocorrências de gás e conchas

A partir da ferramenta de seleção por atributos, foi possível isolar as linhas da tabela referentes a ocorrências de gás natural e conchas. O procedimento de seleção de atributo é o mesmo das análises anteriores: são separadas da tabela principal todas as linhas onde é informada a presença de conchas ou gás natural.

As linhas isoladas contêm a localização espacial onde tais fenômenos foram observados, bem como todas as outras informações previamente contidas nessas linhas, permitindo assim gerar um mapa que mostre a localização espacial de tais ocorrências e ainda mostrar em cada ponto um rótulo contendo informações como cota e/ou camada.

A diferença dessa análise para as anteriores é que mais de um atributo foi considerado na seleção. Algumas empresas informavam ocorrência de conchas enquanto outras se referiam a essa ocorrência como “sedimentos marinhos”, embora este termo não seja o mais correto. Nesse grupo de mapas temáticos, ambos foram considerados. O comando “Select by Attribute” permite também que operadores lógicos como “OR” seja utilizado, e o resultado da busca serão linhas cuja coluna referente a estas ocorrências exiba tanto ‘CONCHAS’ quanto ‘SEDIMENTOS MARINHOS’, como demonstrado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Exemplo de seleção de mais de um atributo.

A tabela resultante tem então suas informações adicionadas sobre a imagem aérea de fundo. Junto da posição, no ponto de sondagem optou-se por informar as cotas e a camada onde ocorrem os fenômenos. Os atributos apresentados junto do ponto que marca na imagem a localização espacial da sondagem onde ocorrem os fenômenos é chamado pelo ArcGIS de “Label”. Qualquer atributo referente àquelas informações espaciais pode ser apresentado, mas também é possível criar uma expressão onde o resultado exibido será mais de um parâmetro, ou ainda parâmetros formatados com pontuação ou parênteses, além de outros tipos de edição. Nos mapas referentes à coucha, sedimentos marinhos e gás natural, optou-se por apresentar não só as cotas referentes aos acontecimentos, mas também a camada em que ocorrem. Um exemplo de geração de feição está ilustrado na Figura 4.12.



Figura 4.12 - Montagem de feição completa.

5. RESULTADOS.

Depois de organizada a planilha a ser utilizada como base para o estudo com todos os atributos possíveis de se extrair dos boletins de ensaio, somando-se a isso a identificação das camadas conforme a divisão proposta por Bastos (2014) e a distribuição da capacidade de carga da estaca tipo A dentro da área do dique, foram gerados mapas temáticos mostrando a ocorrência espacial de cada um desses itens e como eles se relacionam conforme os métodos de interpolação citados anteriormente.

5.1 OCORRÊNCIA DE CONCHAS E GÁS.

Utilizando as ferramentas do ArcGIS para separar e destacar eventos, foi criado um mapa temático destacando a ocorrência de Bolhas de Gás Natural e Conchas (também chamadas de “Sedimentos Marinhos”). A Figura 5.1 representa os furos de sondagem, a cota e a camada onde ocorreram. O retângulo desenhado na figura representa o perímetro do dique seco. Destacada em verde está uma ocorrência isolada de Bolhas de Gás Natural, que ocorreu de um dos furos no momento da sondagem. É possível observar que praticamente todos os furos de sondagem mostraram pelo menos uma ocorrência de Conchas e Sedimentos Marinhos. Este resultado é um exemplo de que qualquer evento que for julgado pertinente a alguma análise pode ser destacado e especializado com o uso das ferramentas de geoprocessamento.

Na área do dique, a presença de conchas foi marcante nas camadas D e F, que mostram preponderância de argila siltosa em suas composições. Esse fato apoia a ideia de que as camadas argilosas do perfil estratigráfico foram depositadas em períodos de transgressão marinha, quando estas áreas de deposição estavam submersas e submetidas a condições de baixa energia de ondas.

Observação semelhante foi feita por Pereira et al. (1998) para as argilas orgânicas de Recife. Os autores observaram que as amostras de argila orgânica muito mole obtidas durante

três campanhas de sondagem executadas no bairro do Ibra, em Recife, continham conchas de moluscos. Na análise das conchas (identificação e espectrometria de massa), os autores avaliaram a influência do mar no processo de deposição que formou o depósito. As variações do nível do mar, no caso relacionadas com os chamados eventos transgressivos, influenciaram diretamente a migração da linha de costa condicionando os processos costeiros. Conchas e moluscos são muito importantes na datação de sedimentos marinhos, sendo considerados como fósseis guias, ou seja, aqueles que dão a idade de camadas onde são encontrados.

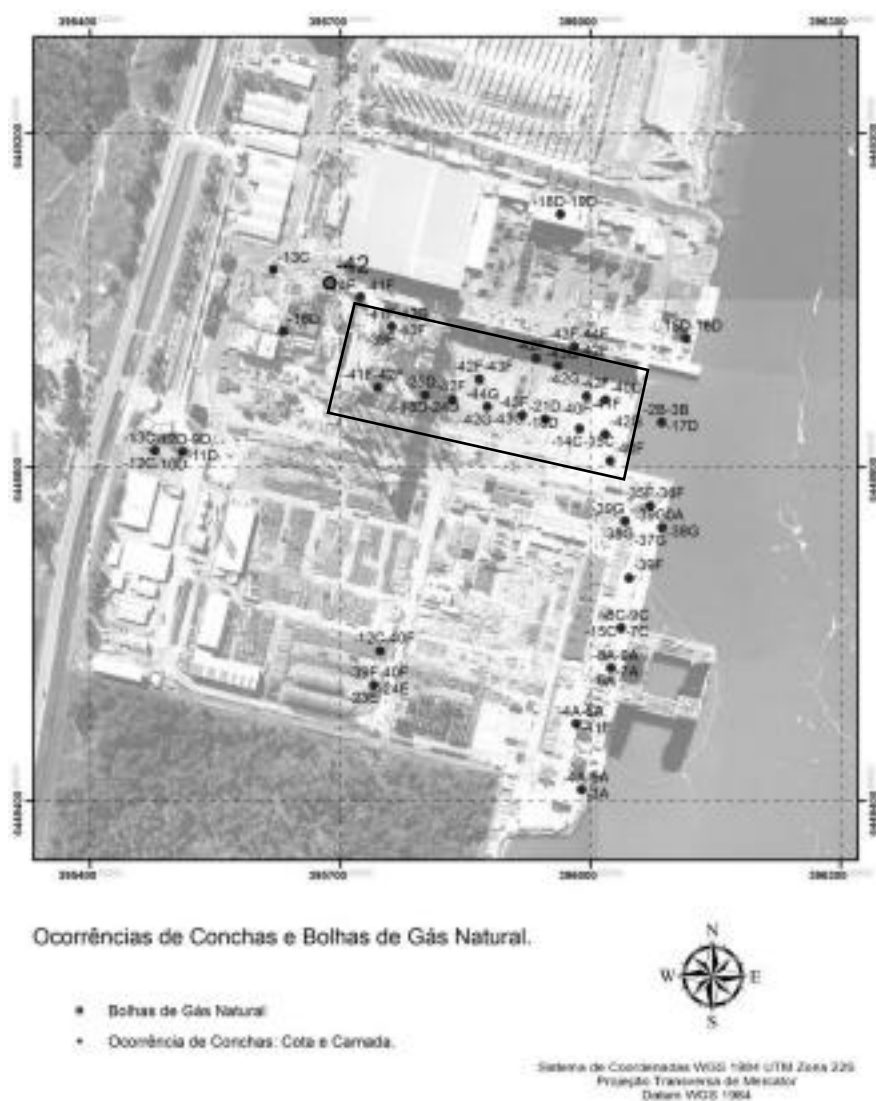


Figura 5.1 – Ocorrência de conchas e gás natural

5.2 INTERPOLAÇÕES

5.2.1 Superfície freática

Utilizando os dados dos furos de sondagem nos quais o nível do lençol freático estava indicado, foi gerada interpolação da superfície freática através dos dois métodos adotados neste estudo. Das 147 sondagens utilizadas neste estudo, 54 apresentavam dados sobre a cota do lençol freático.

A Figura 5.2 representa a interpolação pelo método IDW com peso 2. Todos os 54 pontos foram considerados na análise e o resultado tende a manter mais concentrados os valores que destoam dos demais. O resultado é uma superfície relativamente uniforme, mas ainda valorizando os picos.

A Figura 5.3 representa a interpolação pelo método Krigagem Ordinária. Este método de interpolação tende a minimizar a importância dos picos na análise, mostrando a superfície freática mais suave e uniforme do que os demais.

A Tabela 5.1 abaixo mostra os parâmetros estatísticos dos dados utilizados para a interpolação do Nível do Lençol Freático.

Tabela 5.1 - Parâmetros estatísticos do NA

Total de Furos Analisados	54
Cota do N.A. Máxima (m)	2,8
Cota do N.A. Mínima (m)	-4,7
Cota Média (m)	0,49
Desvio Padrão	1,73

Cabe ressaltar que as sondagens foram realizadas em diferentes períodos do ano, refletindo portanto diferentes posições do nível freático, e que durante a execução da obra haviam sistemas de rebaixamento de lençol freático em ação.

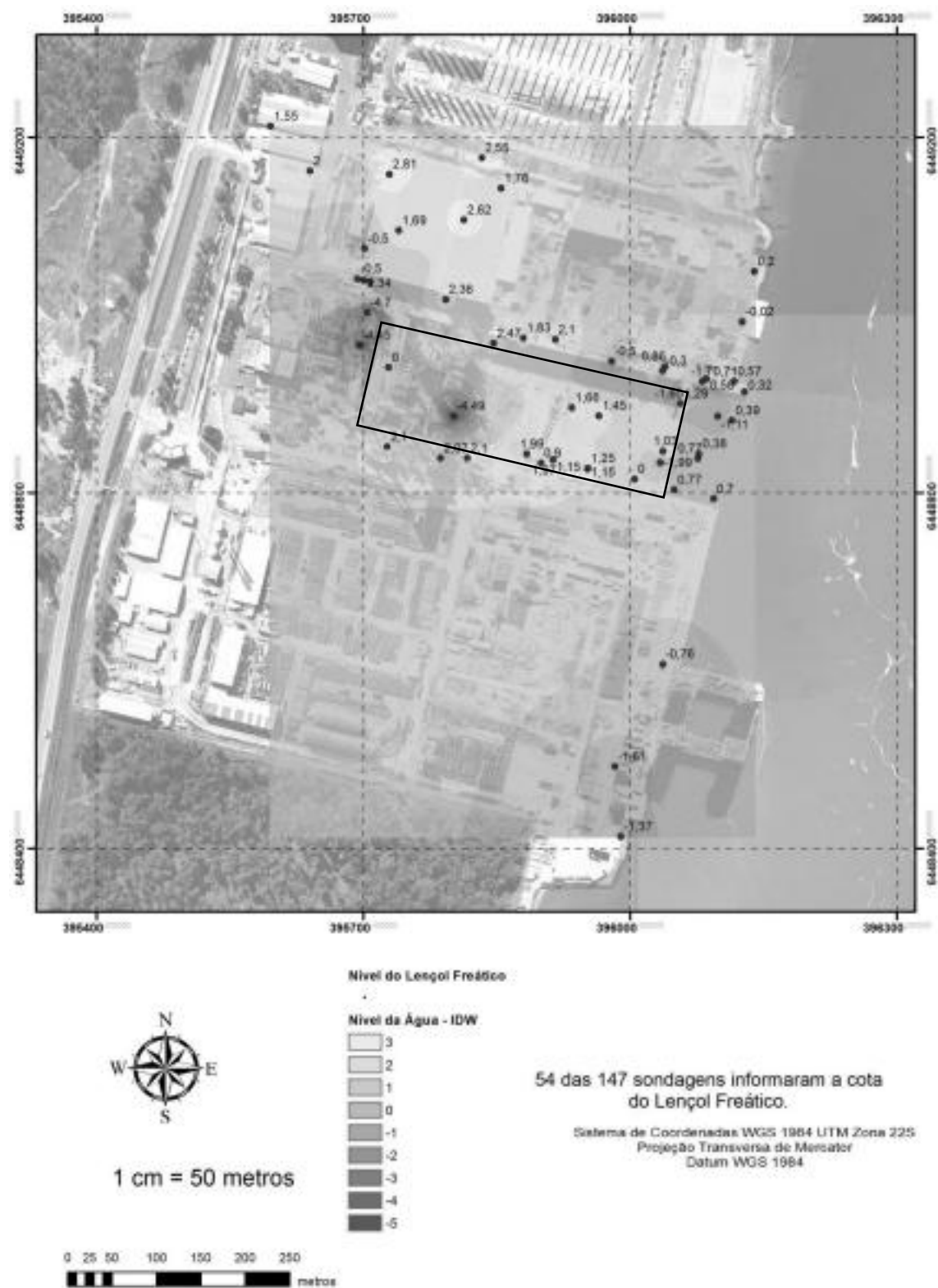


Figura 5.2 - Nível da água pelo método IDW.

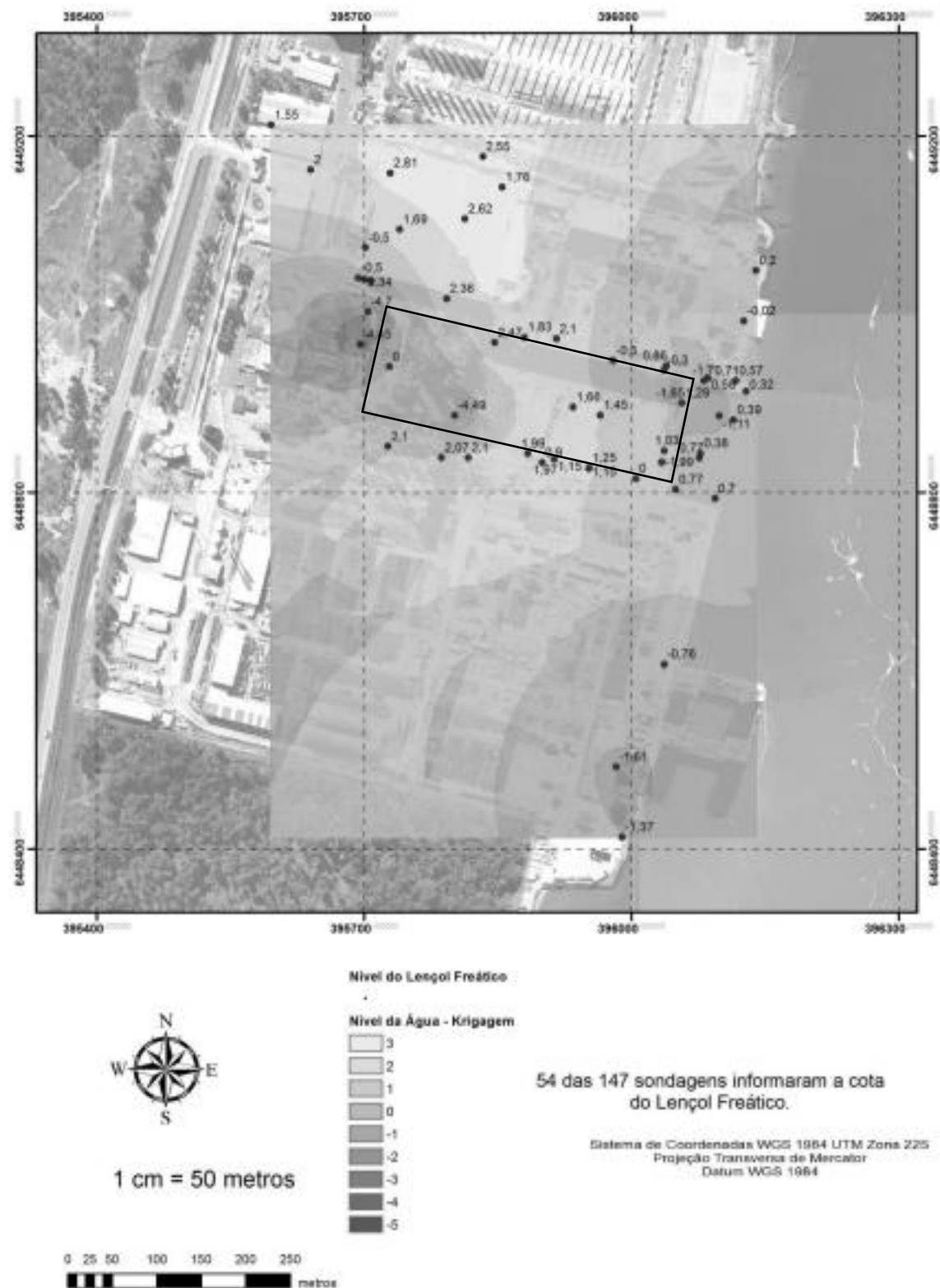


Figura 5.3 - Nível da água pelo método Krigagem.

5.2.2 Superfície do topo das camadas.

Partindo da divisão das camadas proposta por Bastos (2014), foram identificadas as cotas onde se originavam cada uma das sete camadas, baseadas nas descrições de cada amostra presentes nos boletins de sondagem e nos valores de compactidade ou consistência estimados através do valor de N_{60} . Todos os 147 boletins de sondagem foram analisados para obtenção desse resultado, mas vale destacar que nem todos contavam com informações suficientes para determinar a ocorrência das camadas. Apenas em 16 sondagens foi possível identificar, com base nas informações presentes nos boletins, a camada B. Este fato, para os métodos de interpolação, significa a diminuição das amostras para considerar na geração das superfícies e influencia a confiabilidade do resultado gerado.

As Figuras 5.4 a 5.10 representam a interpolação da superfície das camadas através do método IDW. A Figura 5.6, destaca a característica do método em preservar a importância de cada amostragem individual e gerar uma superfície que se aproxima gradualmente do valor da próxima amostra. Nas Figuras 5.8 e 5.9 é possível observar que amostras com valor de cota destoantes de sua vizinhança ainda são considerados, gerando picos de maior ou menor intensidade dependendo da distância às amostras vizinhas.

As Figuras 5.11 a 5.17 representam a superfície das camadas interpoladas através de Krigagem Ordinária. Este método suaviza a superfície gerada com mais ou menos intensidade de acordo com o número de pontos presentes na análise, conforme se visto pela Figura 5.12, onde as diferenças foram mais preservadas devido ao menor número de pontos disponíveis para análise, em contraste com a Figura 5.16 que teve seus picos suavizados.

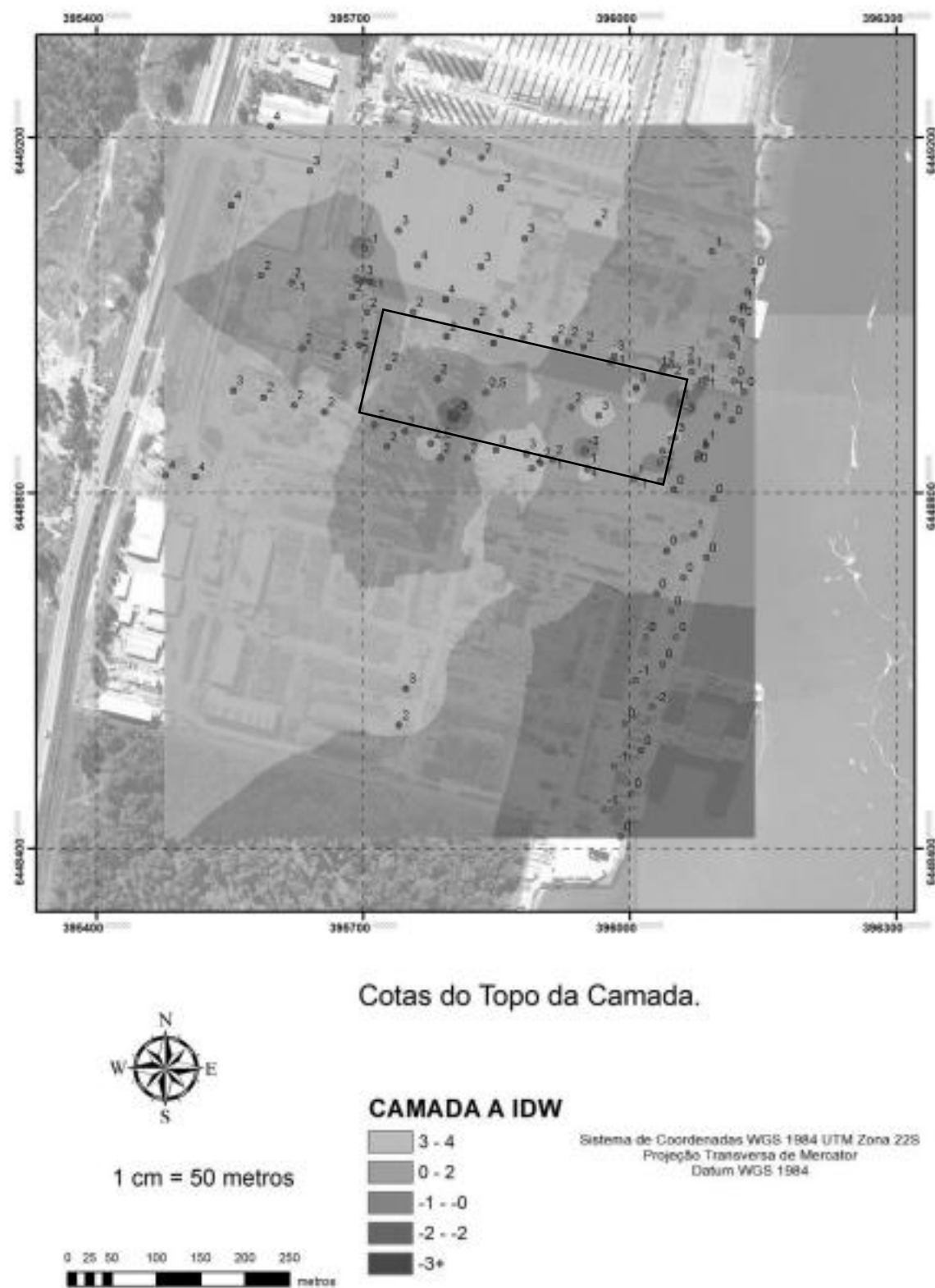


Figura 5.4 - Cota do topo da camada A pelo método IDW.

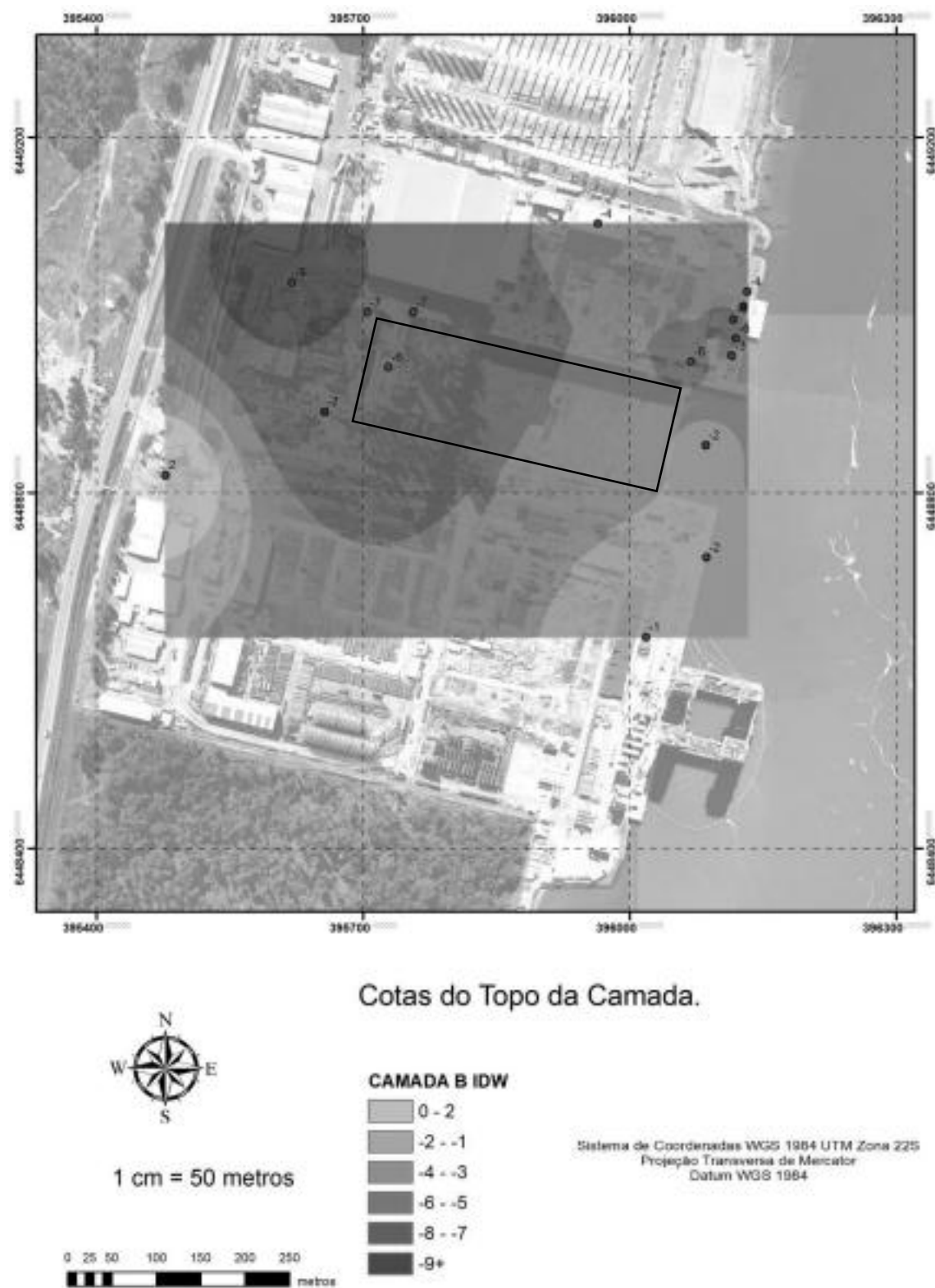


Figura 5.5 - Cota do topo da camada B pelo método IDW.

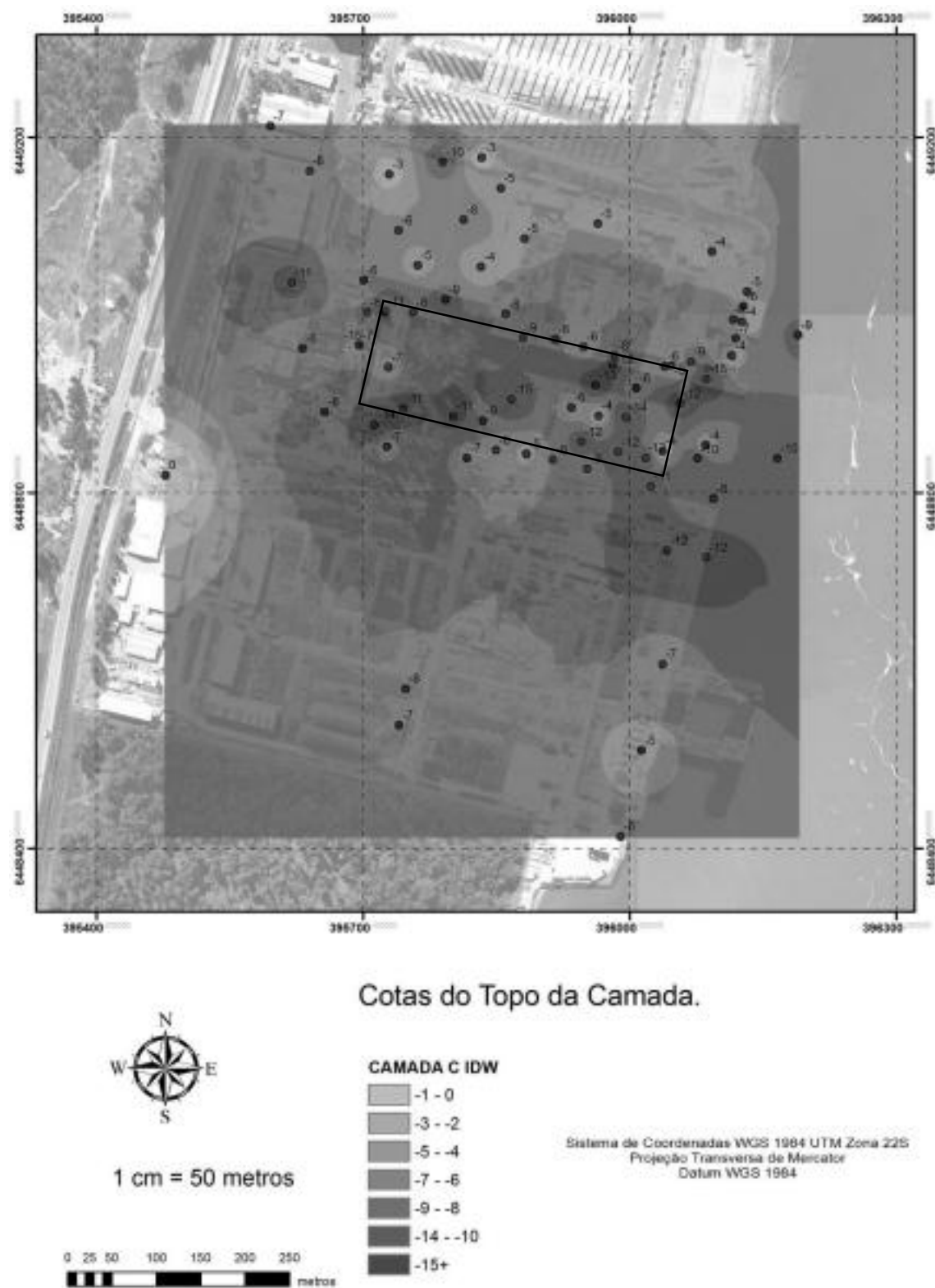


Figura 5.6 – Cota do topo da camada C pelo método IDW.

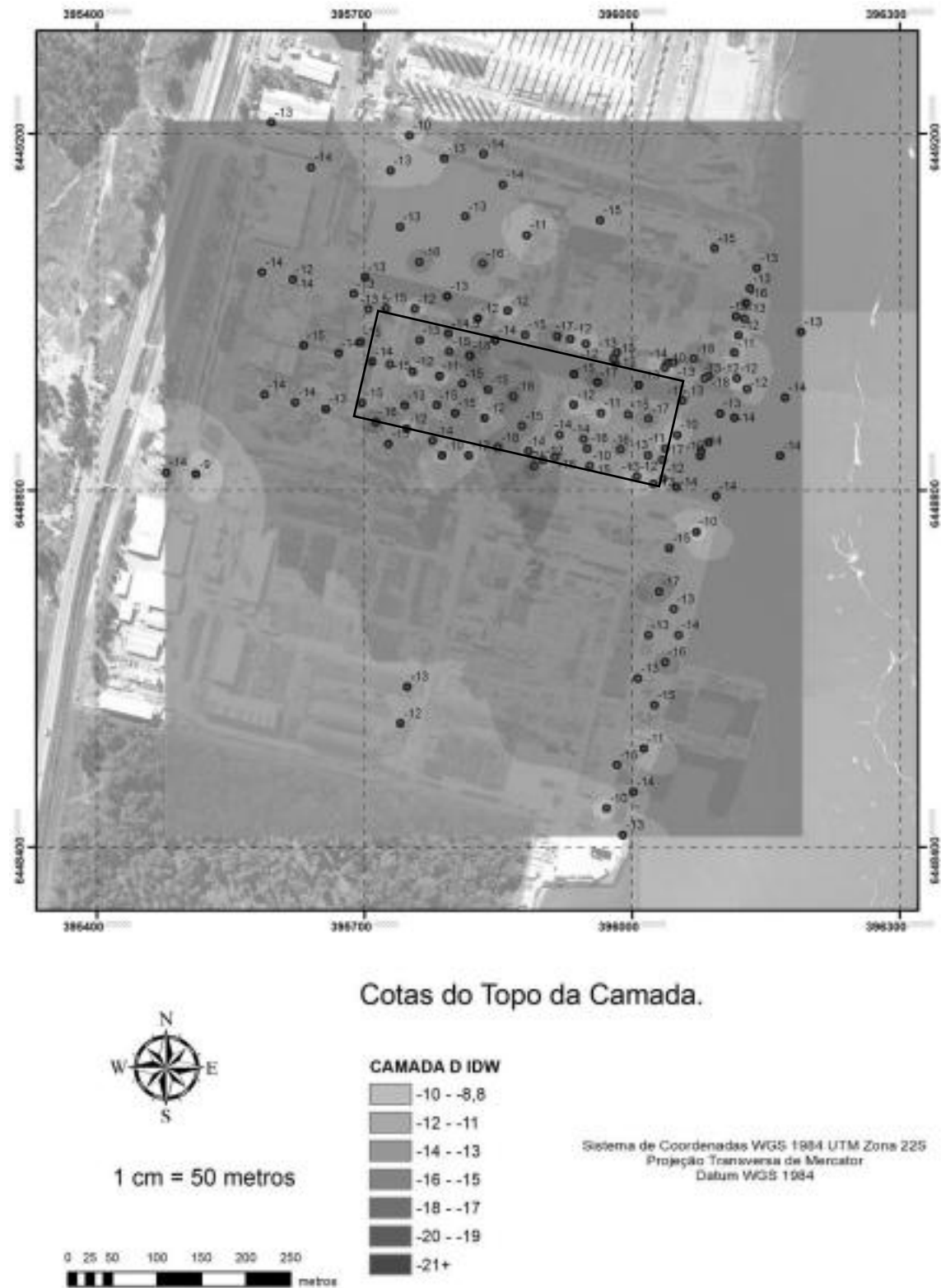


Figura 5.7 – Cota do topo da camada D pelo método IDW.

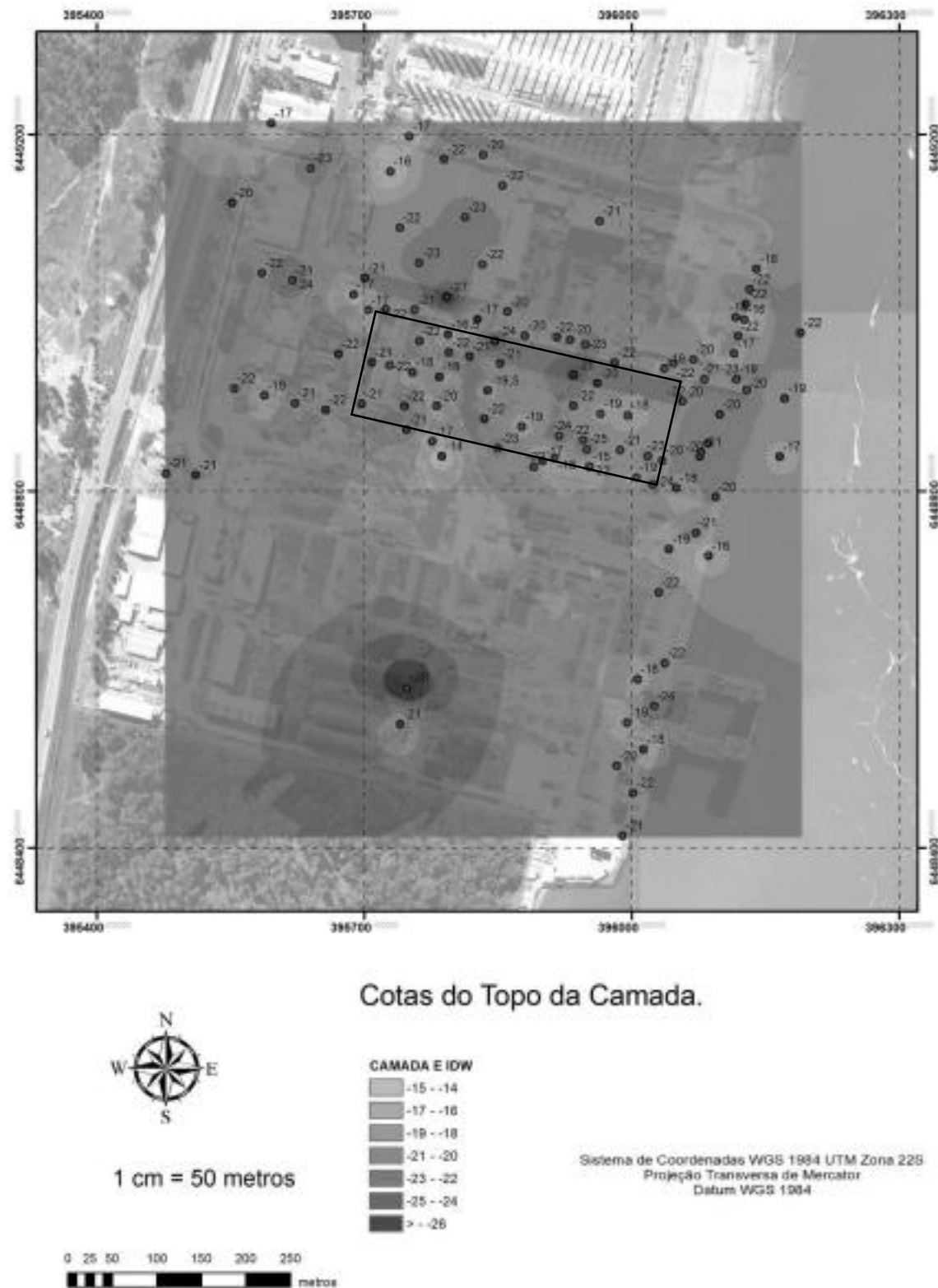


Figura 5.8 – Cota do topo da camada E pelo método IDW.

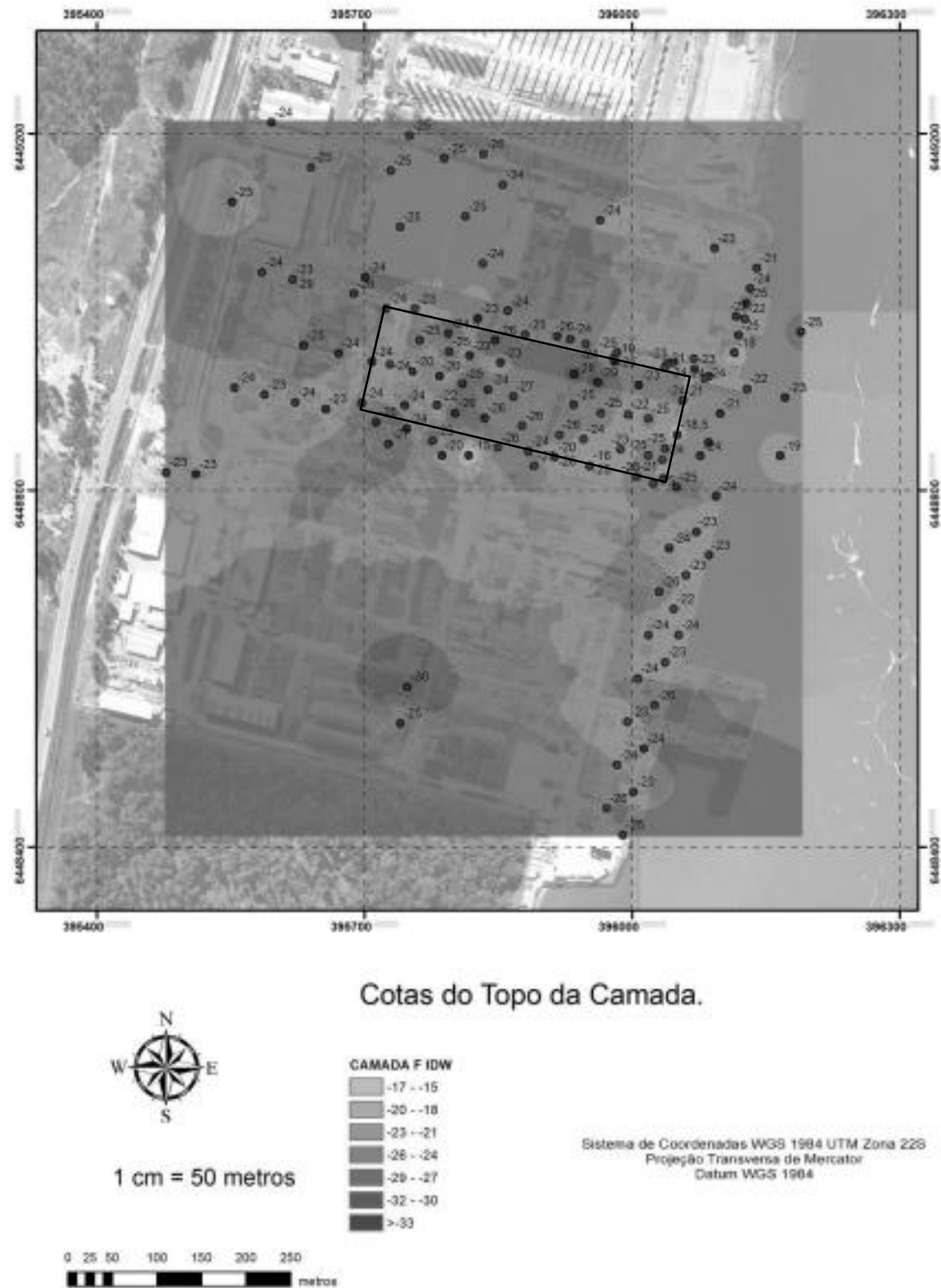


Figura 5.9 – Cota do topo da camada F pelo método IDW.

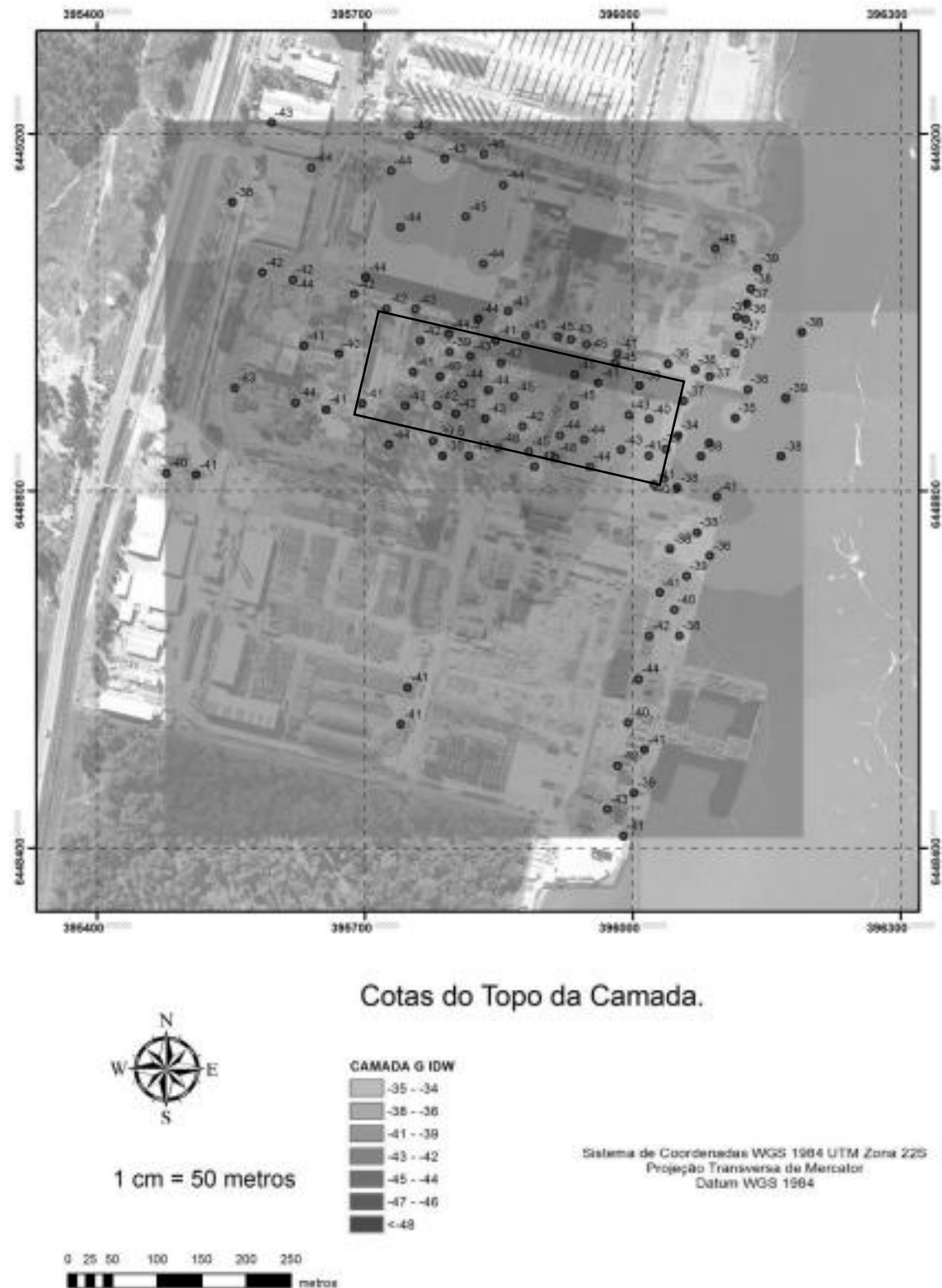


Figura 5.10 – Cota do topo da camada G pelo método IDW.

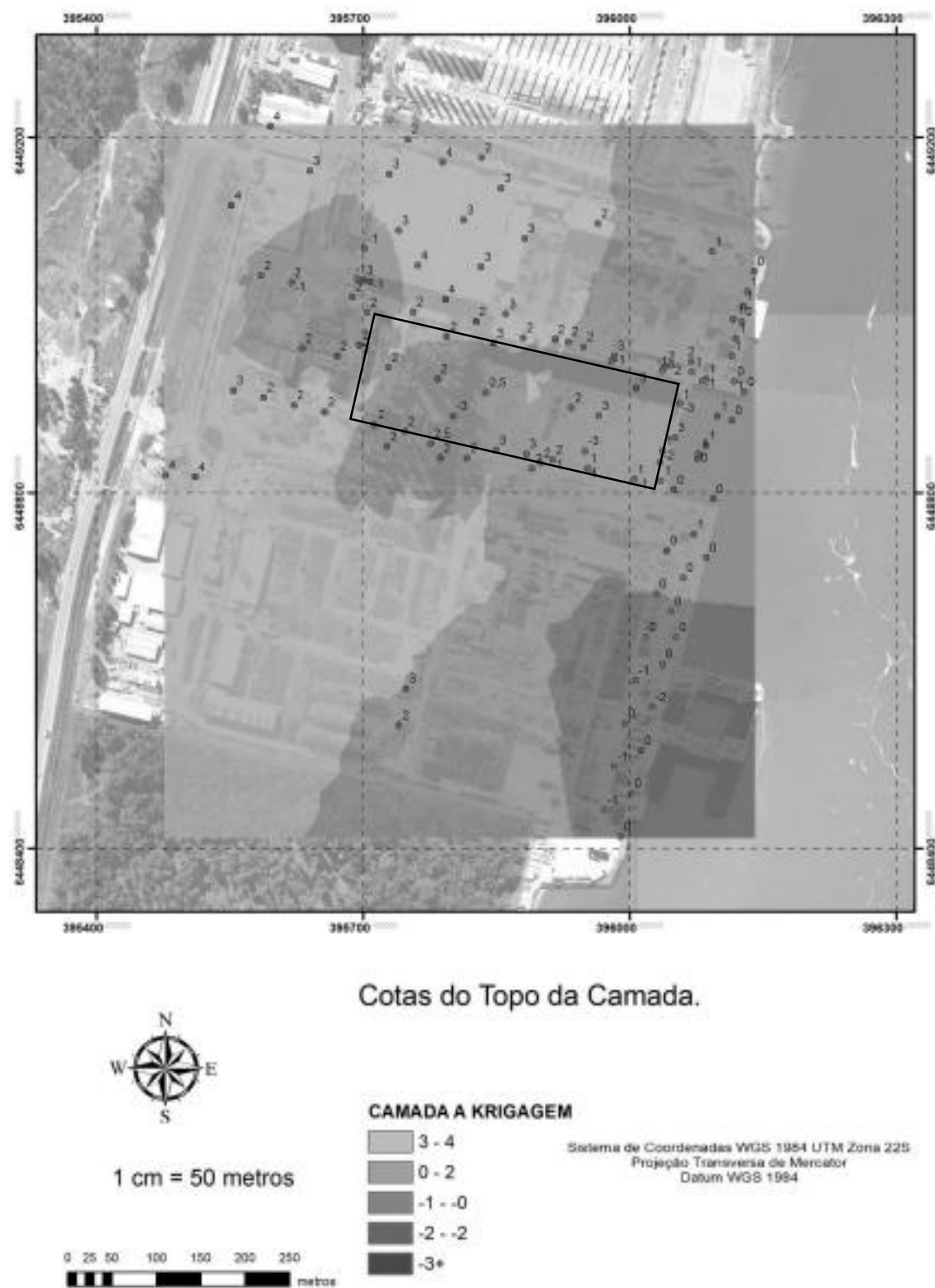


Figura 5.11 – Cota do topo da camada A pelo método Krigagem.

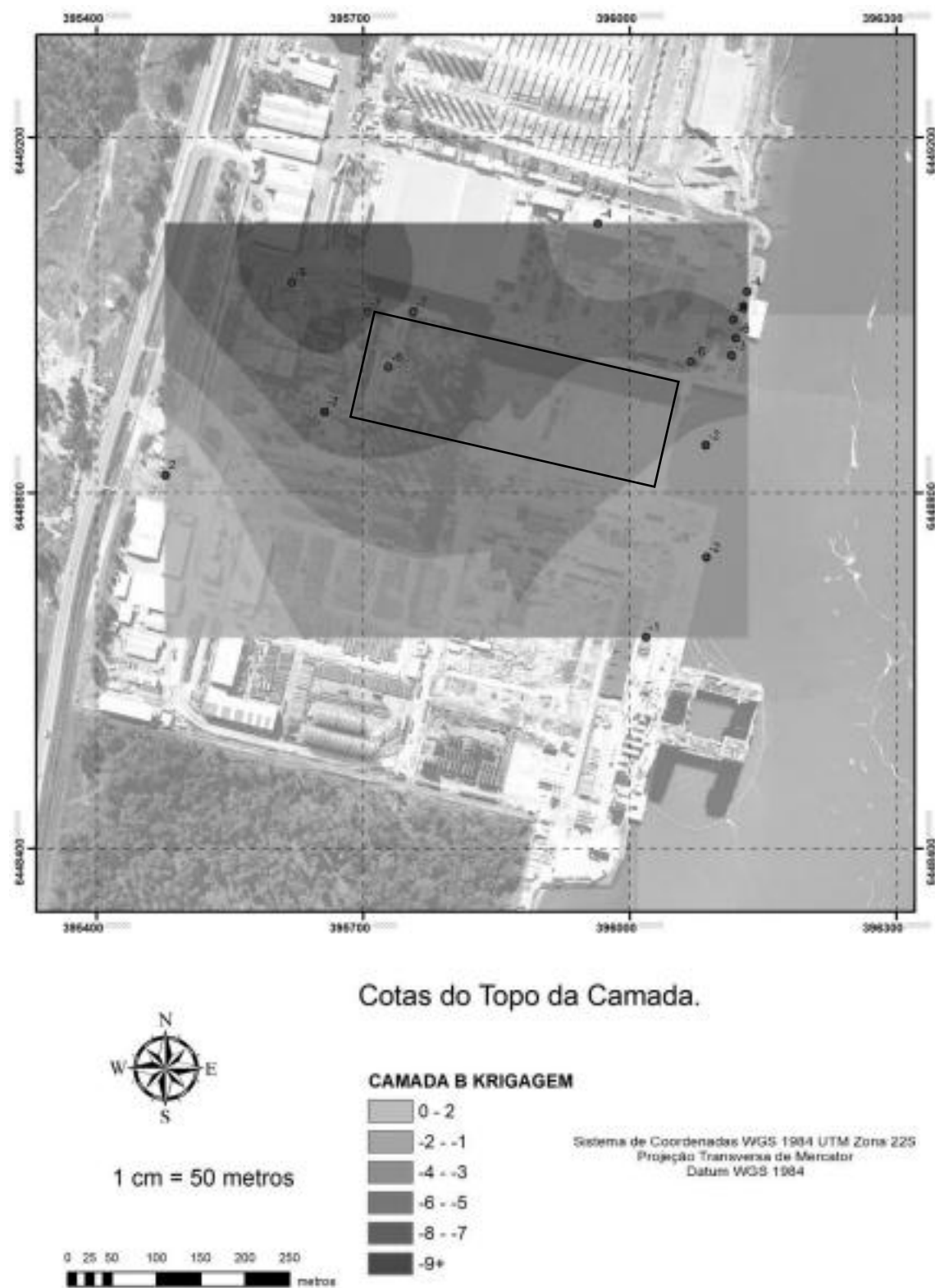


Figura 5.12 – Cota do topo da camada B pelo método Krigagem.

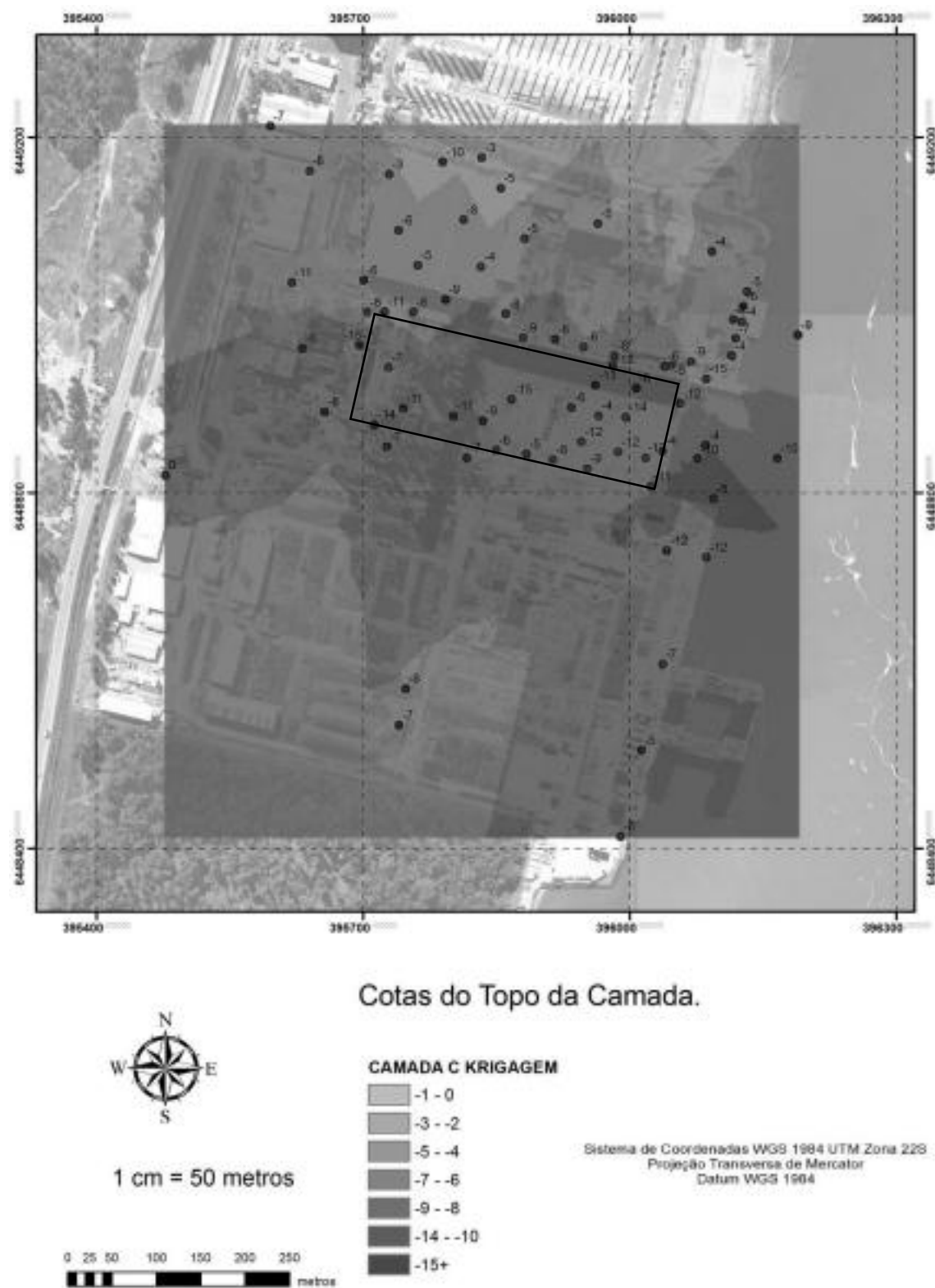


Figura 5.13 – Cota do topo da camada C pelo método Krigagem.

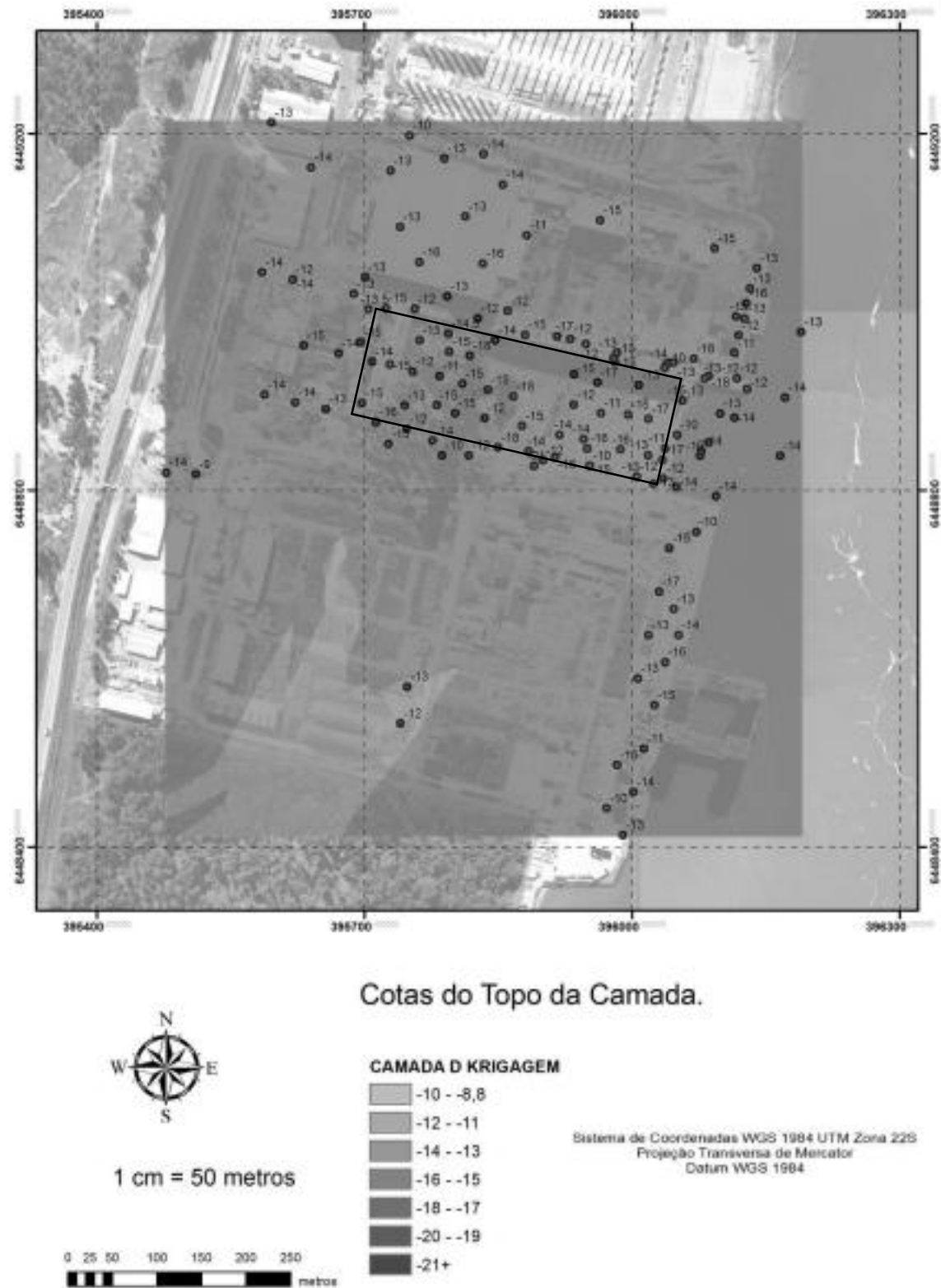


Figura 5.14 – Cota do topo da camada D pelo método Krigagem.

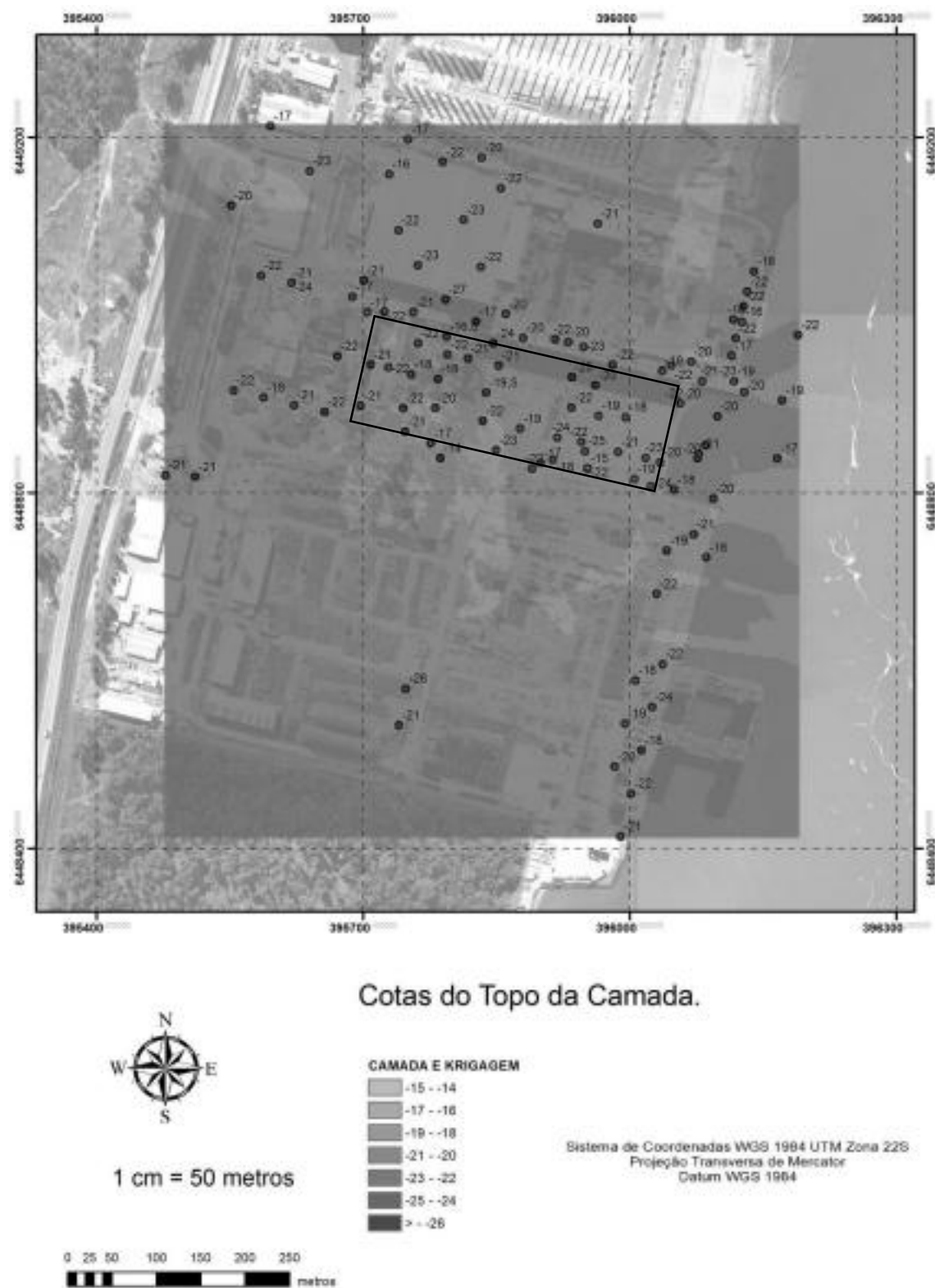


Figura 5.15 – Cota do topo da camada E pelo método Krigagem.

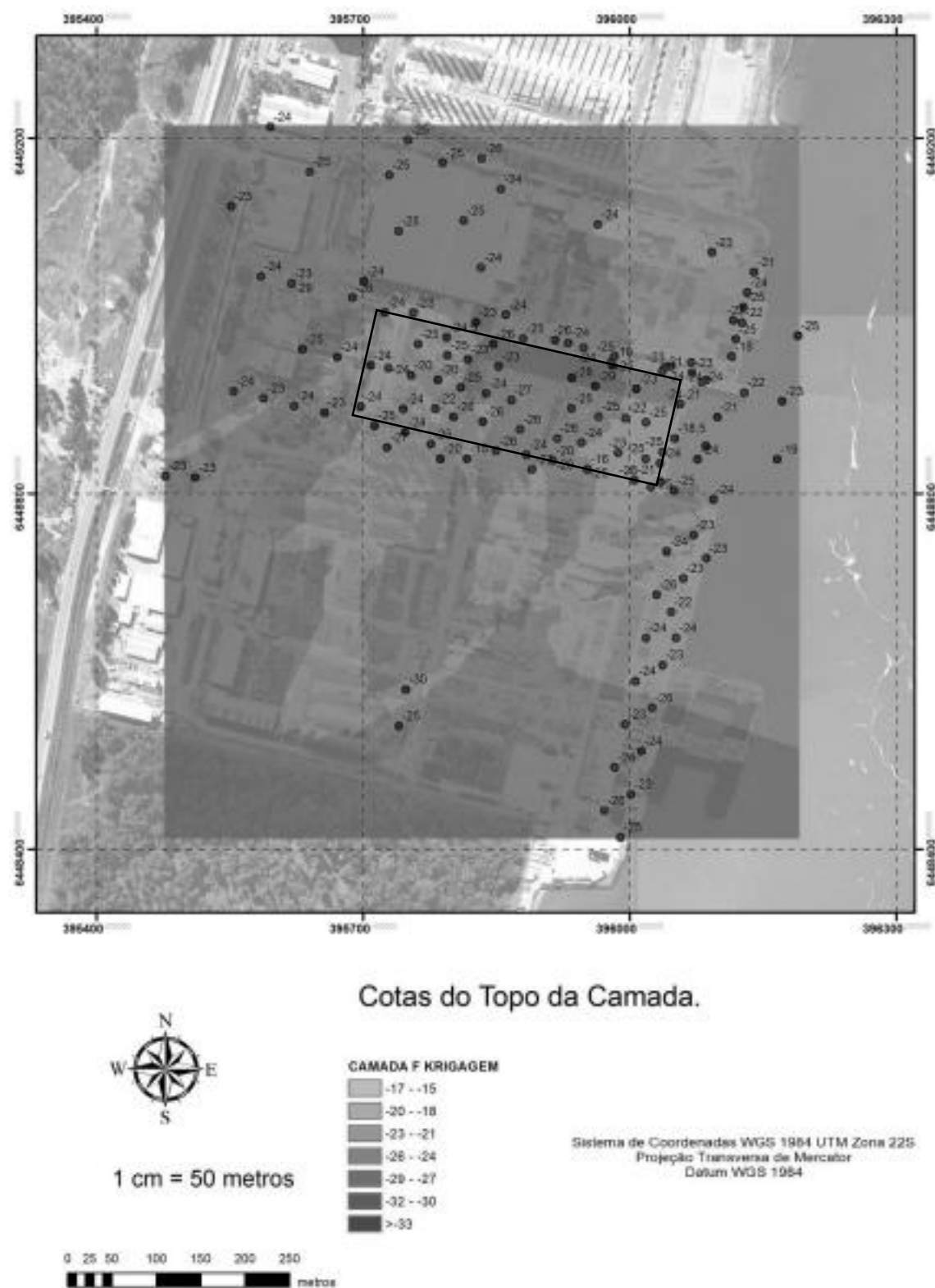


Figura 5.16 – Cota do topo da camada F pelo método Krigagem.

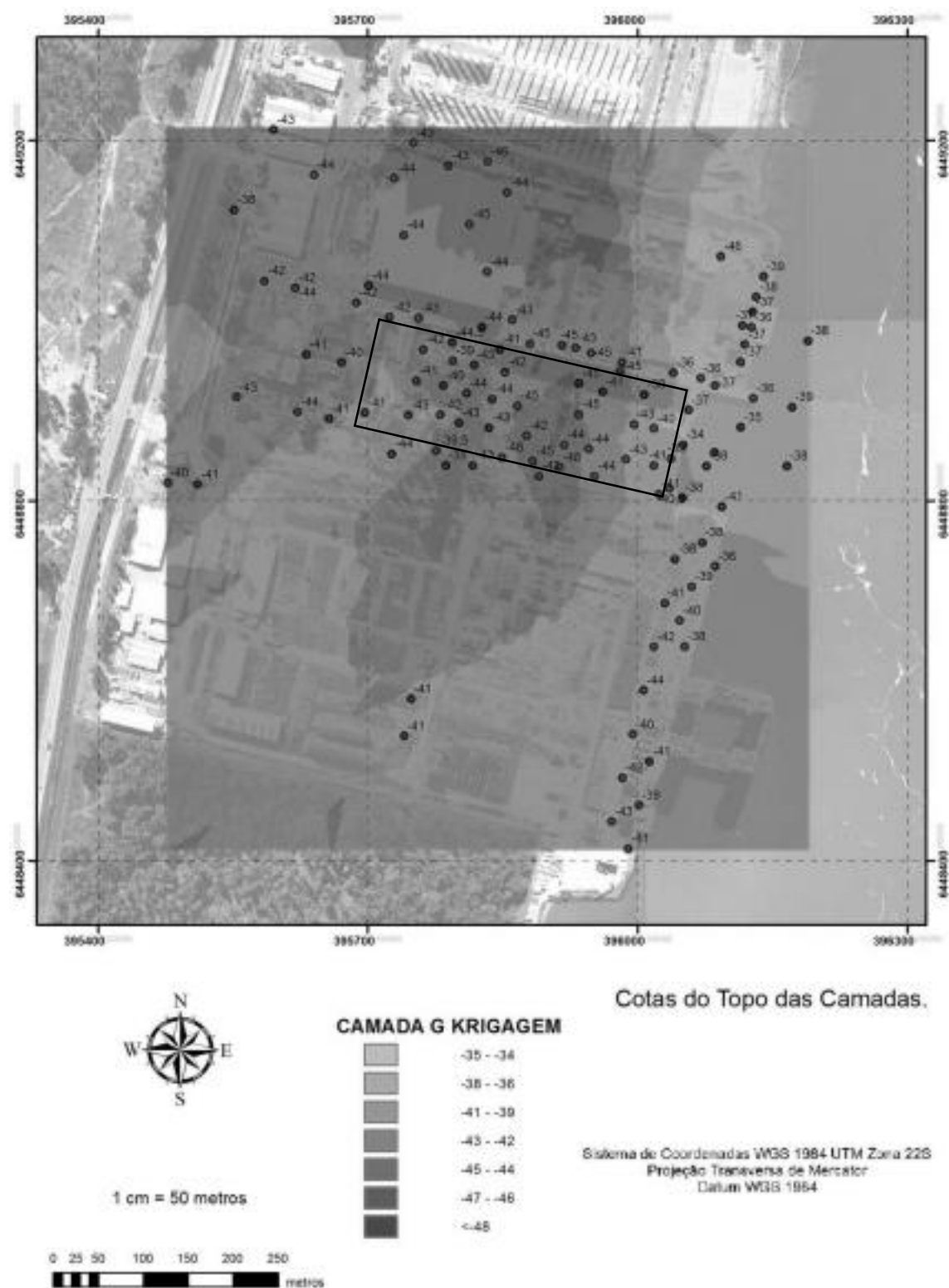


Figura 5.17 – Cota do topo da camada G pelo método Krigagem.

A Tabela 5.2 mostra os parâmetros estatísticos dos dados utilizados na geração das interpolações das superfícies das camadas. É possível observar que as cotas médias do topo das camadas se aproximam muito das cotas médias definidas por Bastos (2014), sendo a maior discrepância (mesmo que pequena) presente na camada B. Isso pode ser justificado pelo fato desta camada ter sido a mais difícil de identificar através das informações presentes nos boletins de sondagem analisados, tendo assim o menor número de amostras utilizadas na geração da superfície. Também se percebe que nem todas as camadas estavam presentes na identificação das 147 sondagens. Isso aconteceu porque nem todas as sondagens começaram na superfície e se estenderam até a atingir a camada G. Várias sondagens foram realizadas depois da escavação do dique, sendo assim começavam além da cota -10 m. Várias outras sondagens foram mais superficiais, de acordo com as estruturas que os locais iriam receber, e se encerraram bem antes de atingir a camada F. Apesar das diferenças entre as cotas máximas e mínimas das camadas, o desvio padrão é baixo, mostrando que a dispersão da média não foi grande.

Tabela 5.2 - Parâmetros estatísticos do topo das camadas.

	Camada A	Camada B	Camada C	Camada D	Camada E	Camada F	Camada G
Total de Faros	19	16	75	137	114	31	11
Cota Mínima (m)	-3	-9	-12	-21	-28	-30	-48
Cota Máxima (m)	4	2	0	-9	-14	-15	-34
Média (m)	1,31	-4,2	-1,91	-13,6	-20,55	-23,8	-41,27
Desvio Padrão	1,59	2,72	3,2	1,96	2,41	2,21	2,99

5.2.3 Vista das camadas em corte

A superfície de cada camada também pode ser observada horizontalmente. Como mostrado na Figura 5.18, dois cortes, um transversal e outro longitudinal, tornam possível montar um gráfico mostrando a distribuição dos limites das camadas que compõem o subsolo da área. Na figura, o círculo preto se refere ao lado esquerdo do gráfico, mais próximo a estrada no corte longitudinal e ao norte no corte transversal, enquanto o círculo vermelho se refere ao lado direito do gráfico, mais próximo da lagoa no corte longitudinal e ao sul no corte transversal. Dependendo do método de interpolação utilizado, o limite da superfície apresenta

um contorno diferente. Na análise a seguir também é possível perceber que a cota média de cada camada representa bem a divisão proposta por Bastos (2014).

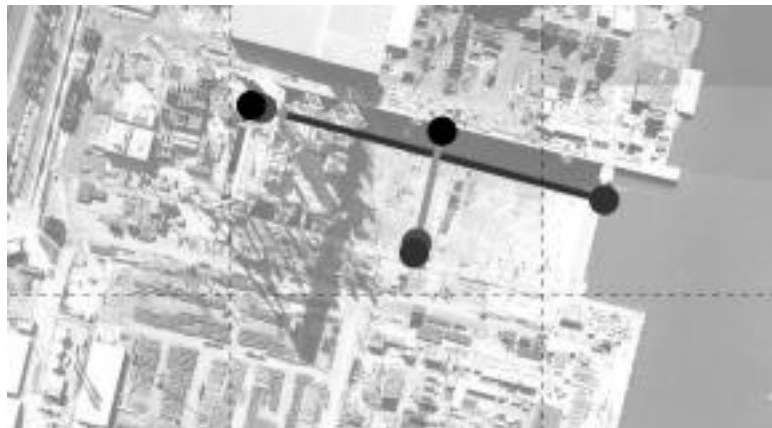


Figura 5.18 - Cortes transversal e longitudinal

Os gráficos representados nas Figuras 5.19 e 5.20 mostram a distribuição horizontal das camadas conforme o método de interpolação IDW com peso 2. Está visível a tendência do método em suavizar a superfície, mas ainda mantendo os picos. Também é possível observar no gráfico representante do corte longitudinal (Figura 5.19) que existe uma tendência das camadas F e G a ocupar uma cota mais alta conforme aumenta a proximidade com a lagoa. No corte transversal, a superfície das camadas é bem uniforme, não sendo notado nenhum forçante.

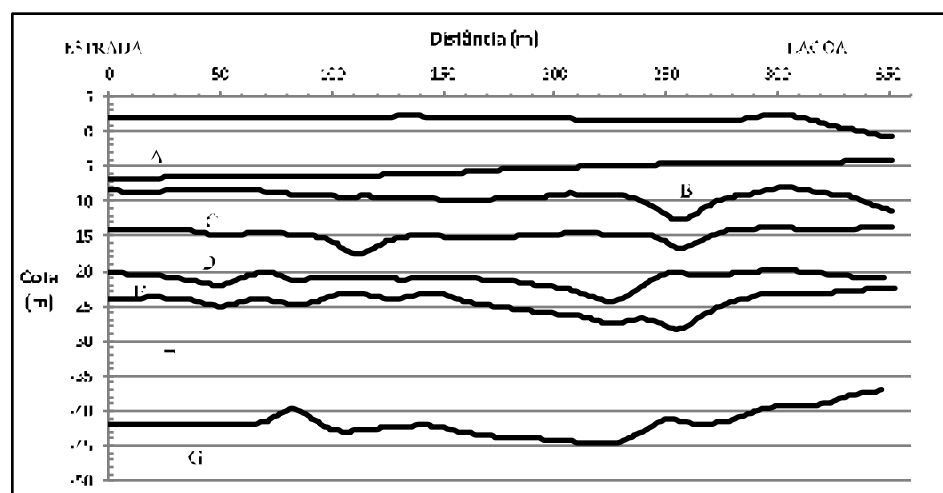


Figura 5.19 - Identificação das camadas interpoladas por IDW no corte longitudinal.

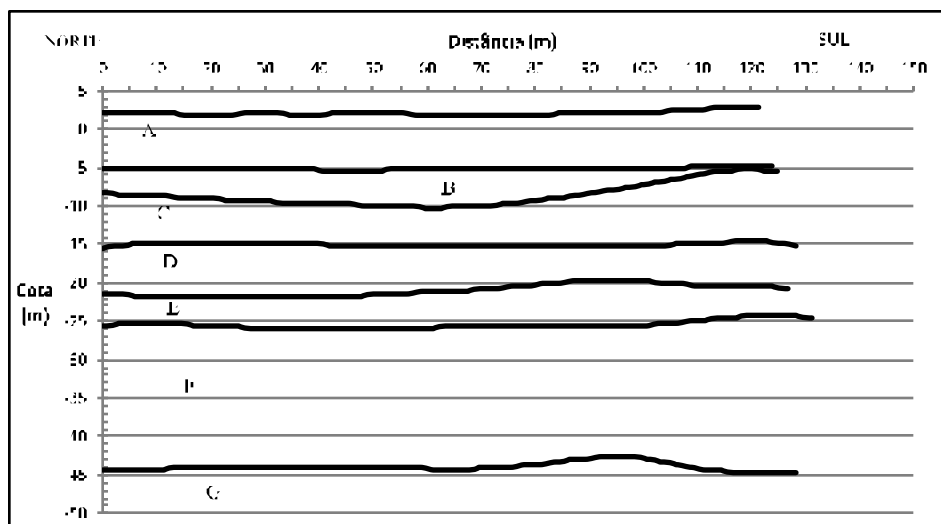


Figura 5.20 - Identificação das camadas interpoladas por IDW no corte transversal.

As Figuras 5.21 e 5.22 representam, respectivamente, os cortes longitudinais e transversais nas superfícies geradas pelo método de Krigagem Ordinária. Apesar de ser o método que representa as superfícies geradas de forma mais suavizada, ainda é possível observar que, assim como mostrado no método IDW, existe uma tendência no corte longitudinal do topo das camadas F e G de ascender em direção à Lagoa. Também é possível observar que o corte transversal não apresenta nenhuma forçante, resultando em uma superfície bem uniforme,

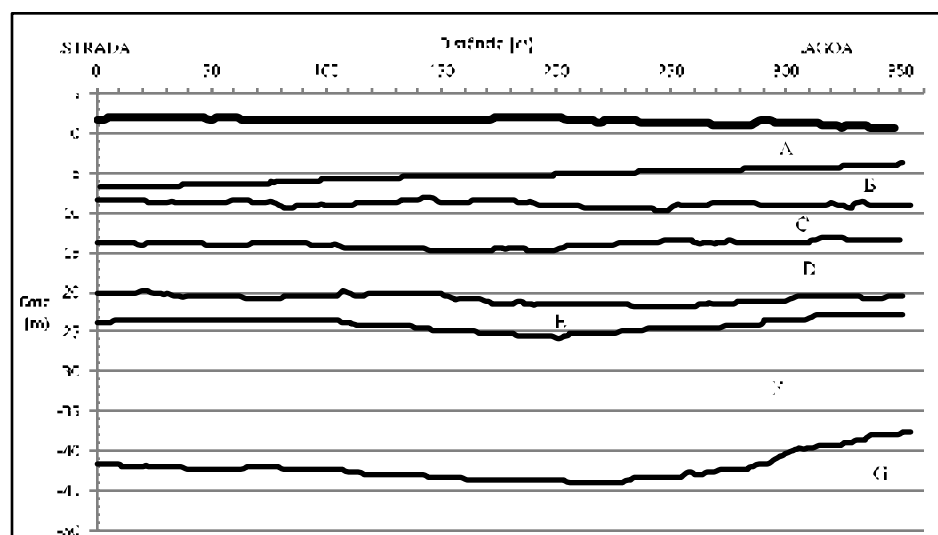


Figura 5.21 Identificação das camadas interpoladas por Krigagem no corte longitudinal.

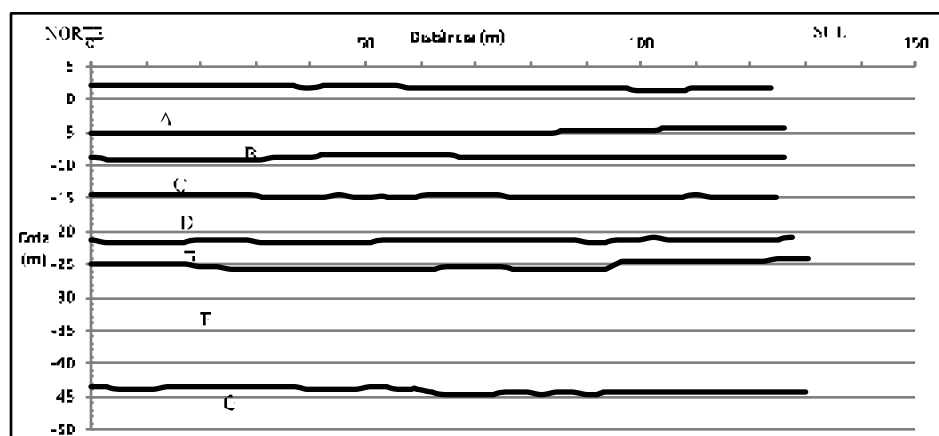


Figura 5.22- Identificação das camadas interpoladas por Krigagem no corte transversal.

A tendência de subida do topo das camadas F e G em direção à lagoa, demonstrada nos cortes longitudinais, tem relação com o processo deposicional da região, bastante complexo em face da influência do oceano, por um lado, e da Laguna dos Patos, por outro. As cotas do topo da camada G também sobem ligeiramente em direção à parte de trás do dique (mais próxima à estrada). Estes fatos indicam que as estacas da laje de fundo, que devem atingir cotas em torno de -50 m terão mais dificuldade em serem cravadas nas regiões frontal (próximo à porta batel) e traseira do dique, devido às cotas mais altas do topo da camada G nestas áreas.

Os vales observados nos resultados com o método IDW podem ser associados a possibilidade de existência de paleocanais resultantes do processo deposicional. O método de Krigagem acaba atenuando esses picos e vales, o que pode dificultar a identificação dos mesmos.

5.2.4 Imagens tridimensionais a partir das superfícies interpoladas

Outra possibilidade de visualização do topo das camadas é a geração de imagens tridimensionais com base nas superfícies interpoladas de cada camada. Neste caso, foi usado o módulo ArcScene10, que permite a visualização tridimensional dos modelos gerados. Como as variações das cotas topográficas das superfícies são pequenas em relação ao tamanho da área utilizada, as superfícies geradas inicialmente assumem um aspecto plano, podendo ser

percebidas as variações de cota apenas com distorção de escala. Isso acontece também pois a variabilidade dos valores interpolados é pequena.

Para uma melhor visualização as cotas foram aumentadas dez vezes e as camadas espaçadas 50 metros além da distância natural entre elas. Assim é possível uma visualização clara da diferença de relevo nas superfícies e de como o método de interpolação gera superfícies mais ou menos suavizadas (Figuras 5.23 e 5.24).

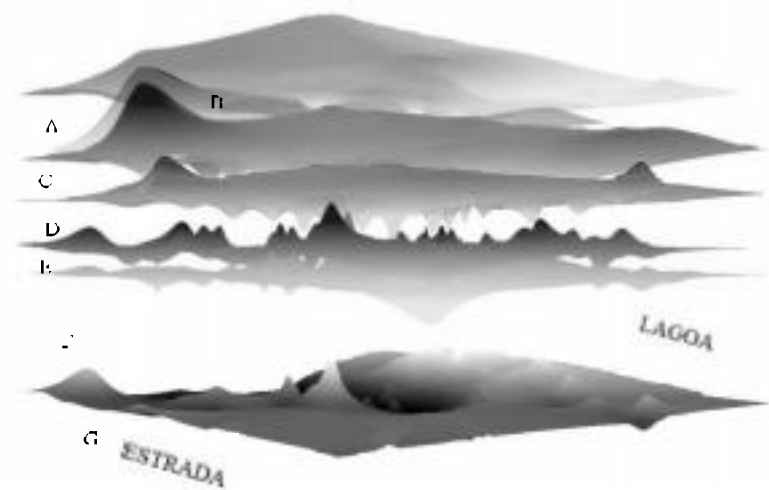


Figura 5.23 – Sobreposição das camadas do subsolo gerada através do método IDW.

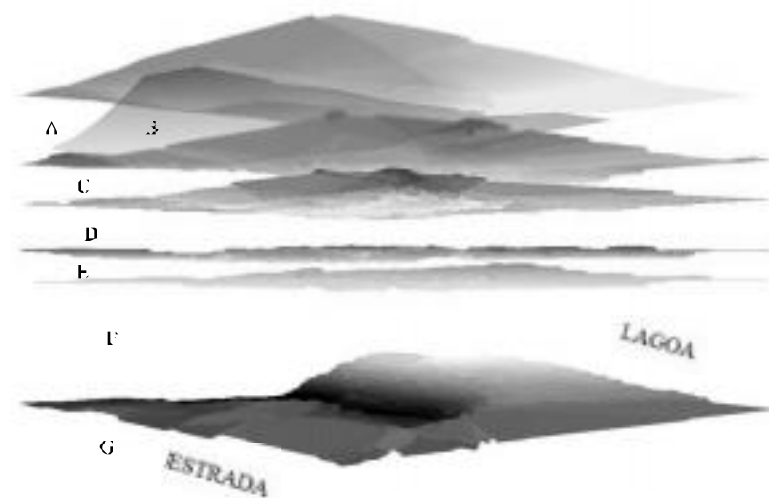
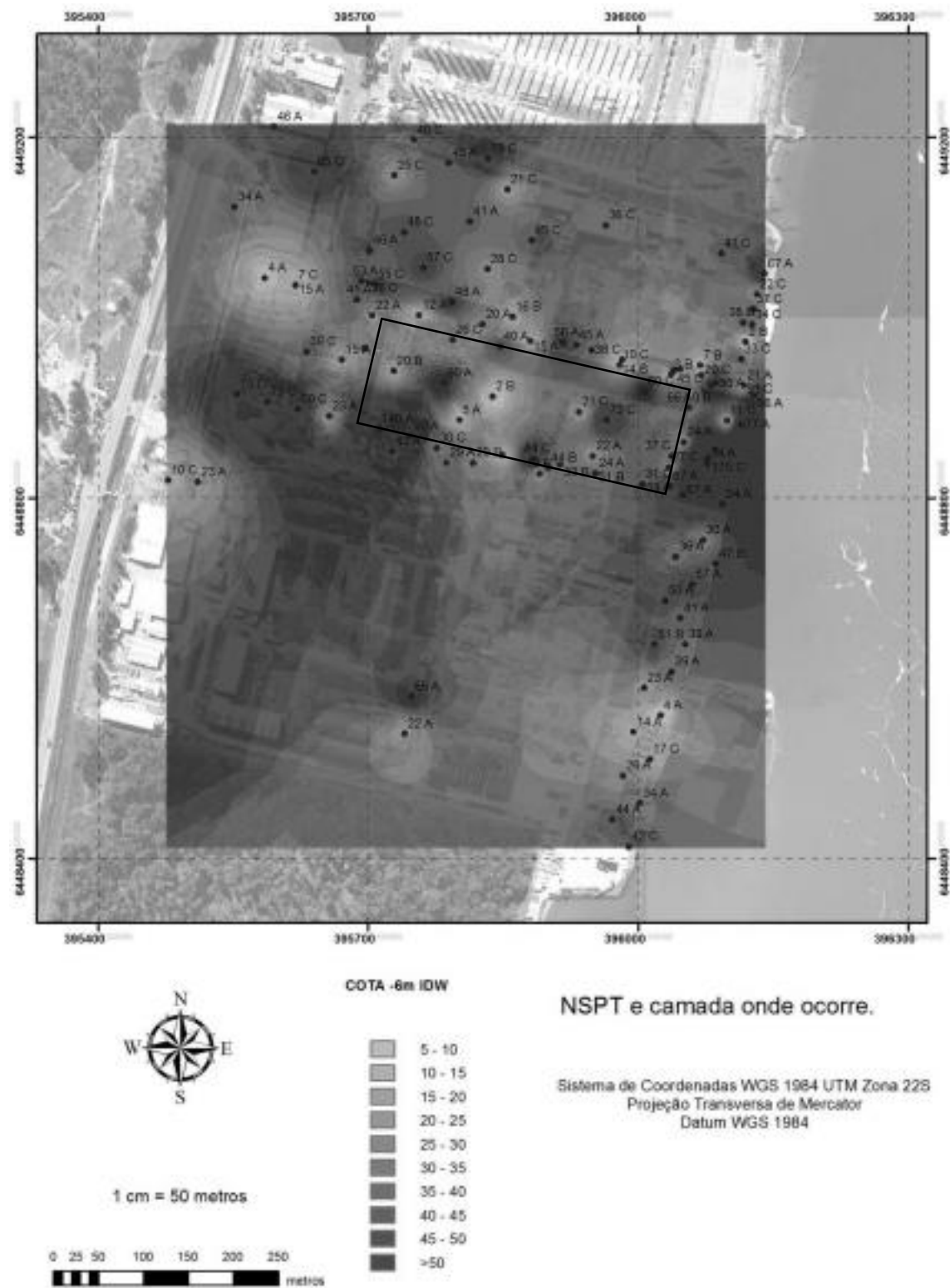


Figura 5.24 - Sobreposição das camadas do subsolo gerada através do método Krigagem.

5.2.5 Mapas da distribuição do N_{SP} nas cotas de transição entre as camadas

Além da distribuição espacial das superfícies, também foram gerados mapas temáticos mostrando a distribuição espacial do N_{SP} e geradas camadas mostrando a interpolação dos valores das sondagens. Neste item, foram selecionadas as interpolações de N_{SP} referentes à cota média de ocorrência da superfície de cada camada ou a cota que melhor representava as mudanças no valor de N_{SP} causadas pela mudança do tipo de solo da camada. Especificamente nessas cotas começa a ocorrer a mudança da camada superior para a camada imediatamente inferior, o que também significa a mudança do tipo de solo. Como a resistência a penetração é diretamente influenciada pelo tipo de solo, será possível perceber que a resistência a penetração é influenciada pela camada em que se encontra a sondagem. Para facilitar a observação, nos mapas temáticos, ao lado valor de N_{SP} está informado a camada em que se encontra a sondagem. Os mapas temáticos gerados em todas as cotas (de metro em metro) encontram-se no Apêndice A.

A Figura 5.25 e a Figura 5.26 mostram a distribuição dos valores de N_{SP} obtidos dos boletins de sondagem e a superfície gerada pela interpolação desses dados pelos métodos IDW e Krigagem, respectivamente. A cota média onde ocorre a troca da camada A para camada B é -4,5 m, mas a cota onde melhor se percebe os efeitos dessa troca nos valores de N_{SP} foi a cota -6 m. Na imagem gerada pelo método de interpolação IDW (Figura 5.26) é possível perceber as manchas amarelas, que simbolizam um valor de N_{SP} mais baixo, normalmente próximo a um furo de sondagem onde nesta dada cota observaram-se as características da Camada B. As partes mais avermelhadas da superfície gerada normalmente representam a Camada A ou estão próximas a sondagens que já atingiram a camada C.

Figura 5.25 – Distribuição do N_{SPF} na cota -6m pelo método IDW

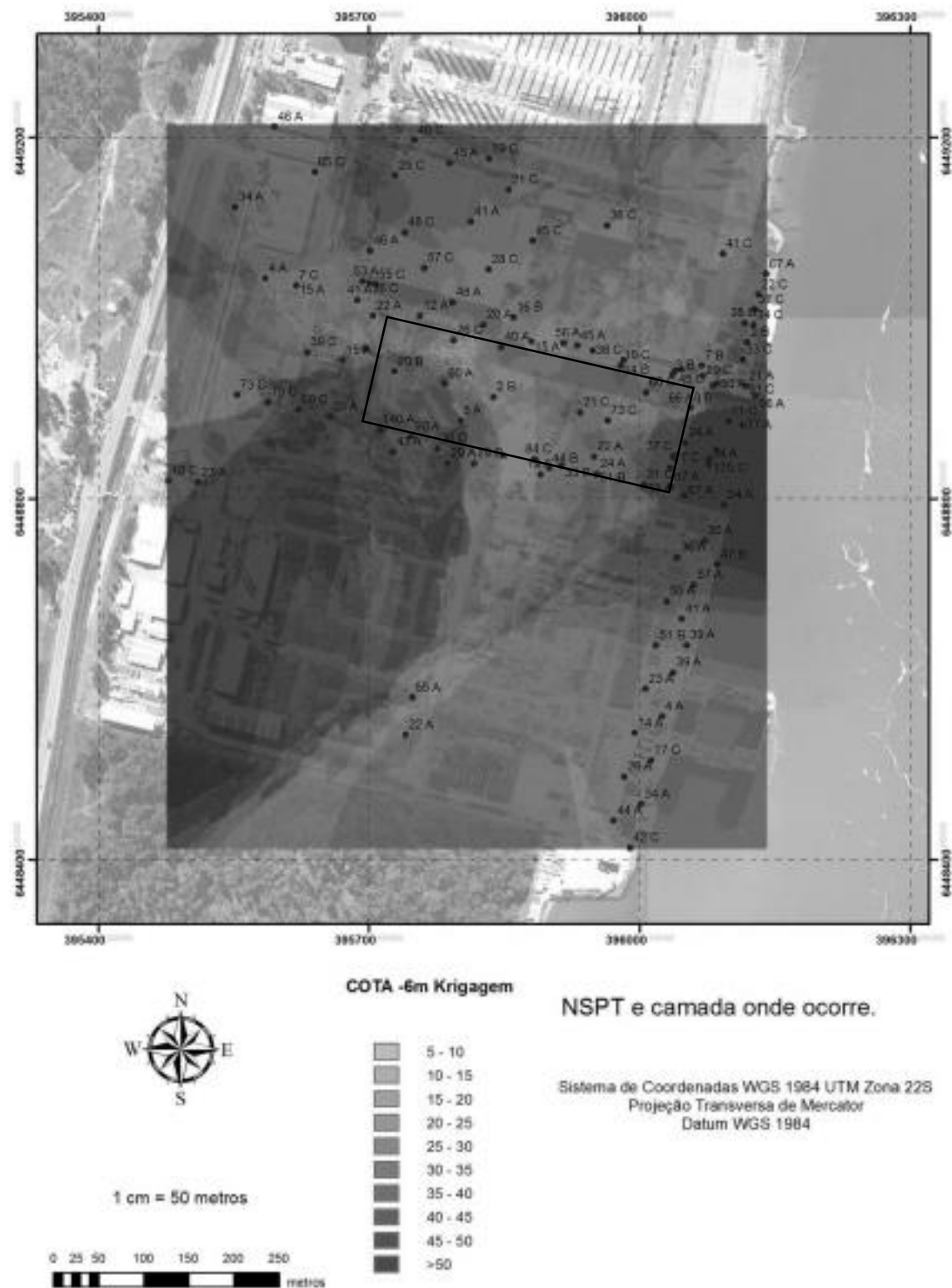


Figura 5.26— Distribuição do N_{CRT} na cota -6m pelo método Krigagem.

O gráfico representado na Figura 5.27 representa o histograma de distribuição do N_{SPF} na Cota -6 m. A Tabela 5.3 mostra os parâmetros estatísticos de N_{SPF} correspondentes à cota -6 m.

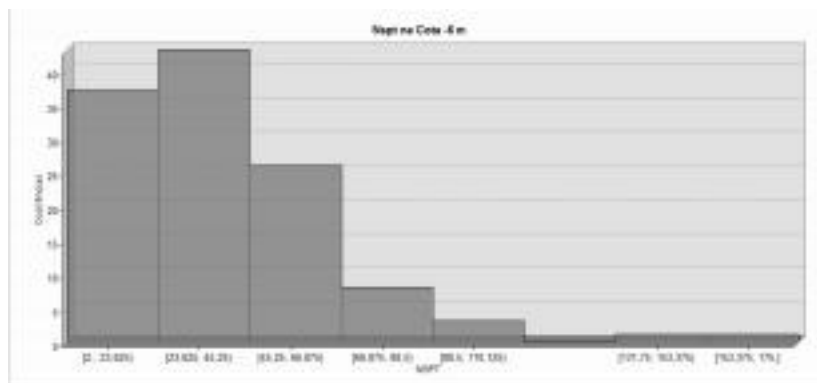


Figura 5.27 - Histograma representando a distribuição do N_{SPF} na cota -6 m

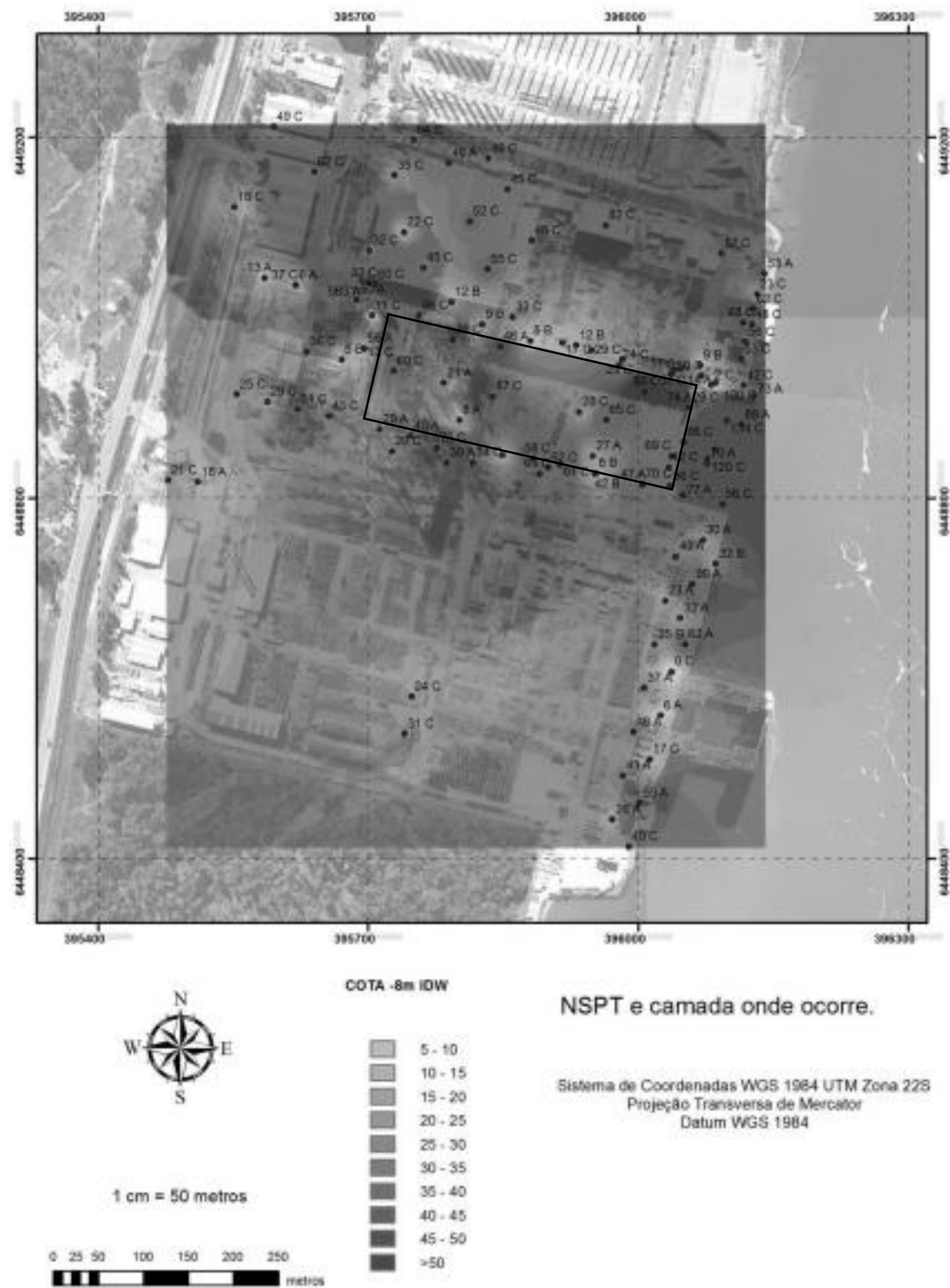
Tabela 5.3 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SPF} na cota -6m

Total de Amostras	119
N_{SPF} mínimo	2
N_{SPF} máximo	175
N_{SPF} médio	39,3
Desvio Padrão	26,01

A Figura 5.28 e a Figura 5.29 mostram a distribuição dos valores de N_{SPF} e as superfícies geradas pela interpolação desses dados pelos métodos IDW e Krigagem. A cota média onde ocorre a troca da camada B para camada C é -7,91, mas como para este estudo as cotas foram arredondadas para um valor inteiro, a cota -8 m é a que melhor representa a análise.

Foi possível perceber claramente a influência das camadas no valor de N_{SPF} . O método de interpolação IDW é o que melhor representa a força das discrepâncias na análise pontual, e é possível perceber nas manchas amarelas, representativas de um valor de N_{SPF} mais baixo, a ocorrência maior da camada B ou ainda pontos identificados como o final da

Camada A. No caso desses pontos, não significa necessariamente que a camada seja A, mas que não existem, nos boletins de sondagem, informações suficientes para classificar a camada como B ou mesmo como C, e nesse caso optou-se por manter a última classificação até que se fossem obtidas, nas cotas subsequentes dos boletins de sondagem, informações suficientes para alterar a classificação da camada na dada cota.

Figura 5.28 – Distribuição do N_{SPT} na cota -8m pelo método IDW

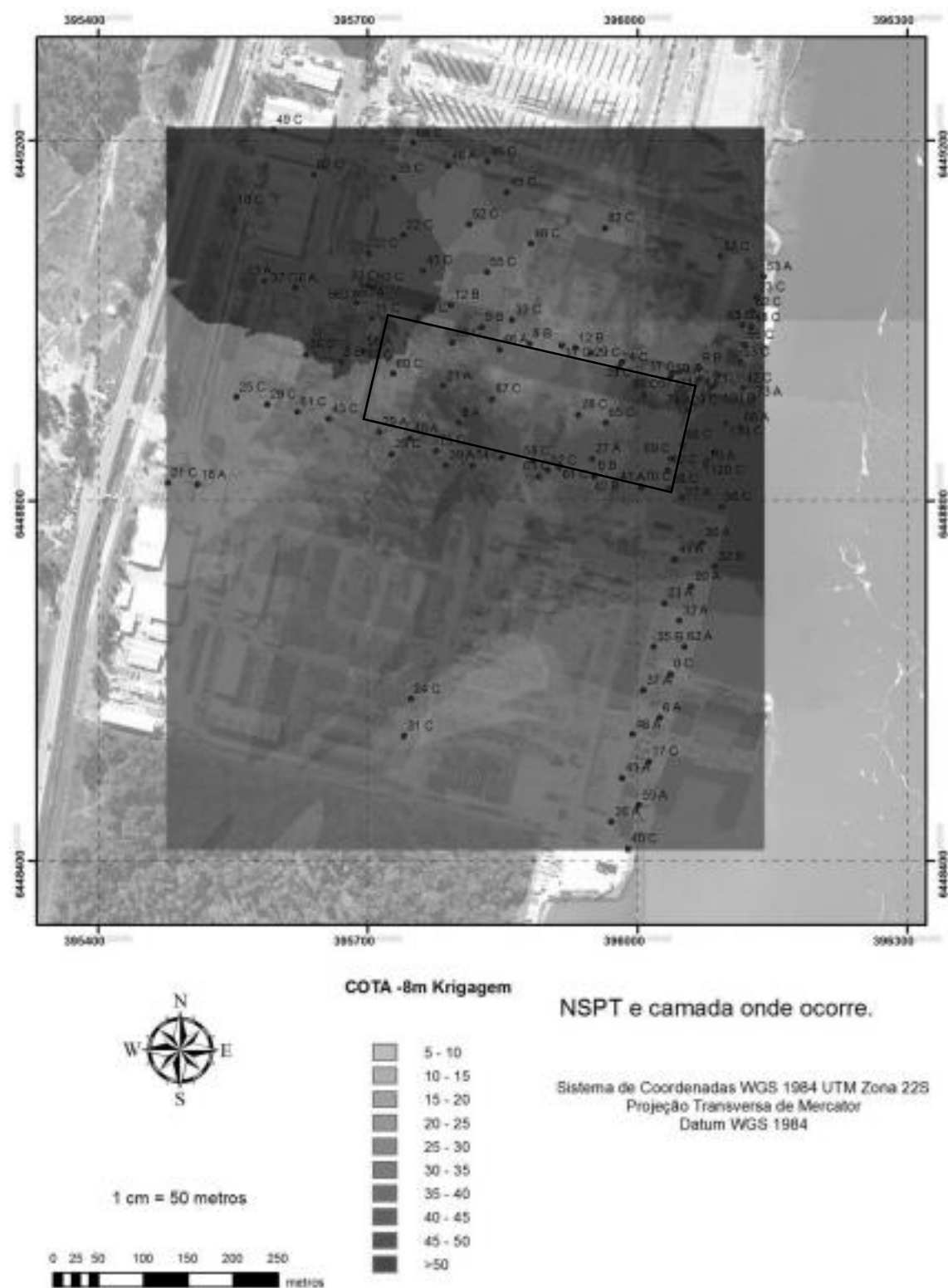


Figura 5.29 – Distribuição do N_{SPT} na cota -8m pelo método Krigagem

O gráfico representado pela Figura 5.30 representa o histograma de distribuição do N_{SP1} na Cota -8 m. A Tabela 5.4 mostra os parâmetros estatísticos de N_{SP1} correspondentes à cota -8 m.

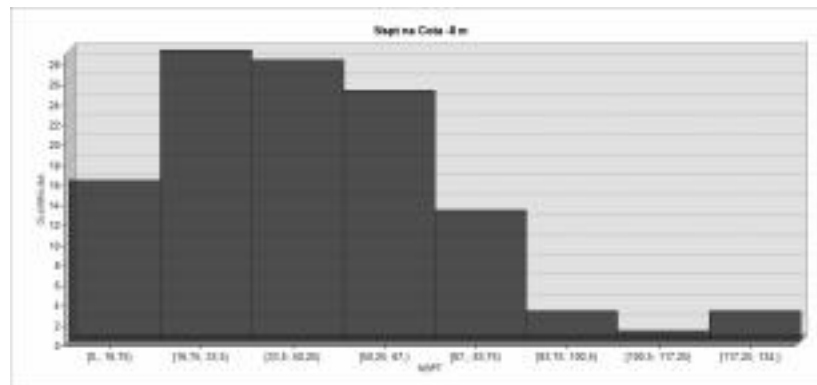


Figura 5.30 - Histograma representando a distribuição do N_{SP1} na cota -8 m

Tabela 5.4 - Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP1} na cota -8m

Total de Amostras	118
N_{SP1} mínimo	0
N_{SP1} máximo	134
N_{SP1} médio	41,5
Desvio Padrão	25,65

A cota -13,76 m foi a cota média do topo da camada D, e o valor arredondado mais próximo é a cota -14 m. A influência da camada no valor de N_{SP1} está claramente representada nos resultados da análise nesta profundidade. As Figuras 5.31 e a Figura 5.32 representam a distribuição do N_{SP1} nessas camadas pelos métodos de interpolação IDW e Krigagem.

As manchas amarelas associadas a um N_{SP1} mais baixo são predominantes nesta cota, e normalmente as sondagens amostradas já se encontravam na camada D ou estavam na transição da camada C para D. Na parte superior do mapa temático, as manchas vermelhas que representam um N_{SP1} mais alto mostram ainda sondagens onde a camada ainda é a C, mostrando a tendência dessa camada a apresentar um valor de N_{SP1} mais alto.

Novamente, é importante salientar que nos pontos onde ainda é informada a ocorrência da Camada A significa apenas que não existem no boletim de sondagem informações suficientes para se classificar outra camada nessa cota.

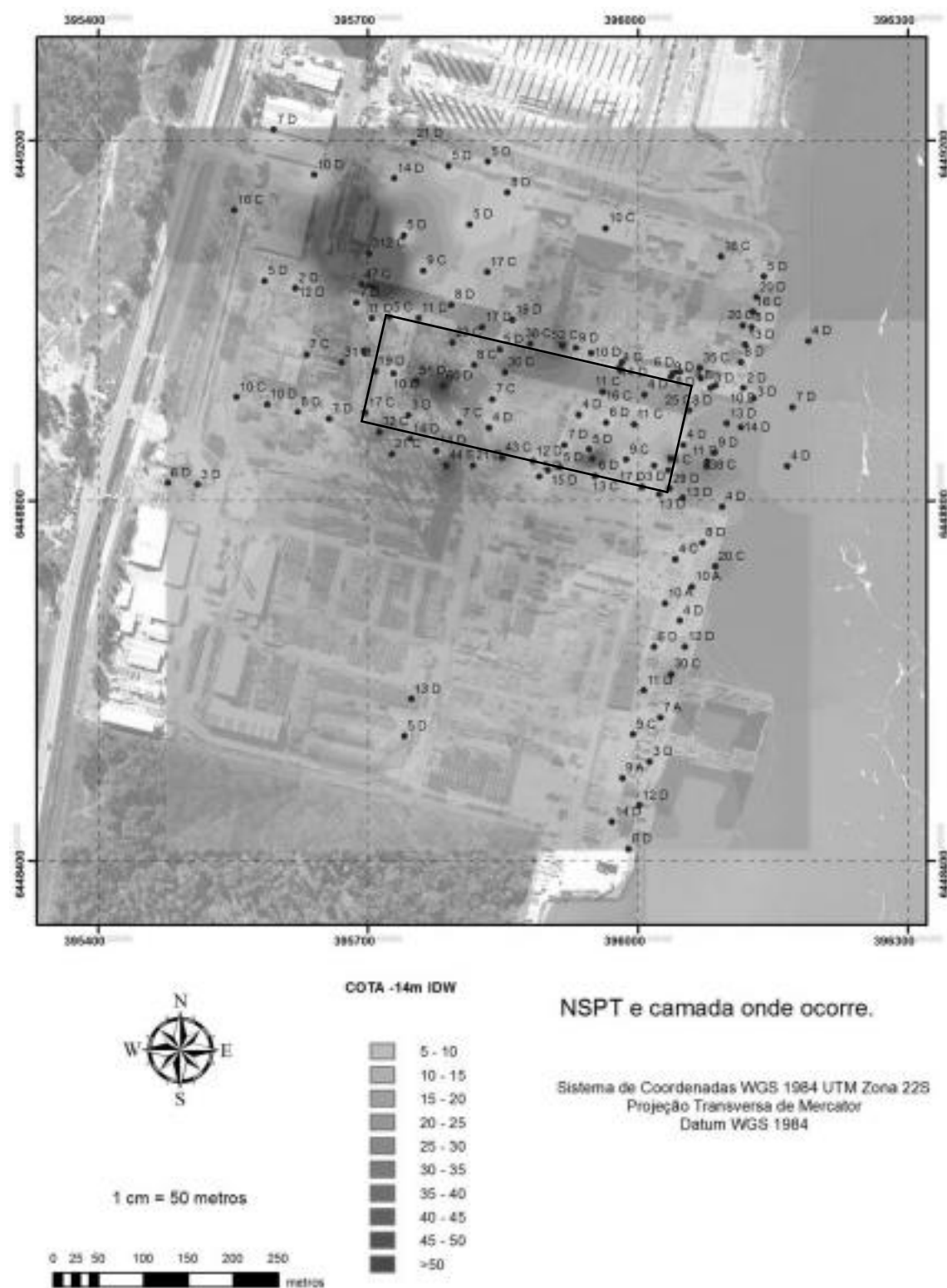


Figura 5.31 – Distribuição do N_{SP} na cota -14m pelo método IDW

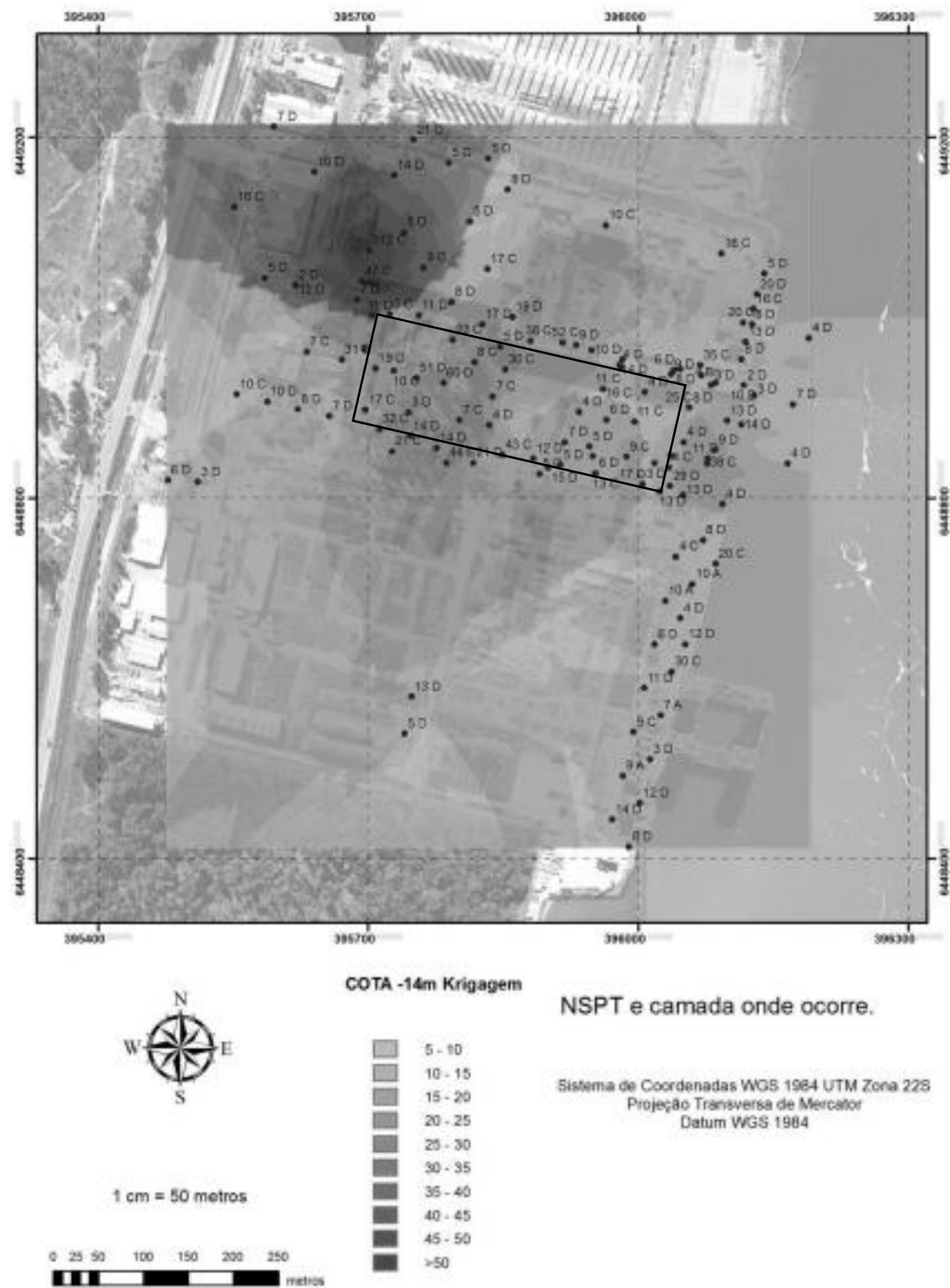


Figura 5.32– Distribuição do N_{SPF} na cota -14m pelo método Krigagem

O gráfico da Figura 5.33 representa o histograma de distribuição do N_{SPF} na Cota -14 m. A Tabela 5.5 mostra os parâmetros estatísticos de N_{SPF} correspondentes à cota -14 m.

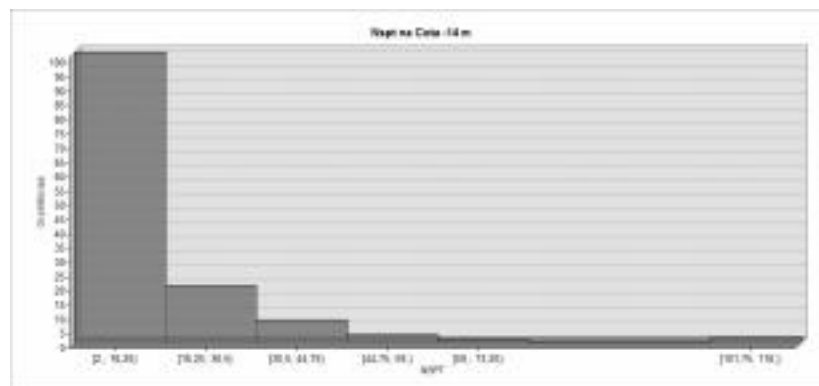


Figura 5.33 - Histograma representando a distribuição do N_{SPF} na cota -14 m

Tabela 5.5 - Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SPF} na cota -14 m

Total de Amostras	136
N_{SPF} mínimo	2
N_{SPF} máximo	116
N_{SPF} médio	14,82
Desvio Padrão	16,07

A cota -21 m é a cota média da superfície da Camada E, mas é na cota -22 m, onde as sondagens já haviam penetrado mais fundo, que é possível observar melhor a influência da alteração das camadas no valor de N_{SPF} . Por se tratar de uma camada de espessura relativamente pequena, normalmente variando em média da cota -21 até a cota -24, é possível observar no mapa temático da cota -22 (representado pelas Figuras 5.34 e 5.35, interpolação por IDW e Krigagem, respectivamente) que as sondagens informam a ocorrência das camadas D, E e F. Também fica clara a característica do tipo de solo de cada camada representada pelo valor de N_{SPF} já que a Camada D é uma camada de areia compacta localizada entre duas camadas de argila.

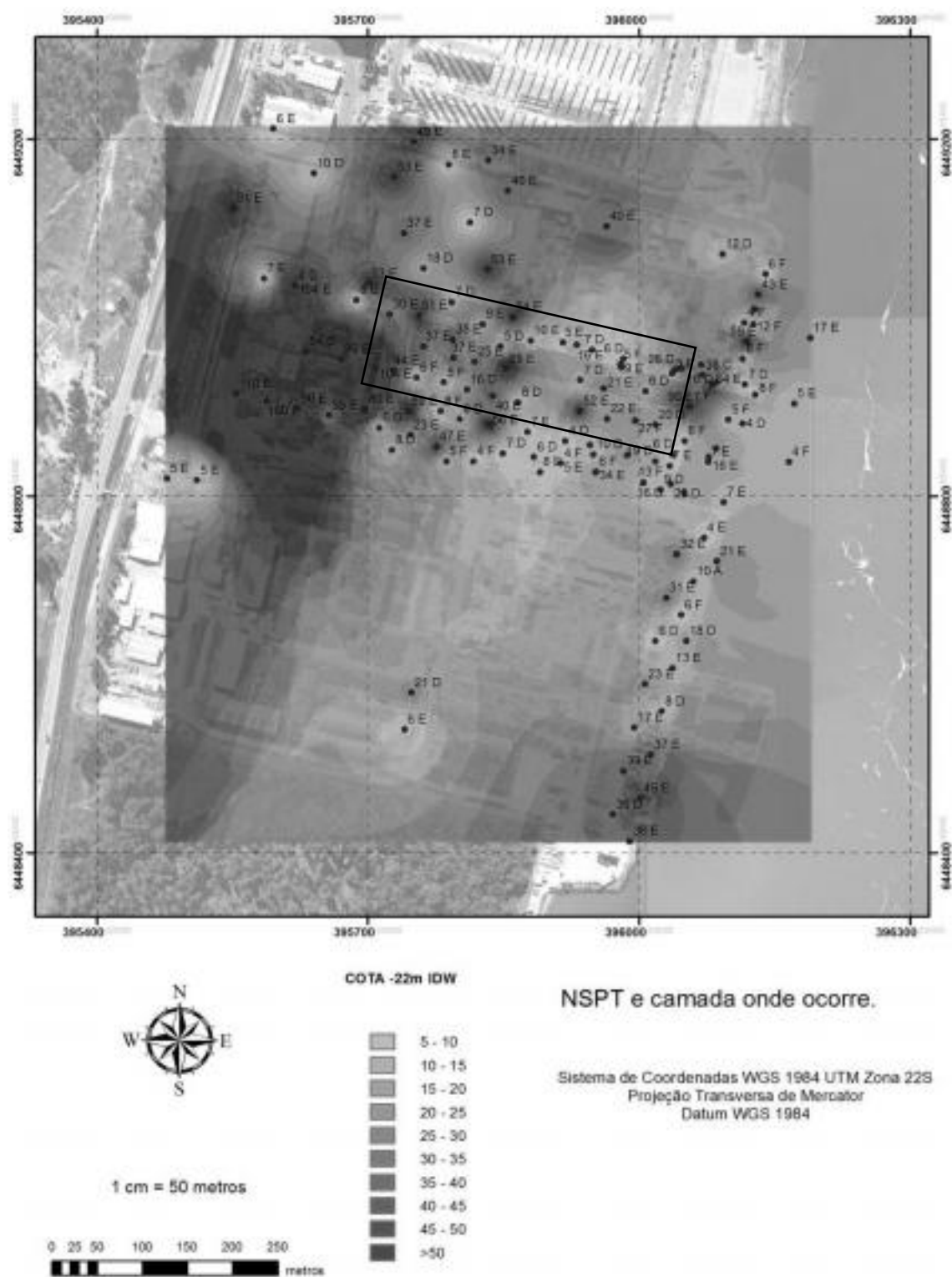


Figura 5.34—Distribuição do N_{SPT} na cota -22m pelo método IDW

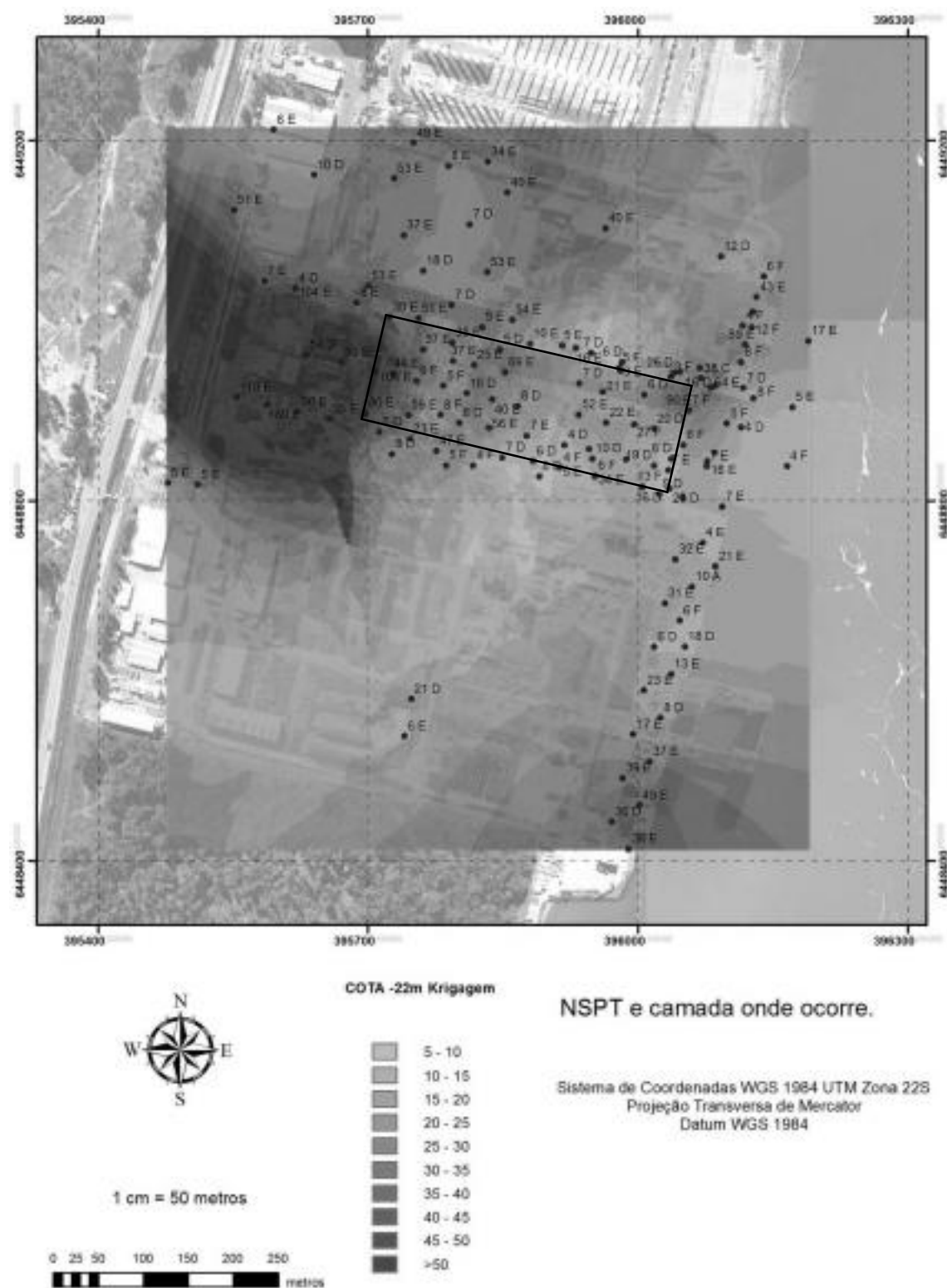


Figura 5.35– Distribuição do N_{sp} na cota -22 m pelo método Krigagem

As manchas vermelhas representativas de N_{SPT} mais alto são forçadas por sondagens que normalmente informam a existência da camada E. O gráfico representado na Figura 5.36 representa o histograma de distribuição do N_{SPT} na Cota -22 m. A Tabela 5.6 mostra os parâmetros estatísticos de N_{SPT} correspondentes à cota -22 m.

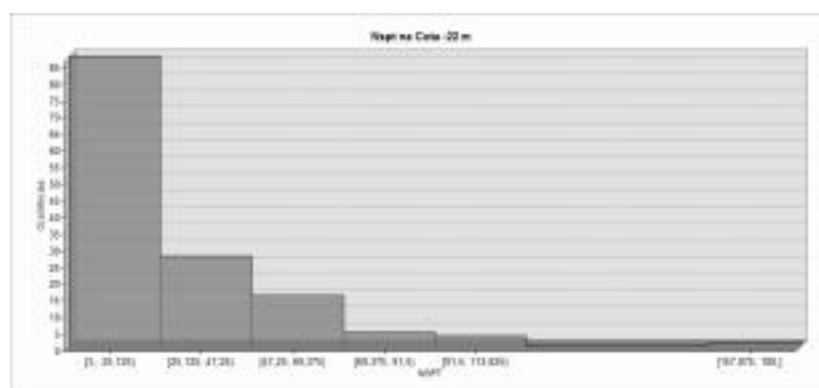


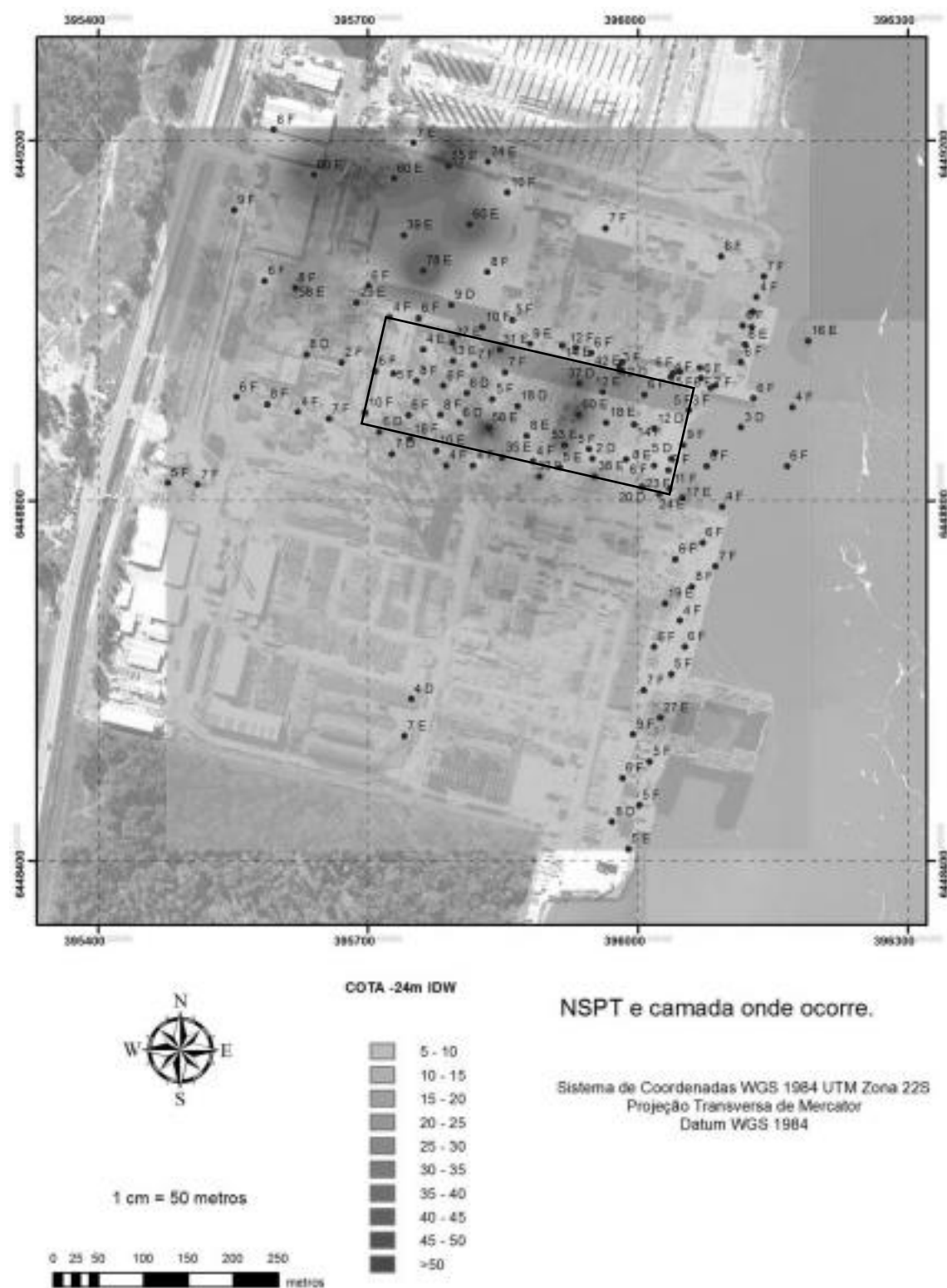
Figura 5.36 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -22 m

Tabela 5.6 - Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SPT} na cota -22m.

Total de Amostras	13
N_{SPT} mínimo	3
N_{SPT} máximo	180
N_{SPT} médio	25,48
Desvio Padrão	27,06

É na cota -24 m onde começa a ser percebida a presença massiva da camada F, a espessa camada de argila média de cor variando do cinza ao preto. De todas as sondagens realizadas, essa é a camada mais fácil de ser identificada. Especificamente na cota -24 m observa-se a transição da camada E, de areia compacta, pra camada F, o que fica destacado pelas manchas vermelhas mais ao norte da imagem, representando N_{SPT} alto relacionado com as amostragens pertencentes a camada E em uma área dominada pelo amarelo indicativo de N_{SPT} mais baixo proveniente de sondagens que já atingiram a camada F. As Imagens 5.37 e 5.38 (IDW e Krigagem, respectivamente) ilustram bem essa transição.

Nas Imagens 5.37 e 5.38 também é possível observar a tendência da Camada F, já mostrada por gráficos e imagens anteriores, de aparecer em cotas mais altas mais próximo da Lagoa, enquanto entre as sondagens mais ao norte e oeste da imagem ainda ocorre a camada E, reforçada pelo N_{SPT} mais alto. A partir dessa cota, a camada F prossegue por mais aproximadamente 20 metros.

Figura 5.37– Distribuição do $N_{q, r}$ na cota -24 m pelo método IDW

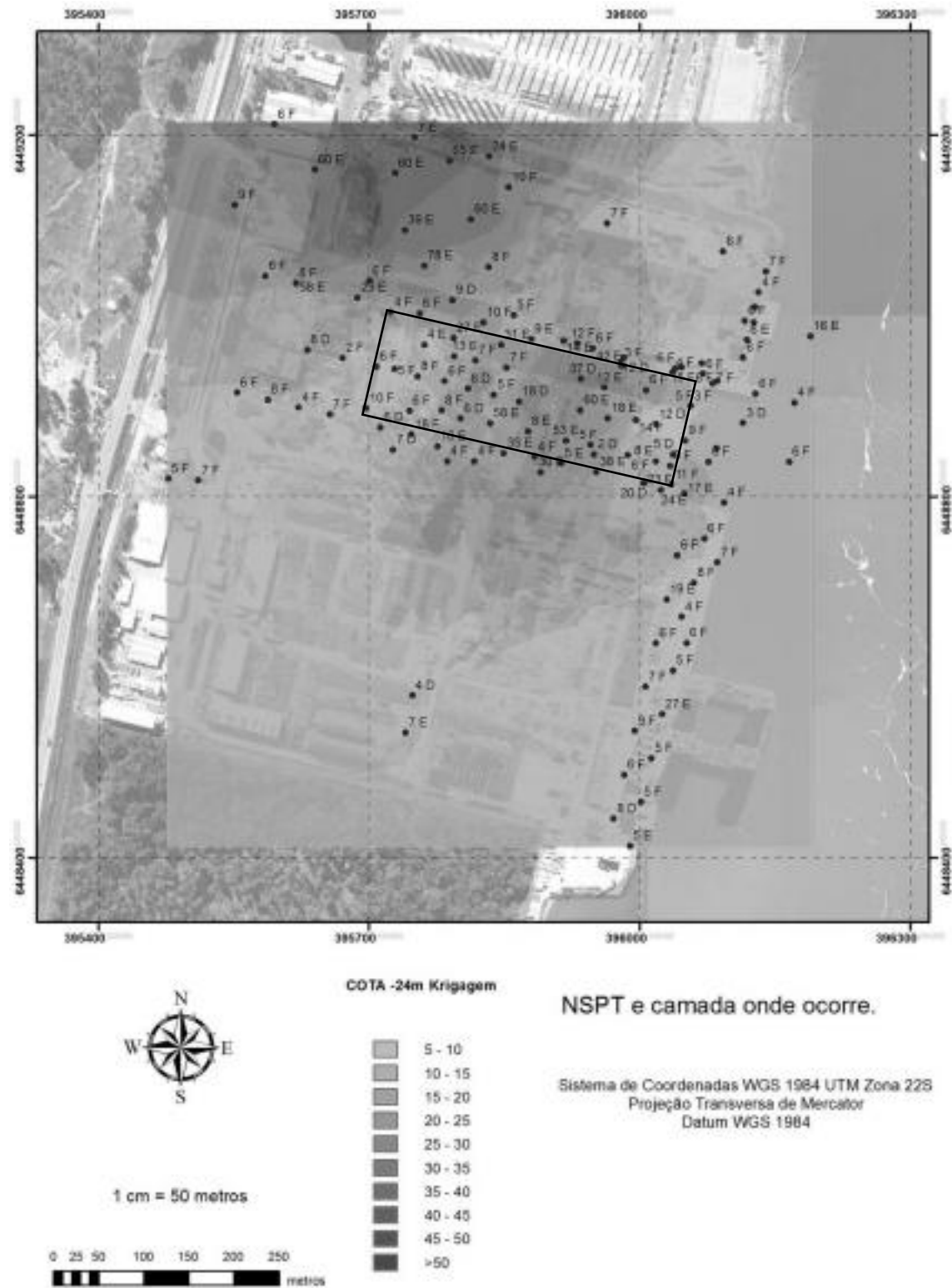


Figura 5.38– Distribuição do N_{sp} na cota -24 m pelo método Krigagem

O gráfico representado na Figura 5.39 representa o histograma de distribuição do N_{5PT} na Cota -24 m. A Tabela 5.7 mostra os parâmetros estatísticos do N_{5PT} correspondentes à cota -24 m.

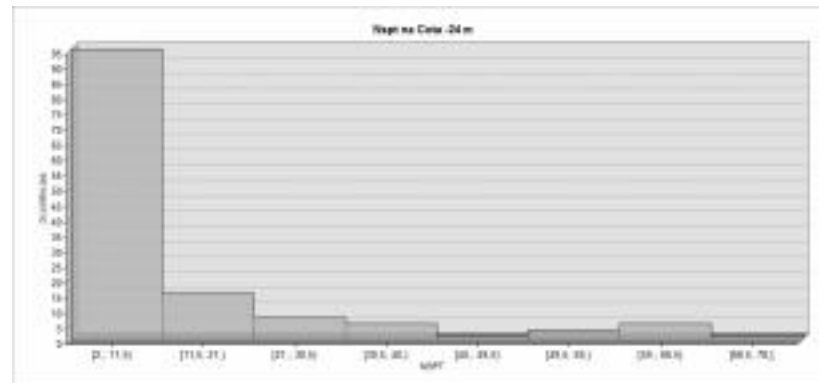


Figura 5.39 - Histograma representando a distribuição do N_{5PT} na cota -24 m

Tabela 5.7 - Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{5PT} na cota -24 m.

Total de Amostras	132
N_{5PT} mínimo	2
N_{5PT} máximo	78
N_{5PT} médio	13,48
Desvio Padrão	15,34

Depois de atravessar em média 20 metros de argila média e com baixa resistência a penetração da camada F, é na camada G, que começa a aparecer em média a 41 metros de profundidade, que se encontra finalmente a areia compacta e alta resistência a penetração. O valor alto de N_{5PT} tem um claro contraste com o baixo N_{5PT} da camada F, como pode ser observado facilmente nas Figuras 5.40 e 5.41.

A análise dessas imagens mostra com clareza a característica de cada método de interpolação. Enquanto a Figura 5.40, interpolada pelo método IDW, mostra o a ocorrência de N_{5PT} mais alto como pontual, traçando a superfície vermelha ao redor e da amostragem, a Figura 5.41 desenha uma superfície suavizada em que os valores de N_{5PT} mais alto são atribuídos ao longo da das áreas do leste e ao sul, próximas a duas sondagens que já atingiram a camada G e apresentam valor de N_{5PT} mais alto.

Também fica reforçada mais uma vez a tendência observada nos gráficos anteriores da camada G começar a ocorrer em cotas mais altas perto da Lagoa e agora também, no espaço mais ao sul da imagem interpolada.

Vale lembrar que nem todas as sondagens atingiram essa profundidade, em comparação com quase todas as sondagens que atingiram a camada F.

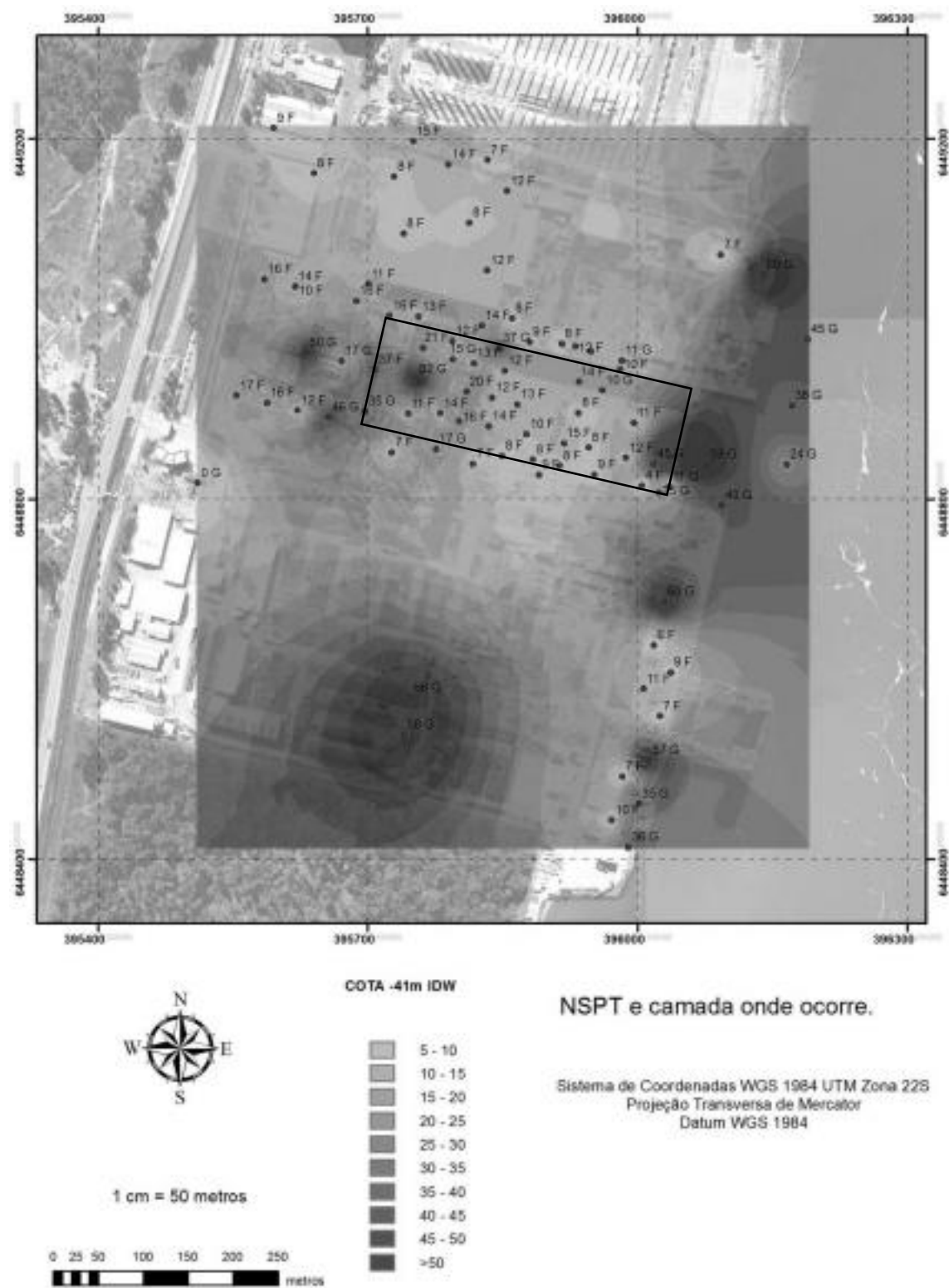


Figura 5.40– Distribuição do $N_{q, r}$ na cota -41 m pelo método IDW

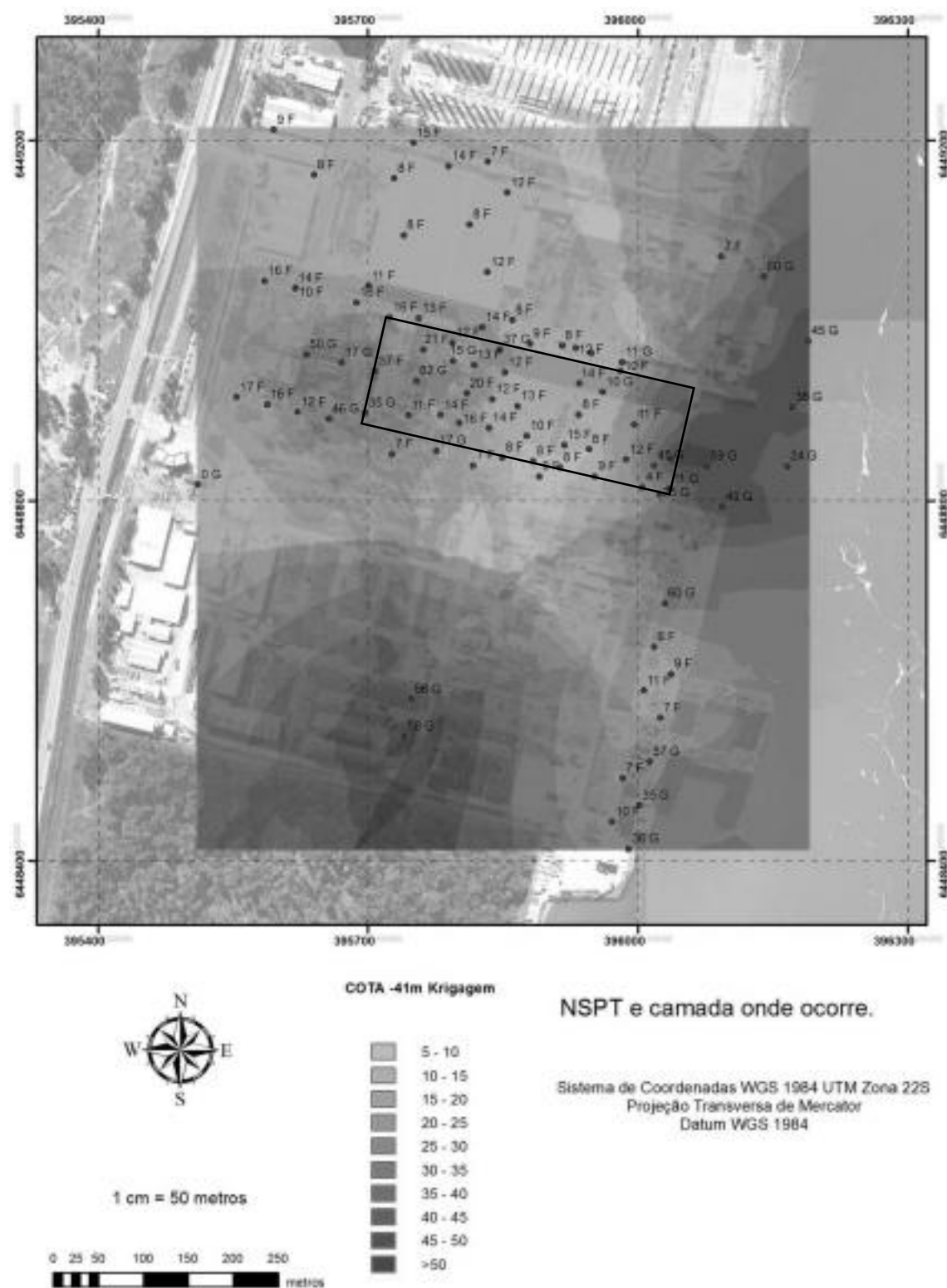


Figura 5.41– Distribuição do N_{sp} na cota -41 m pelo método Krigagem

O gráfico representado na Figura 5.42 representa o histograma de distribuição do N_{SPT} na Cota -41 m. A Tabela 5.8 mostra os parâmetros estatísticos do N_{SPT} correspondentes à cota -41 m.

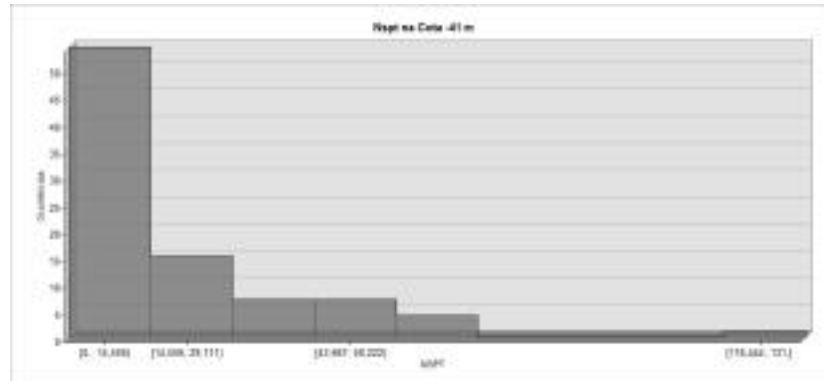


Figura 5.42 - Histograma representando a distribuição do N_{SPT} na cota -41 m

Tabela 5.8 - Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SPT} na cota -41 m.

Total de Amostras	38
N_{SPT} mínimo	0
N_{SPT} máximo	31
N_{SPT} médio	20,26
Desvio Padrão	19,65

Além dos mapas mostrados para as cotas de transição de camadas, foram gerados mapas a cada metro de profundidade (Apêndice A). Estes mapas, a exemplo daqueles mostrados nas figuras anteriores, permitem identificar regiões de maior e menor resistência do solo. Pode-se observar também que os histogramas de N_{SPT} mostram uma distribuição que tende a ser assimétrica, podendo possivelmente ser bem representada pela distribuição log-normal.

5.2.6 Mapas da distribuição do $N_{SP,T}$ na região central da camada F.

A camada F é de especial interesse para projetos de geotecnia por se tratar de uma espessa camada de argila média, sujeita a grandes recalques, que ocorre em praticamente toda a região. A cota escolhida foi -33 m, já que a cota média da base da camada E e do topo da camada F é -24 m e a camada média da base da camada F e do topo da camada G é -41 m.

A variação do valor de $N_{SP,T}$ é pequena, o que pode ser observado no histograma de distribuição do $N_{SP,T}$ (Figura 5.43) e também nos parâmetros estatísticos da Tabela 5.9

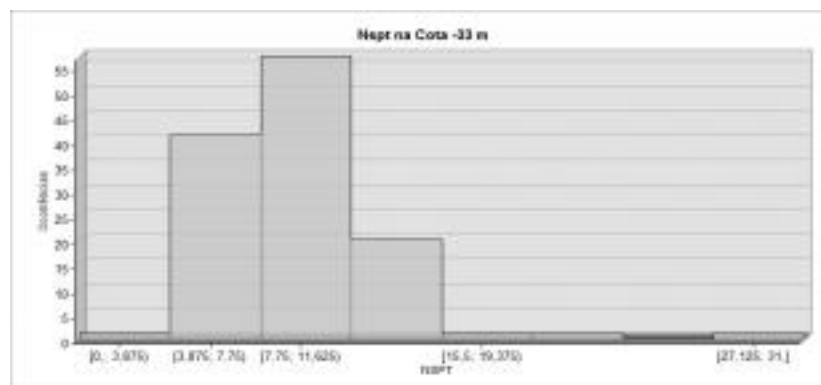


Figura 5.43 – Histograma representando a distribuição do $N_{SP,T}$ na cota -33 m.

Tabela 5.9 - Parâmetros estatísticos da distribuição do $N_{SP,T}$ na cota -33 m.

Total de Amostras	22
$N_{SP,T}$ mínimo	0
$N_{SP,T}$ máximo	3
$N_{SP,T}$ médio	8,95
Desvio Padrão	3,61

Devido à pequena dispersão dos valores de $N_{SP,T}$ em relação à média da camada F, a diferença entre as superfícies geradas pelos dois métodos de interpolação é mínima, mas ainda assim é possível destacar a característica da distribuição apresentada por cada método: Os valores de $N_{SP,T}$ são distribuídos ao redor do ponto pelo método IDW (Figura 5.44) enquanto o método de Krigagem (Figura 5.45) busca uma superfície mais uniforme, ignorando valores destoantes muito próximos.

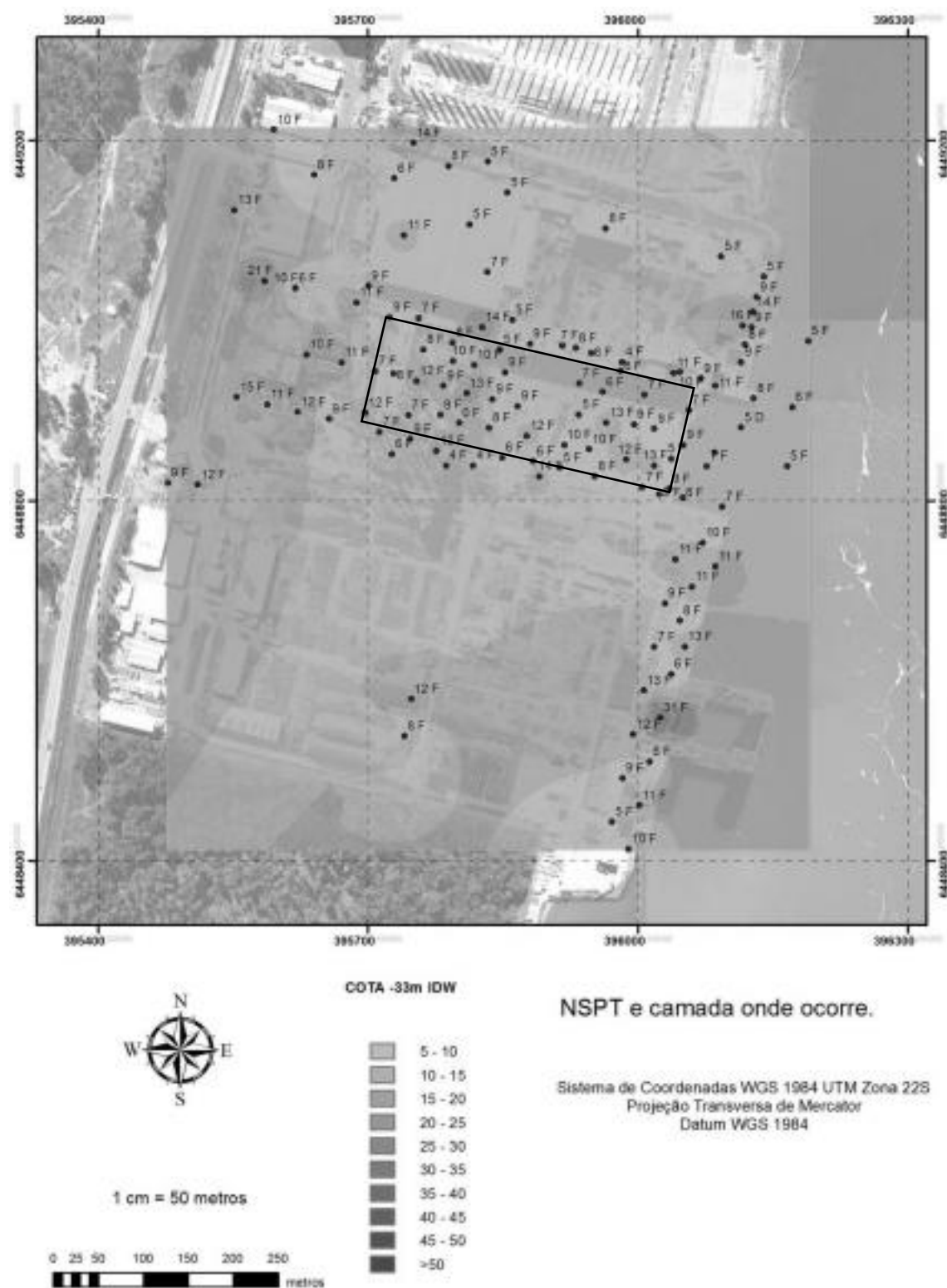


Figura 5.44 - Distribuição do N_{spt} na cota -33 m pelo método IDW.

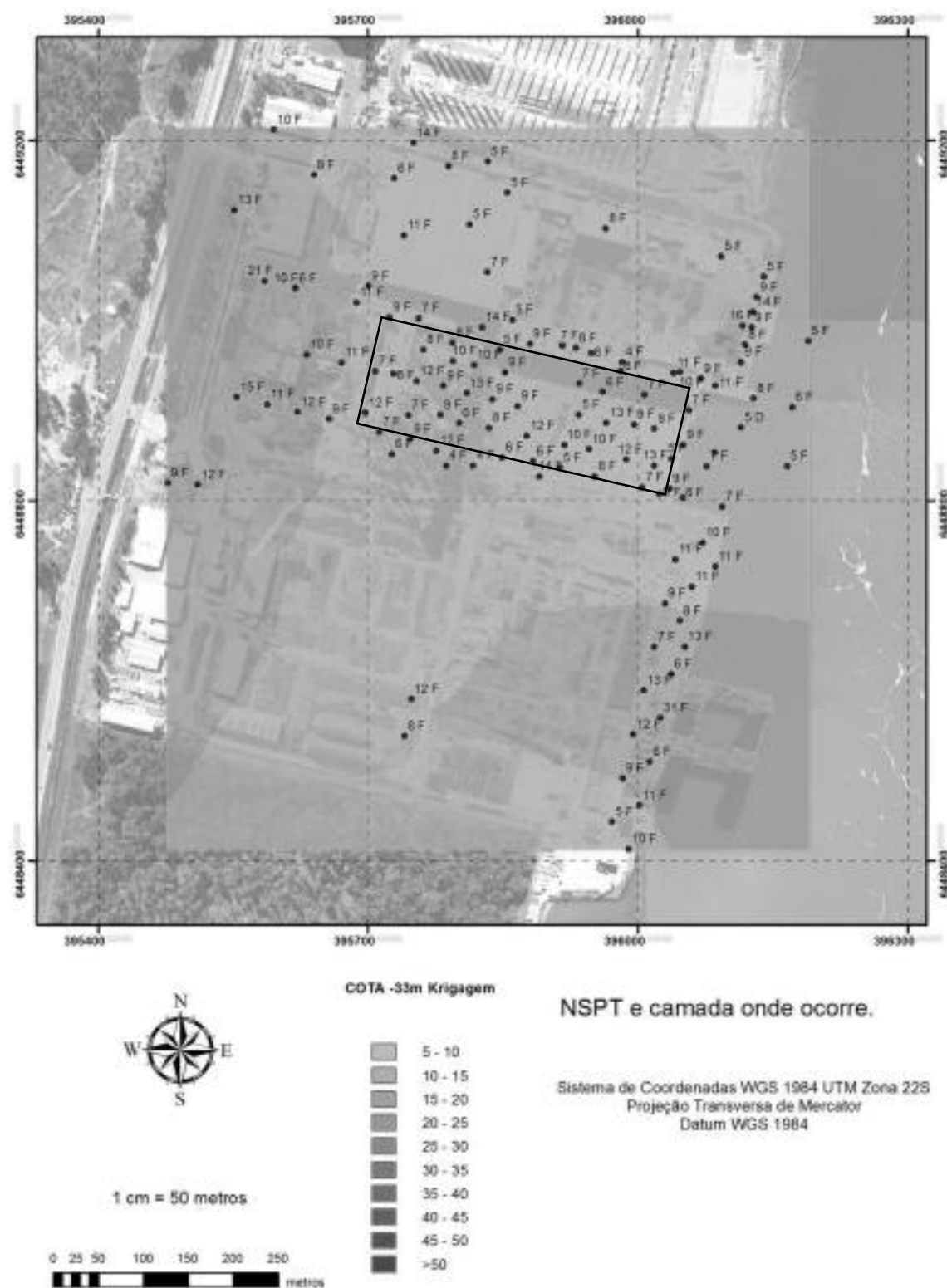


Figura 5.45 - Distribuição do N_{sp} na cota -33 m pelo método Krigagem.

5.3 COMPARAÇÃO DO MODELO COM UMA SONDAGEM REAL

Durante a transposição dos dados de sondagem para a tabela que foi inserida no ArcGIS, verificou-se que uma das sondagens, em destaque na Figura 5.46, apresentava valores de N_{SP} inconsistentes tanto com o que se esperava nas dadas cotas quanto com a descrição no próprio boletim. O primeiro avanço de sondagem foi realizado por lavagem, mas, no entanto, valores de N_{SP} estavam atribuídos a essas cotas como se houvesse ocorrido cravação do amostrador. Mais abaixo, a uma camada de areia fina estava atribuído um valor de N_{SP} igual a zero. É provável que tenha ocorrido um erro de digitação neste boletim.

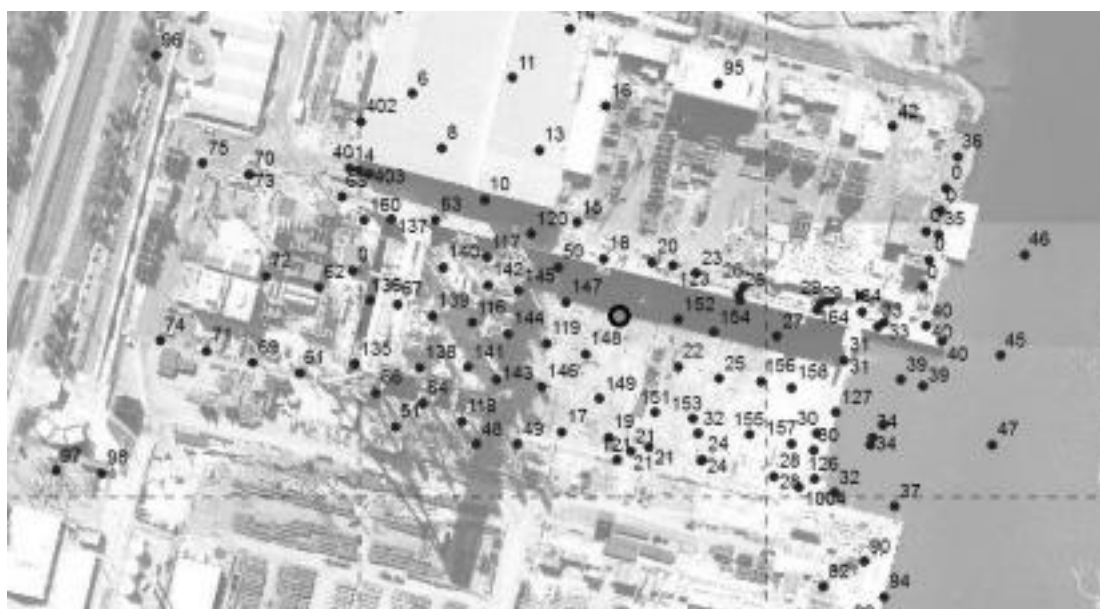


Figura 5.46 – Sondagem em verde excluída da análise.

A primeira impressão é que os valores foram invertidos nas páginas do boletim, mas mesmo trocando a ordem, os resultados ainda continuaram inconsistentes. Optou-se então por excluir essa sondagem da análise e posteriormente testar os valores gerados por interpolação nessas coordenadas.

O resultado da comparação, tanto com os valores atribuídos por interpolação pelo método de Krigagem quanto IDW foi bastante esclarecedor: os valores de N_{SP} interpolados

continuavam muito diferentes dos valores da sondagem real, mas atenciam com muita precisão à descrição das camadas apresentada no boletim, como pode ser conferido na tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Comparação sondagem real com valores de N_{SPT} por interpolação.

COTA	N_{SPT}	Descrição	N_{SPT} Interpolação	N_{SPT} TDW
-3	5	Areia média por Lavagem	13	35
-4	5		31	35
-7	5		35	29
-8	5		34	30
-9	9		50	44
-10	9		56	58
-11	8		39	47
-12	10		24	26
-13	12		25	27
-14	10		17	21
-15	13		11	16
-16	5	Argila Arenosa Cinza Escuro	17	21
-17	9		25	24
-18	15		19	19
-19	8	Areia Fina Verde	18	19
-20	0	Argila Cinza Escuro	9	9
-21	0	Areia Fina Verde	11	10
-22	0		22	10
-23	0		26	25
-24	0		18	18
-25	0		12	14
-26	0	Areia Azilosa Verde	7	6
-27	0		7	7
-28	0	Argila Cinza Escuro	8	8
-29	0		8	8
-30	0		8	8
-31	0		9	8
-32	10		9	9
-33	12		8	8
-34	5		8	8
-35	50		9	8
-36	19		9	9
-37	7		9	10
-38	5		11	11
-39	7		12	11
-40	2	Argila Preta com Cascalhos	10	11
-41	25		13	13
-42	7		14	13
-43	5	Argila Preta com Cascalhos	26	26
-44	5		29	25
-45	5	Areia Fina Cinza	59	57

Os valores interpolados acompanham razoavelmente bem a descrição das camadas com exceção do primeiro trecho, onde o avanço foi por lavagem e não pode ser avaliada a descrição do solo. Nas camadas entre as cotas de -16 m até -19 m, descritas como “Argila Arenosa Cinza Escuro” e “Areia Fina Verde”, os valores de N_{SPT} seguem uma certa tendência, mas imediatamente baixam para acompanhar a camada de “Argila Cinza Escuro” que ocorre em -20 m, subindo de novo a partir de -21 m, na camada descrita como “Areia Fina Verde”. Novamente passam a baixar na camada de “Areia Argilosa Verde” e assumem um valor quase constante de N_{SPT} na camada de “Argila Cinza Escuro”, passando a subir conforme se aproximam das camadas finais de “Argila Preta com Conchas” e “Areia Fina Cinza”, que apresenta o valor de N_{SPT} mais alto, como era de se esperar, e contrariando os valores apresentados no boletim. Os resultados demonstrados avalizam o modelo tridimensional gerado como bom predictor dos resultados de N_{SPT} na área em estudo.

5.4 GRÁFICO N_{SPT} MÉDIO X PROFUNDIDADE.

Calculando-se a média do valor de N_{SPT} de cada cota, foi possível a geração de um gráfico (Figura 5.47) mostrando a variação da resistência à penetração na profundidade e, a exemplo de Dias et al (2008) e Bastos (2014), destacar ao longo do gráfico a cota média de mudança de camadas.

As sondagens analisadas neste estudo mostram claramente um aumento no valor de N_{SPT} entre as cotas -21 m e -24 m, resultado concordante com a presença da camada de areia compacta designada por Bastos (2014) como camada E.

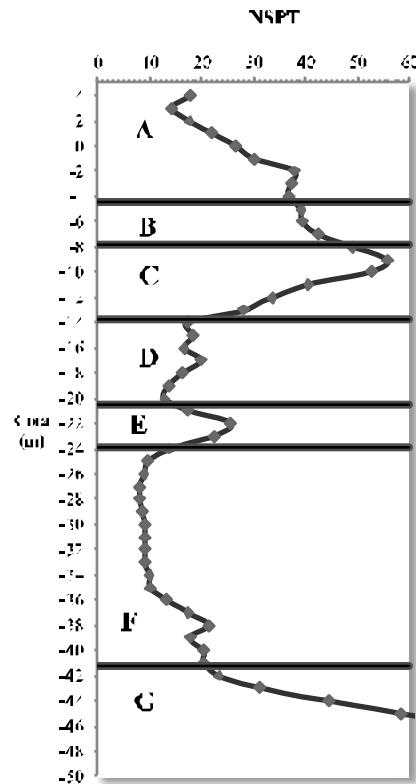


Figura 5.17 – Gráfico do N_{SPT} x Cota com base nos novos dados de sondagem.

Fica nítida a presença de duas camadas argilosas, D e F, sendo a última, de maior espessura, já bem conhecida e descrita na literatura técnica. A camada F pode trazer importantes efeitos em termos de recalques por adensamento, e também determina que as fundações profundas das obras da região atinjam cotas inferiores a -40 m.

5.5 COMPARAÇÃO N_{SPT} REALIZADOS ANTES E DEPOIS DA ESCAVAÇÃO

Das 56 sondagens realizadas dentro da área do dique, 22 foram realizadas depois de iniciados os serviços de escavação. Para avaliar o efeito da escavação nos resultados dos ensaios SPT, foi gerado um gráfico (Figura 5.48) com a média dos valores de N_{SPT} das sondagens executadas antes da escavação (linhas em azul) confrontado com a média dos valores de N_{SPT} das sondagens executadas depois da escavação (linhas em verde).

Observou-se uma redução nos valores de N_{SPT} na camada C após a escavação. Esta redução pode estar associada ao alívio de tensões devido a escavação e a diferença de energia aplicada no amostrados SPT devido a redução no comprimento total das hastes. Não se observou diferença significativa nos valores médios de N_{SPT} nas camadas D, E e F. As diferenças observadas no trecho inferior da camada F podem ser associadas com a variabilidade do topo da camada G, que sobe bastante próximo a Lagoa.

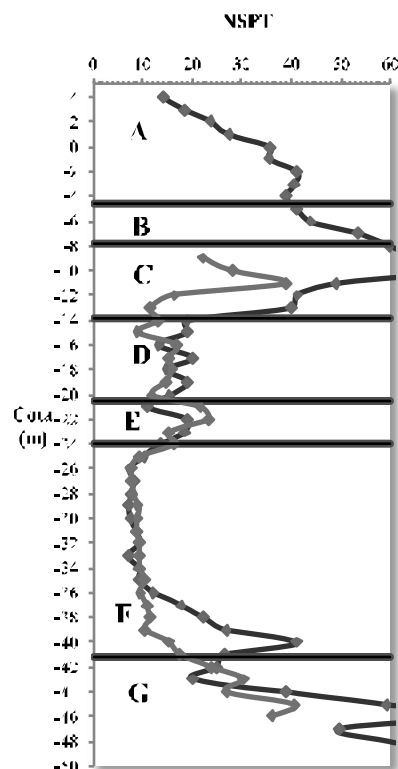


Figura 5.18 - N_{SPT} médio x Cota antes e depois da escavação.

5.6 CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS DENTRO DO DIQUE

Com a metodologia exposta no capítulo 4.1.3, foram gerados os mapas temáticos mostrando a distribuição da capacidade de carga para a estaca tipo A baseadas nas informações das sondagens executadas dentro do dique e que tenham atingido a camada G. O

procedimento adotado foi extrapolar as sondagens até a cota -50 m (cota prevista para o assentamento das estacas), considerando o valor de N_{52T} no trecho extrapolado igual a 50.

5.6.1 Capacidade de carga – compressão.

A Tabela 5.11 mostra os principais parâmetros estatísticos dos dados utilizados na geração dos mapas temáticos através dos métodos de Aoki & Velloso e Decourt & Quaresma.

Tabela 5.11 – Parâmetros estatísticos – Capacidade de carga à compressão

Aoki & Velloso		Decourt & Quaresma	
Total de Amostras	40	Total de Amostras	40
Capacidade de Carga Mínima (kN)	5245	Capacidade de Carga Mínima (kN)	5564
Capacidade de Carga Máxima (kN)	8932	Capacidade de Carga Máxima (kN)	9665
Capacidade de Carga Média (kN)	6873	Capacidade de Carga Média (kN)	7511
Desvio Padrão	876	Desvio Padrão	1175

Os histogramas representando a distribuição da capacidade de carga à compressão pelos métodos de Aoki & Velloso e de Decourt & Quaresma estão representados respectivamente nas Figuras 5.49 e 5.50.

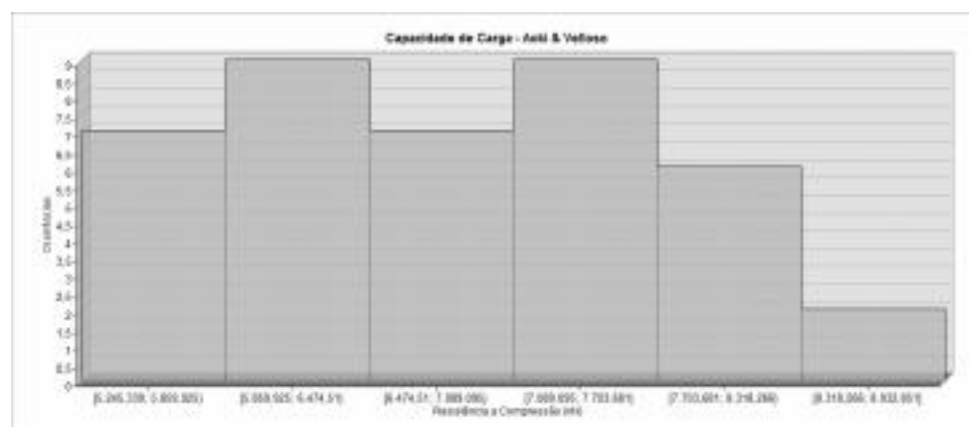


Figura 5.49 – Histograma de distribuição da capacidade de carga à compressão pelo método de Aoki & Velloso.

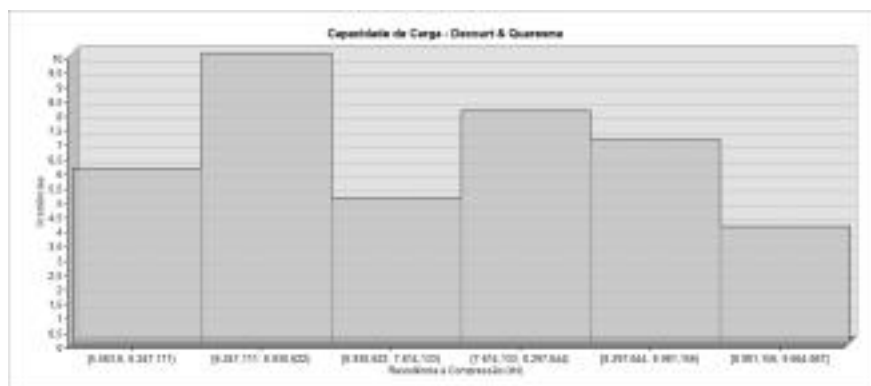


Figura 5.50 - Histograma de distribuição da capacidade de carga à compressão pelo método de Decourt & Quaresma.

Nas Figuras 5.51 e 5.52 o método de interpolação utilizado foi IDW. Este método é particularmente interessante para esta análise pela tendência a manter valores destoantes e destaca-los no mapa temático gerado. As manchas amarelas que simbolizam um valor de capacidade de carga menor ficam mais visíveis e mesmo um valor isolado tem mais influência nos seus arredores. O mesmo ocorre com as sondagens que representaram capacidade de carga mais alta: as manchas vermelhas aparecem destacadas e a superfície interpolada mostra capacidade de carga mais alta nos arredores dessas sondagens.

Ao contrário, as Figuras 5.53 e 5.54, geradas através do método de interpolação Krigagem, tendem a enxergar valores destoantes como anomalias e diminuir o peso destes na análise, gerando uma superfície mais uniforme. Nesse caso específico, valores de capacidade de carga mais baixos têm seu peso diminuído e a superfície final tende a um valor de capacidade de carga médio. Não aparecem nessa superfície os altos e baixos preservados pelo método IDW.

As capacidades de carga previstas tendem a ser maiores nas regiões frontais (próximo à porta batel) e traseira do dique. Isto está de acordo com a tendência de subida do topo da camada G em direção à lagoa (mais pronunciada), e também à subida desta cota em direção ao fundo do dique (menos pronunciada), comentada no item 5.2.3.

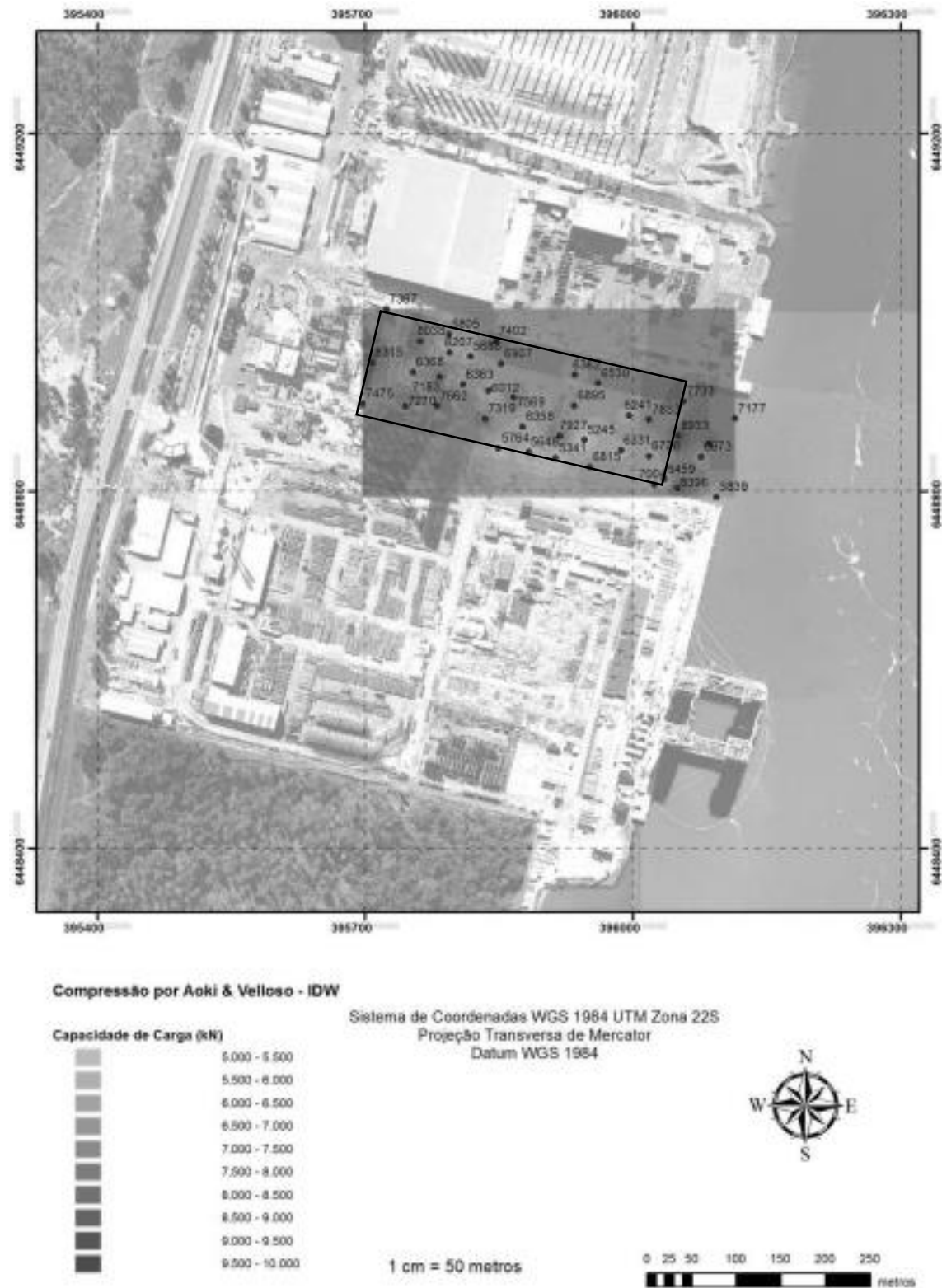


Figura 5.51 – Capacidade de carga (compressão) por Aoki & Velloso interpolada pelo método IDW.

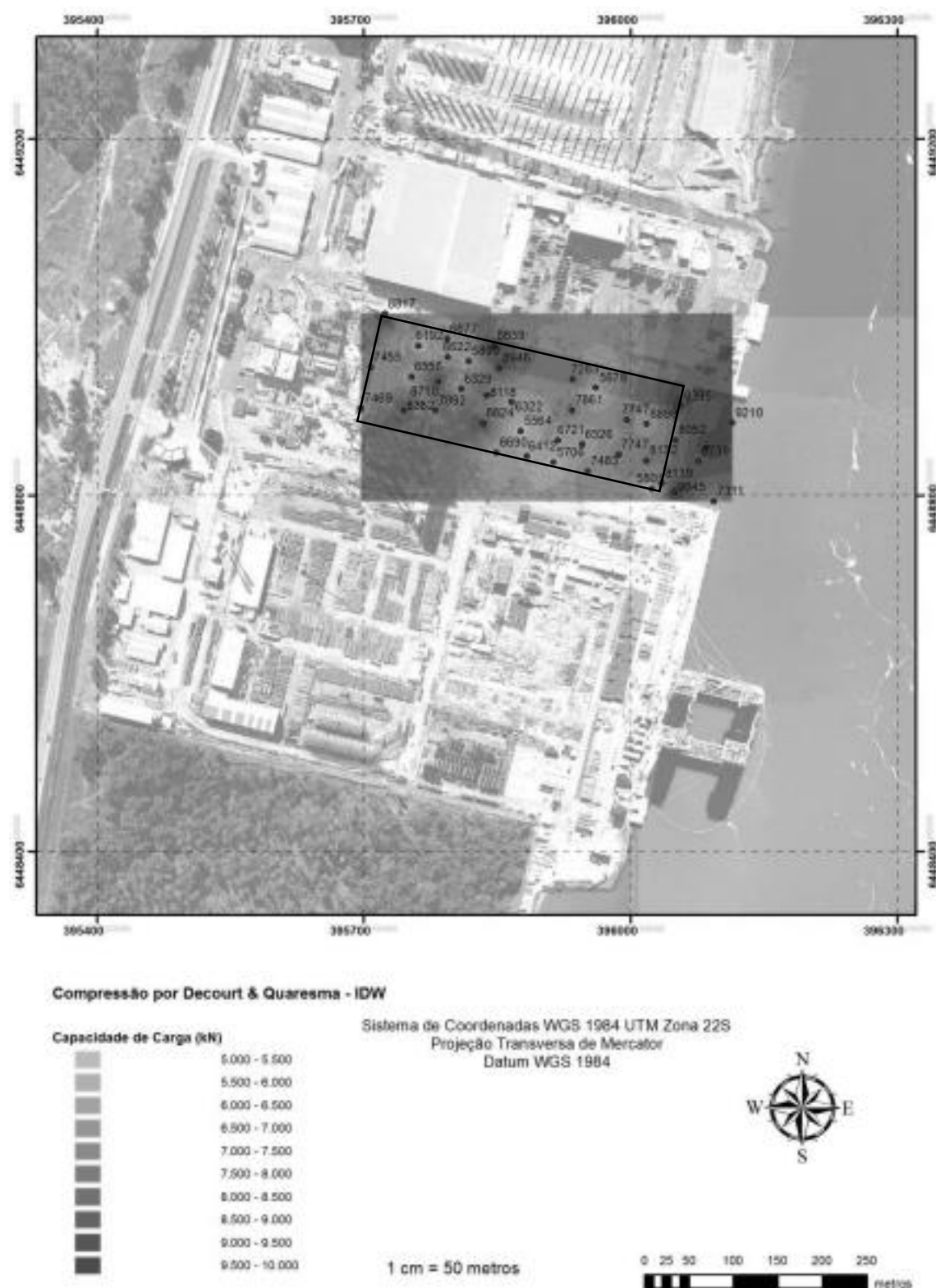


Figura 5.52 – Capacidade de carga (compressão) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método IDW.

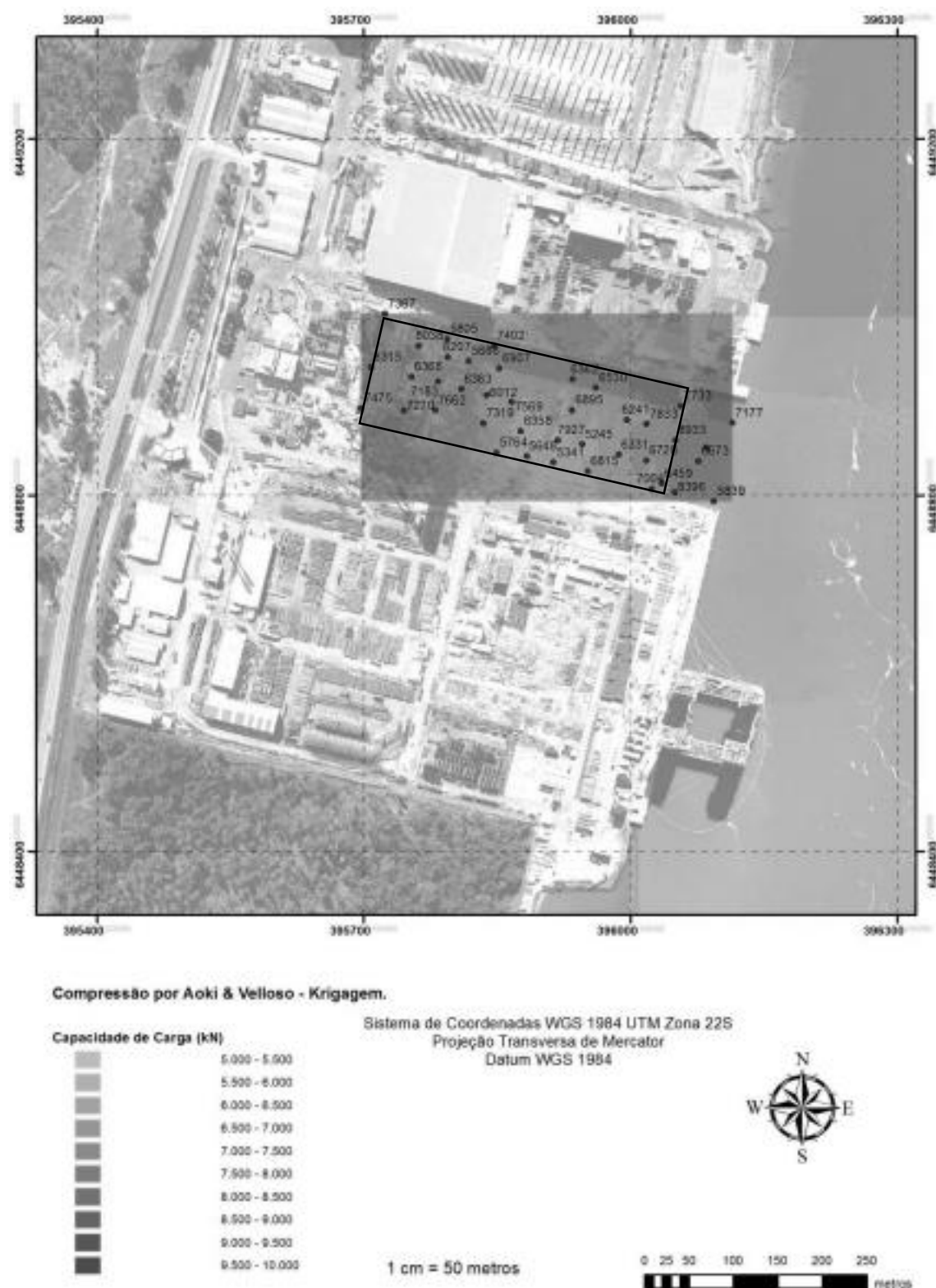


Figura 5.53 – Capacidade de carga (compressão) por Aoki & Velloso interpolada pelo método Krigagem.

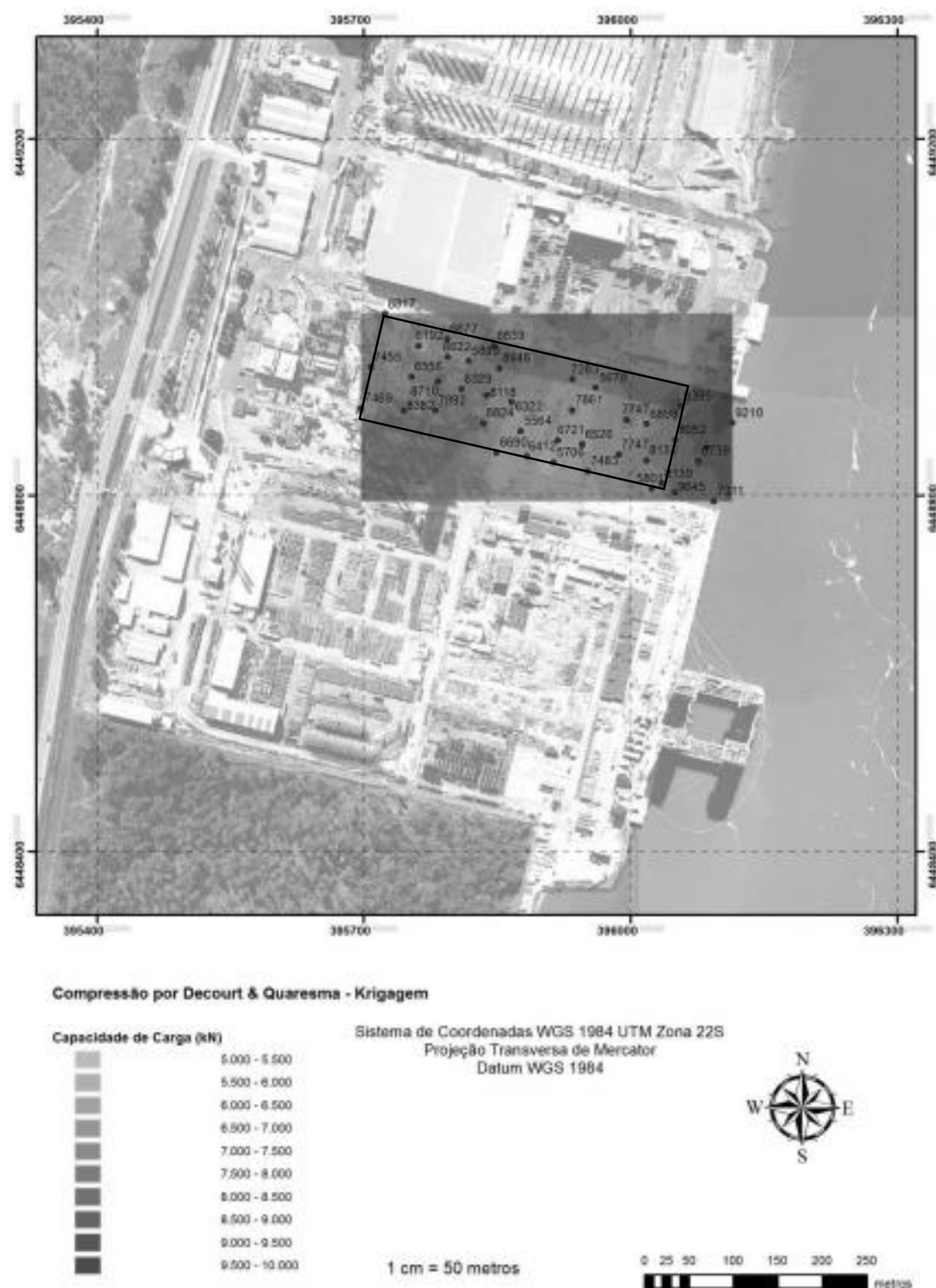


Figura 5.54 – Capacidade de carga (compressão) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método Krigagem.

5.6.2 Capacidade de carga - tração

Os princípios utilizados foram os mesmos do Item 5.6.1. No caso específico da laje de fundo do dique é importante a determinação da capacidade de carga à tração, pois a laje fica submetida à subpressão exercida pela água do subsolo quando o dique está vazio. Na Tabela 5.12 estão os parâmetros estatísticos dos dados utilizados para a geração dos mapas temáticos.

Tabela 5.12 - Parâmetros estatísticos – Capacidade de carga à tração

Aoki & Velloso		Decourt & Quaresma	
Total de Amostras	40	Total de Amostras	40
Capacidade de Carga Mínima (kN)	2810	Capacidade de Carga Mínima (kN)	2370
Capacidade de Carga Máxima (kN)	6569	Capacidade de Carga Máxima (kN)	7066
Capacidade de Carga Média (kN)	4359	Capacidade de Carga Média (kN)	4358
Desvio Padrão	875	Desvio Padrão	856

Os histogramas representando a distribuição da capacidade de carga à compressão pelos métodos de Aoki & Velloso e de Decourt & Quaresma estão representados respectivamente nas Figuras 5.55 e 5.56.

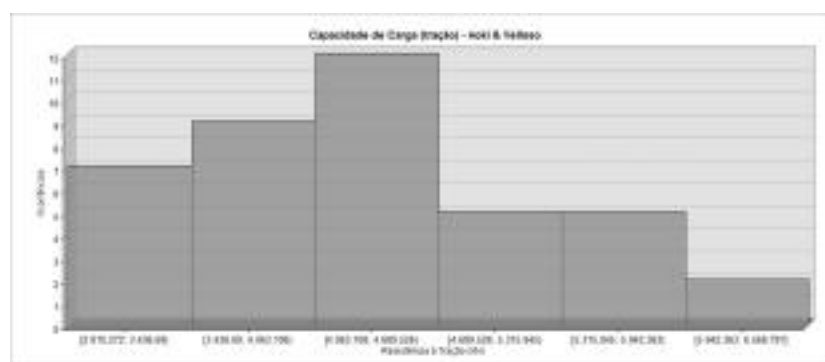


Figura 5.55 - Histograma de distribuição da capacidade de carga à tração pelo método de Aoki & Velloso.

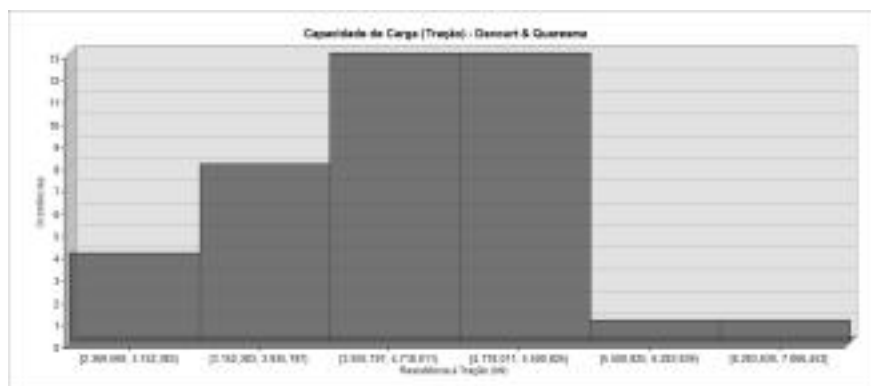


Figura 5.56 - Histograma de distribuição da capacidade de carga à tração pelo método de Decourt & Quaresma.

As mesmas observações feitas para os mapas de capacidade de carga à compressão podem ser aplicadas aos mapas que mostram a variação da capacidade de carga à tração: as Figuras 5.57 e 5.58 representam, respectivamente, a capacidade de carga à tração com base no atrito lateral obtido pelos métodos de Aoki & Velloso e Decourt & Quaresma interpoladas pelo método IDW. Como potência dois sobre o inverso da distância, ficam destacados os picos e vales na variação da capacidade de carga.

As Figuras 5.59 e 5.60 representam os valores de capacidade de carga à tração interpolados por Krigagem para os métodos de Aoki & Velloso e Decourt & Quaresma, respectivamente, com sua tendência clara a geração de superfícies mais uniformes.

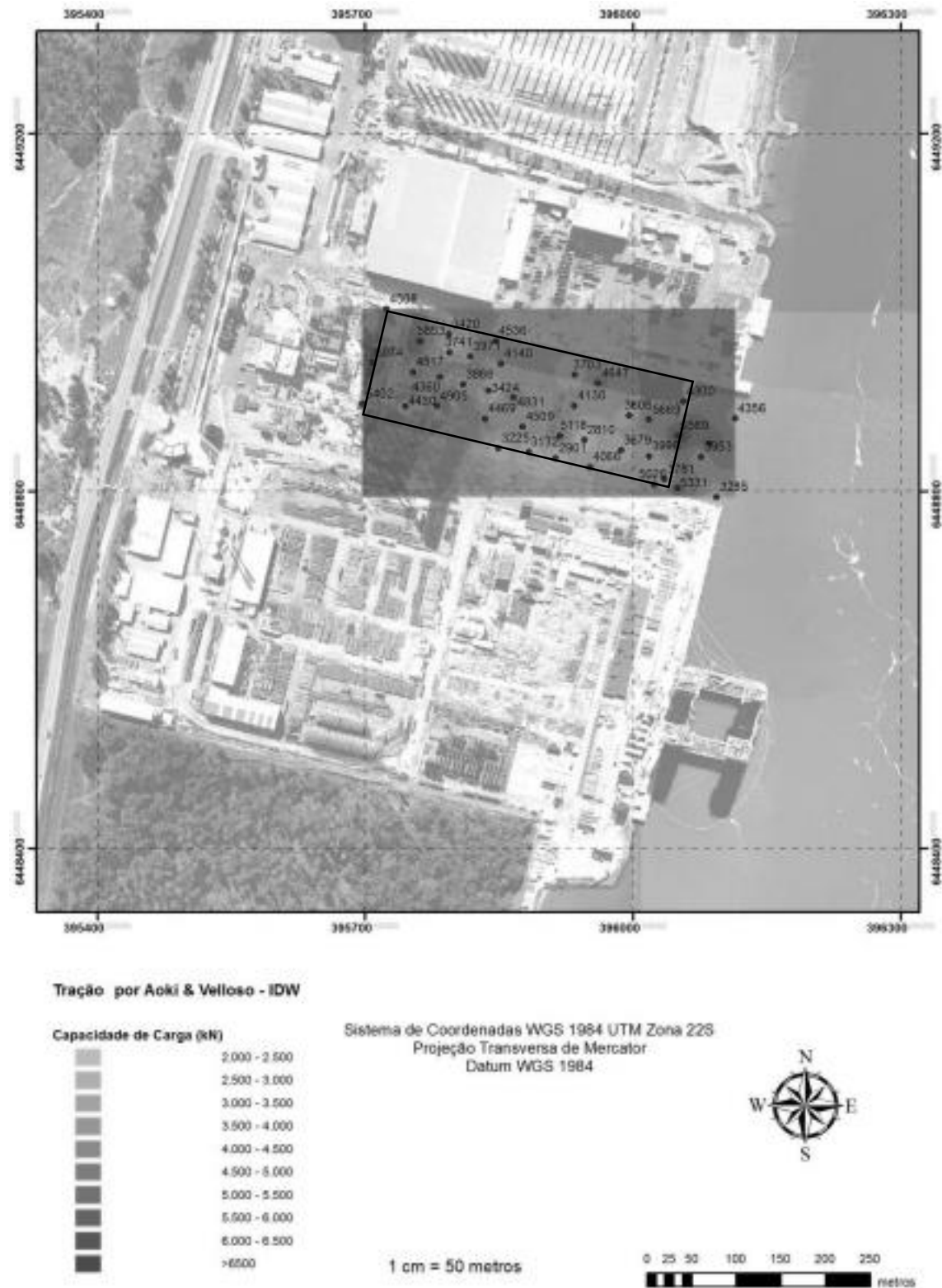


Figura 5.57 - Capacidade de carga (tração) por Aoki & Velloso interpolada pelo método IDW.

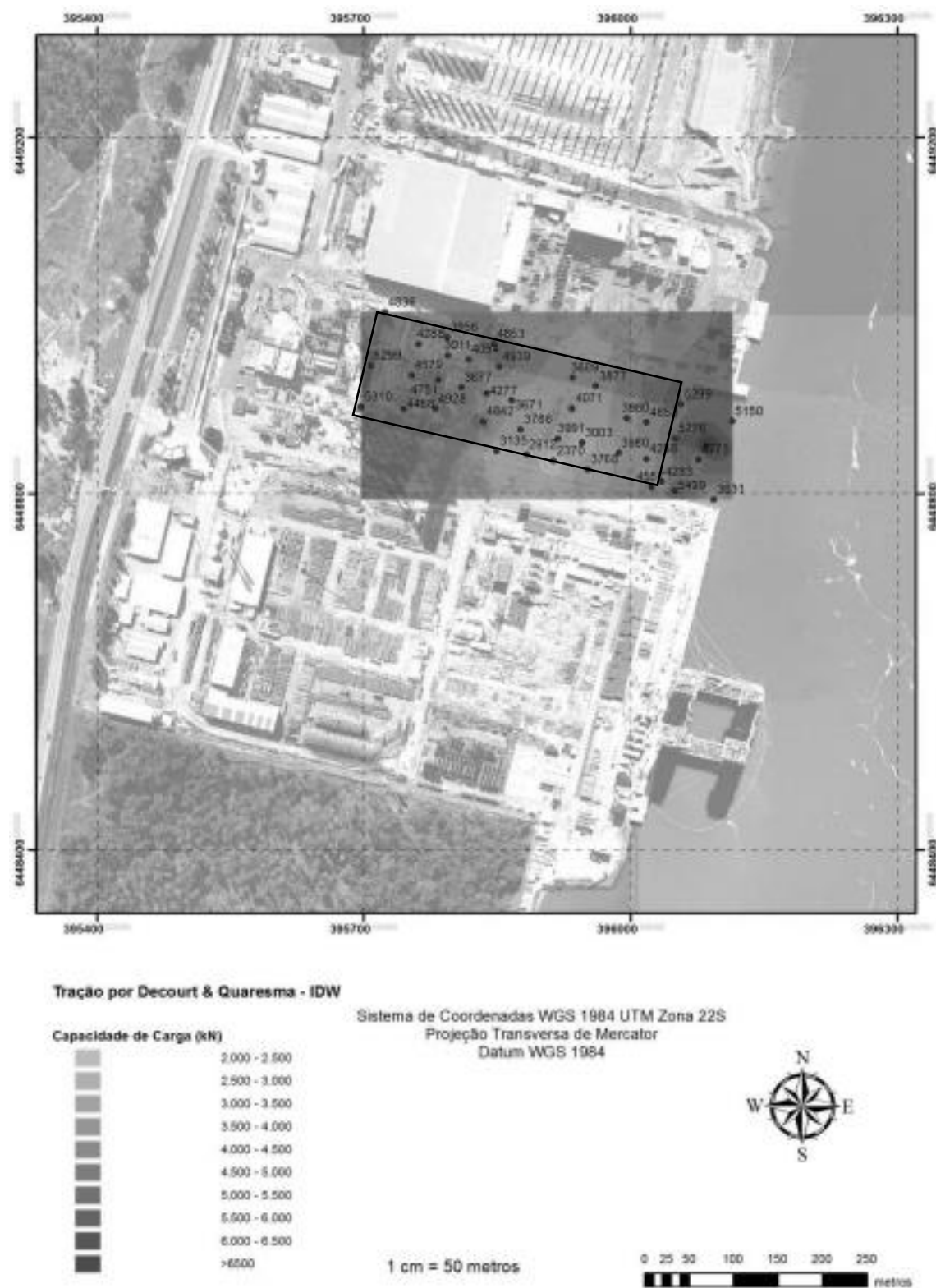


Figura 5.58 - Capacidade de carga (tração) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método IDW.

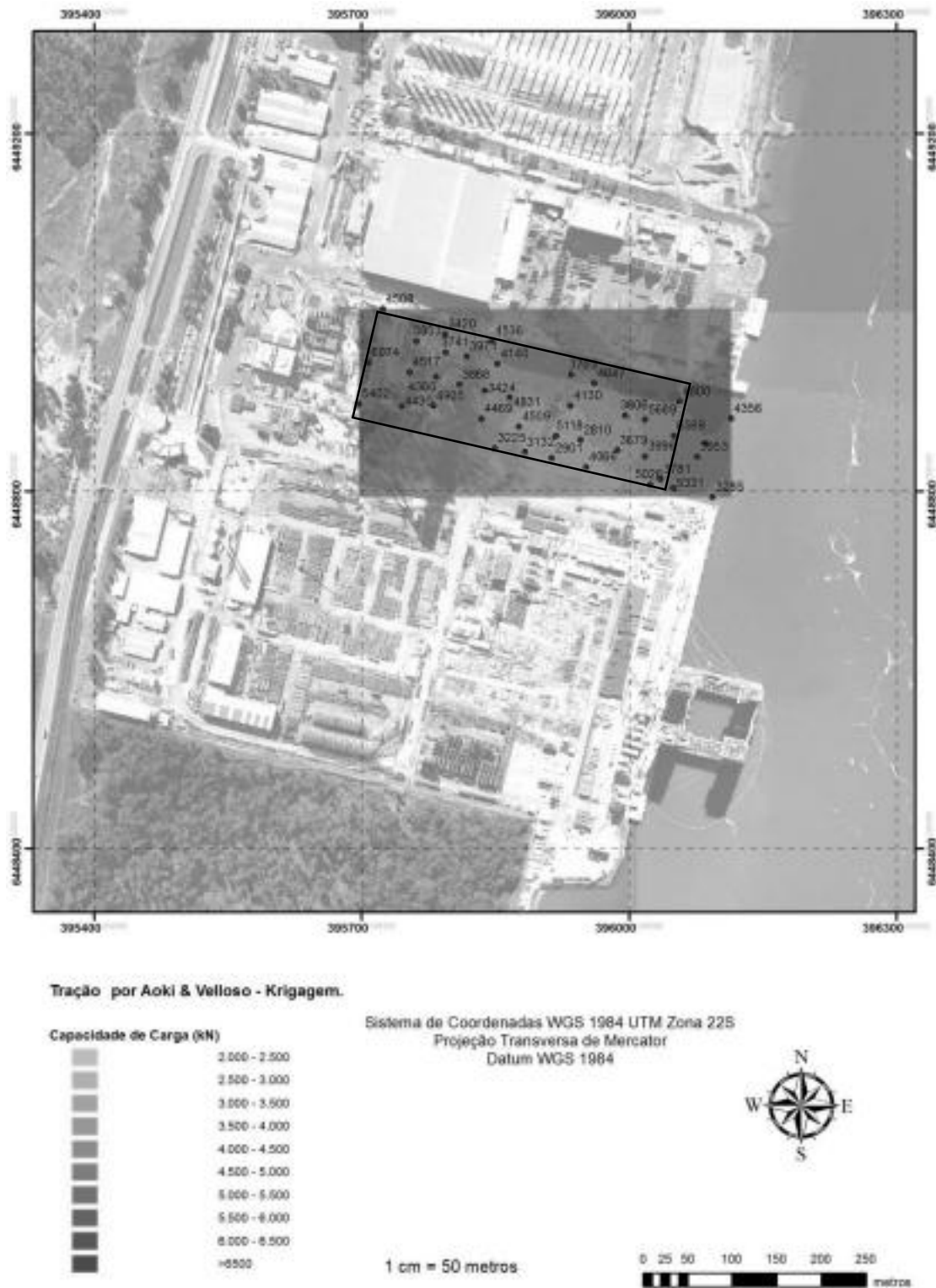


Figura 5.59 - Capacidade de carga (tração) por Aoki & Velloso interpolada pelo método Krigagem.

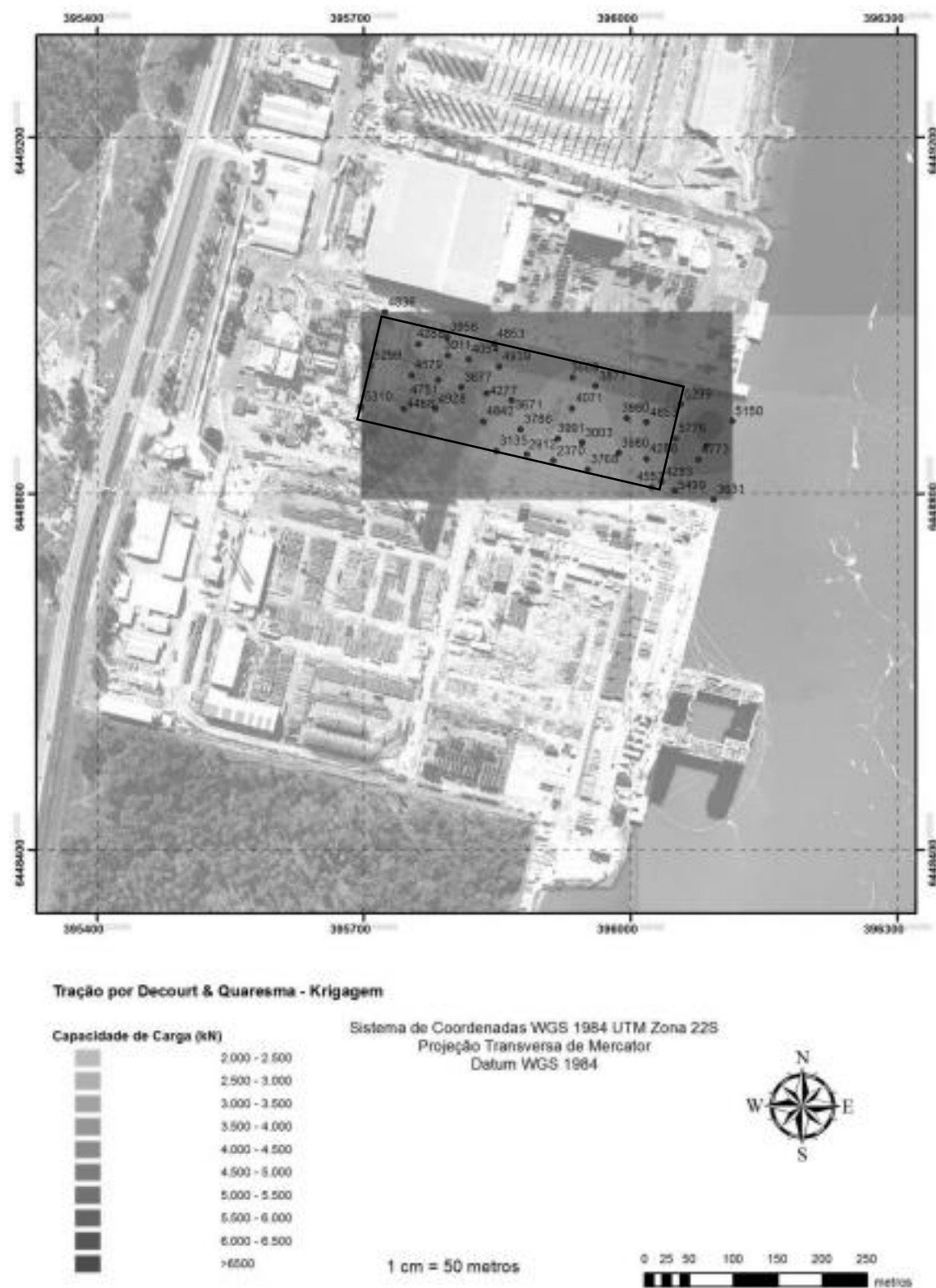


Figura 5.60 - Capacidade de carga (tração) por Decourt & Quaresma interpolada pelo método Krigagem.

6. CONCLUSÕES

Como conclusão geral, pode-se afirmar que foi possível a construção de um modelo tridimensional representativo do subsolo do local onde se construiu o Estaleiro Rio Grande. Este modelo engloba a distribuição das camadas de solo que compõem o terreno e a distribuição dos valores de N_{60} medidos em sondagens à percussão do tipo SPT. Apesar do empreendimento em questão já estar construído, o modelo gerado pode ser útil no auxílio e tomada de decisão em relação a qualquer anomalia que venha a ser observada, seja no desempenho das suas fundações, seja no desempenho dos tirantes que ancoram as cortinas de estaca-prancha do dique seco edificado.

Como conclusões específicas podem ser citadas:

- Os métodos de interpolação utilizados nas ferramentas SIG permitem uma análise mais aprimorada dos dados de sondagens geotécnicas, minimizando o efeito de erros humanos e discrepâncias relativas a diferentes procedimentos e equipamentos de ensaio utilizados pelas várias empresas do ramo.
- Na área do dique, o registro da presença de conchas foi marcante nas camadas D e E, que mostram preponderância de argila siltosa em suas composições. Esse fato apóia a ideia de que as camadas argilosas do perfil estratigráfico foram depositadas em períodos de transgressão marinha, quando estas áreas de deposição estavam submersas e submetidas a condições de baixa energia de ondas.
- As cotas médias do topo das camadas se aproximam muito das cotas médias definidas por Bastos (2014). Ficou clara a tendência de subida do topo das camadas E e G em direção à lagoa, demonstrada nos cortes longitudinais da região do dique seco. As cotas do topo da camada G também sobem ligeiramente em direção à parte de trás do dique (mais próxima à estrada). Estes fatos apontam para a maior dificuldade de cravação de estacas nas regiões frontal (próximo à porta batel) e traseira do dique, devido às cotas mais altas do topo da camada G nestas áreas.

- Os dois métodos de interpolação testados neste estudo (IDW e Krigagem) apresentam, dependendo das configurações adotadas, diferenças nos resultados. Observou-se que cada método tem melhor aplicação dependendo do tipo dado que está sendo analisado e do tipo de fenômeno que se deseja destacar. Por exemplo, observou-se que a Krigagem foi o melhor interpolador na análise das camadas de solo, onde se esperam superfícies mais suaves. Já o IDW com peso 2 tem o poder de destacar diferenças (mesmo brancas) nos dados analisados, podendo ser útil na análise da distribuição dos valores de N_{SPT} e capacidade de carga de estacas. Entretanto, a presença de paleossolais pode ser mascarada pela tendência do método de Krigagem de suavizar as superfícies resultantes, enquanto o IDW com peso 2 preserva a capacidade de destacar as diferenças.
- Os mapas criados com a distribuição de N_{SPT} permitem a identificação de zonas mais e menos resistentes do subsolo na área do estaleiro. Pode-se observar também que os histogramas de N_{SPT} por cota mostram uma distribuição que tende a ser assimétrica, podendo possivelmente ser bem representada pela distribuição log-normal.
- A comparação do modelo tridimensional de N_{SPT} com uma sondagem real cujos dados foram considerados inconsistentes demonstra que aquele modelo é um bom predictor dos resultados de N_{SPT} na área em estudo, já que os resultados previstos se adequaram a descrição dos solos apresentada.
- O perfil composto pelos valores médios de N_{SPT} ao longo da profundidade e pelas cotas médias de transição entre as camadas de solo (Figura 5.47) demonstra nitidamente a presença da camada E, entre as cotas -21 m e -24 m, formada por areia compacta. Fica caracterizada também a presença de duas camadas argilosas, D e F, sendo a última, de maior espessura, já bem conhecida e descrita na literatura técnica. A camada F pode trazer importantes efeitos em termos de recalques por adensamento, e também determina que as fundações profundas das obras da região atinjam cotas inferiores a -40 m.
- A comparação dos perfis de N_{SPT} médio gerados com sondagens realizadas antes e depois do início da escavação do dique evidencia uma ligeira queda nos valores de N_{SPT} após a escavação, na camada mais arenosa adiacente ao fundo da escavação.

- A capacidade de carga prevista para as estacas da laje de fundo do dique tende a ser maior nas regiões frontal (próximo à porta batel) e traseira do dique. Isto está de acordo com a tendência de subida do topo da camada G em direção à lagoa (mais pronunciada), e também à subida desta cota em direção ao fundo do dique (menos pronunciada).

7. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Sugerem-se os seguintes tópicos para futuras pesquisas sobre o assunto tratado na presente dissertação:

- Desenvolver sub-modelos tridimensionais com bancos de dados parciais, separados por empresa executora da sondagem;
- Testar outros métodos de interpolação (topo to raster, Gauss-Markov, mínimos quadrados, etc);
- Cruzar os resultados do modelo tridimensional desenvolvido no presente trabalho, com as informações oriundas da cravação das estacas da laje de fundo;
- Incluir outros tipos de ensaios de prospecção geotécnica na análise, tais como piezocone e dilatômetro;
- Incluir análise de capacidade de carga dos tirantes, utilizados na ancoragem das cortinas de estacas-prancha da obra a partir da distribuição espacial dos mesmos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6484. **Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento do Solo**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 5, 1975, Buenos Aires. Anais, v.1, p. 367-376

AGUIB, A. S. II. GIS Application for Constructing Knowledge Base And Representing 3d Geotechnical Data. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON STRUCTURAL AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 11, 2005, Cairo, Egito. Anais do XI ICSGE. Egito, Ain Shams University In CD-ROM.

BLINIGAS, H. Q. Previsões para a curva carga-recalque de estacas a partir de SPT. Rio de Janeiro, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COOPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BASTOS, E.; Evolução e Estratigrafia do Terreno na Região do Superporto de Rio Grande/RS: Análise com Base em Propriedades Geotécnicas e Variações do Nível Médio do Mar. Rio Grande, RS, 2014. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

DÉCOURT, L.; ALBIERO, J. II.; CINTRA, J. C. A. Análise e projeto de Fundações Profundas, Capítulo 8 In: Fundações Teoria e Prática. 2ª. ed. São Paulo/SP; Editora Pini, 1999. 751p.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga a partir de valores de SPT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6, 1978, Rio de Janeiro. Anais do VI COBRAMISFE, Rio de Janeiro, 1978, V. 1, p.45-53.

DEMARQUI, E. N. Notas de Aula - Geoprocessamento e SIG. Não publicado.

DIAS, C. R. R. Parâmetros Geotécnicos da Argila Siltosa Mole da Cidade de Rio Grande – Região do Superporto. *Vetor*, Rio Grande, Vol. 3, p. 9-34, 1993.

DIAS, C. R. R.; BASTOS, C. A. B.; PEDREIRA, C. L. S.; SCHULER, A. R.; SCHMITT, L. A. Caracterização do subsolo do Superporto de Rio Grande a partir de novas investigações geotécnicas para obras portuárias. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNICA, 4, 2008, Coimbra, Portugal. Actas Coimbra, Portugal, SPG/ABMS, 2008, p. 375 – 382.

DIAS, C. R. R.; BASTOS, C. A. B.; PEDREIRA, C. L. S. Variações no comportamento geotécnico da camada argilosa profunda ao longo do Porto de Rio Grande: influência da energia durante o processo sedimentar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15, 2010, Gramado. Anais do XV COBRAMSEG. São Paulo: ABMS, 2010. In CD-ROM.

ESRI. Manual ArcGIS. Redlands, CA, USA, 2012.

GERDAU. Coletânea do uso do aço: perfis Gerdau Açominas aplicados como estacas metálicas em Fundações Profundas, 2ª. Ed, 2007.

GOULARTH, C. L., Inventário e análise dos parâmetros da argila siltosa profunda da região portuária de Rio Grande. Rio Grande, 2012. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

LAPROVITTA, H. Reavaliação de Método Semi-empírico de Previsão da Capacidade de Carga de Estacas a partir do Banco de Dados. Rio de Janeiro, 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MENDES, R. M.; LORANDI, R. Indicator kriging geostatistical methodology applied to geotechnics project planning. In: IRISH ASSOCIATION FOR ECONOMY GEOLOGY INTERNATIONAL CONGRESS, 10. 2006, Nottingham, United Kingdom. Anais do IAG2006, Theme 9, Paper 527, In CD-ROM.

PEREIRA, A. C.; TENÓRIO, D. O.; COUTINHO, R. Q. Ocorrência de moluscos como fator importante na caracterização geológico-geotécnica de um depósito de argila orgânica no bairro do Ibura, Recife-PE. **Trabalhos Oceanográficos da Universidade Federal de Pernambuco**, Recife, v. 26, n. 1, p. 57-62, 1998.

RIBUERO, K. C.; Comparação Entre Diagramas de Cravação de Estacas e Boletins de Sondagens SPT Utilizando Ferramentas de Geoestatística. Rio Grande, RS, 2010, 117p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Engenharia Civil), FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

RODGERS, J. D.; LUNA, R. Impact of geographical information systems on geotechnical engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 5. 2004, New York, USA. Anais do V ICCUIG. Rolla, Missouri, USA: University Of Missouri, In CD-ROM.

ROGERS, Simon. John Snow's data journalism: the cholera map that changed the world. 2013. Disponível em: <<http://www.theguardian.com/news/datablog/2013/mar/15/john-snow-cholera-map>>. Acesso em 27/02/2015.

SCHNAID, F. Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. 1. ed. São Paulo/SP, Oficina de Textos, 2000, 189p.

SCHILLER, A. R. Mapeamento Geostatístico de Ensaios de Prospeção Geotécnica no Município do Rio Grande. Rio Grande, RS, 2007, 230p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Engenharia Civil), FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

SOARES, W. C.; Banco de Dados Geológico – Geotécnico com base e Sondagens a Permeação e uso do SIG: Análise Espacial da Profundidade do Lençol Freático e do N_{SP} para obras de fundação em João Pessoa – PB. São Carlos, SP, 2011. 215p. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

UFES (2014). Apostila do ArcGIS. Laboratório de Topografia e Cartografia, Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <www.ltc.ufes.br>. Acessado em 28/11 2014.

VIEIRA, E.F. Geografia do Município de Rio Grande. Rio Grande RS. Prefeitura Municipal de Rio Grande – Secretaria Municipal de Educação e Cultura. 1970. 30p.

WAN-MOHAMAD, W. N. S.; ABDUL-GHANI, A. N. The use of geographical information system (GIS) for geotechnical data processing and presentation. In: INTERNATIONAL BUILDING CONTROL CONFERENCE, 2, 2011, Proceedings, II IBCC. Elsevier Ltd. Procedia Engineering 20, p. 397-406.

APÊNDICE A. DISTRIBUIÇÃO DO N_{SPI} A CADA METRO.

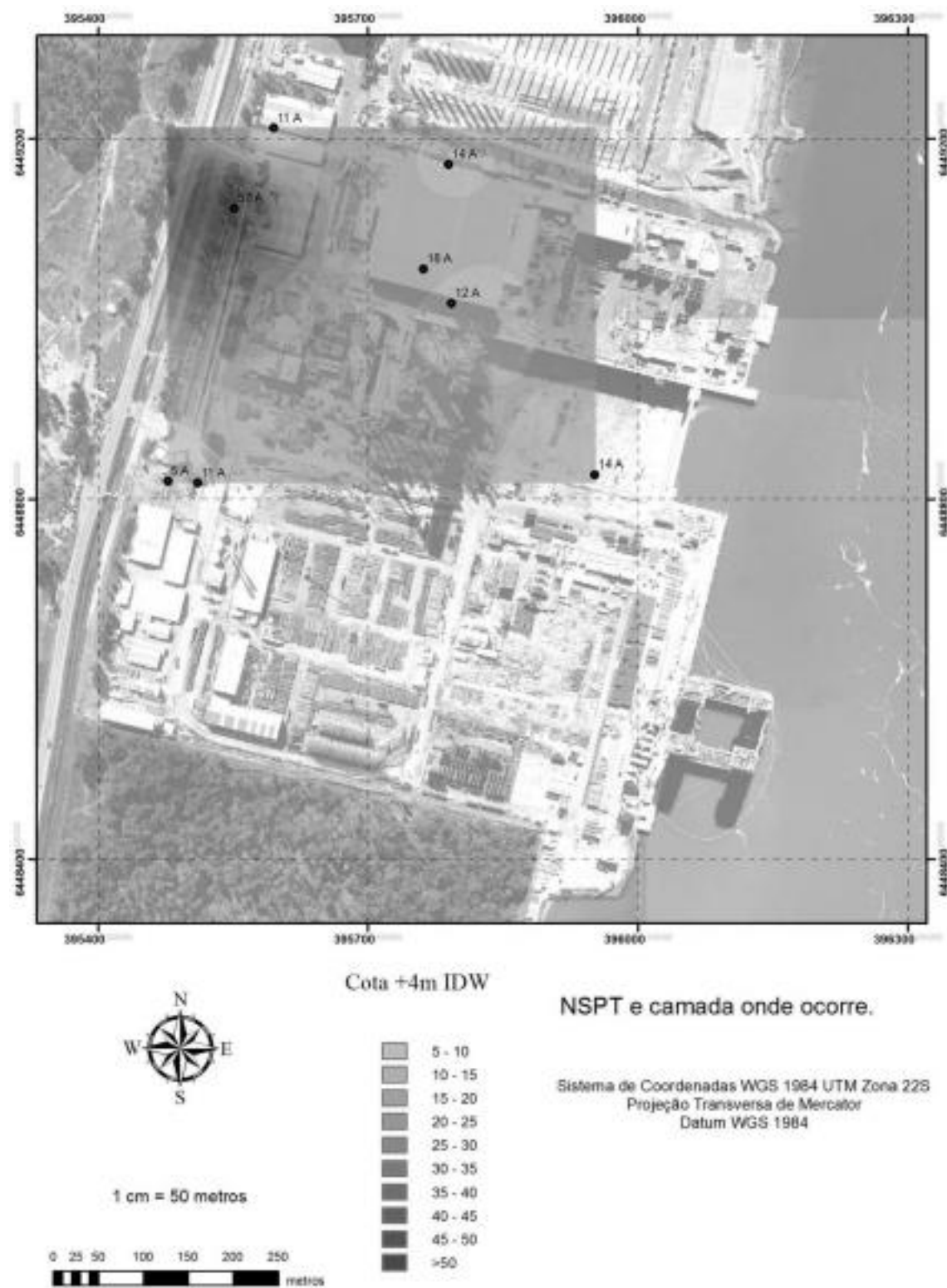


Figura A.0.1 - Distribuição do N_{SPT} na cota +4 m pelo método IDW.

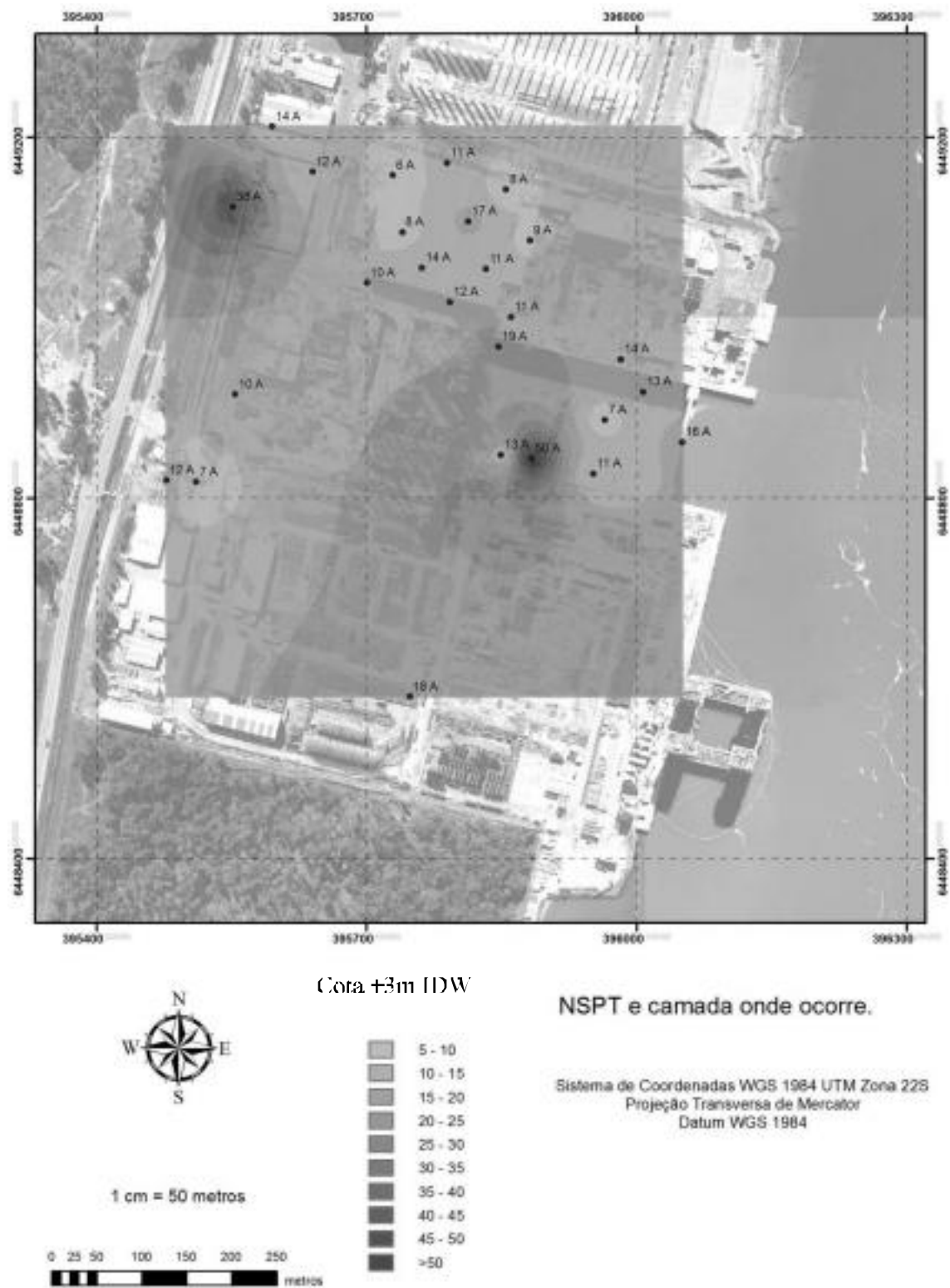


Figura A.0.2 - Distribuição do N_{SPF} na cota +3 m pelo método IDW.

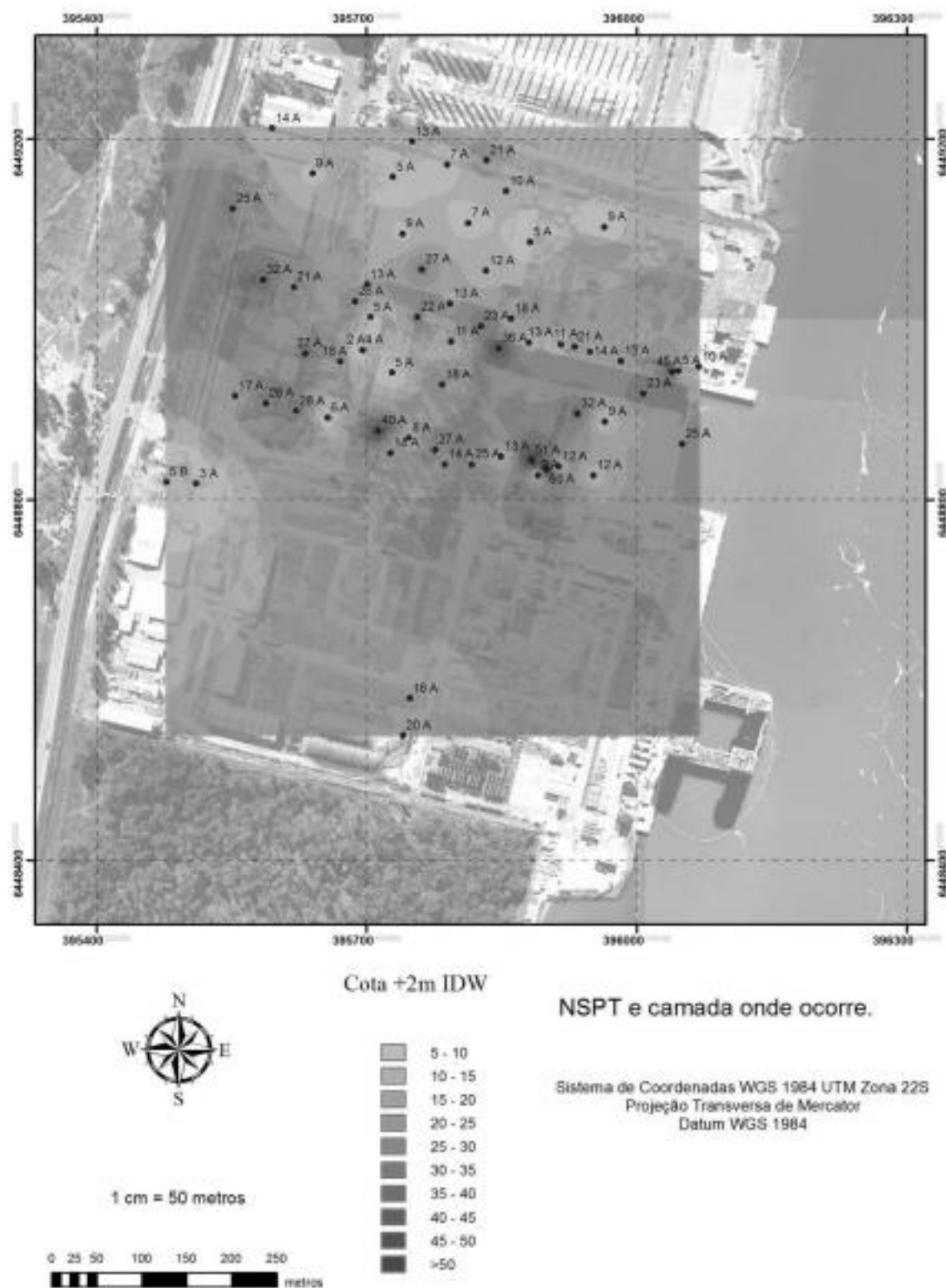


Figura A.0.3 - Distribuição do N_{5PT} na cota -2 m pelo método IDW.

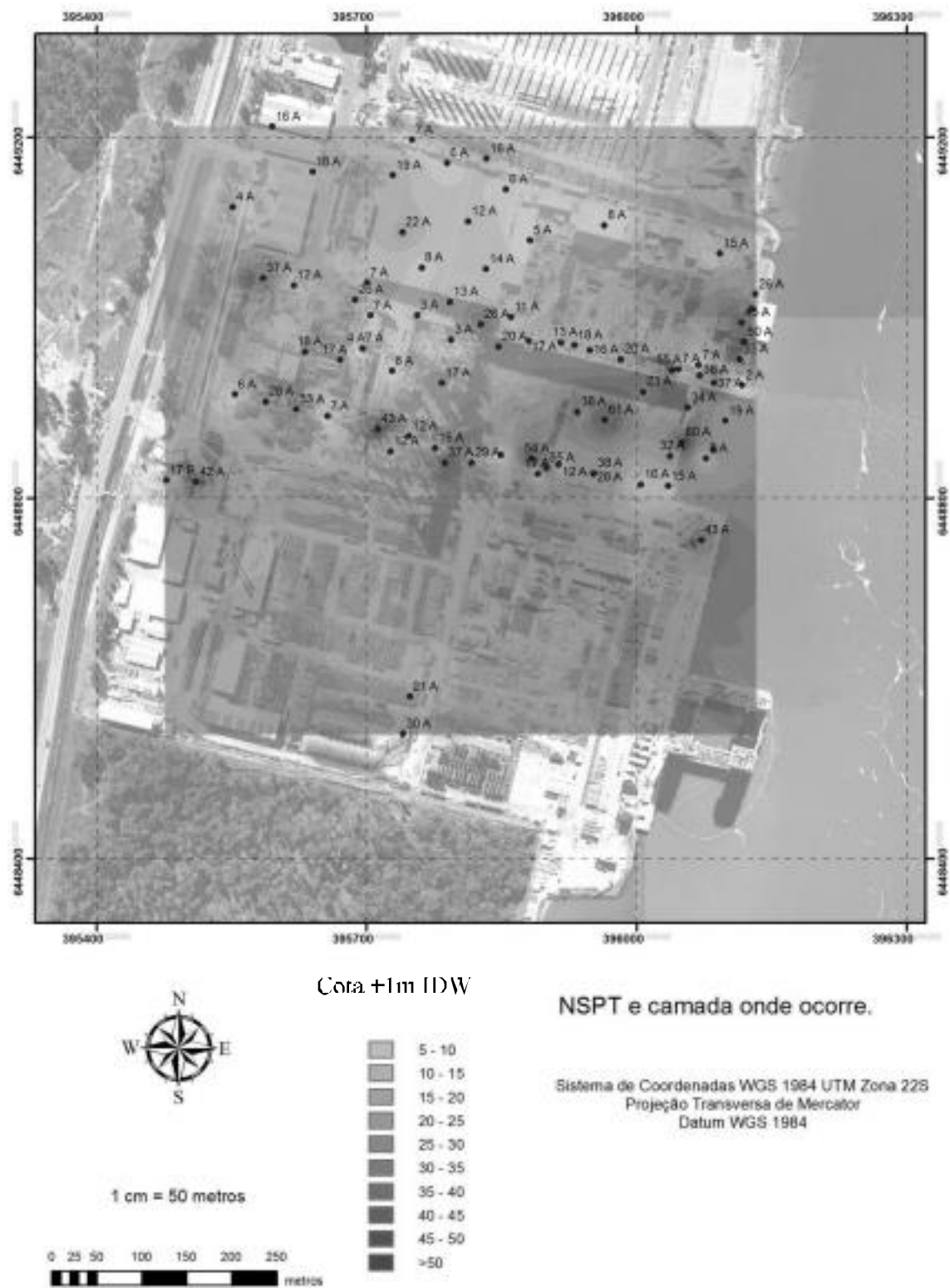


Figura A.0.4 - Distribuição do N_{sPT} na cota +1 m pelo método IDW.

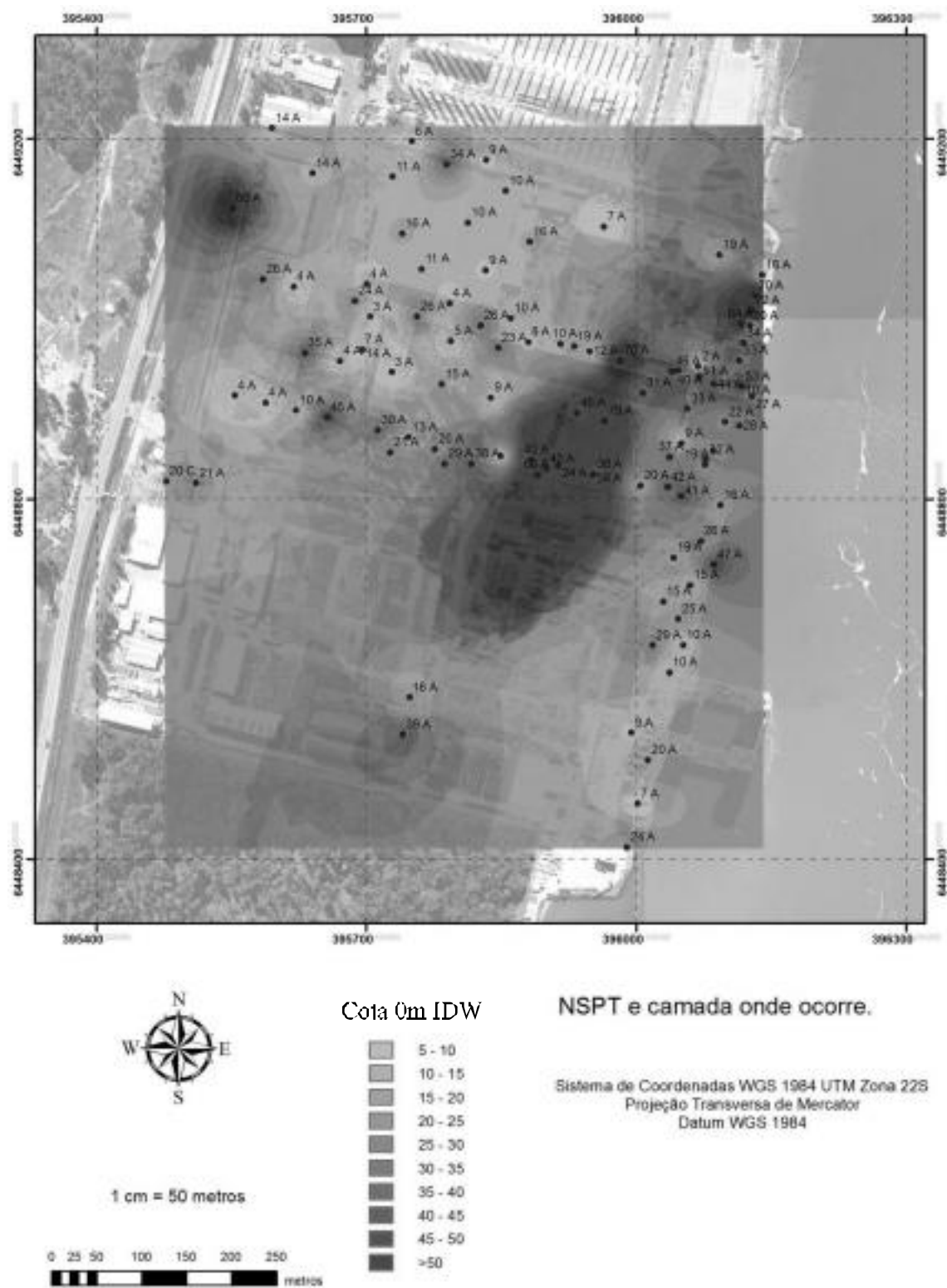


Figura A.0.5 - Distribuição do NSPT na cota 0 m pelo método IDW.

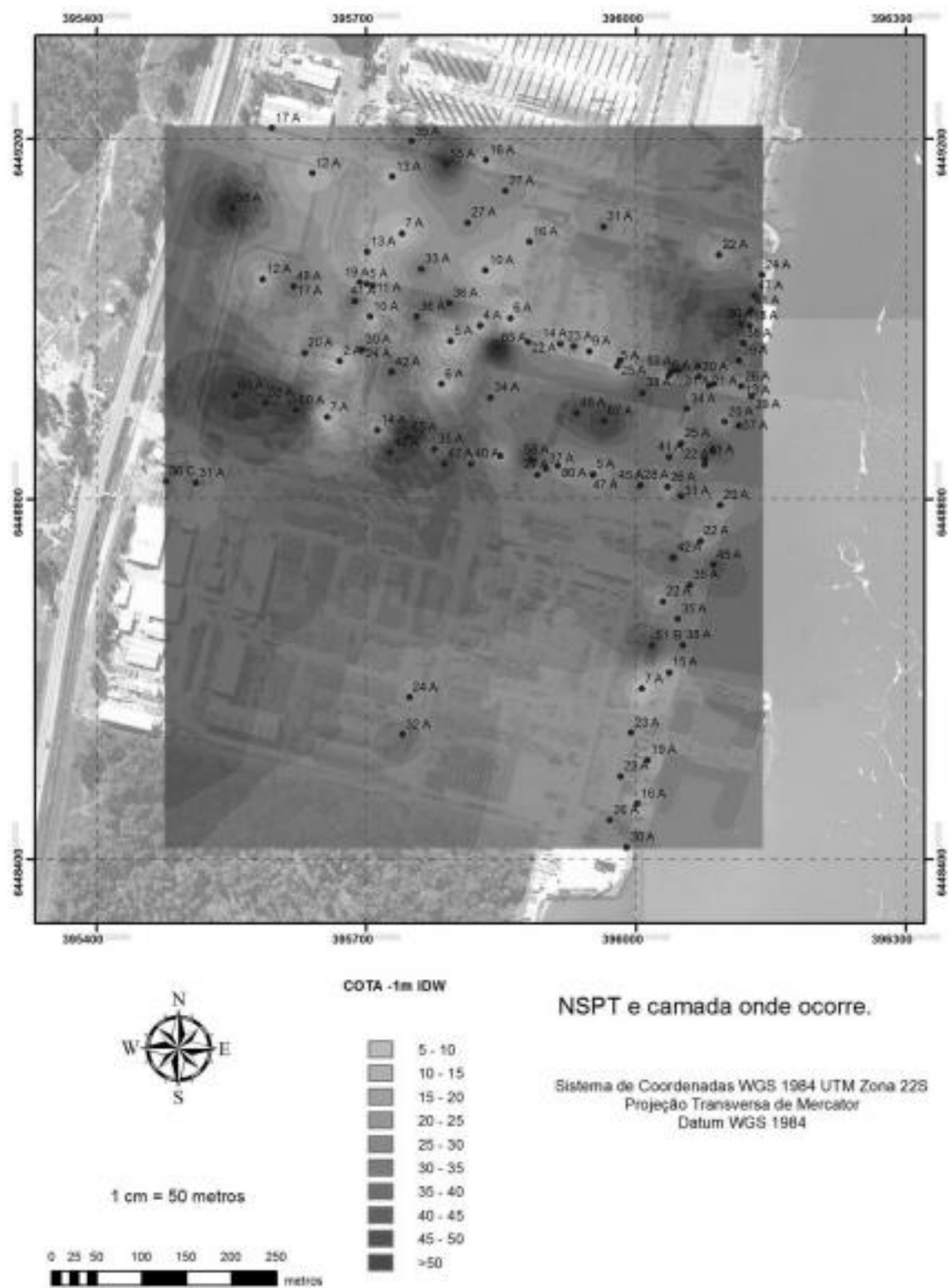
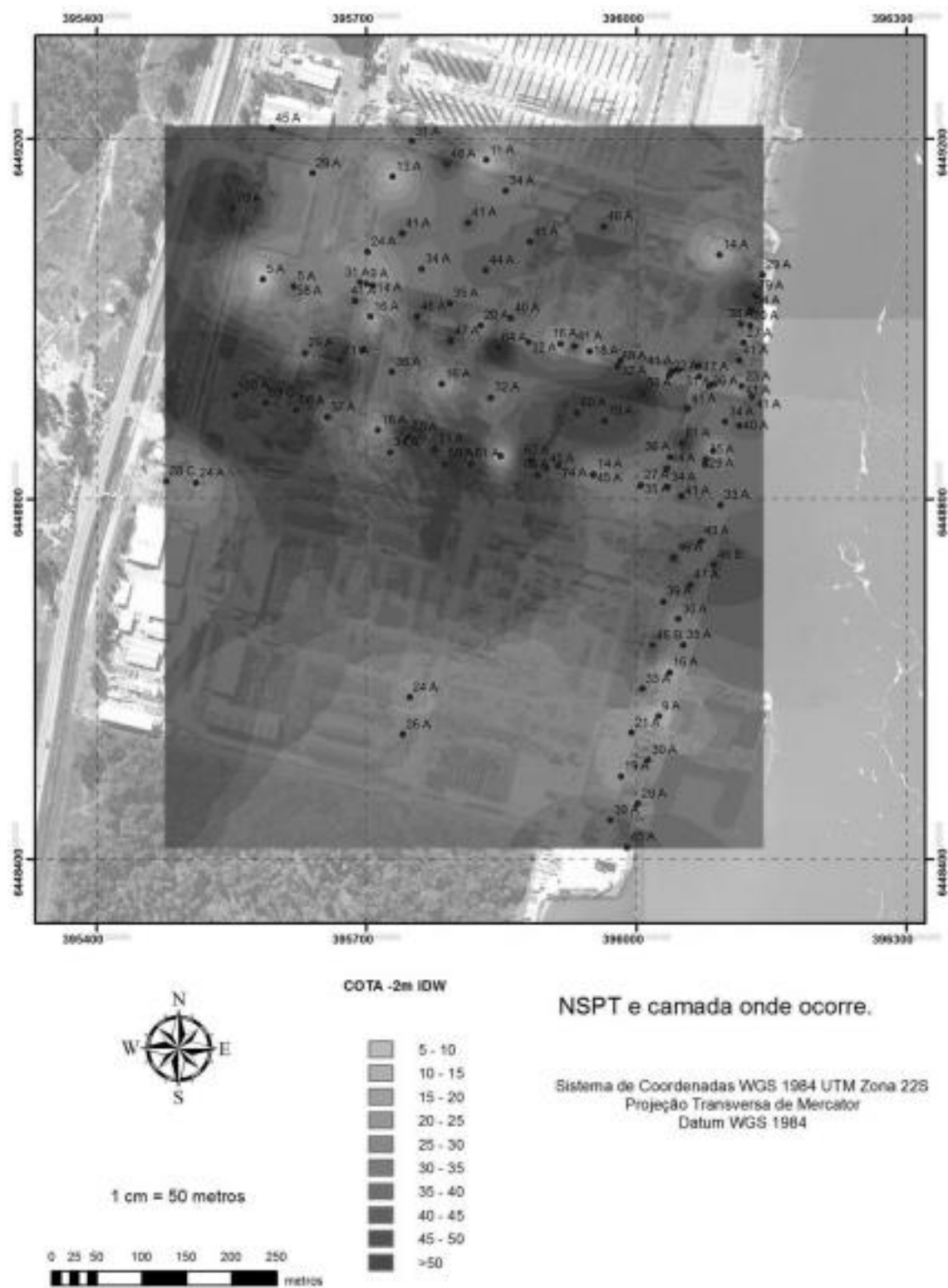


Figura A.0.6 - Distribuição do NSPT na cota -1 m pelo método IDW.



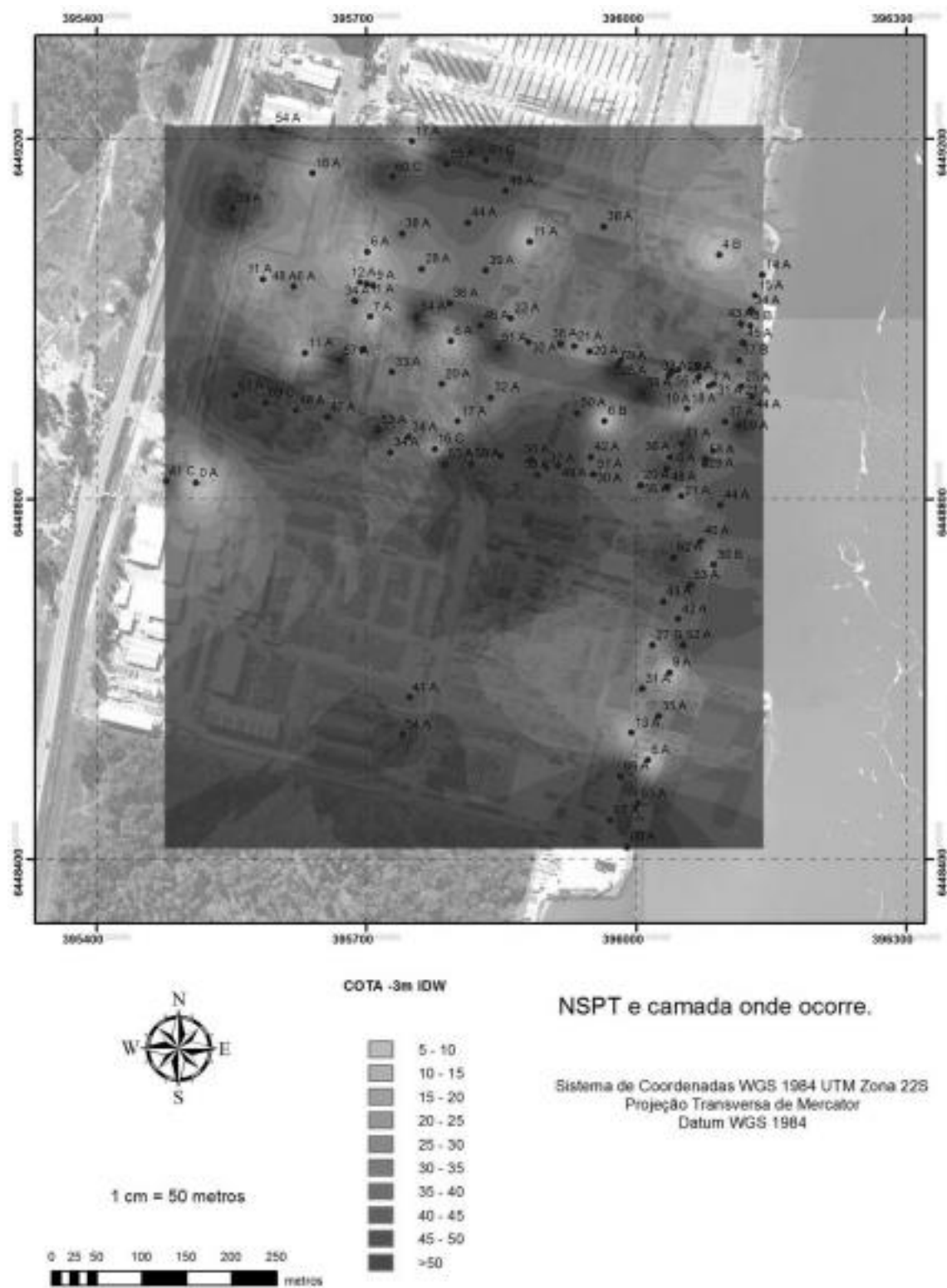


Figura A.0.8 - Distribuição do NSPT na cota -3 m pelo método IDW.

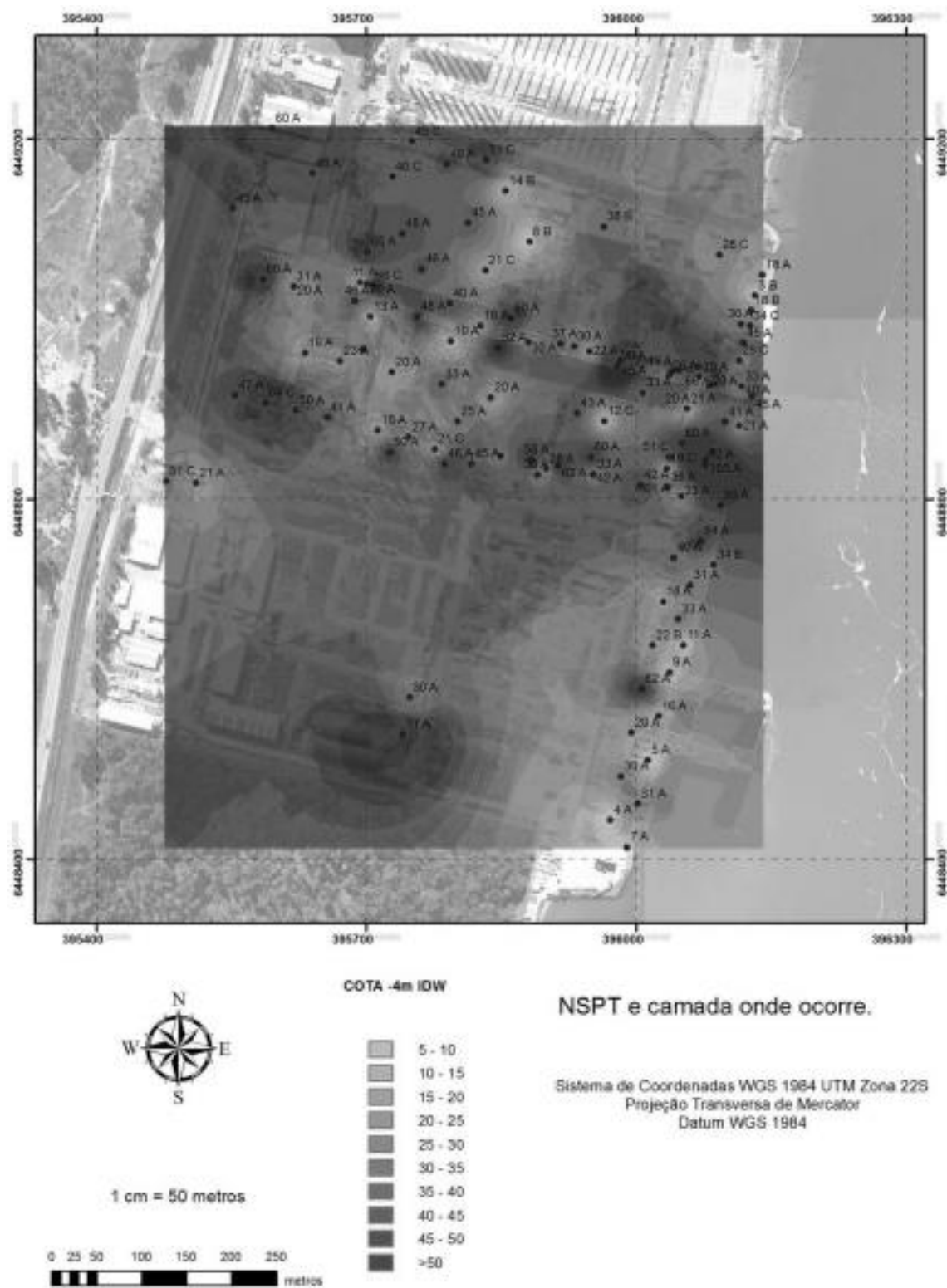


Figura A.0.9 - Distribuição do NSPT na cota -4 m pelo método IDW.

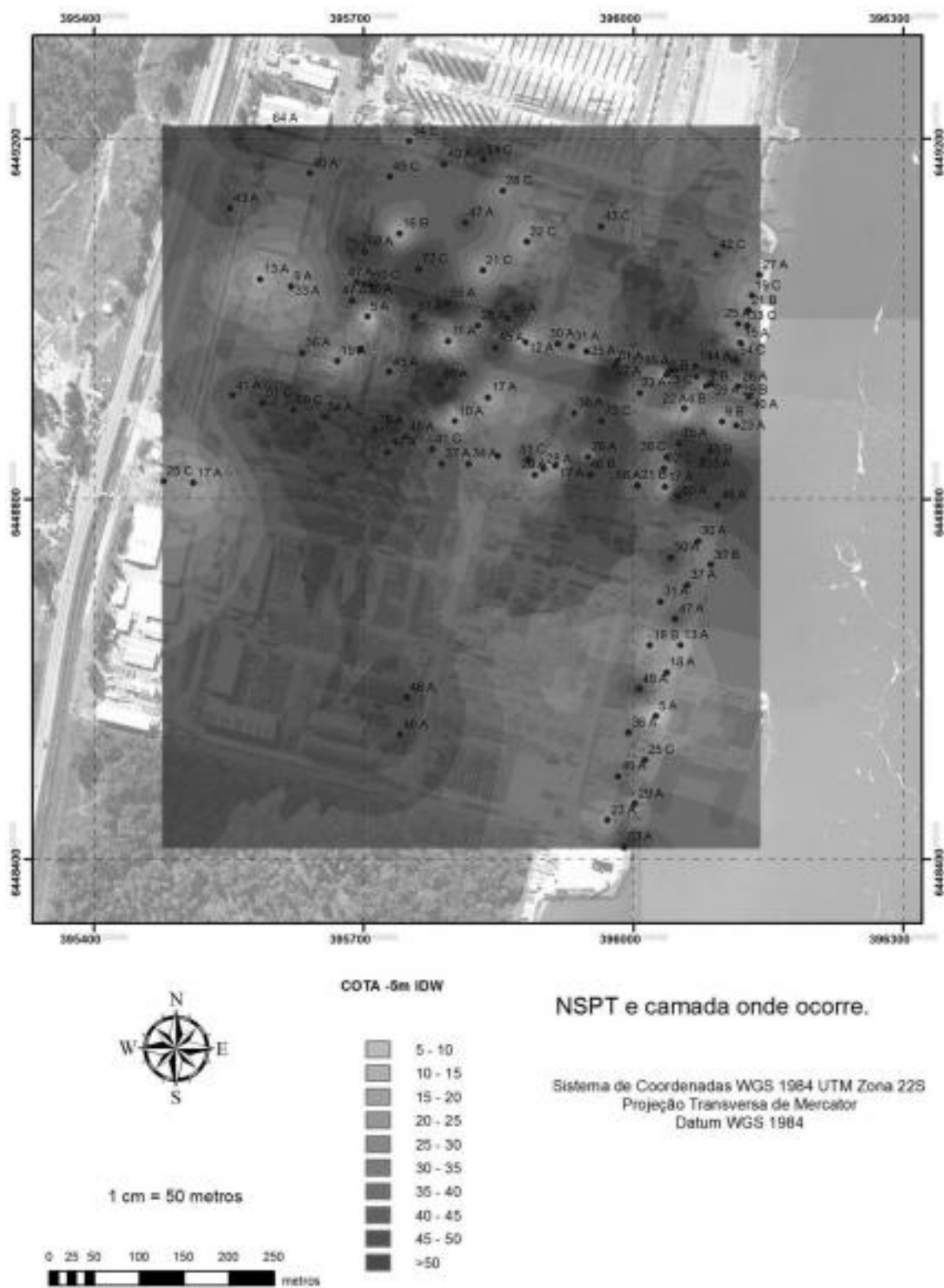


Figura A.0.10 - Distribuição do N_{spr} na cota -5 m pelo método IDW.

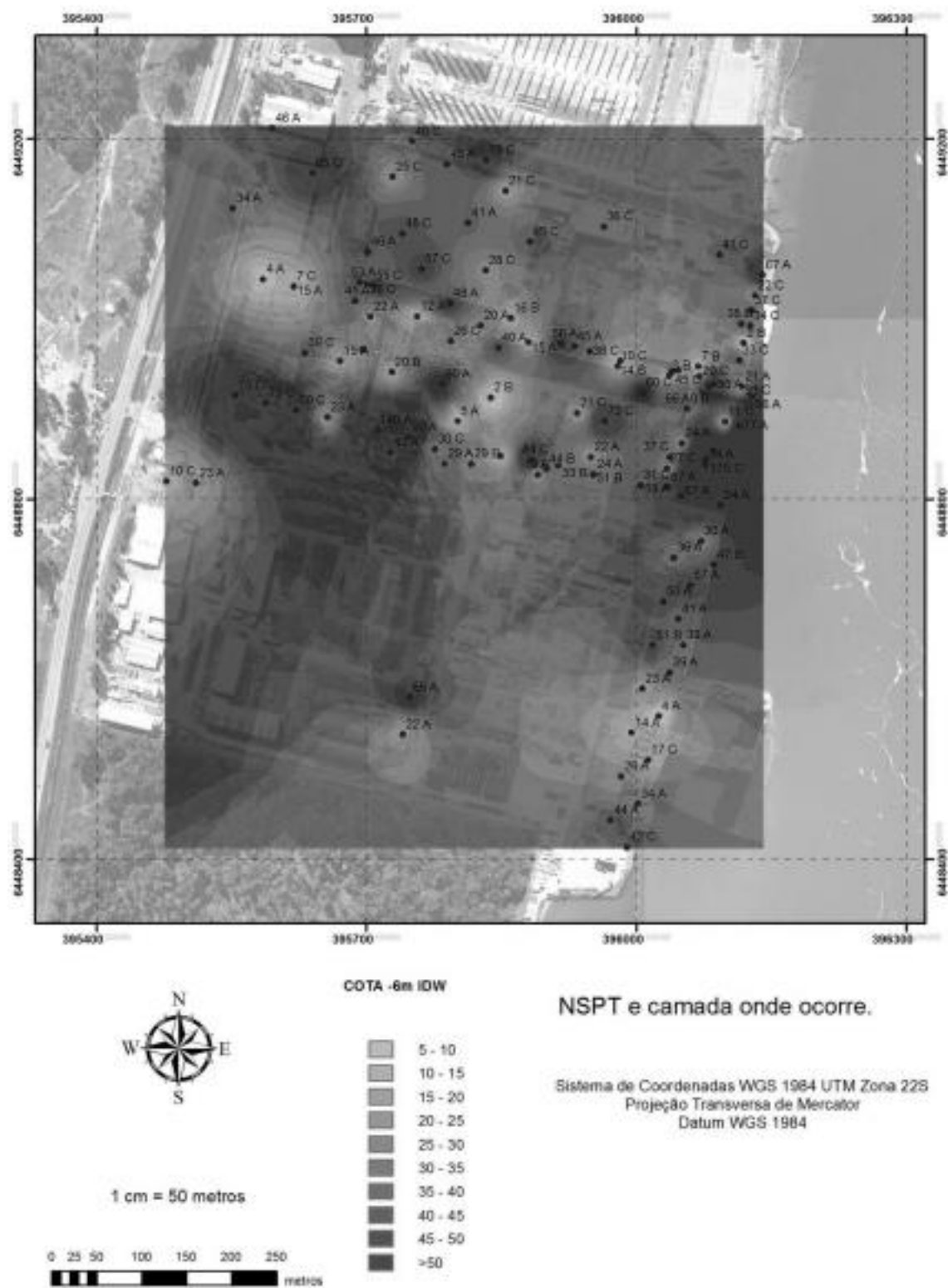


Figura A.0.11 - Distribuição do N_{SPT} na cota -6 m pelo método IDW.

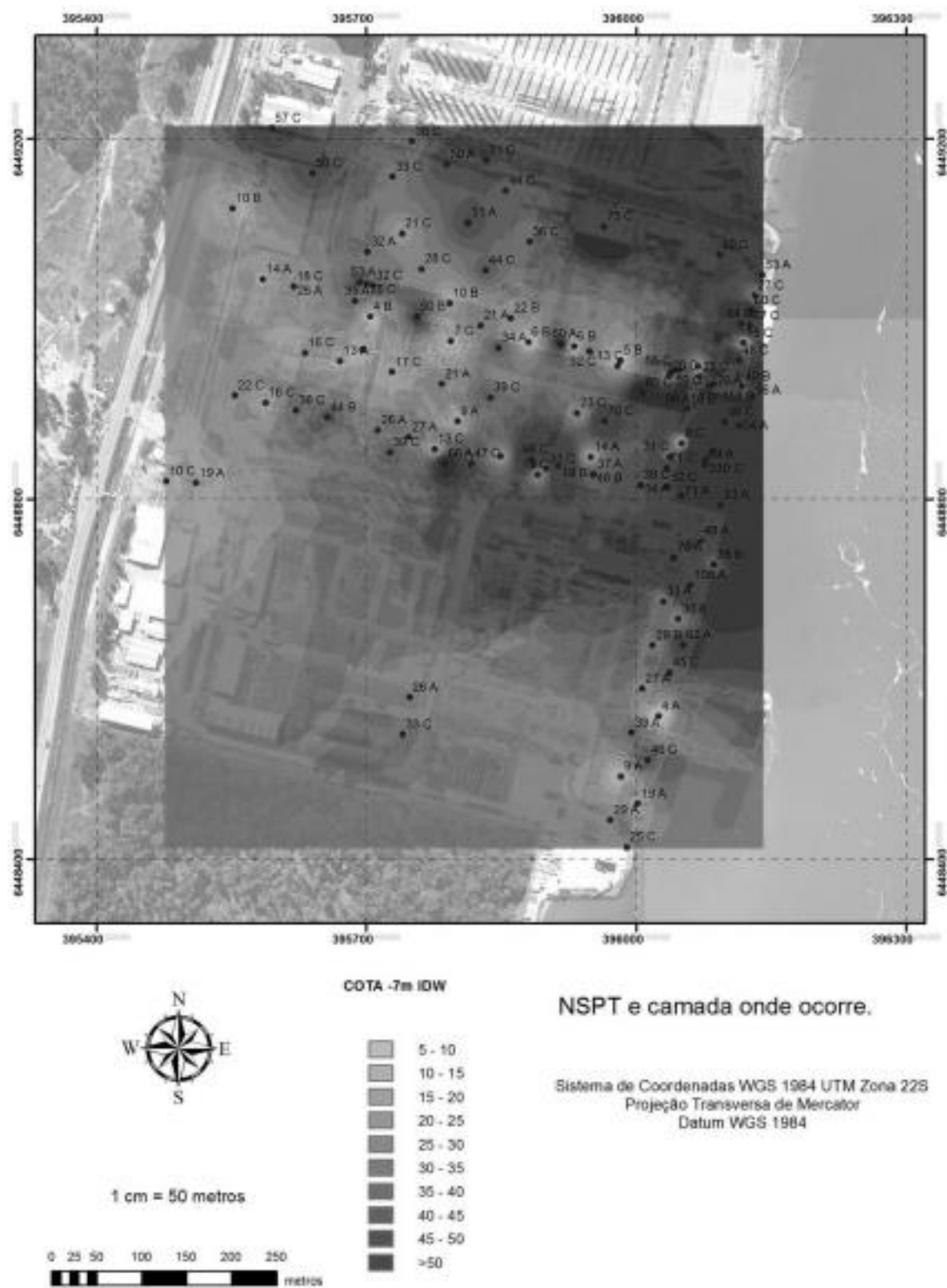


Figura A.0.12 - Distribuição do NSPT na cota -7 m pelo método IDW.

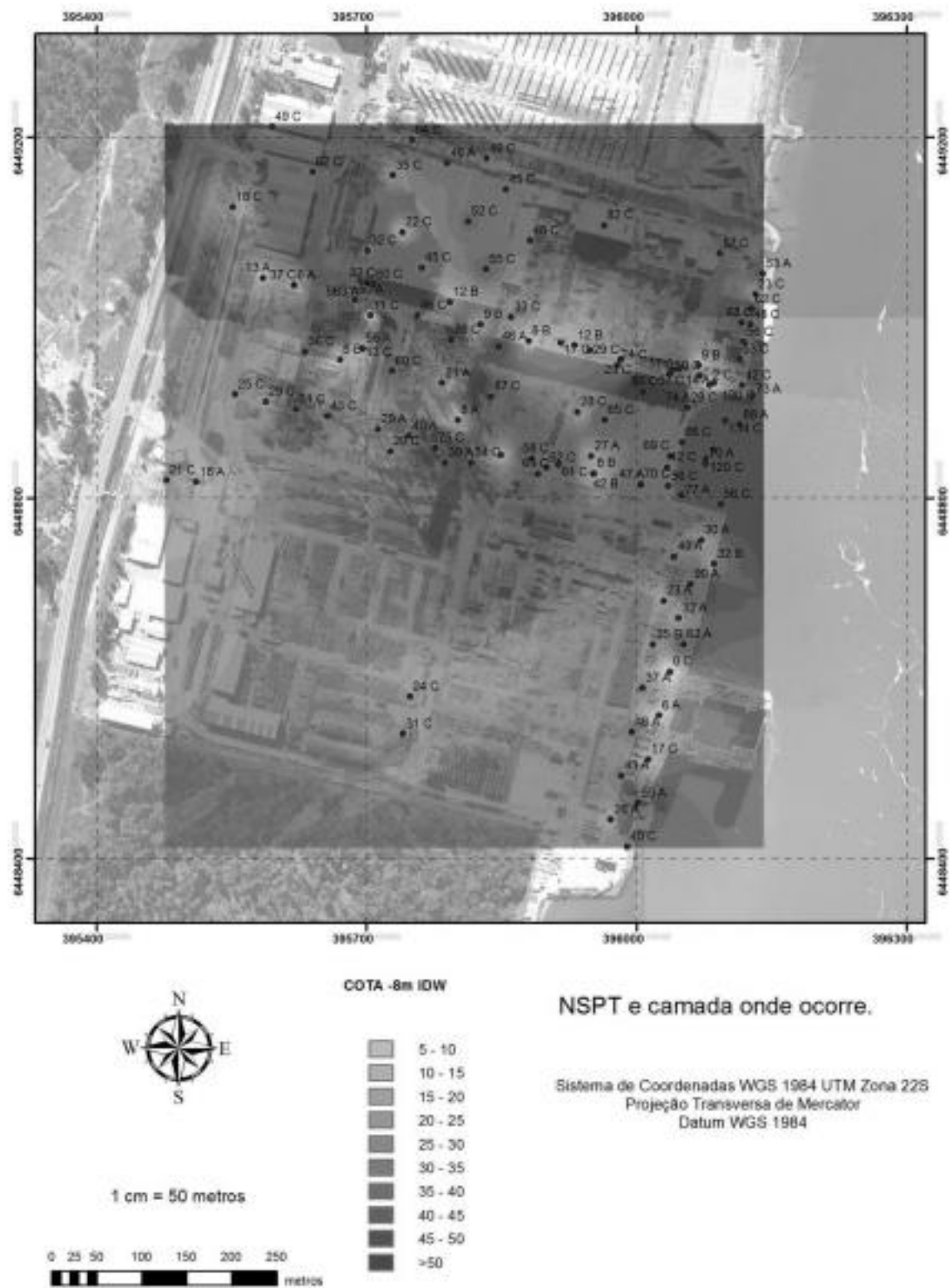


Figura A.0.13 - Distribuição do N_{SPI} na cota -8 m pelo método IDW.

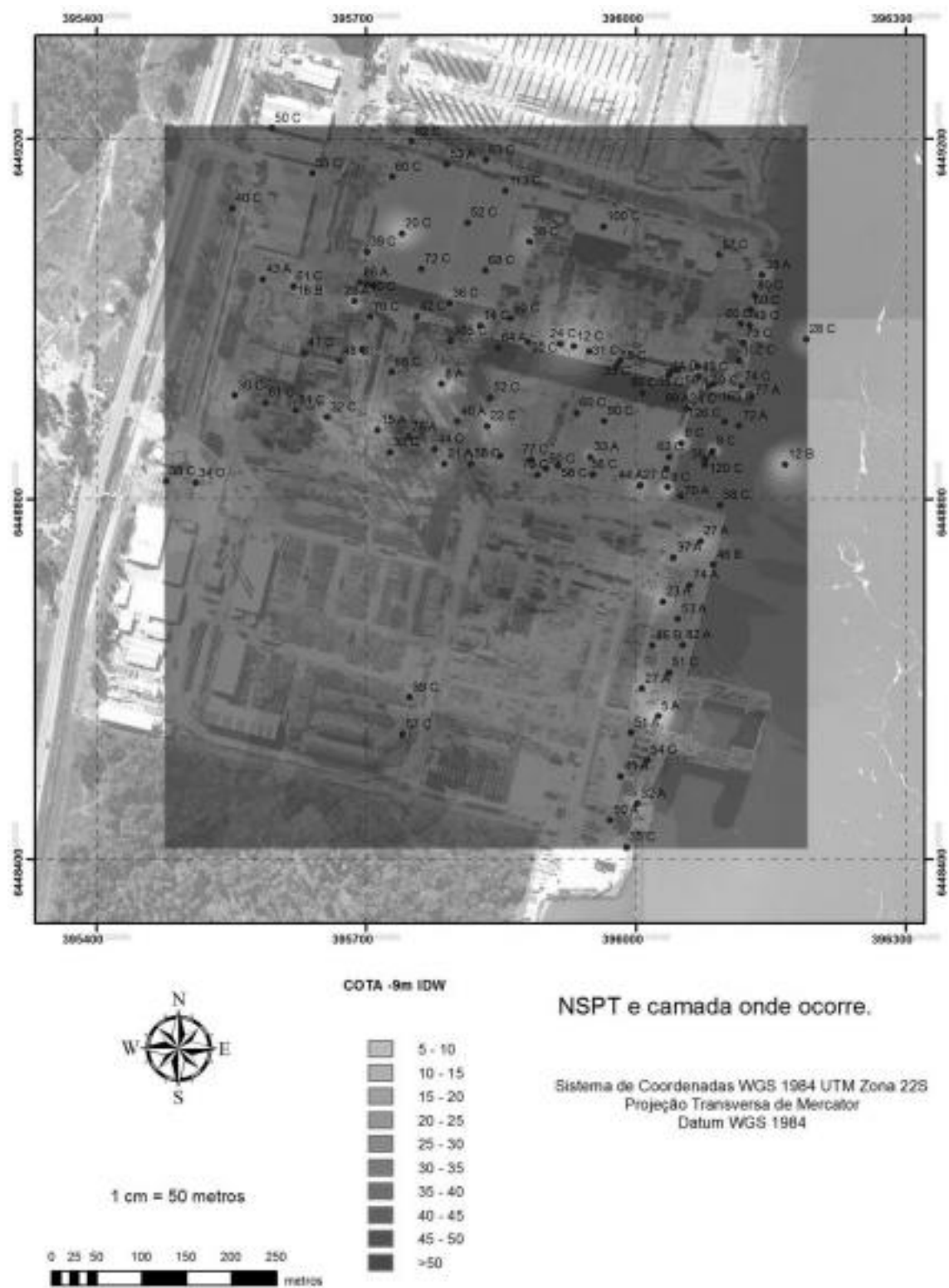


Figura A.0.14 - Distribuição do N_{SPI} na cota -9 m pelo método IDW.

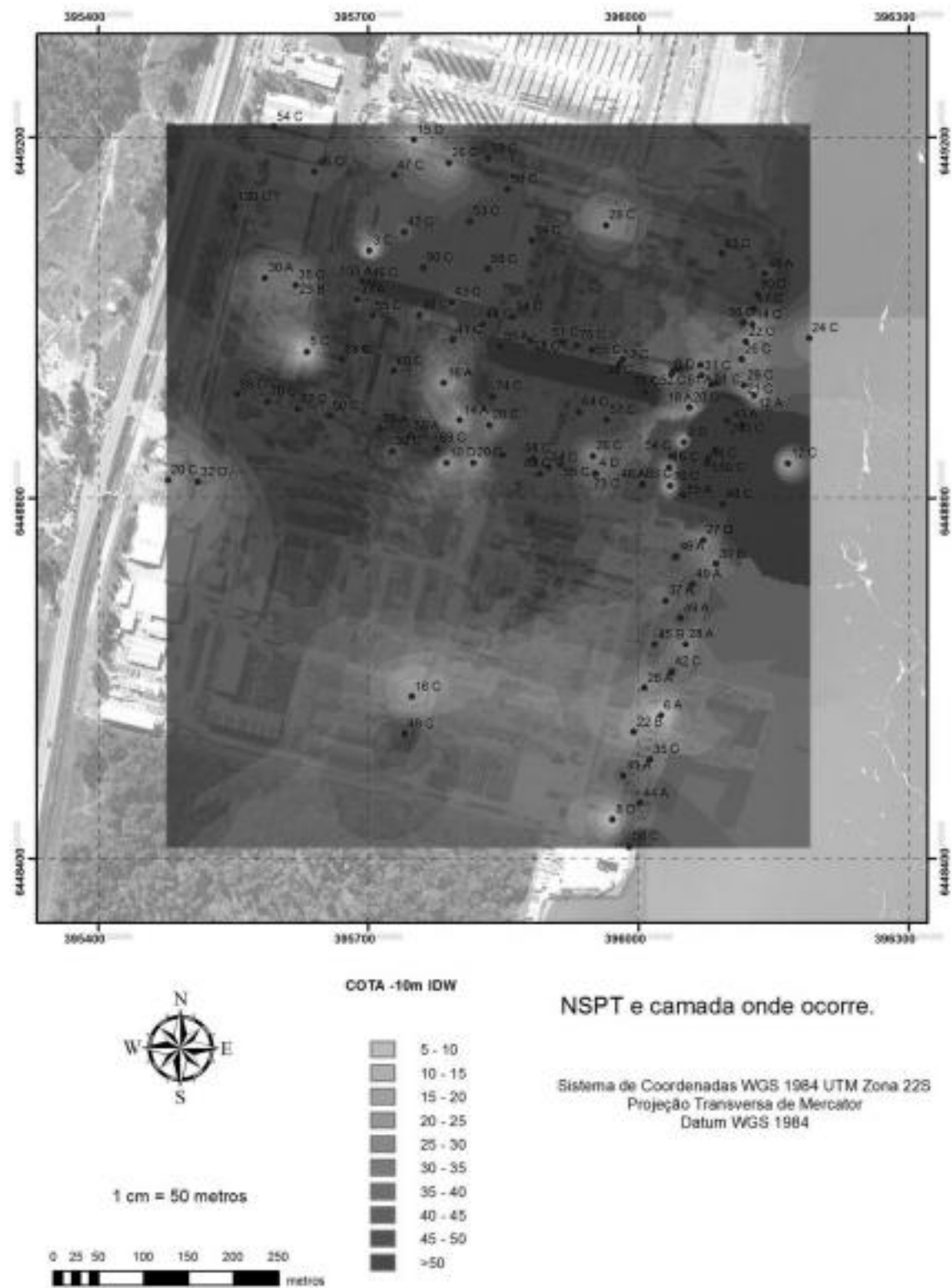


Figura A.0.15 - Distribuição do N_{SP} na cota -10 m pelo método IDW.

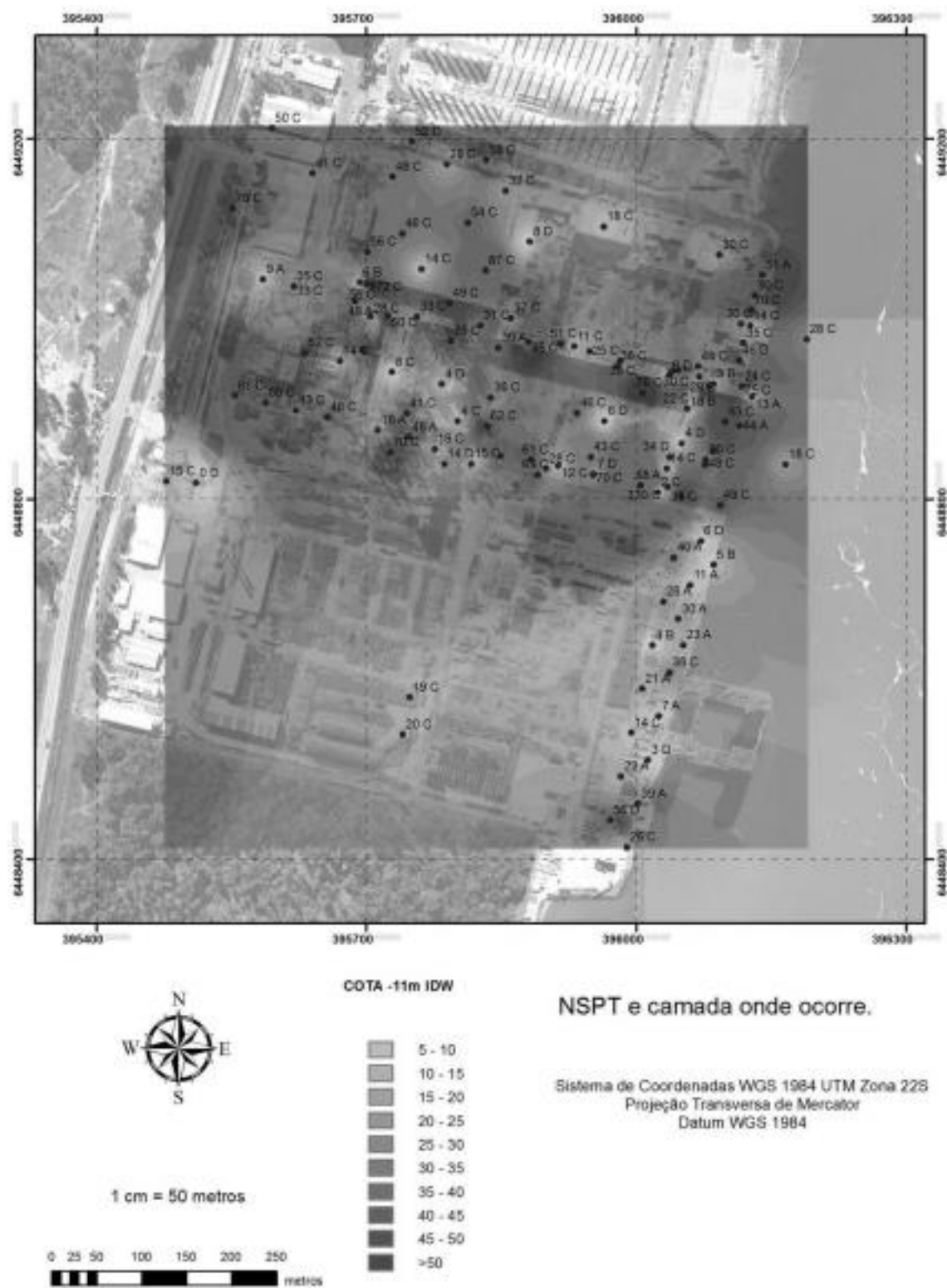
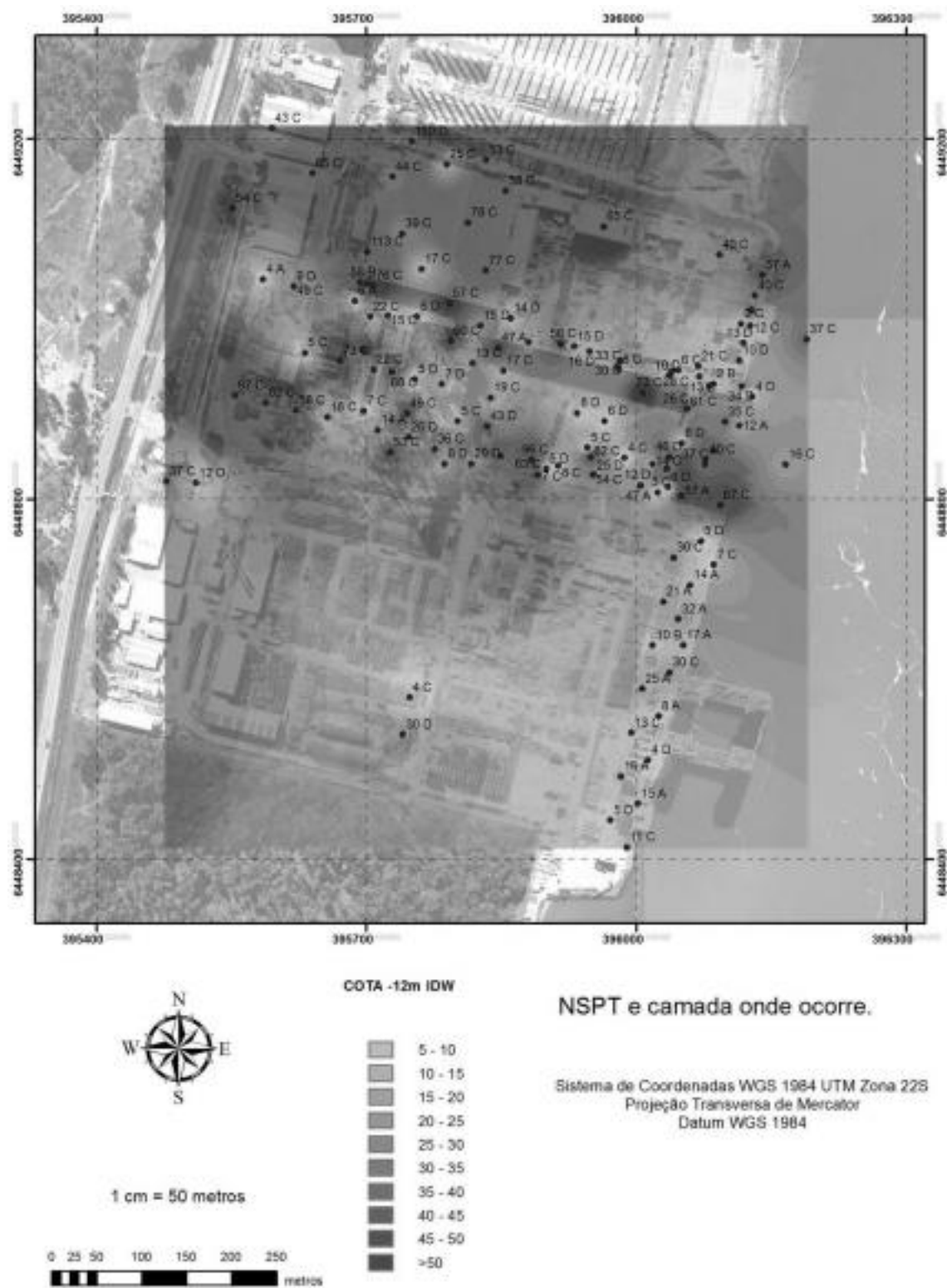


Figura A.0.16 - Distribuição do NSPT na cota -11 m pelo método IDW.



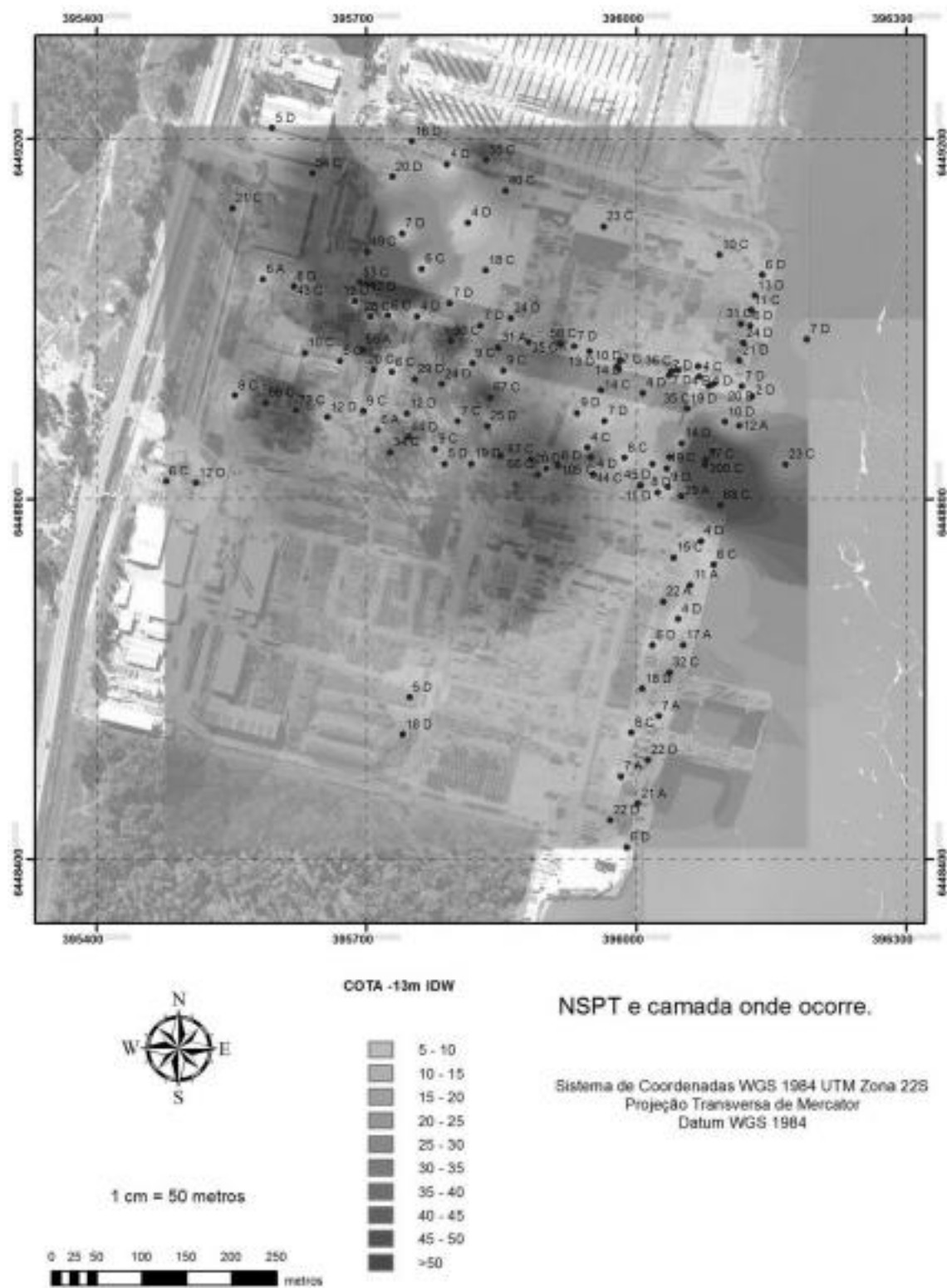


Figura A.0.18 - Distribuição do NSPT na cota -13 m pelo método IDW.

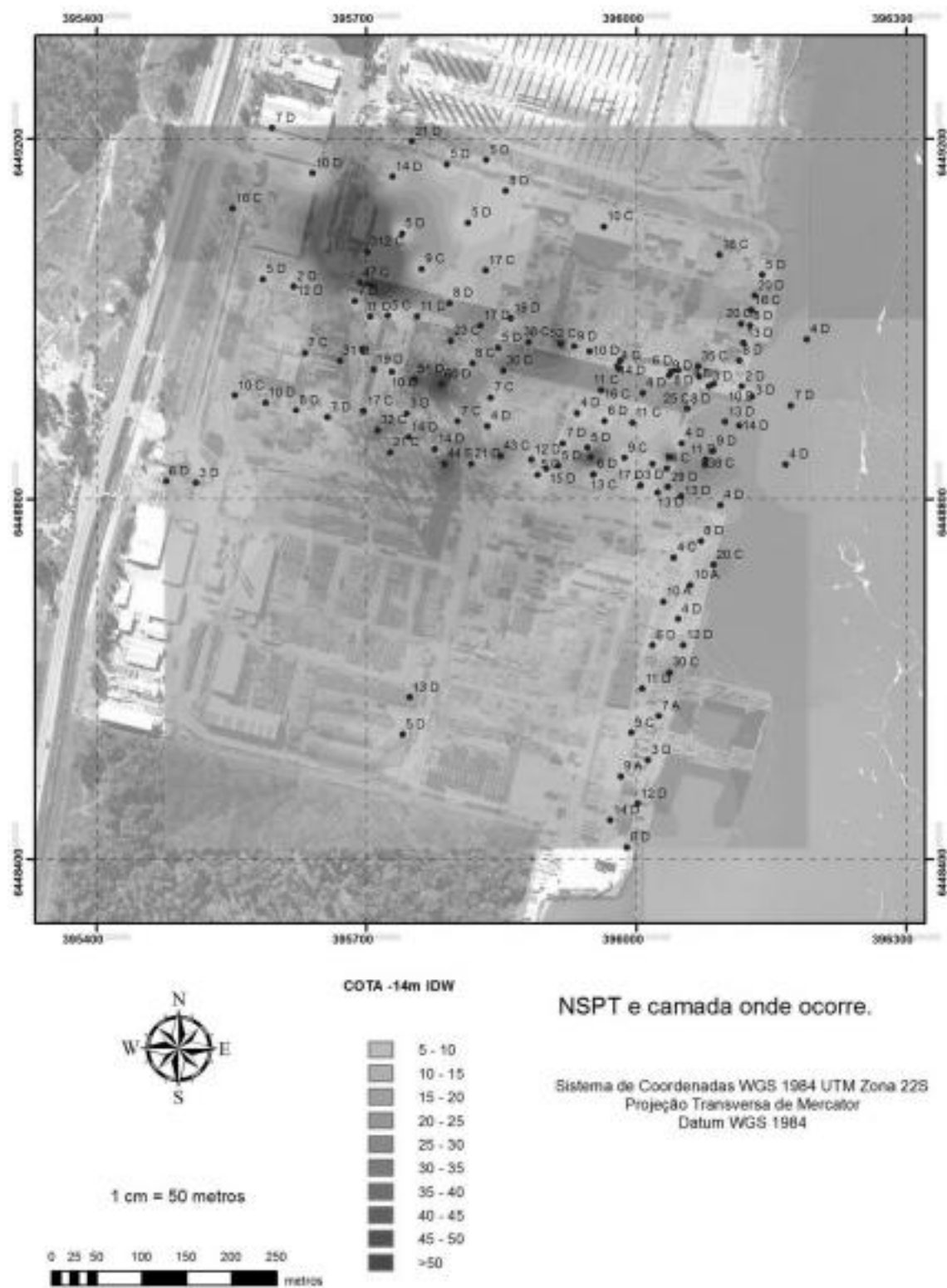


Figura A.0.19 - Distribuição do N_{SPF} na cota -14 m pelo método IDW.

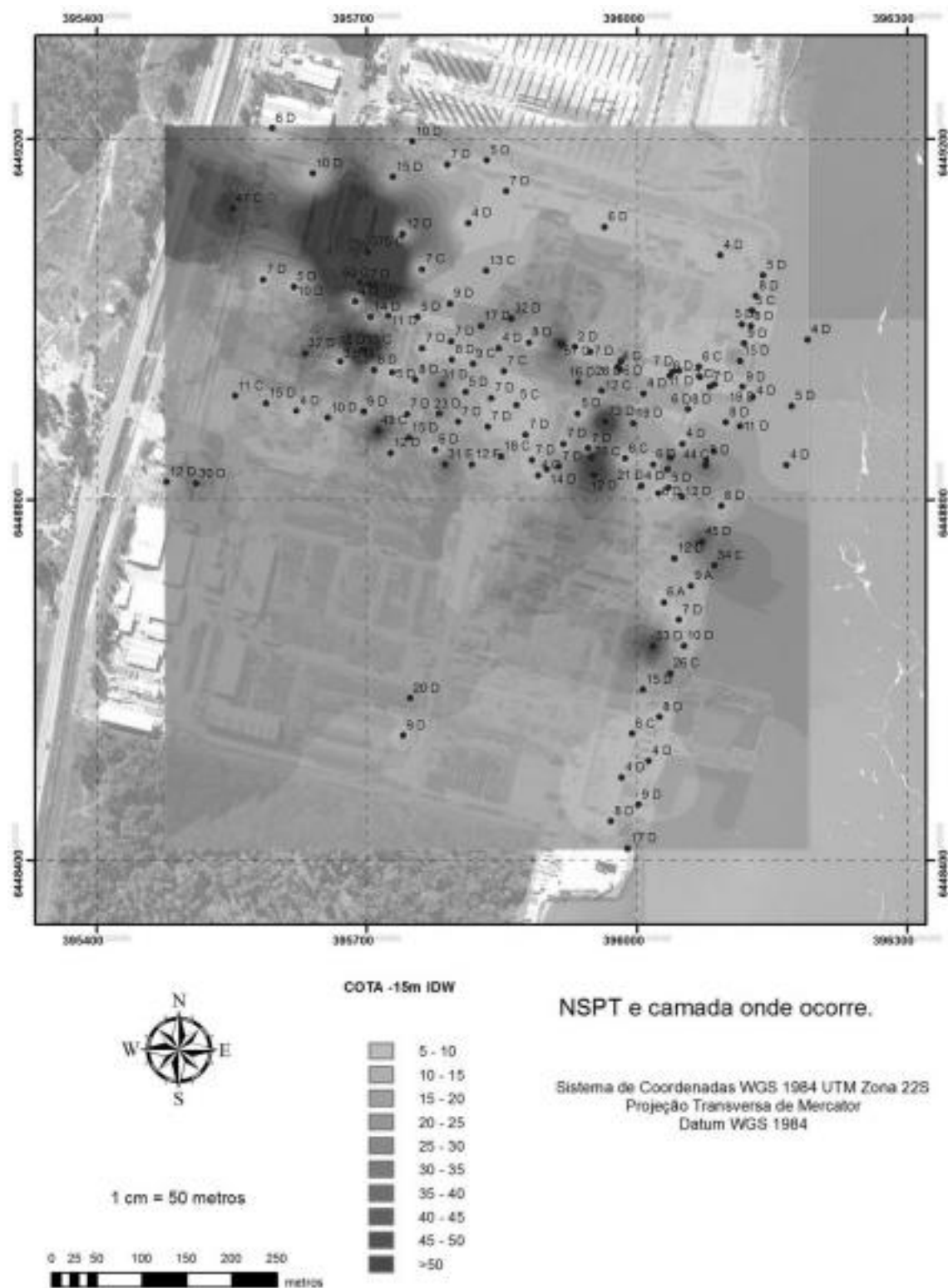


Figura A.0.20 - Distribuição do NSPT na cota -15 m pelo método IDW.

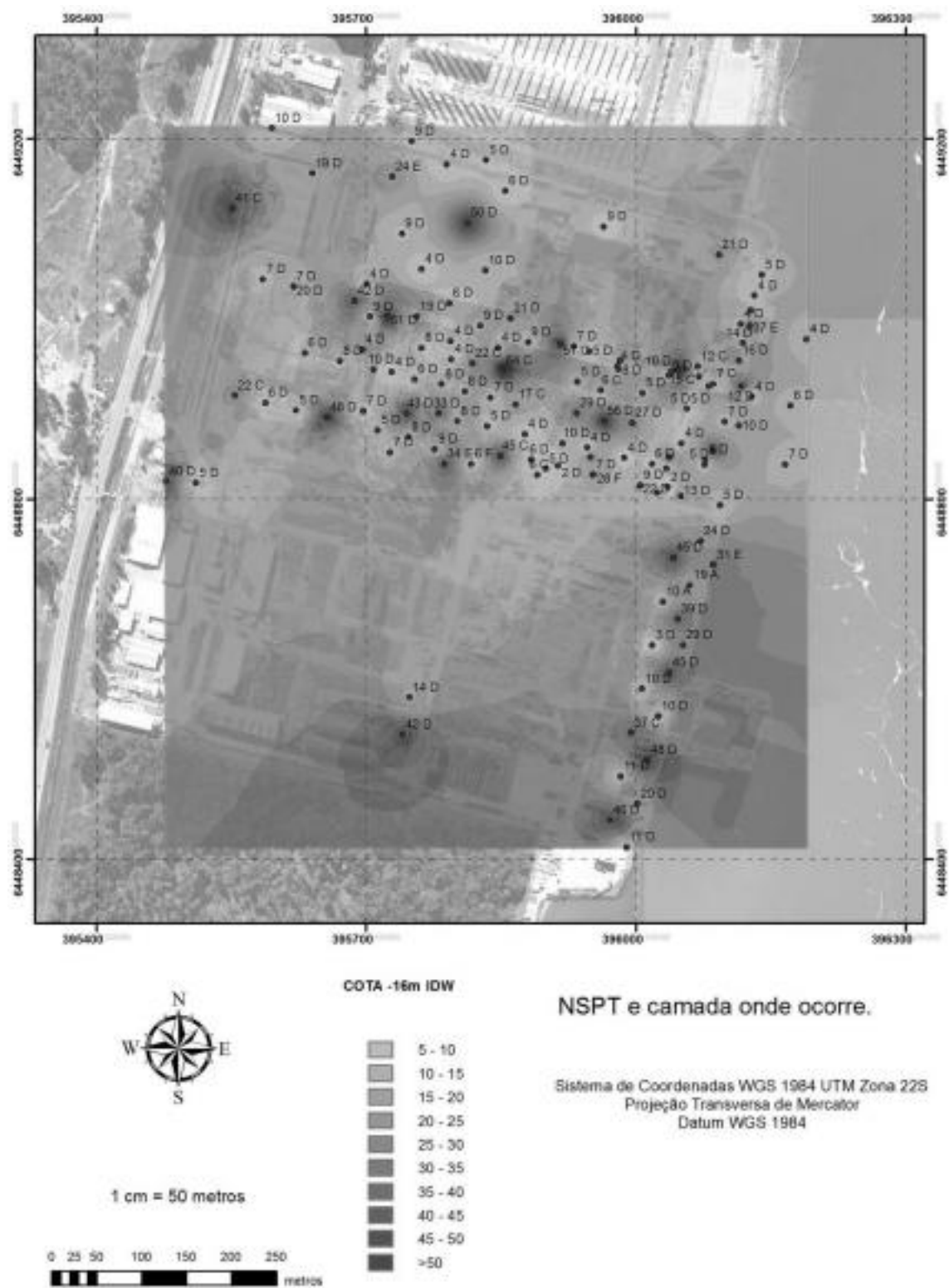


Figura A.0.21 - Distribuição do NSPT na cota -16 m pelo método IDW.

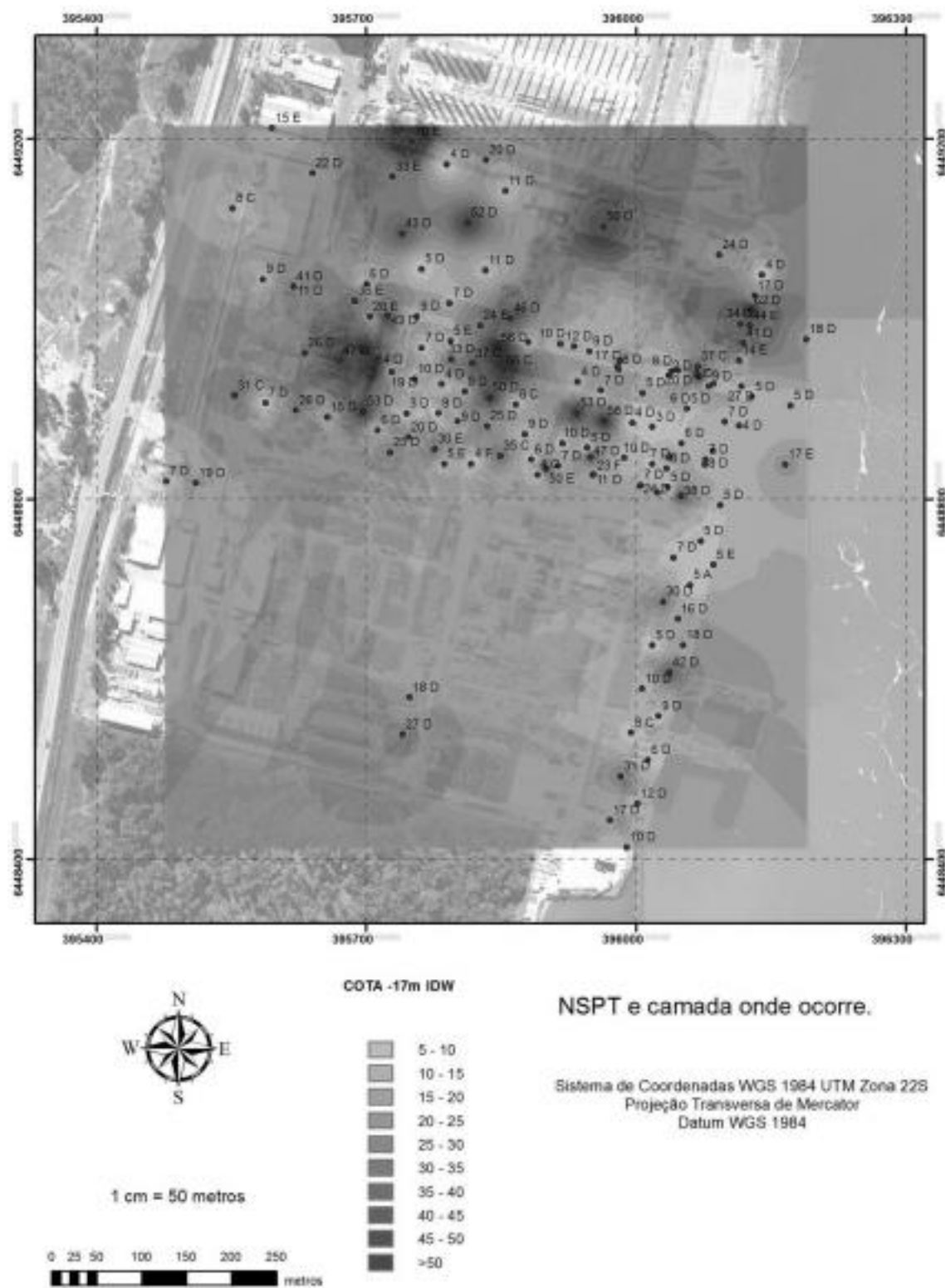


Figura A.0.22 - Distribuição do N_{SPF} na cota -17 m pelo método IDW.

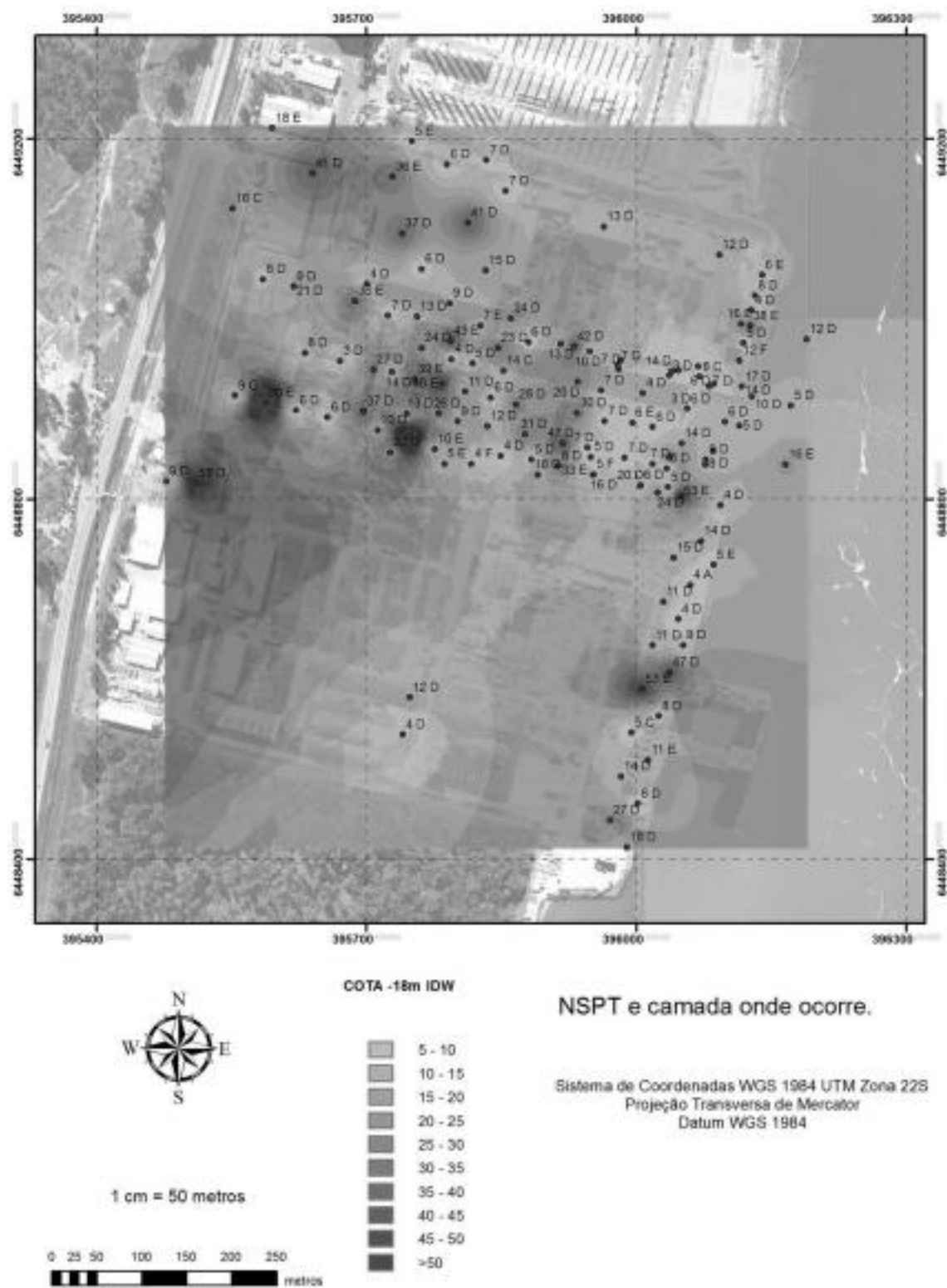


Figura A.0.23 - Distribuição do NSPT na cota -18 m pelo método IDW.

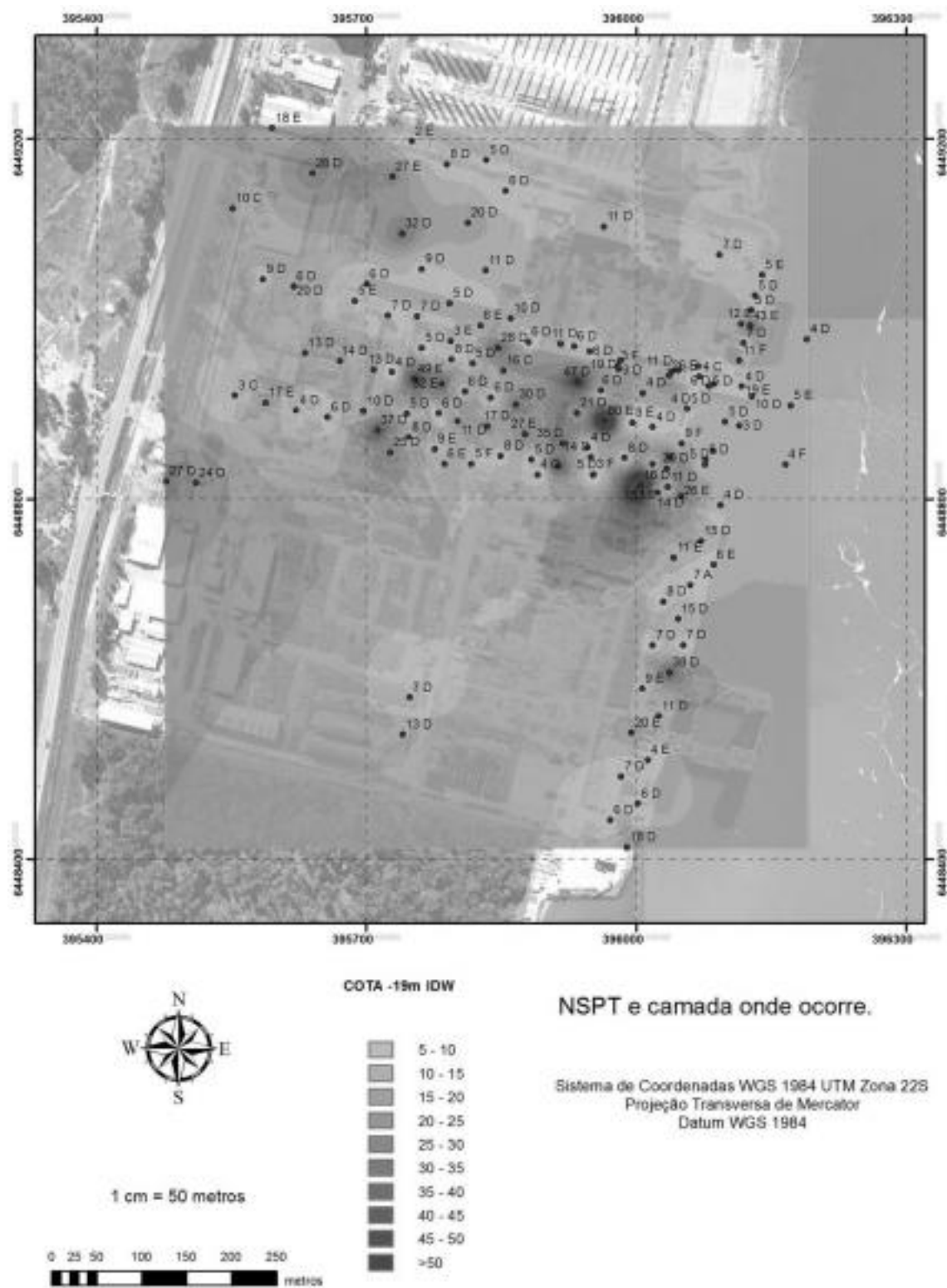


Figura A.0.24 - Distribuição do N_{SPT} na cota -19 m pelo método IDW.

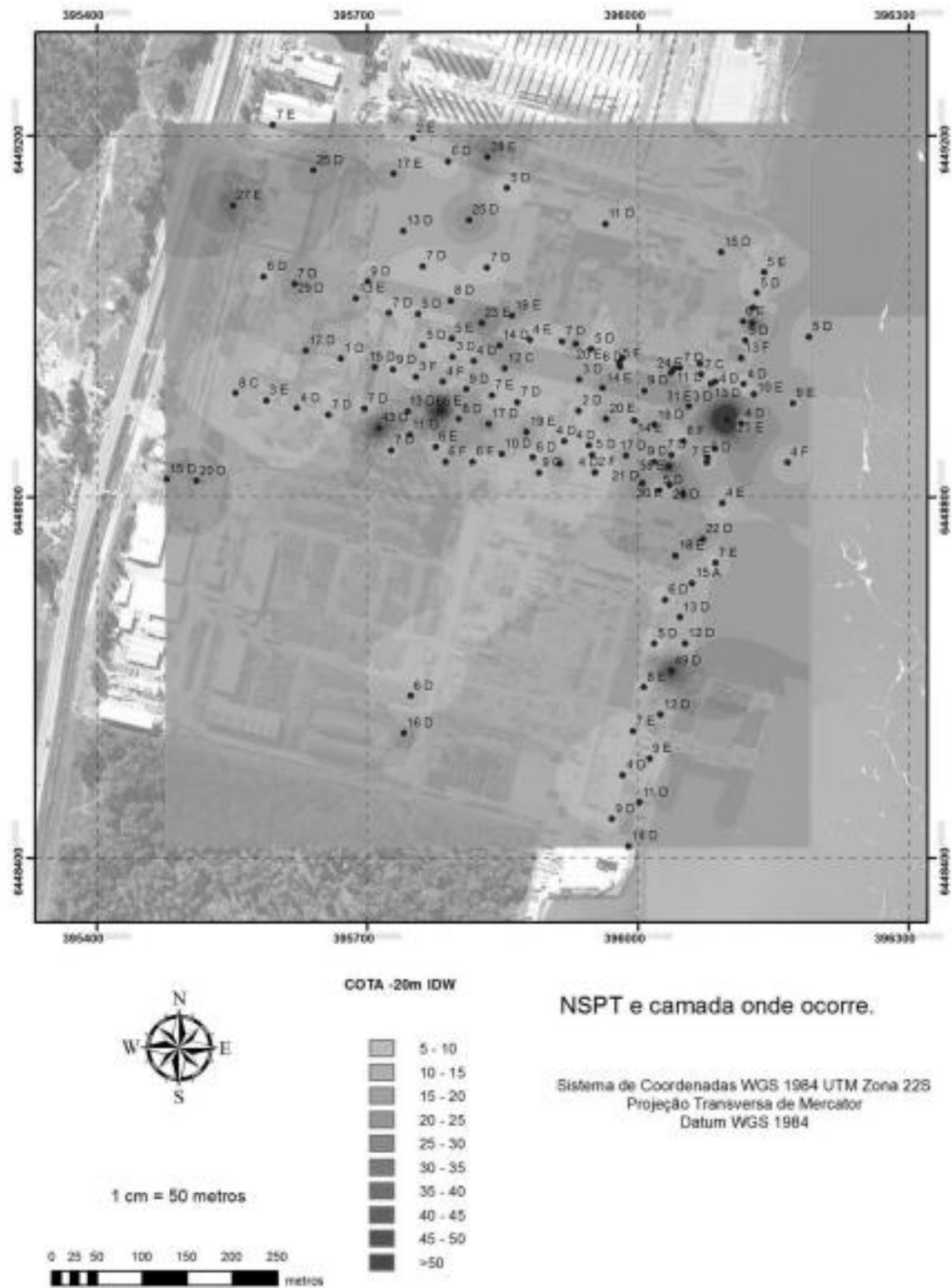


Figura A.0.25 - Distribuição do N_{SPF} na cota -20 m pelo método IDW.

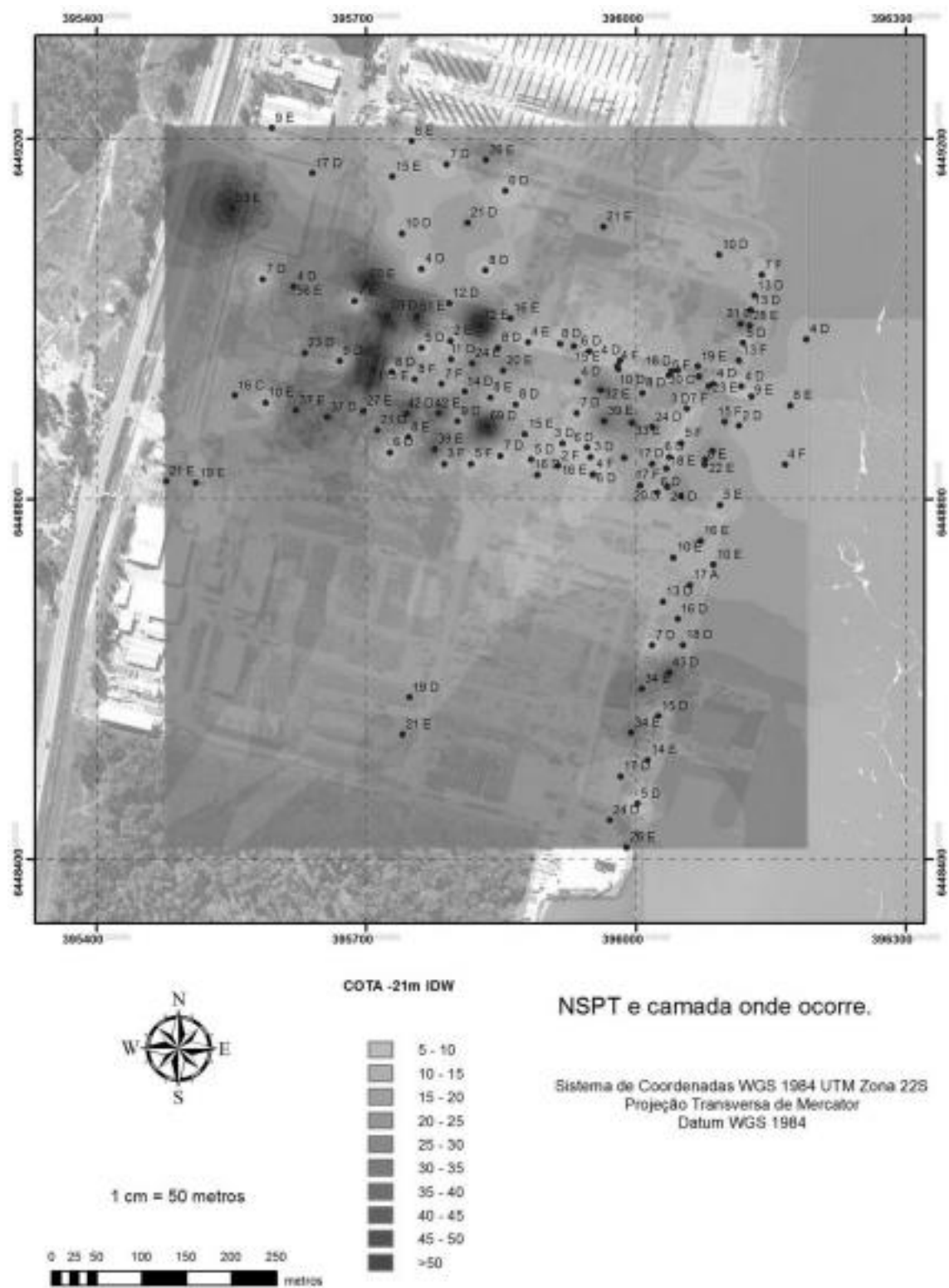


Figura A.0.26 - Distribuição do NSPT na cota -21 m pelo método IDW.

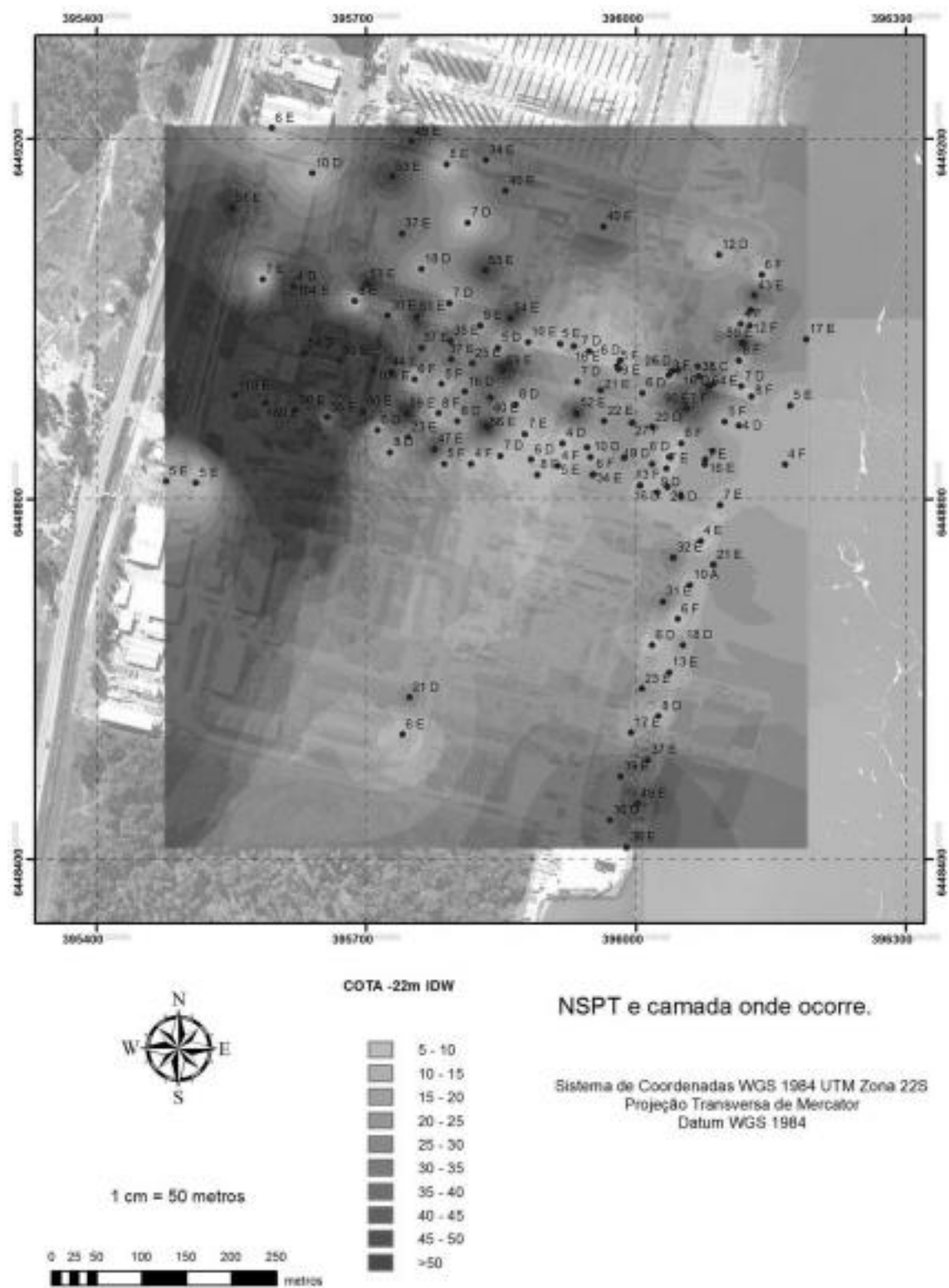


Figura A.0.27 - Distribuição do N_{SPT} na cota -22 m pelo método IDW.

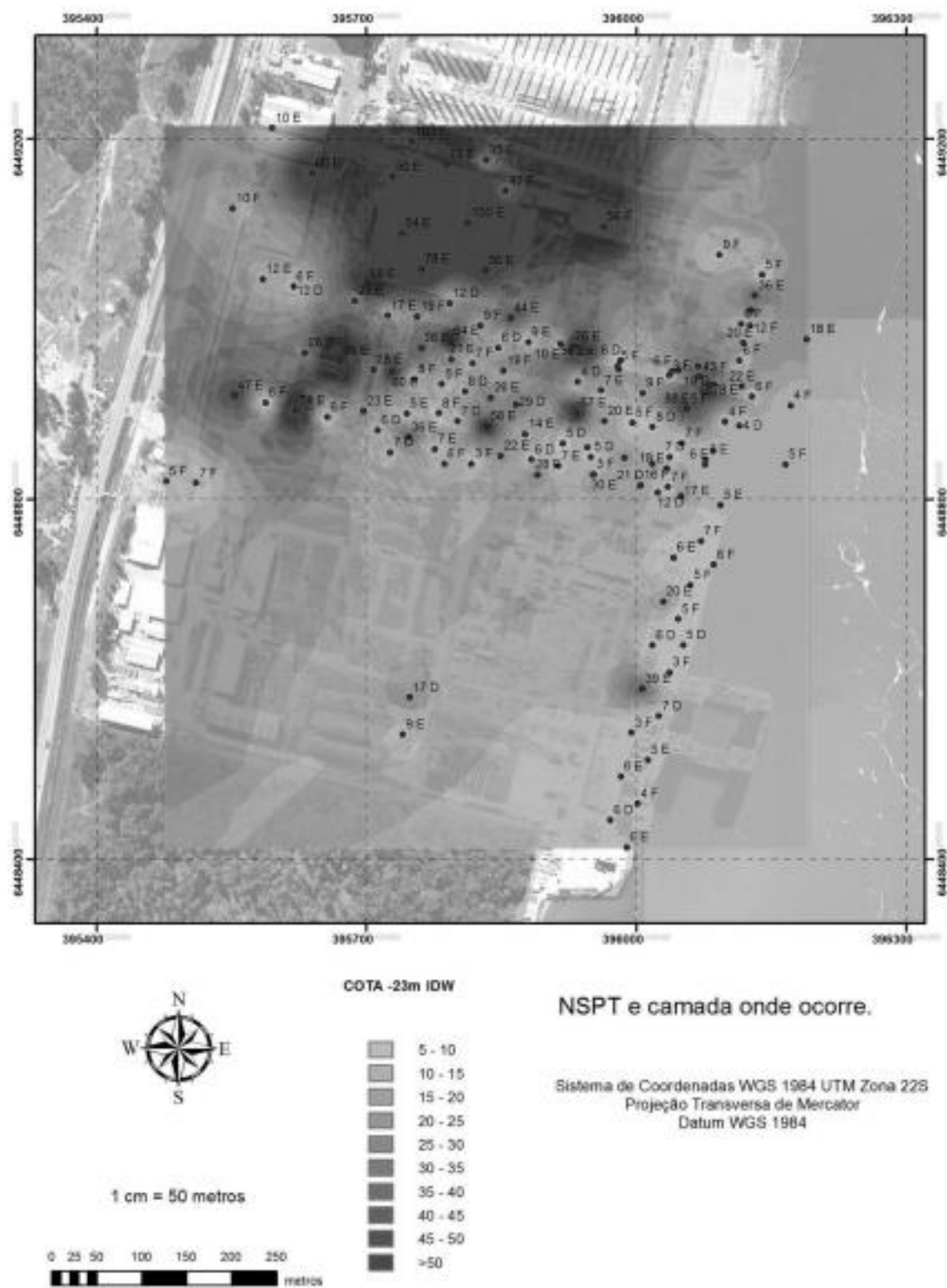
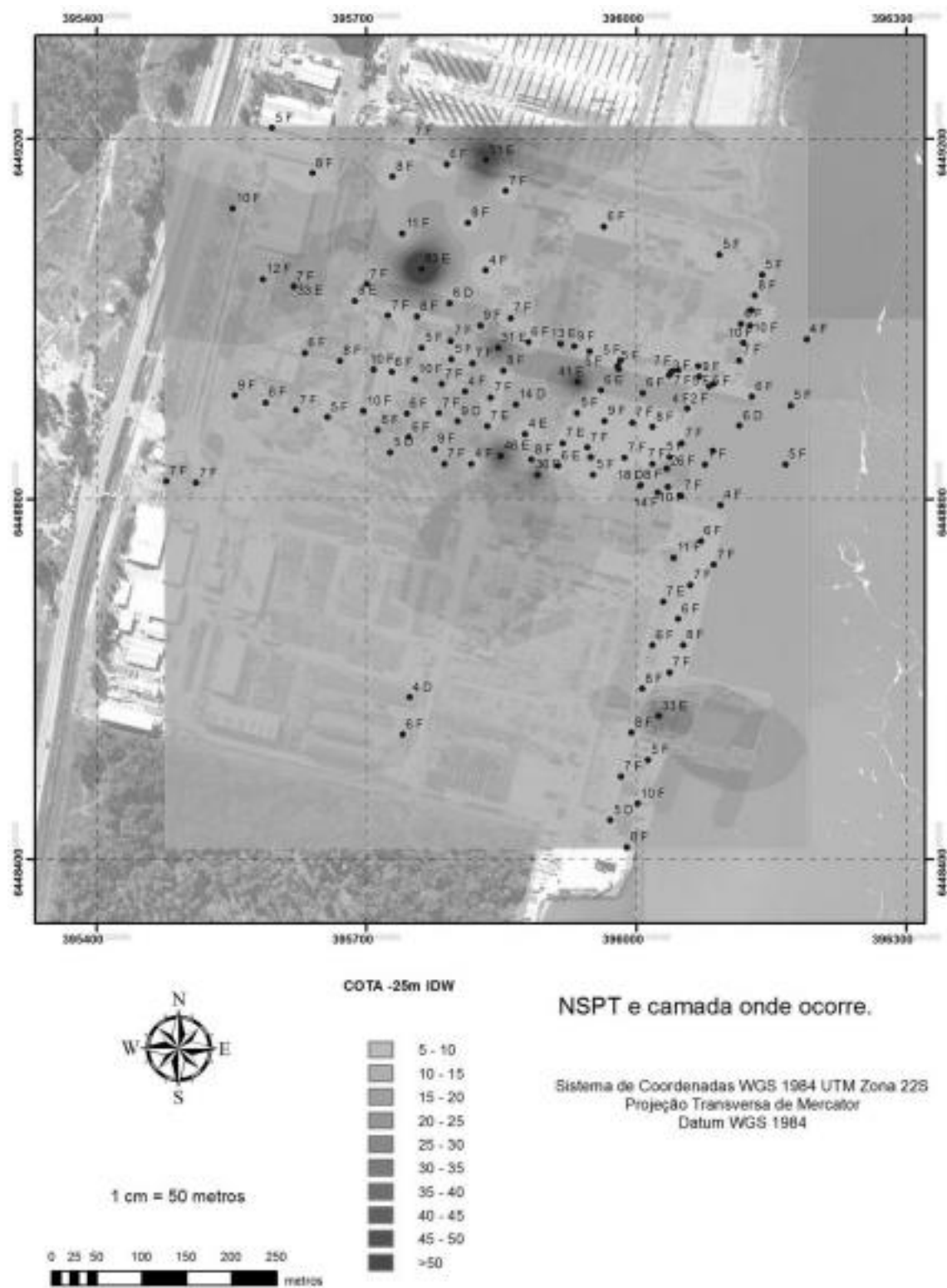


Figura A.0.28 - Distribuição do NSPT na cota -23 m pelo método IDW.



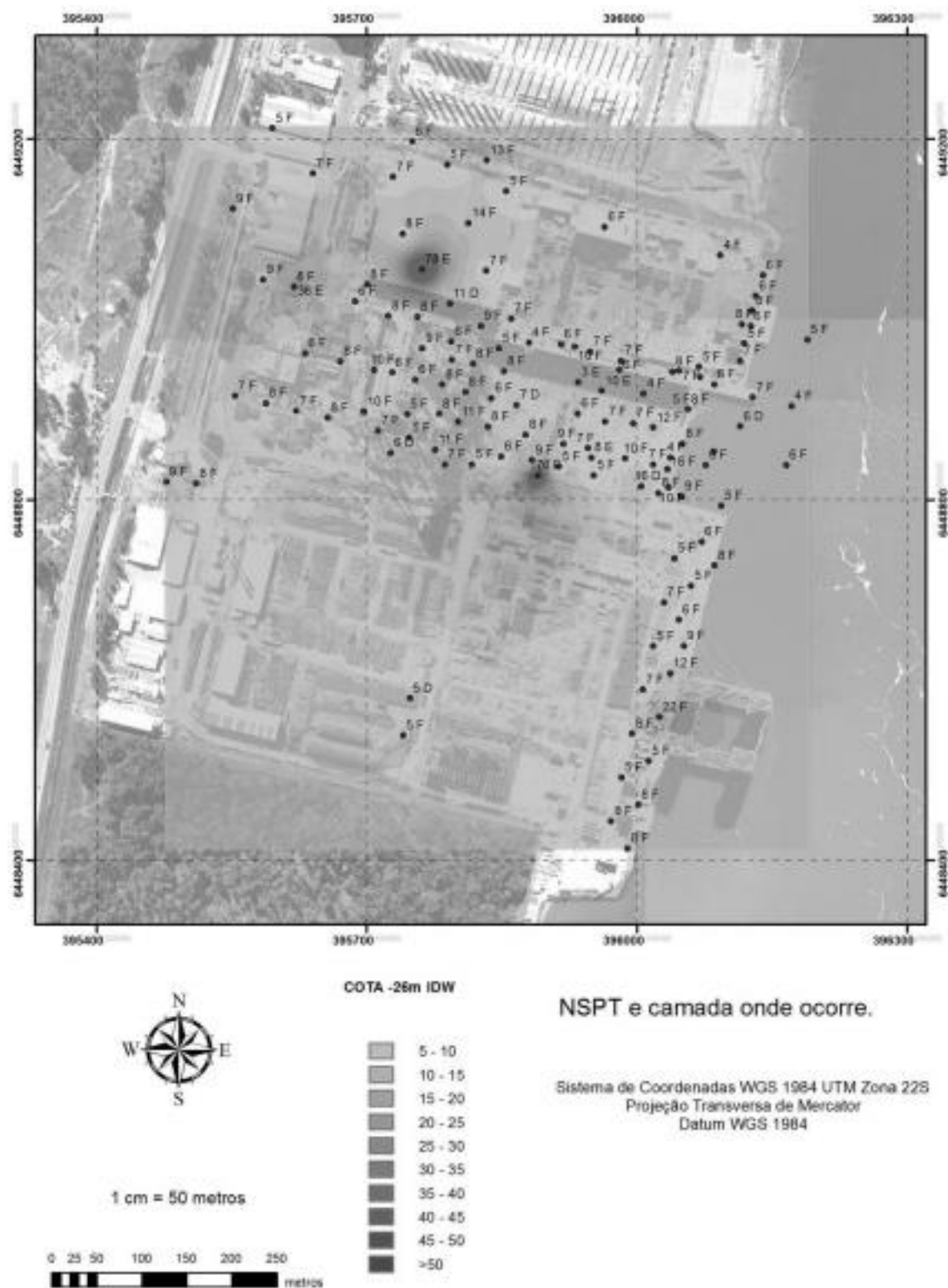


Figura A.0.30 - Distribuição do NSPT na cota -26 m pelo método IDW.

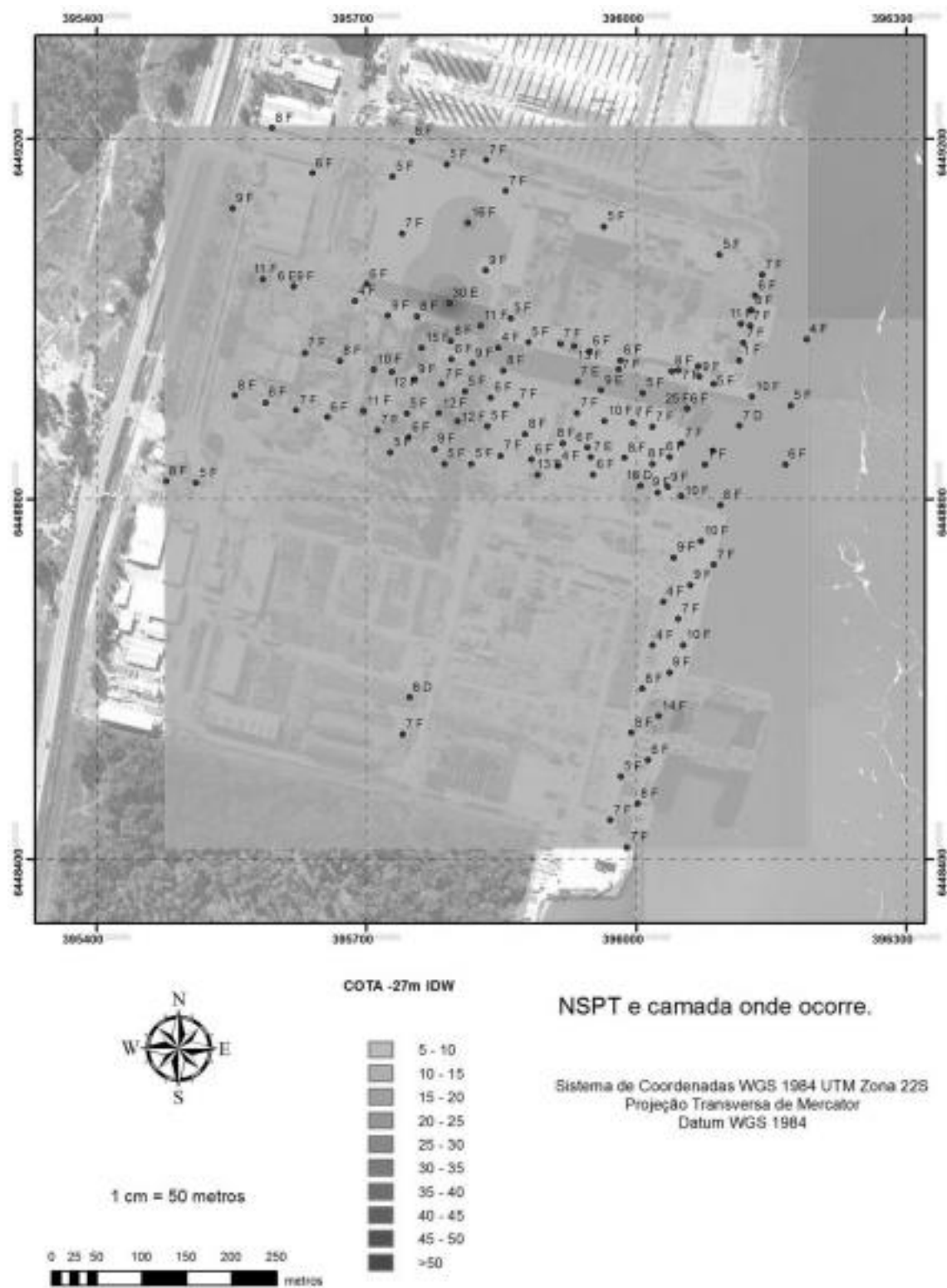


Figura A.0.31 - Distribuição do N_{spt} na cota -27 m pelo método IDW.

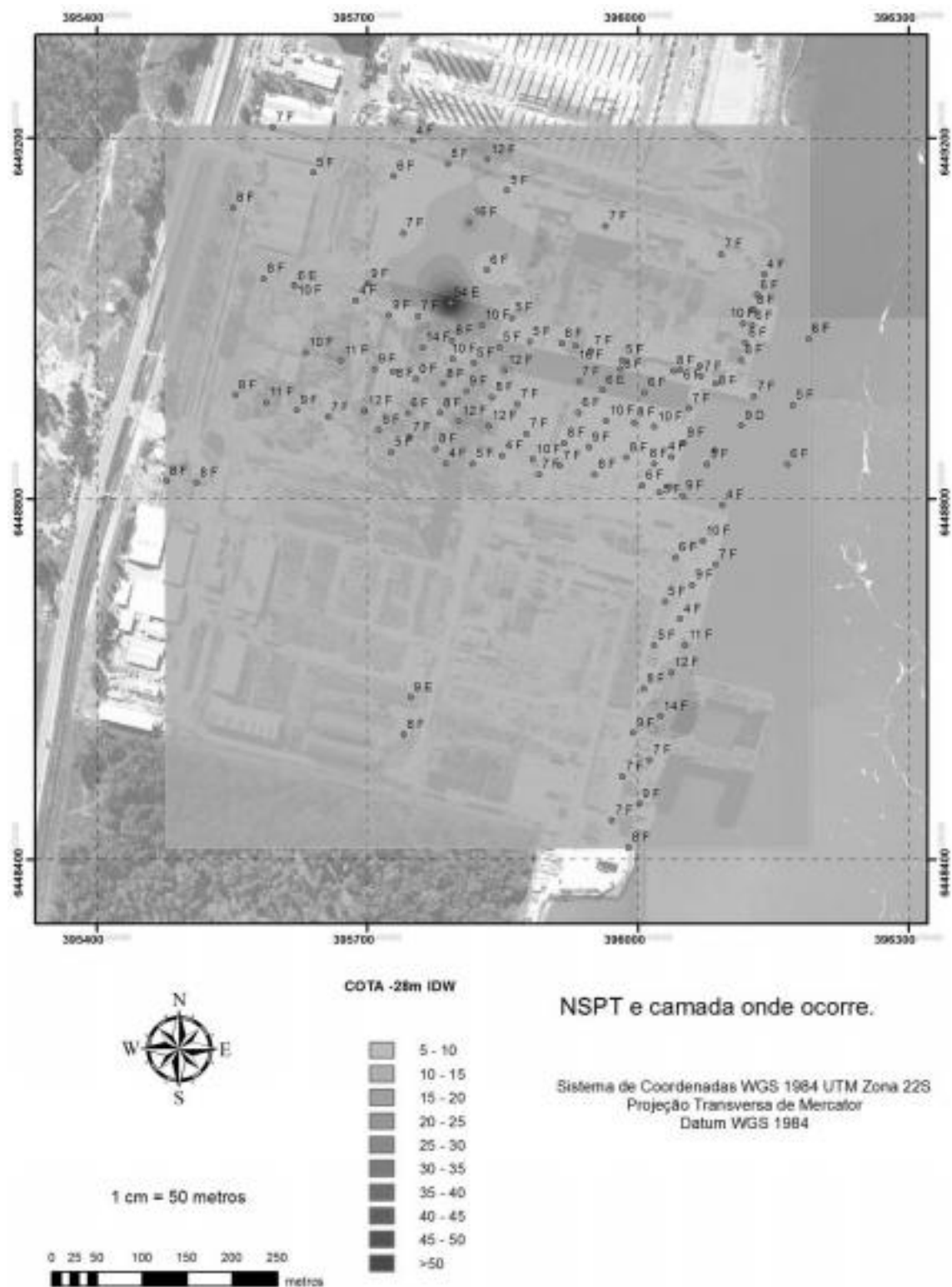


Figura A.0.32 - Distribuição do N_{SPT} na cota -28 m pelo método IDW.

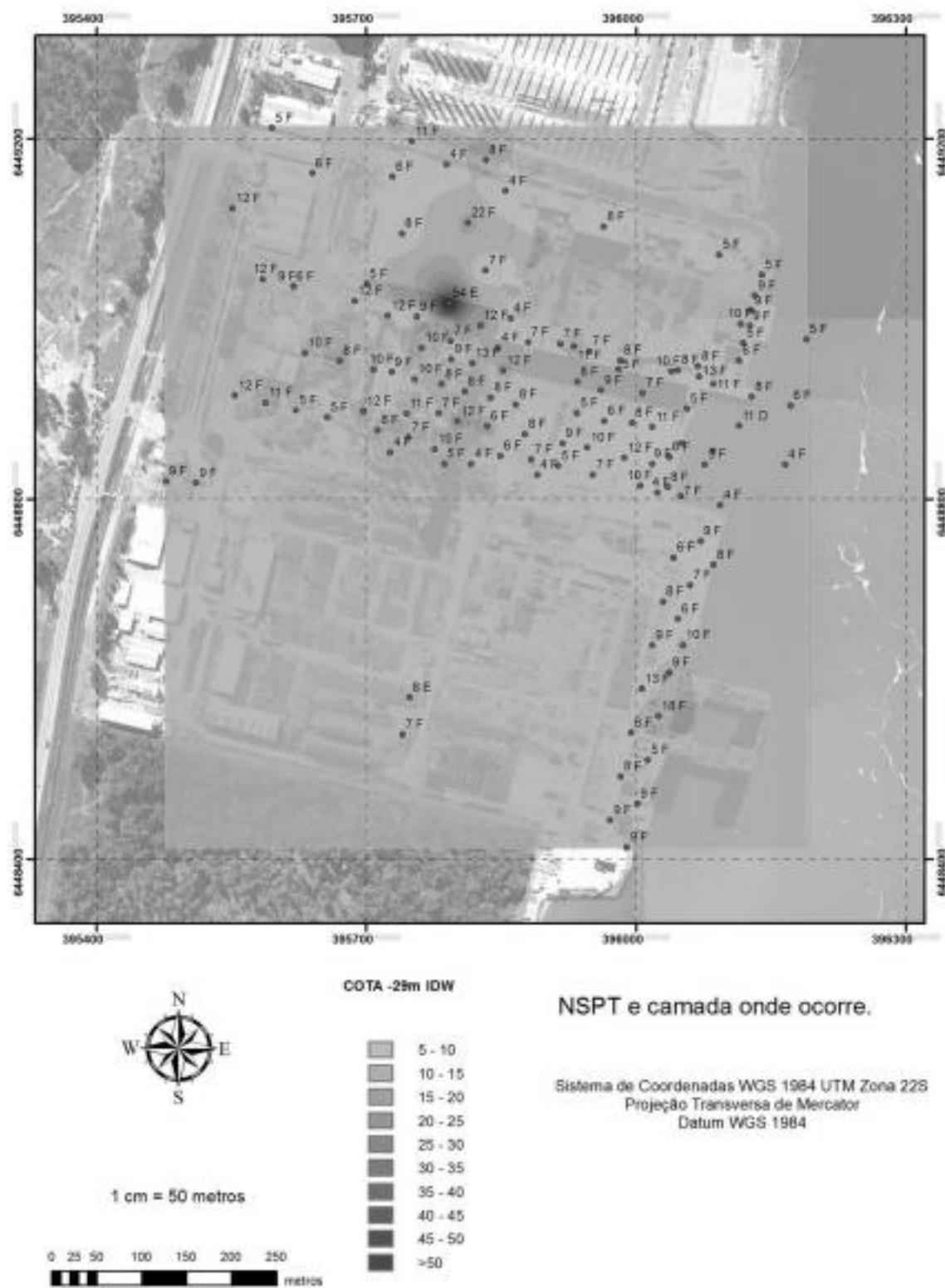


Figura A.0.33 - Distribuição do N_{SPF} na cota -29 m pelo método IDW.

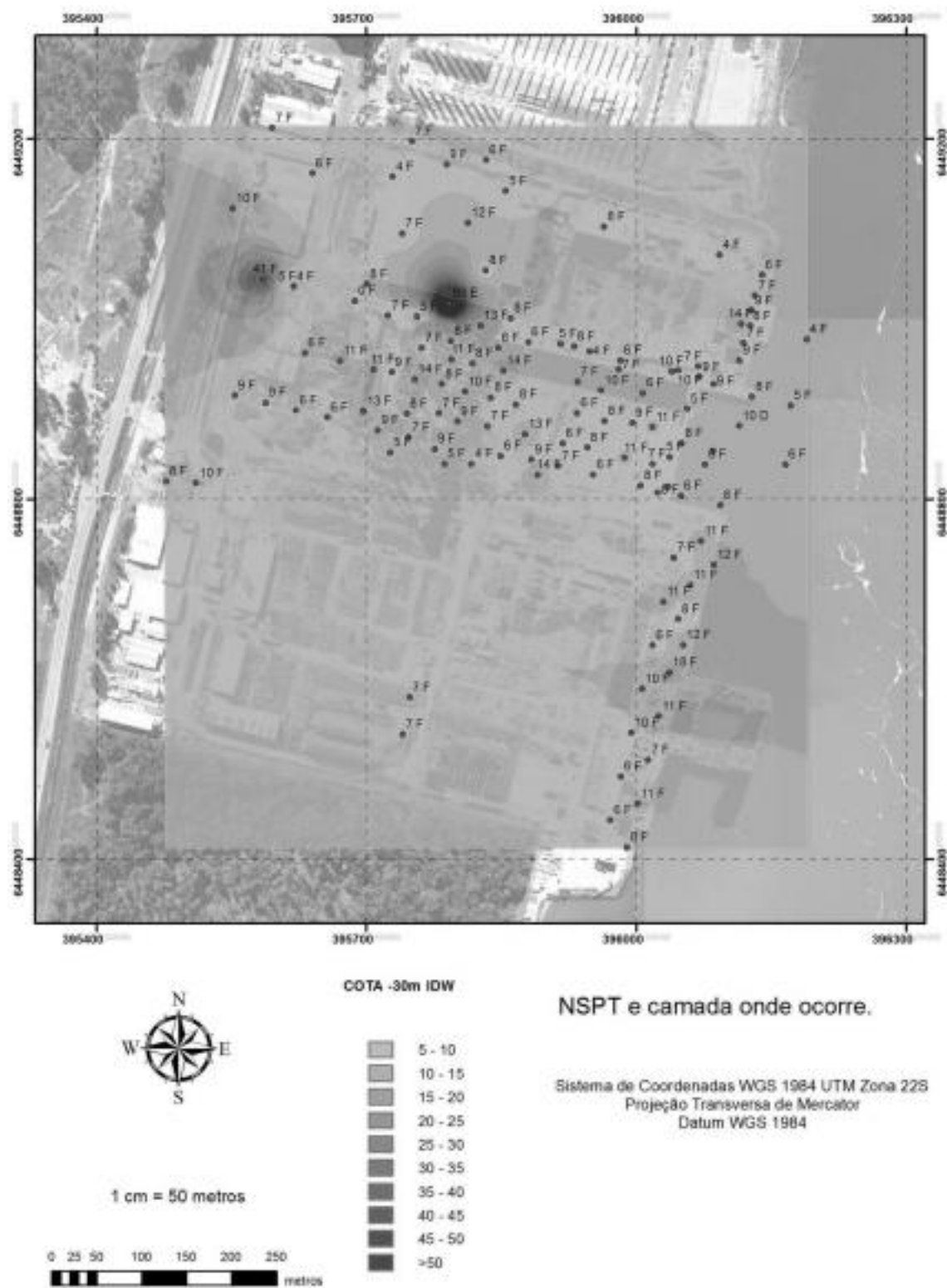


Figura A.0.34 - Distribuição do NSPT na cota -30 m pelo método IDW.

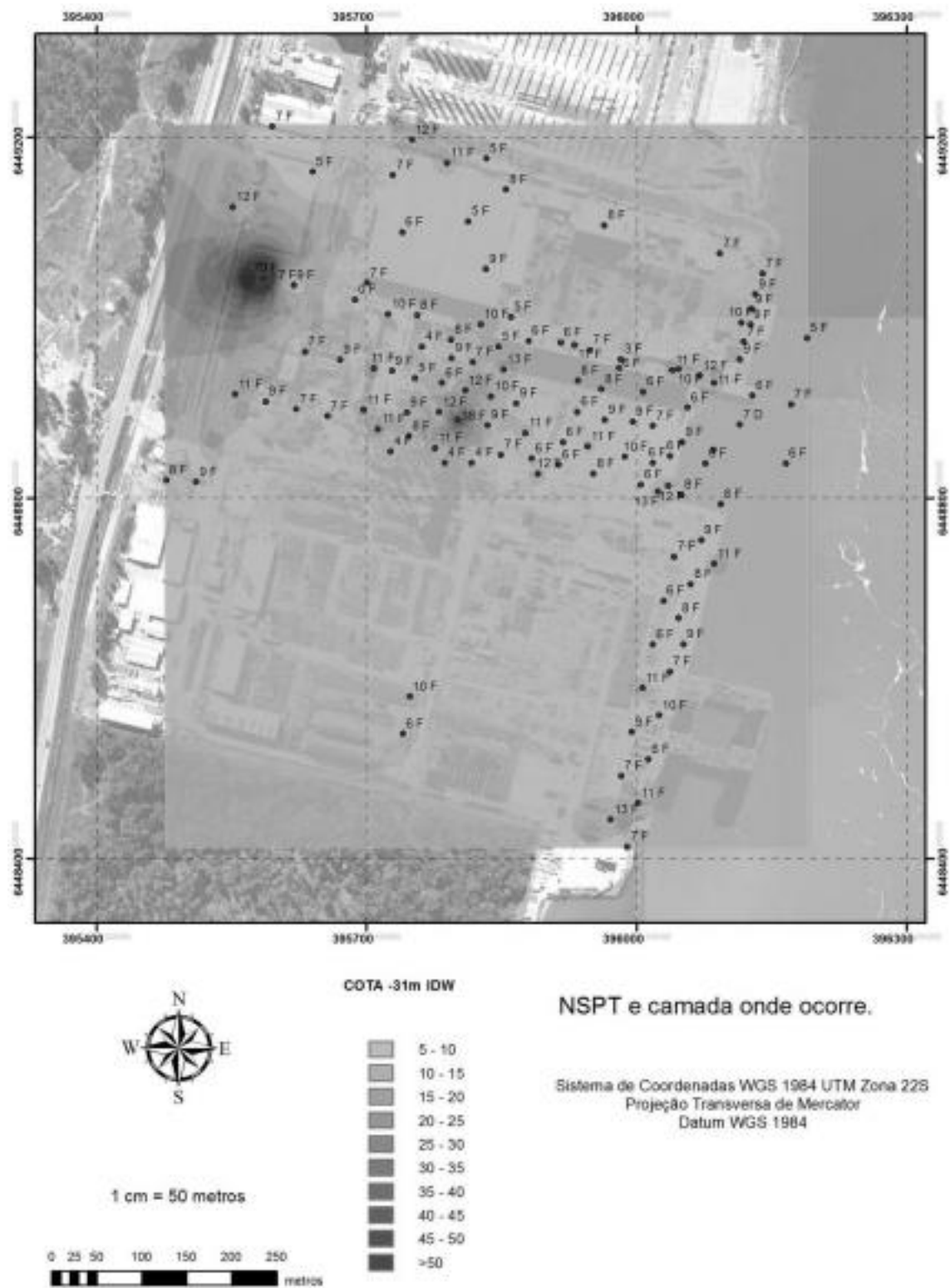


Figura A.0.35 - Distribuição do N_{SPT} na cota -31 m pelo método IDW.

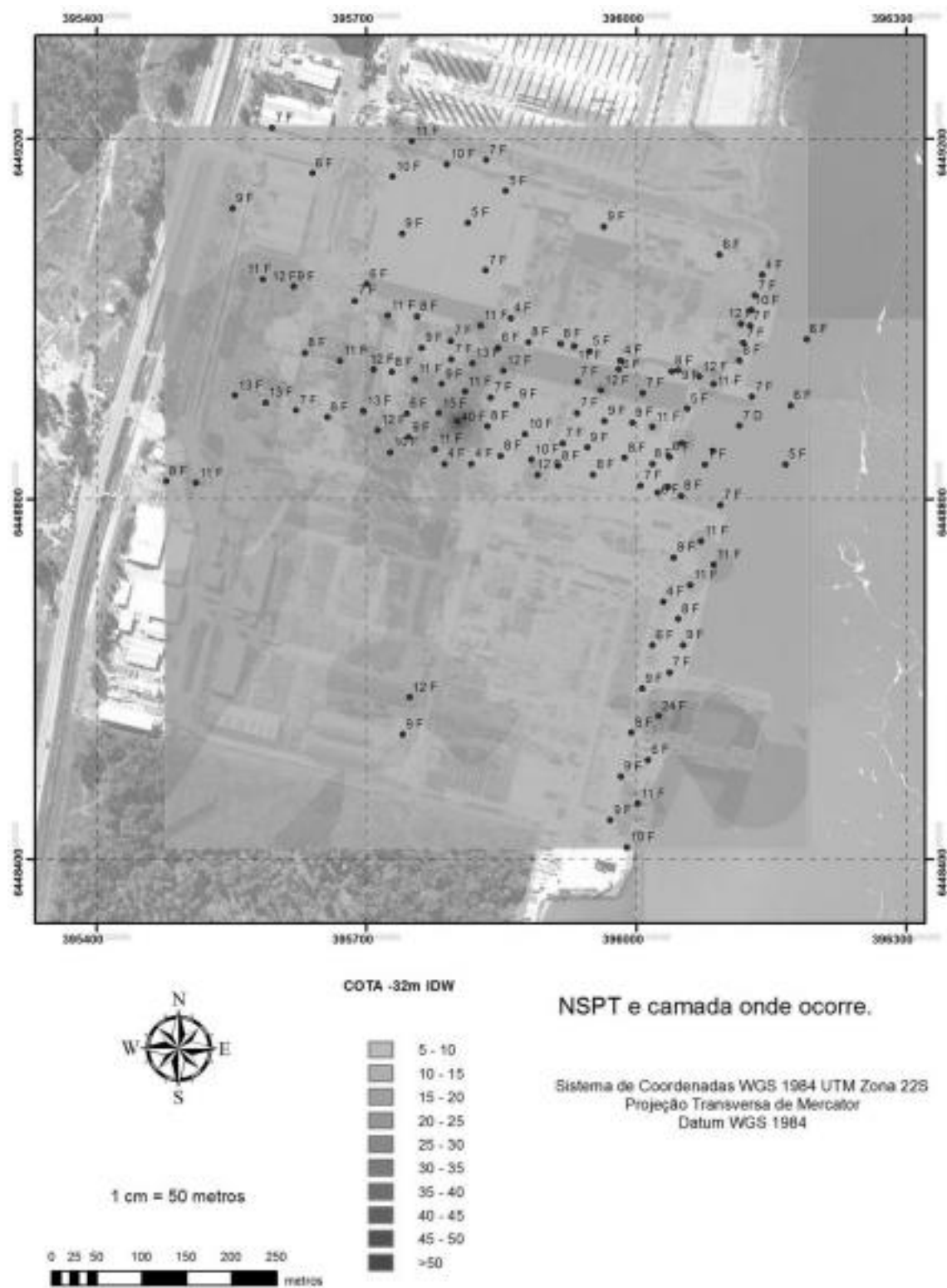


Figura A.0.36 - Distribuição do NSPT na cota -32 m pelo método IDW.

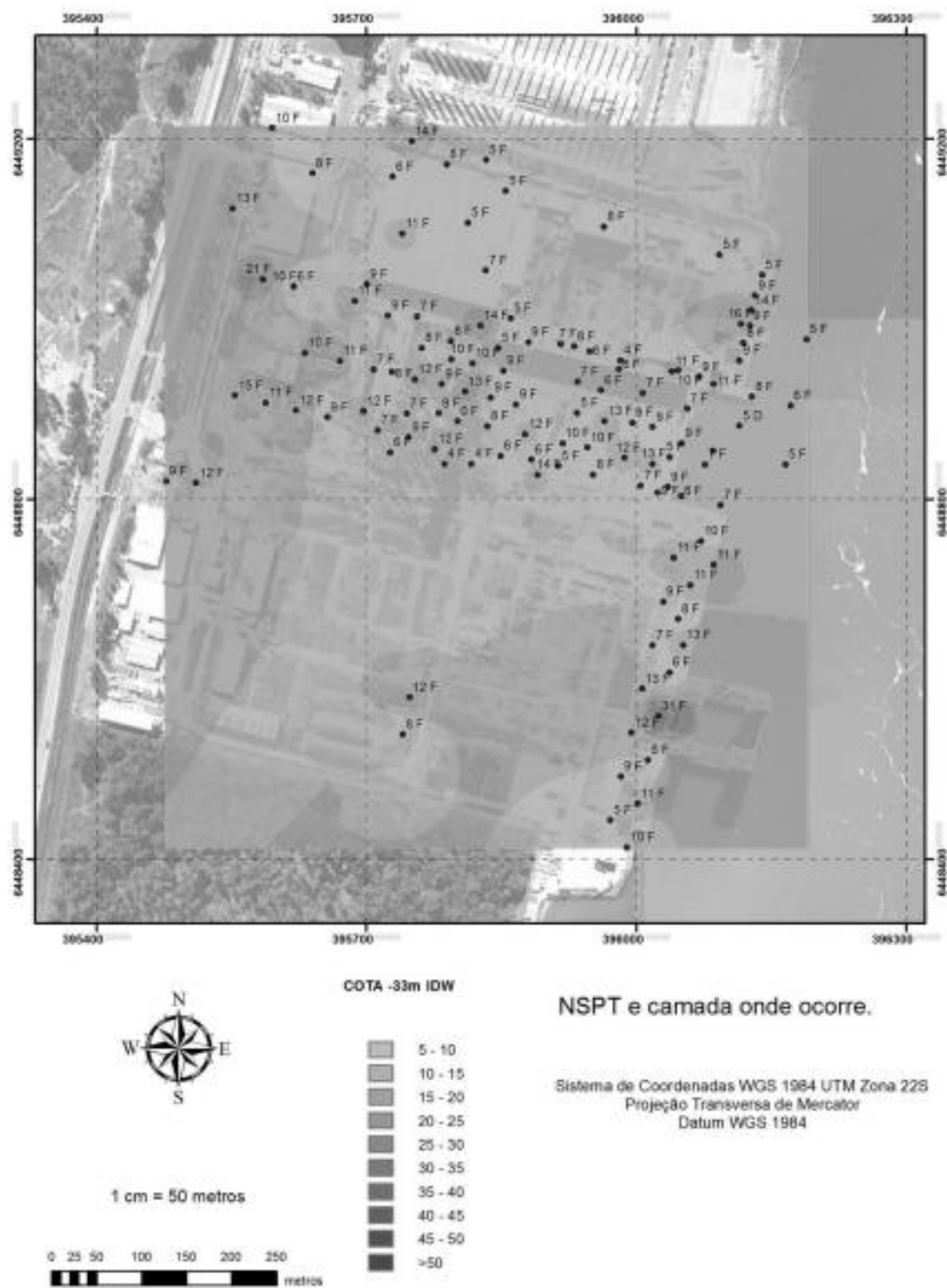


Figura A.0.37 - Distribuição do N_{sfp} na cota -33 m pelo método IDW.

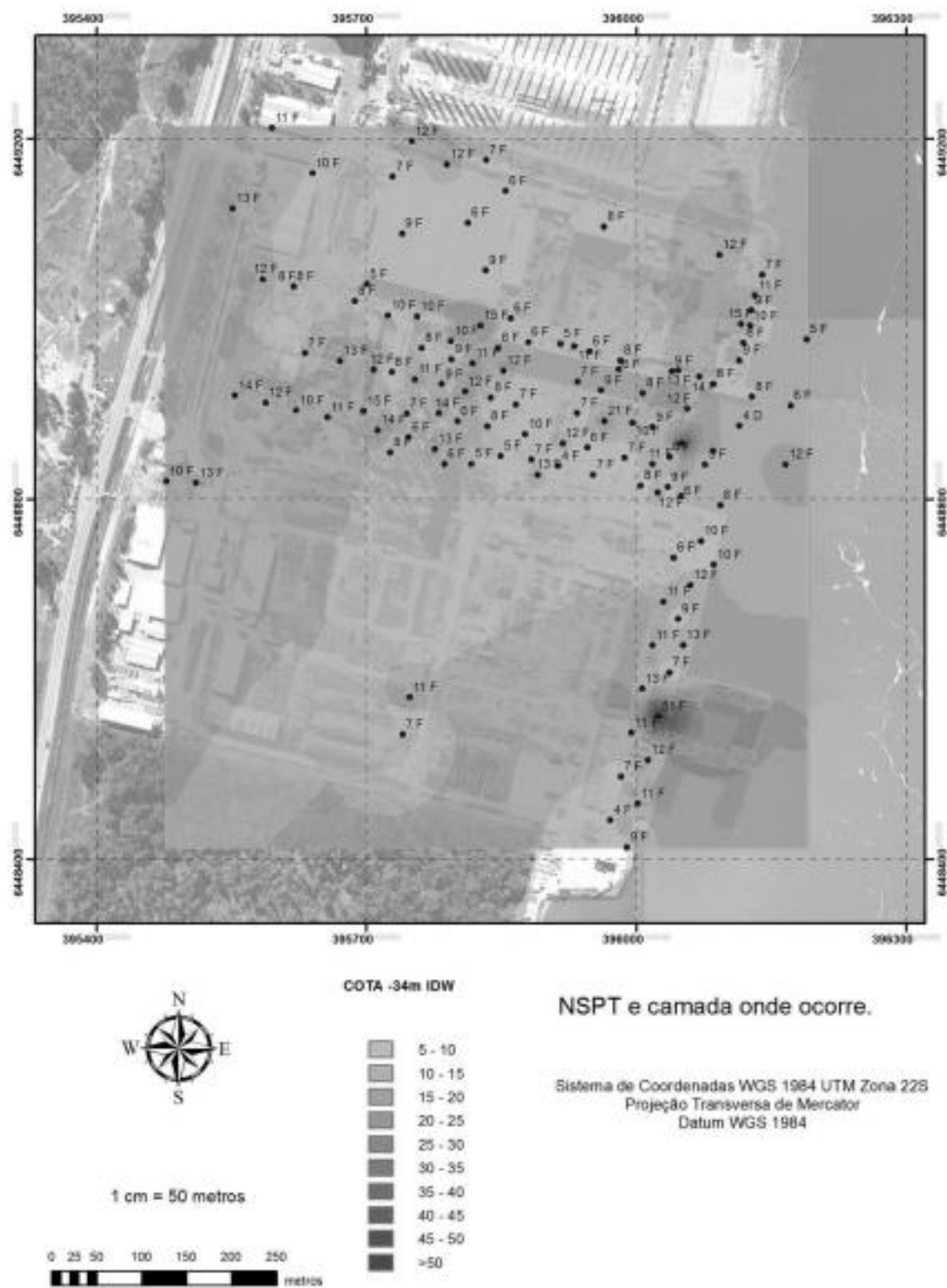


Figura A.0.38 - Distribuição do N_{spt} na cota -34 m pelo método IDW.

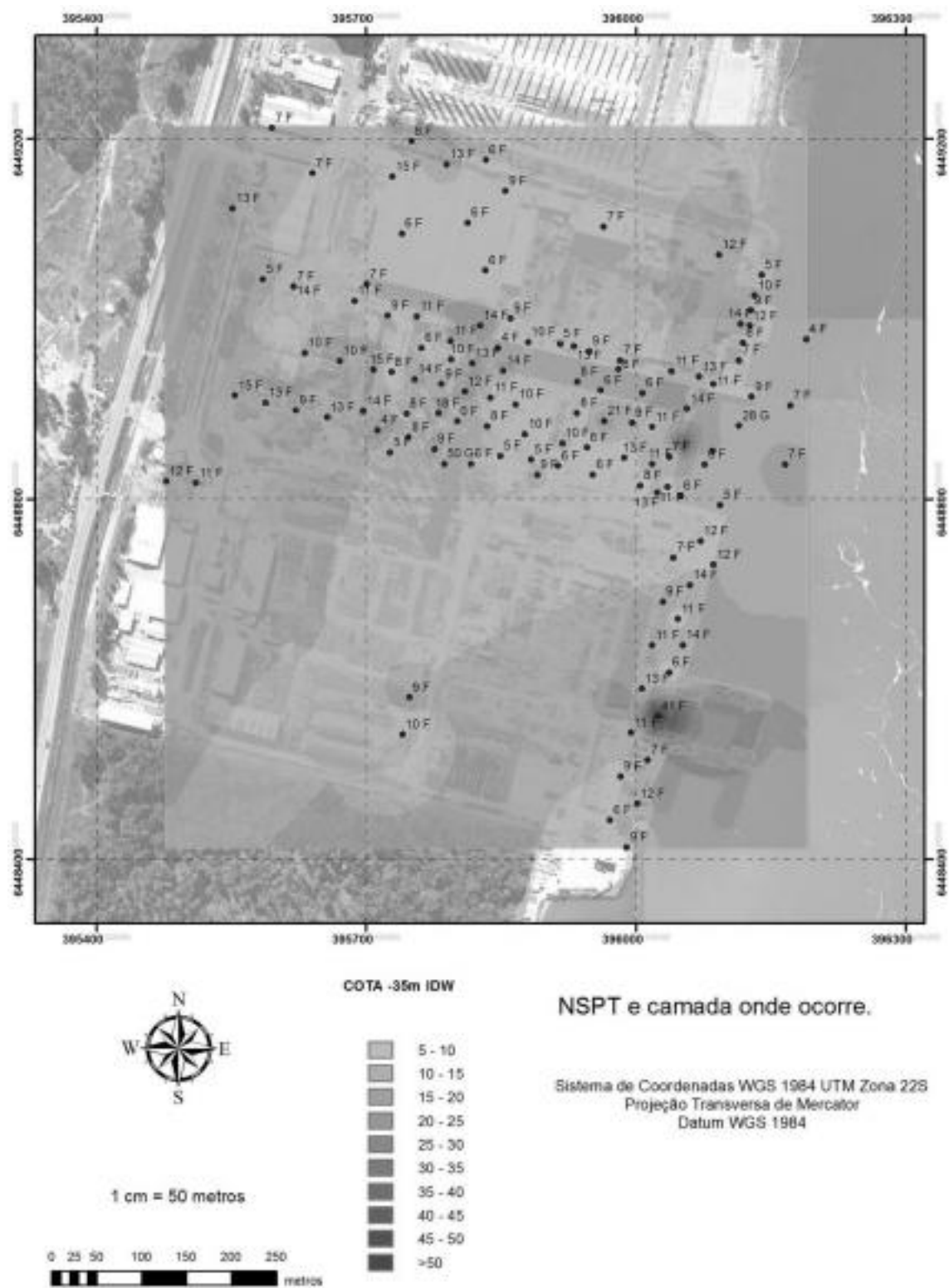


Figura A.0.39 - Distribuição do NSPT na cota -35 m pelo método IDW.

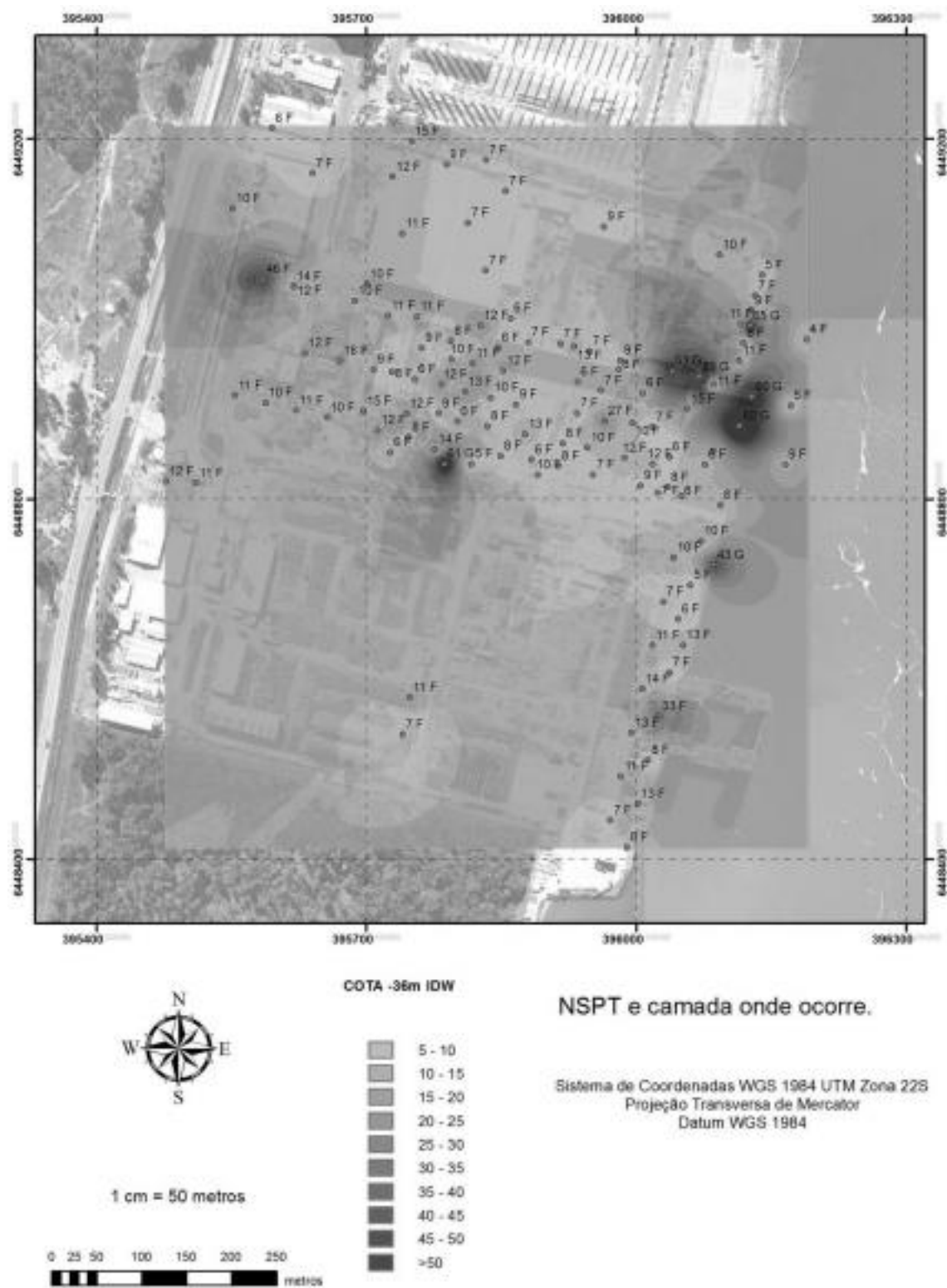


Figura A.0.40 - Distribuição do N_{SPT} na cota -36 m pelo método IDW.

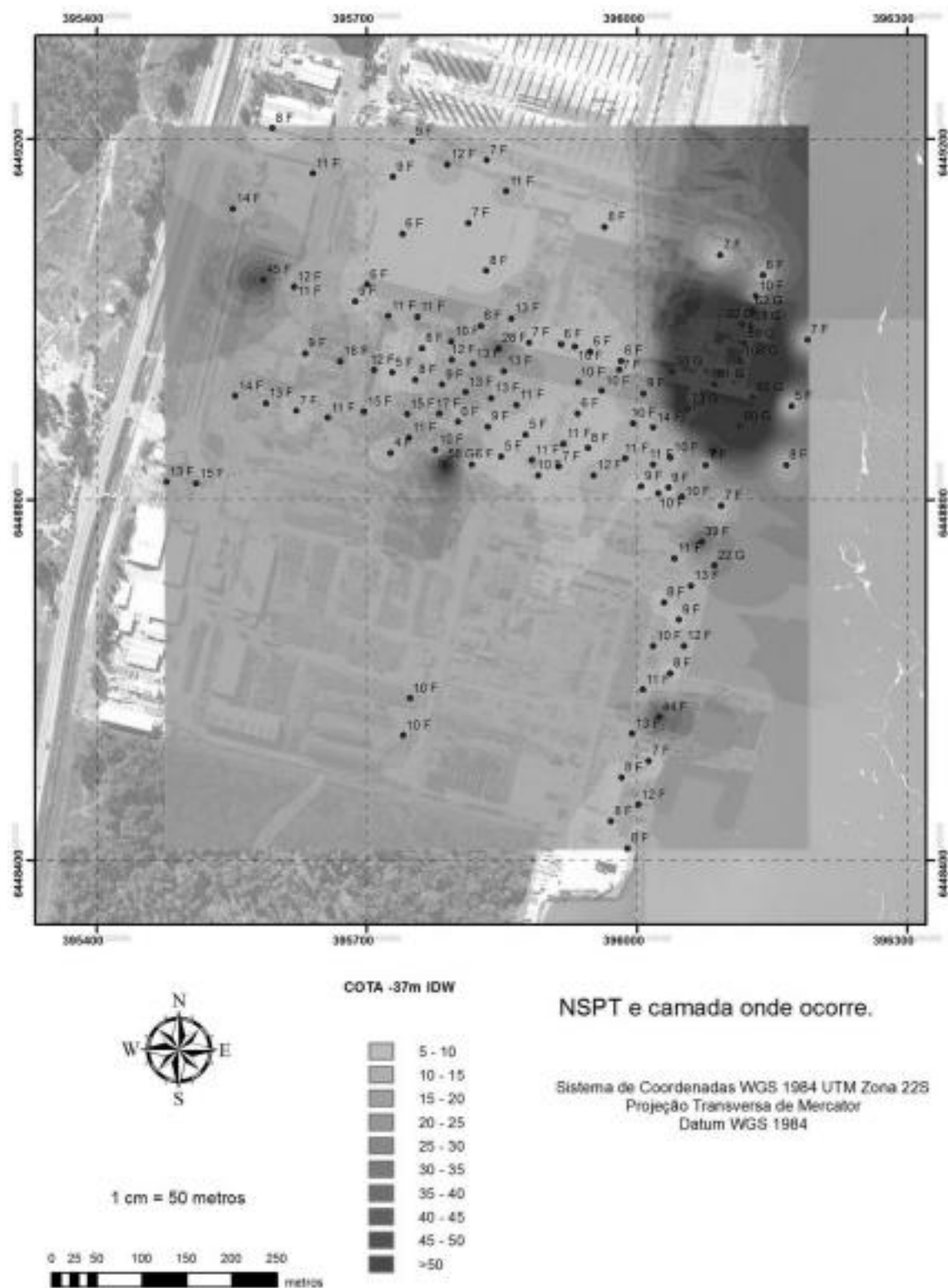


Figura A.0.41 - Distribuição do N_{spt} na cota -37 m pelo método IDW.

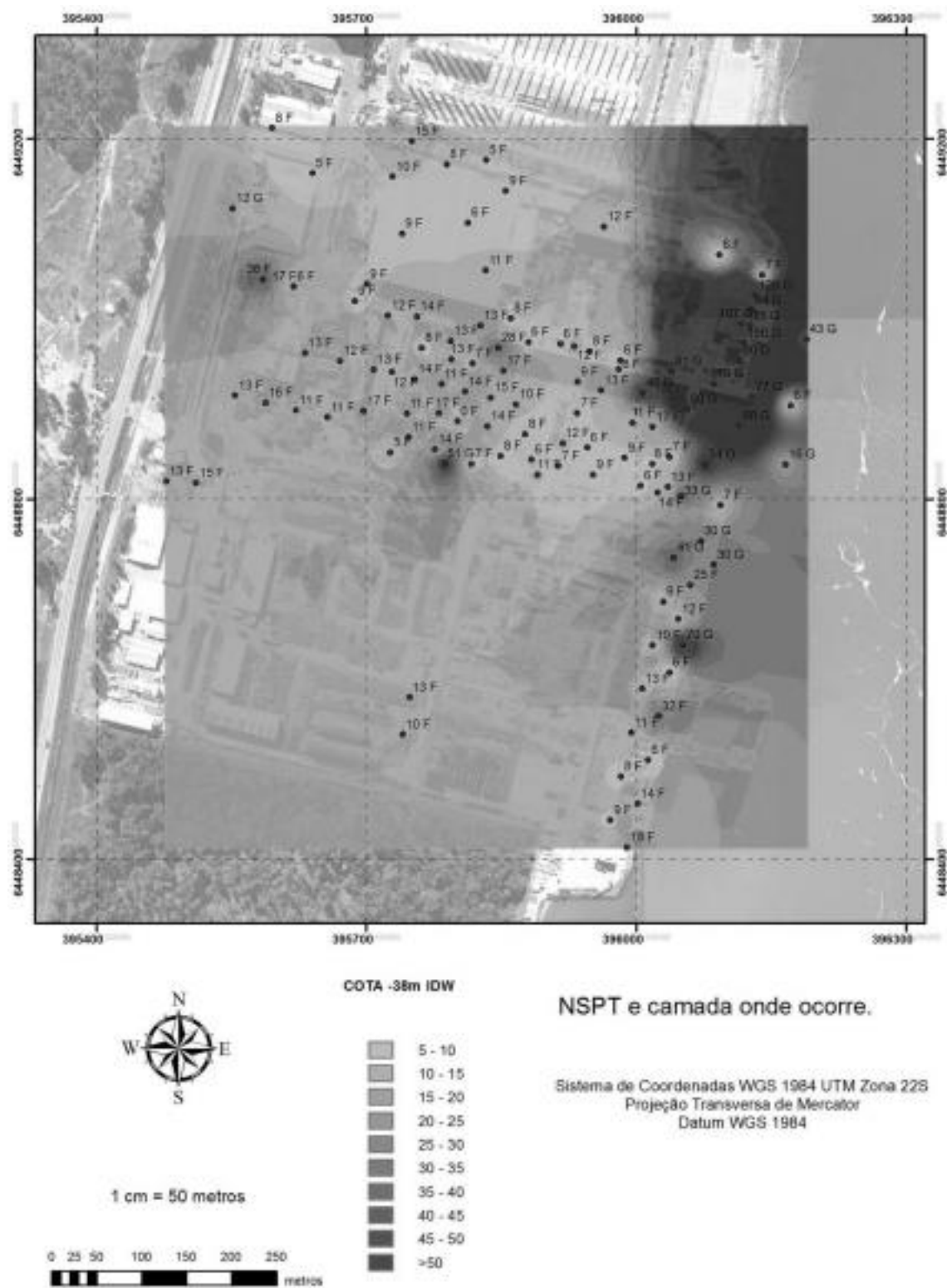


Figura A.0.42 - Distribuição do NSPT na cota -38 m pelo método IDW.

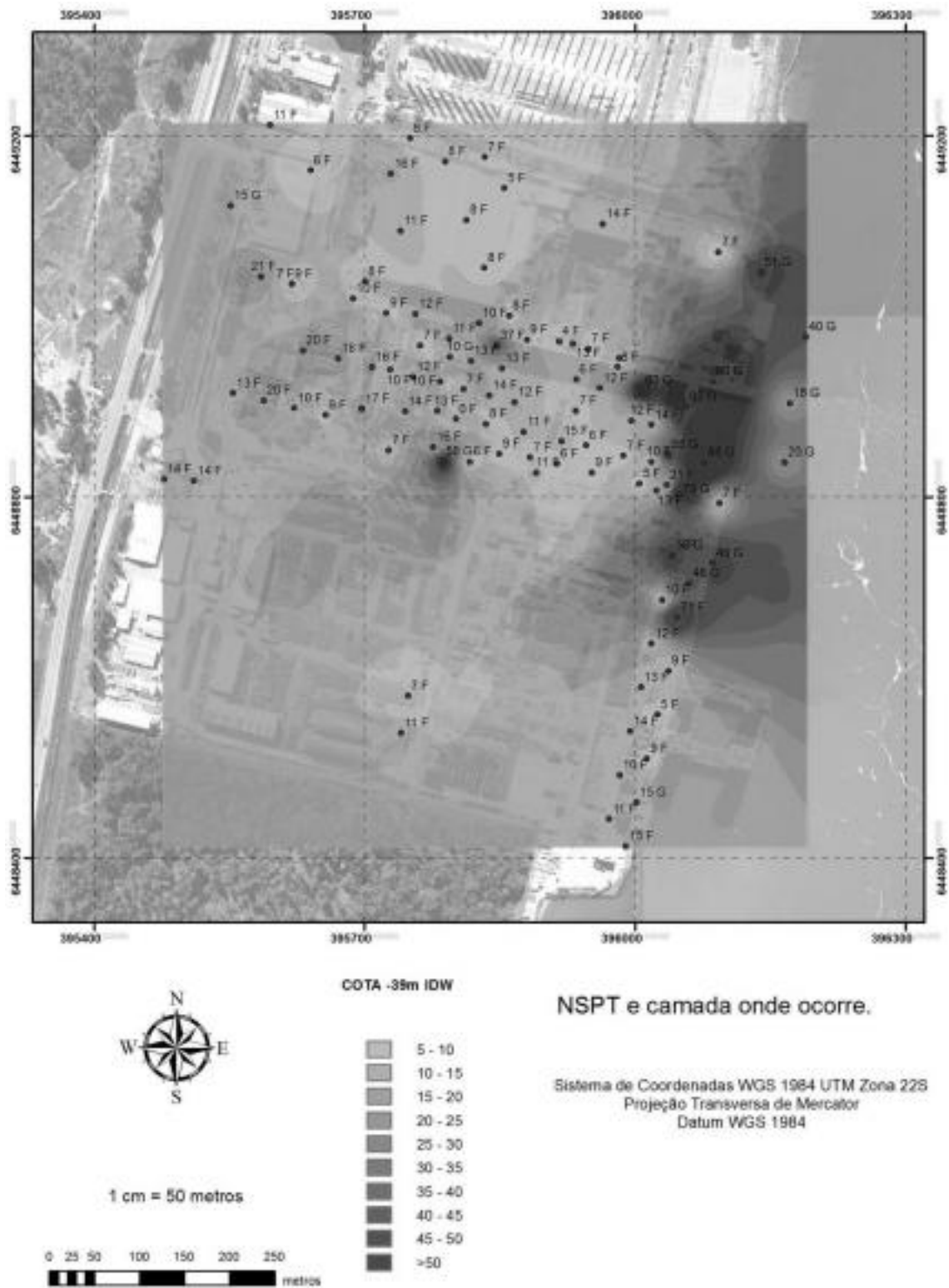


Figura A.0.43 - Distribuição do N_{SPF} na cota -39 m pelo método IDW.

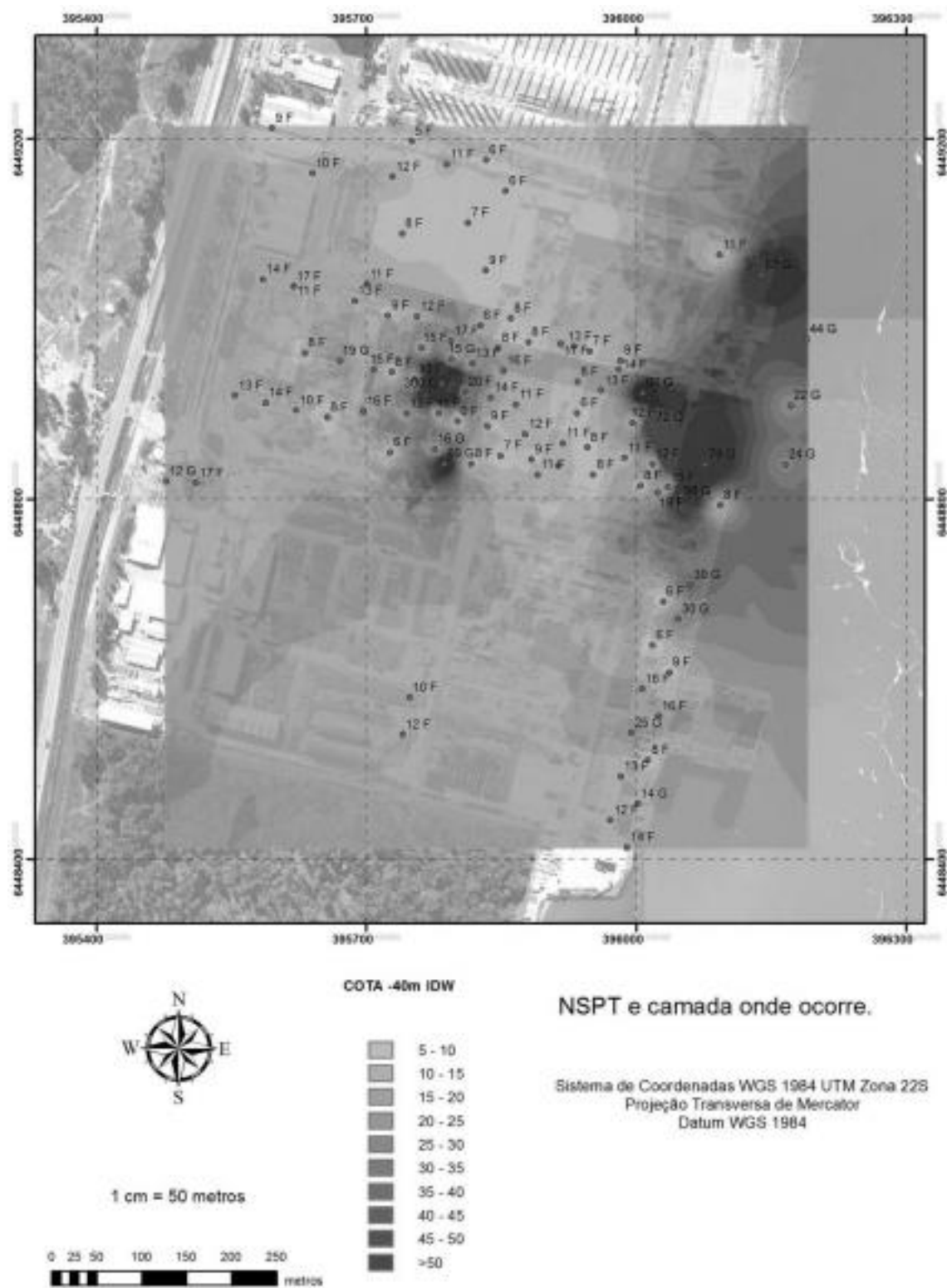


Figura A.0.44 - Distribuição do NSPT na cota -40 m pelo método IDW.

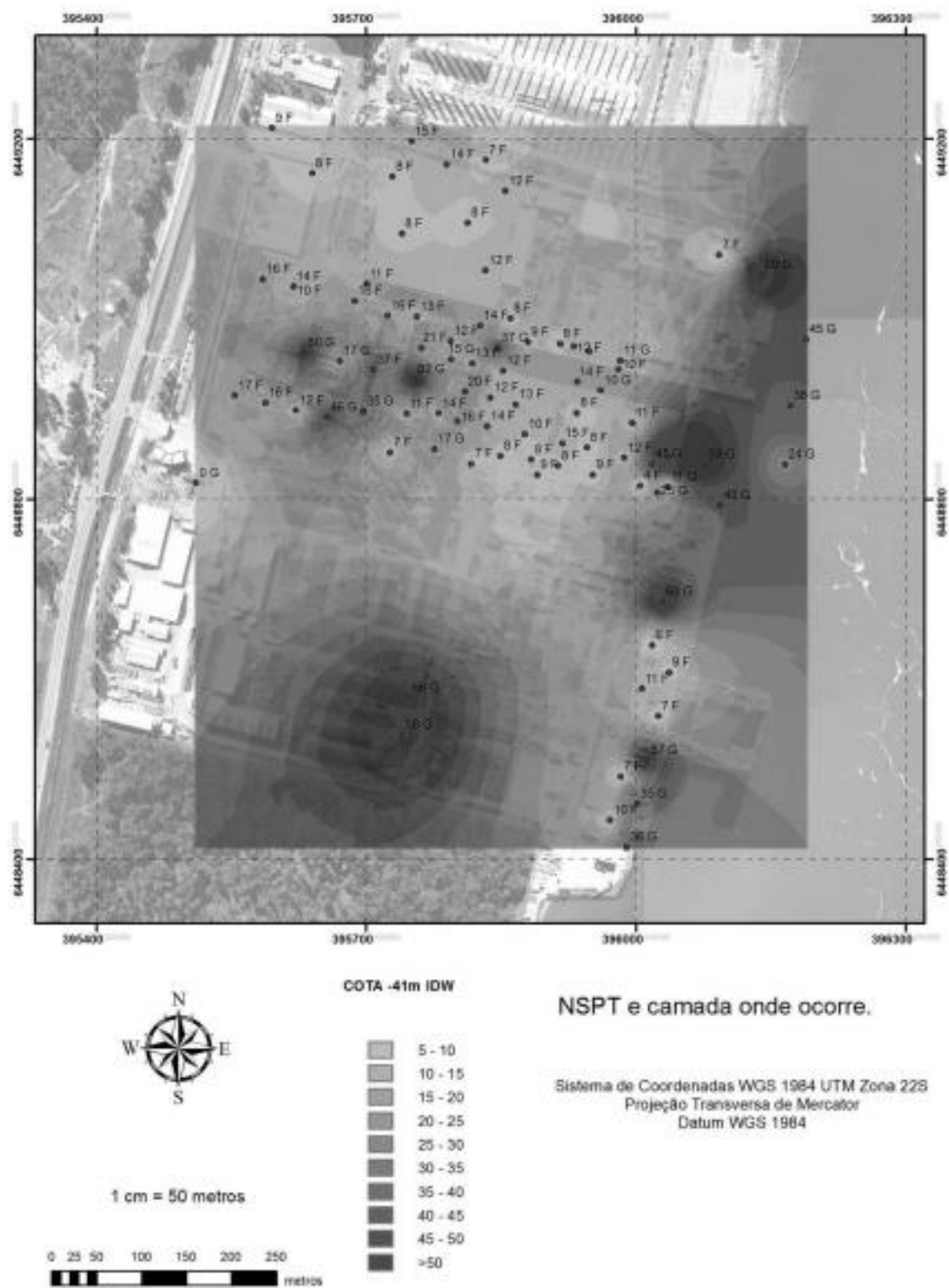


Figura A.0.45 - Distribuição do NSPT na cota -41 m pelo método IDW.

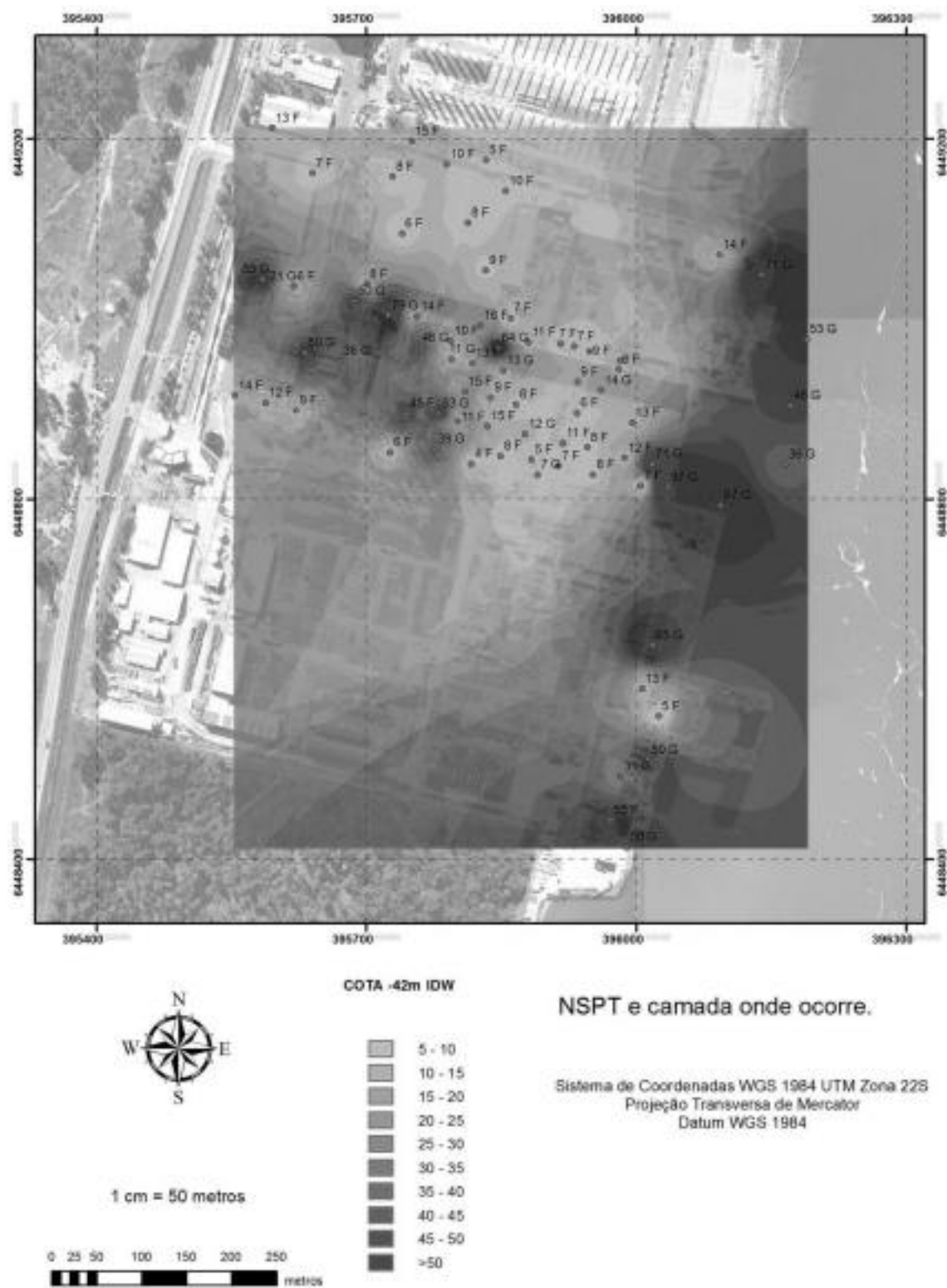


Figura A.0.46 - Distribuição do N_{SPT} na cota -42 m pelo método IDW.

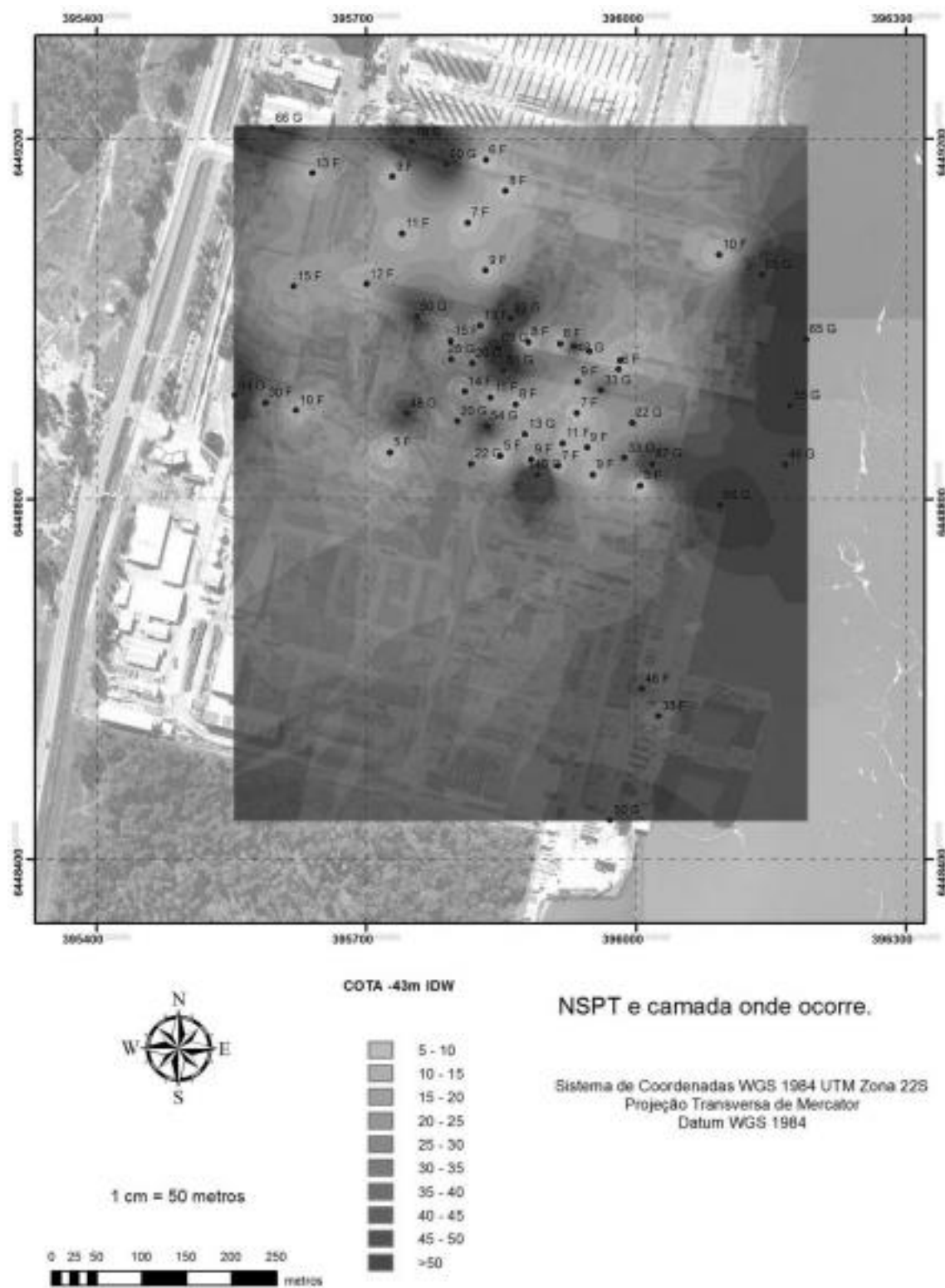


Figura A.0.4/ - Distribuição do N_{sPT} na cota -43 m pelo método IDW.

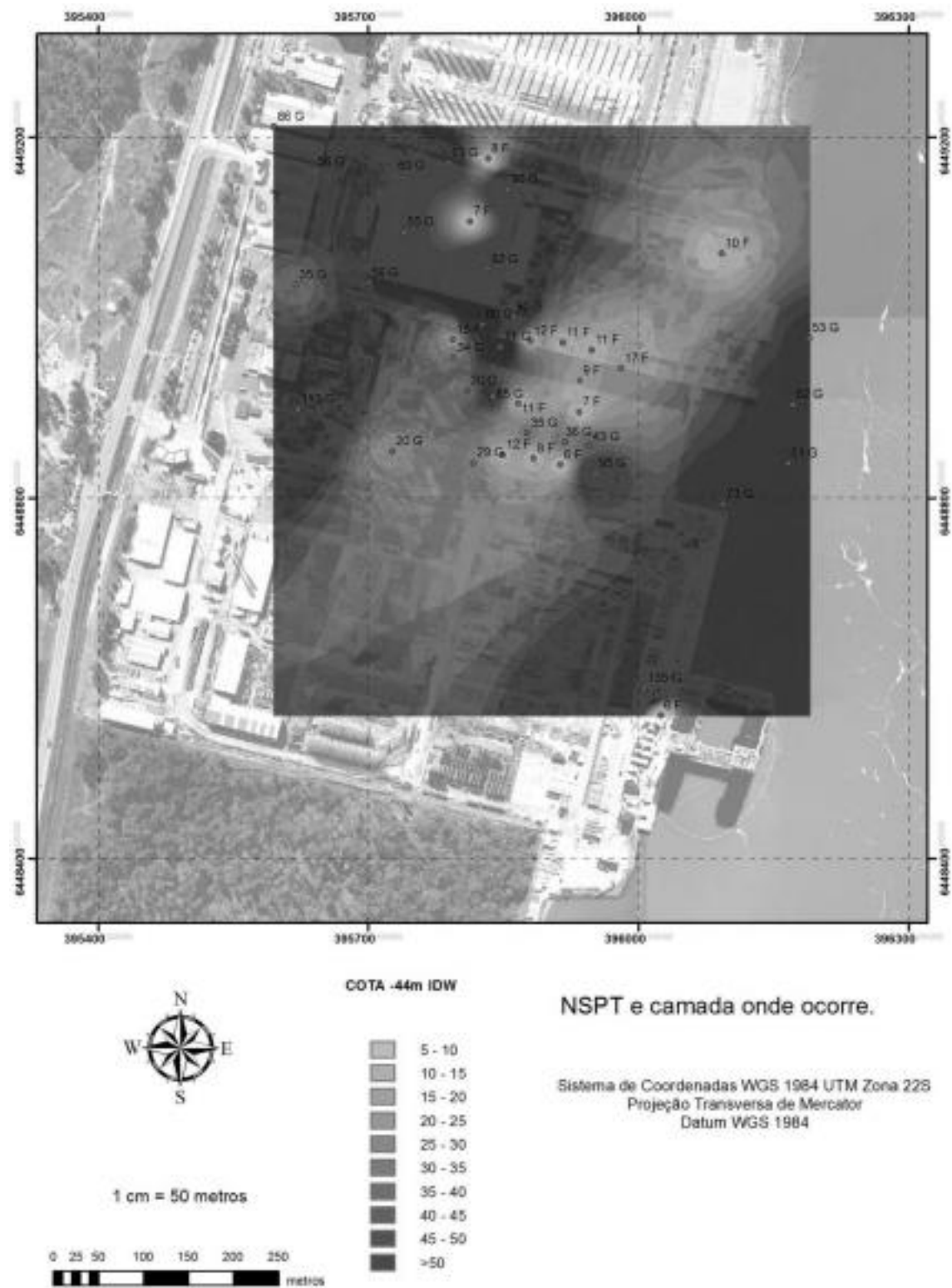


Figura A.0.48 - Distribuição do N_{SPT} na cota -44 m pelo método IDW.

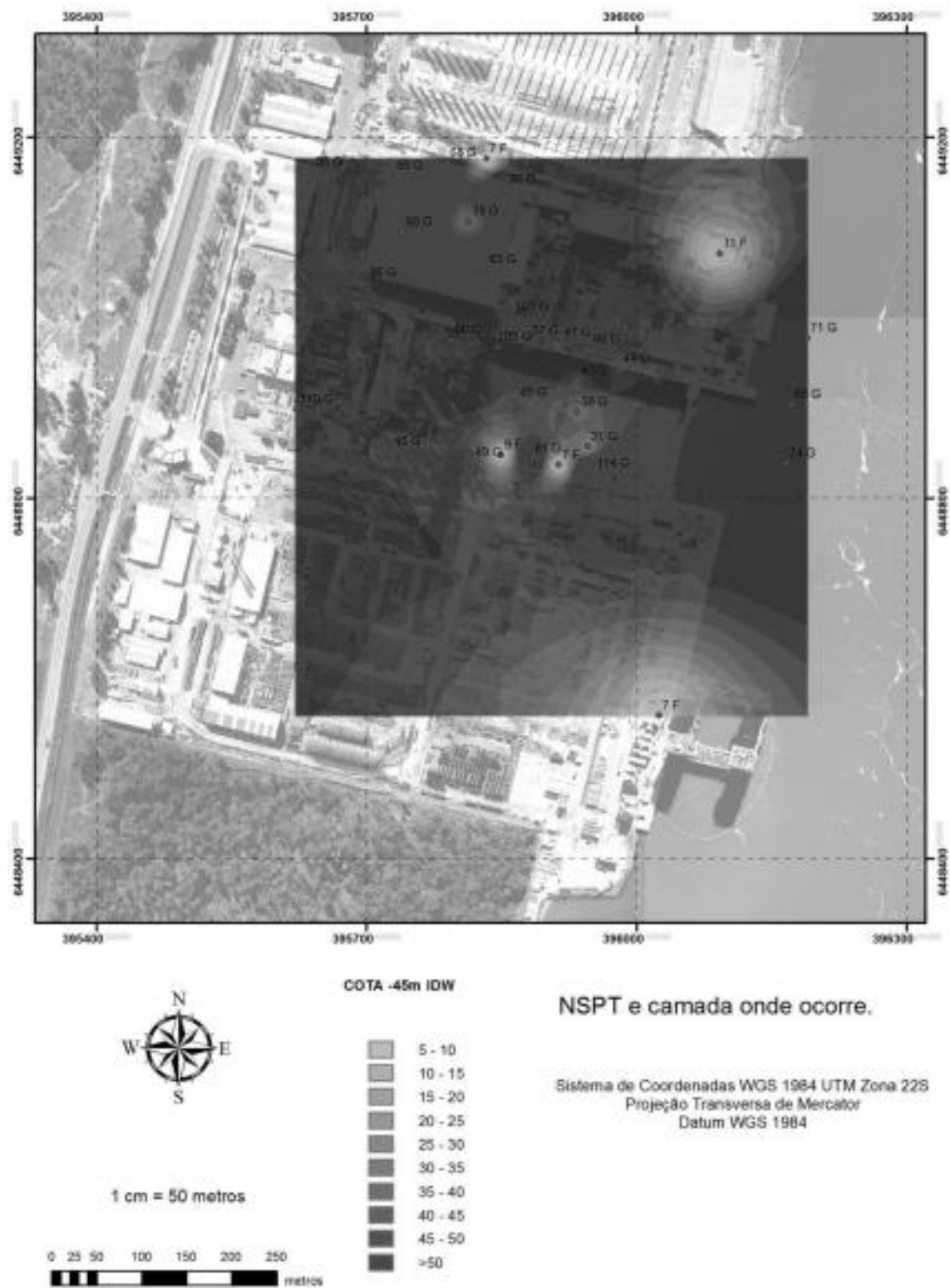


Figura A.0.49 - Distribuição do N_{SPT} na cota -45 m pelo método IDW.

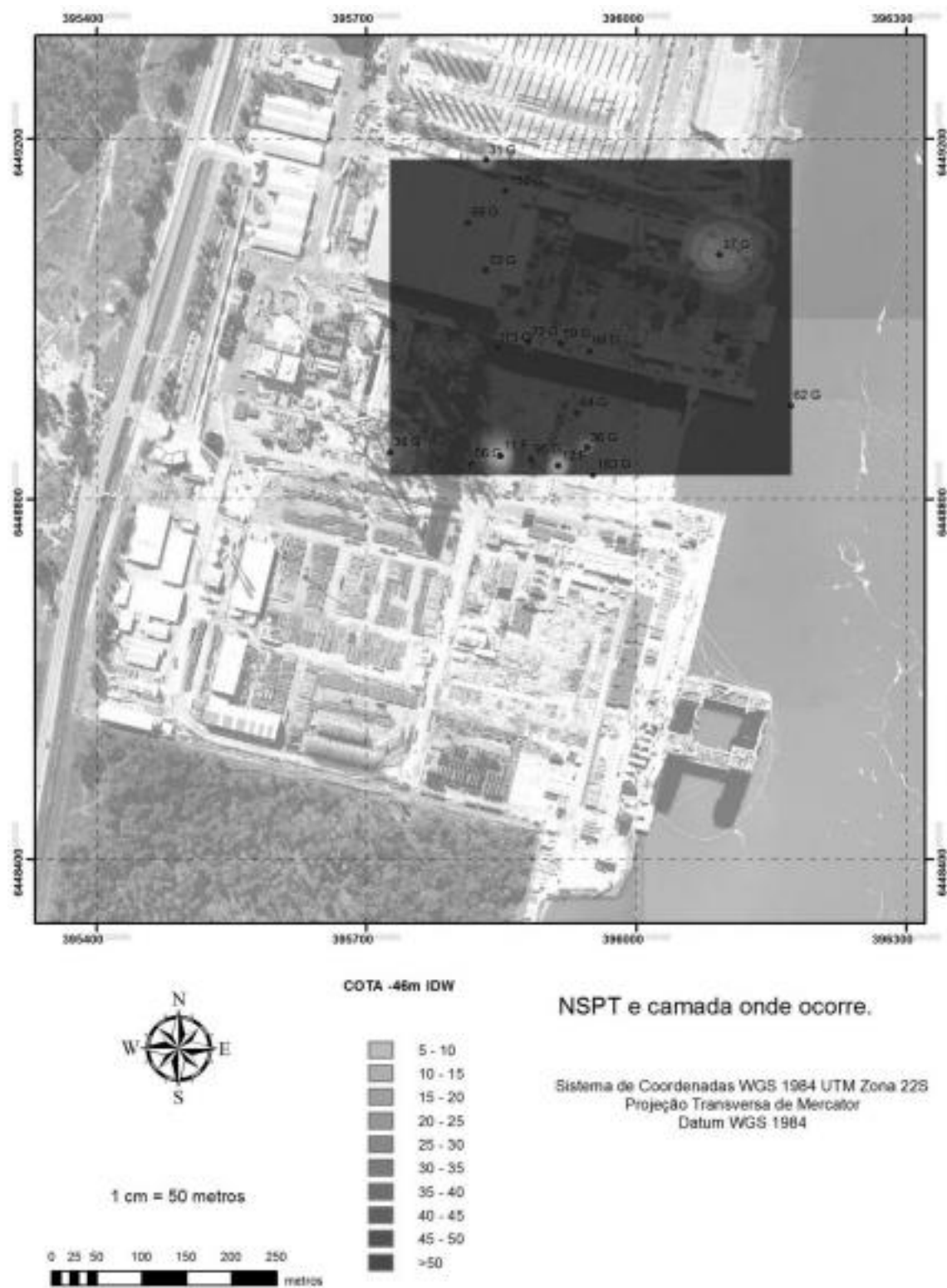


Figura A.0.50 - Distribuição do NSPT na cota -46 m pelo método IDW.

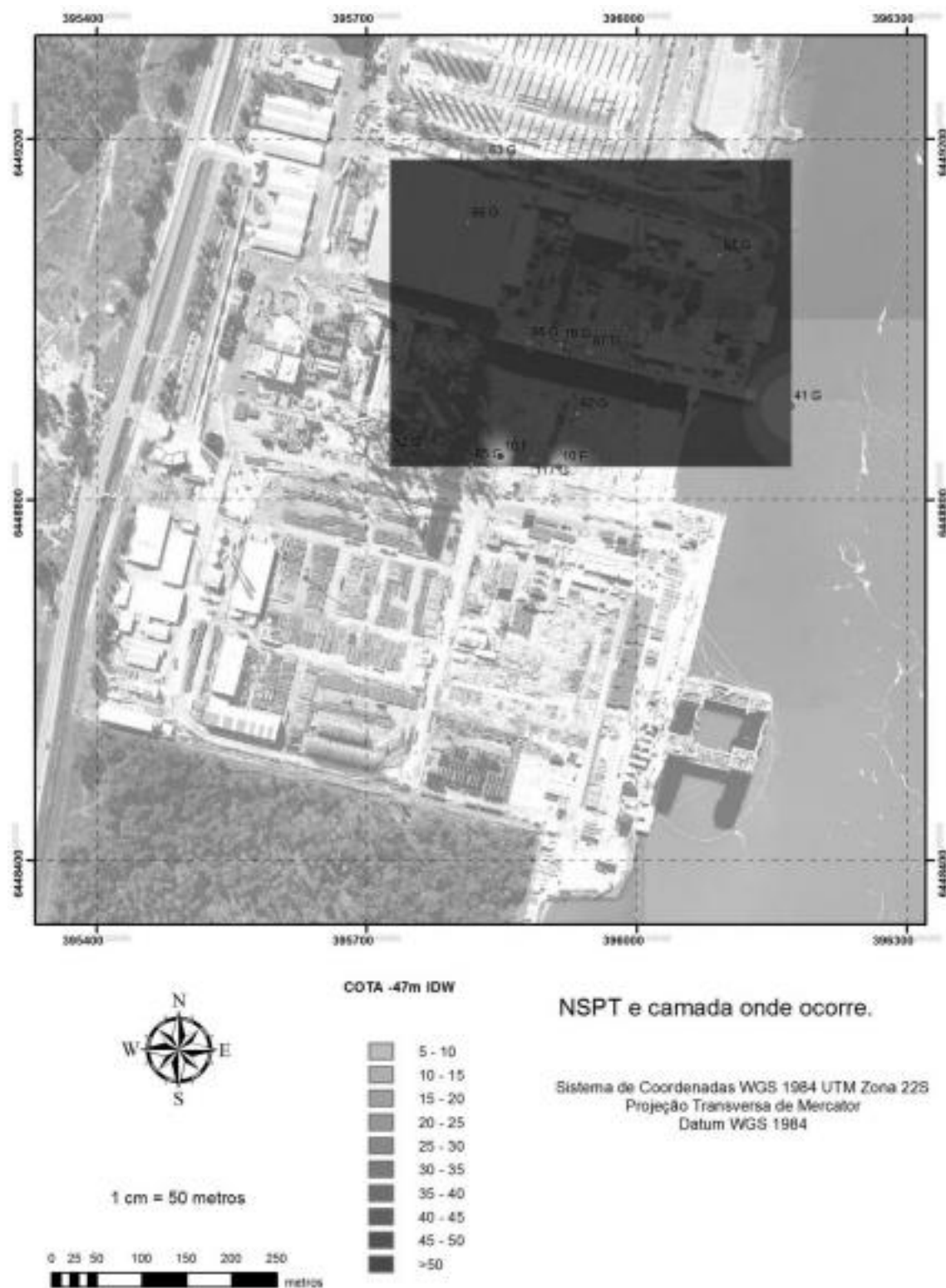


Figura A.0.21 - Distribuição do NSPT na cota -47 m pelo método IDW.

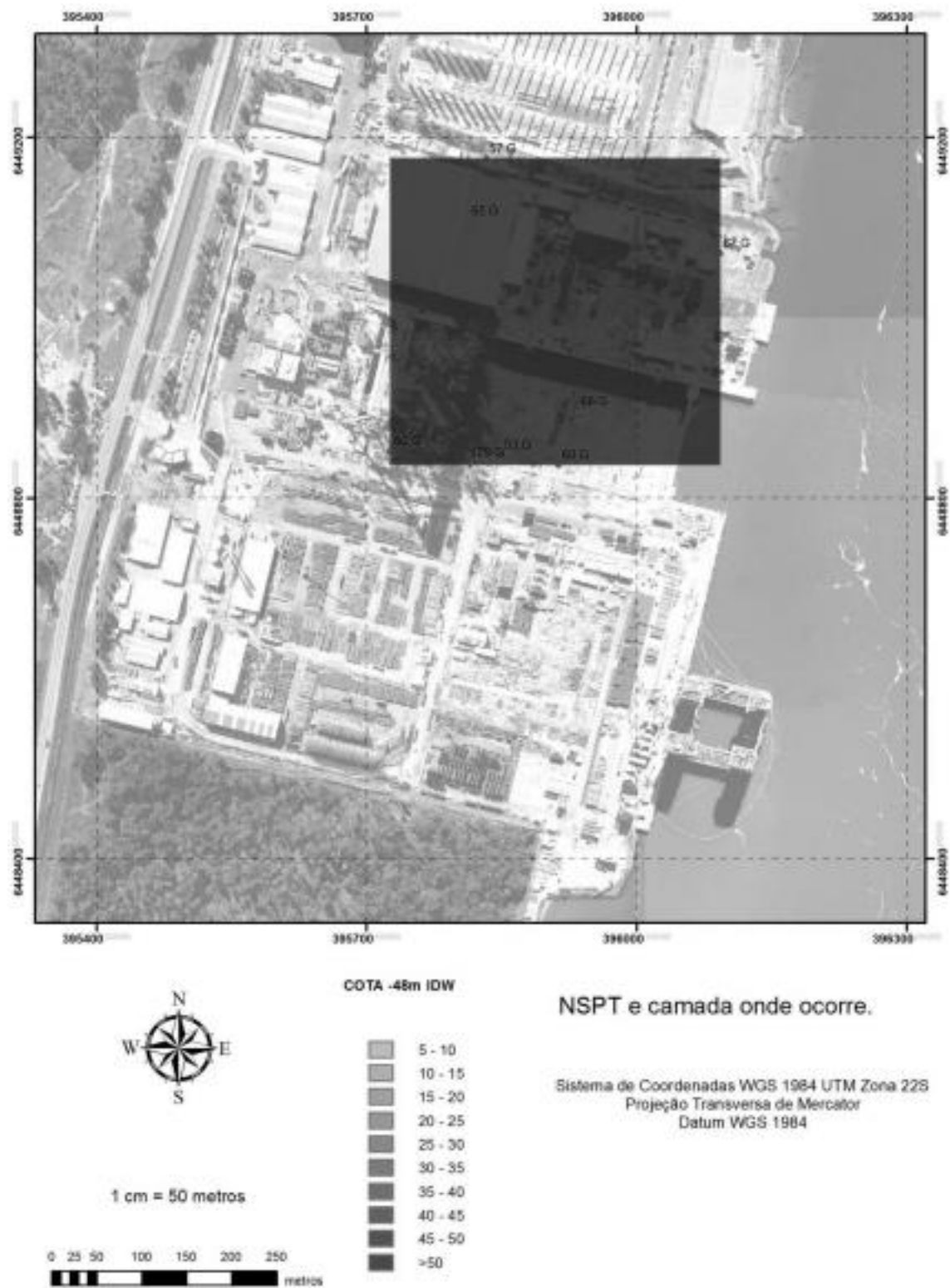


Figura A.0.52 - Distribuição do NSPT na cota -48 m pelo método IDW.

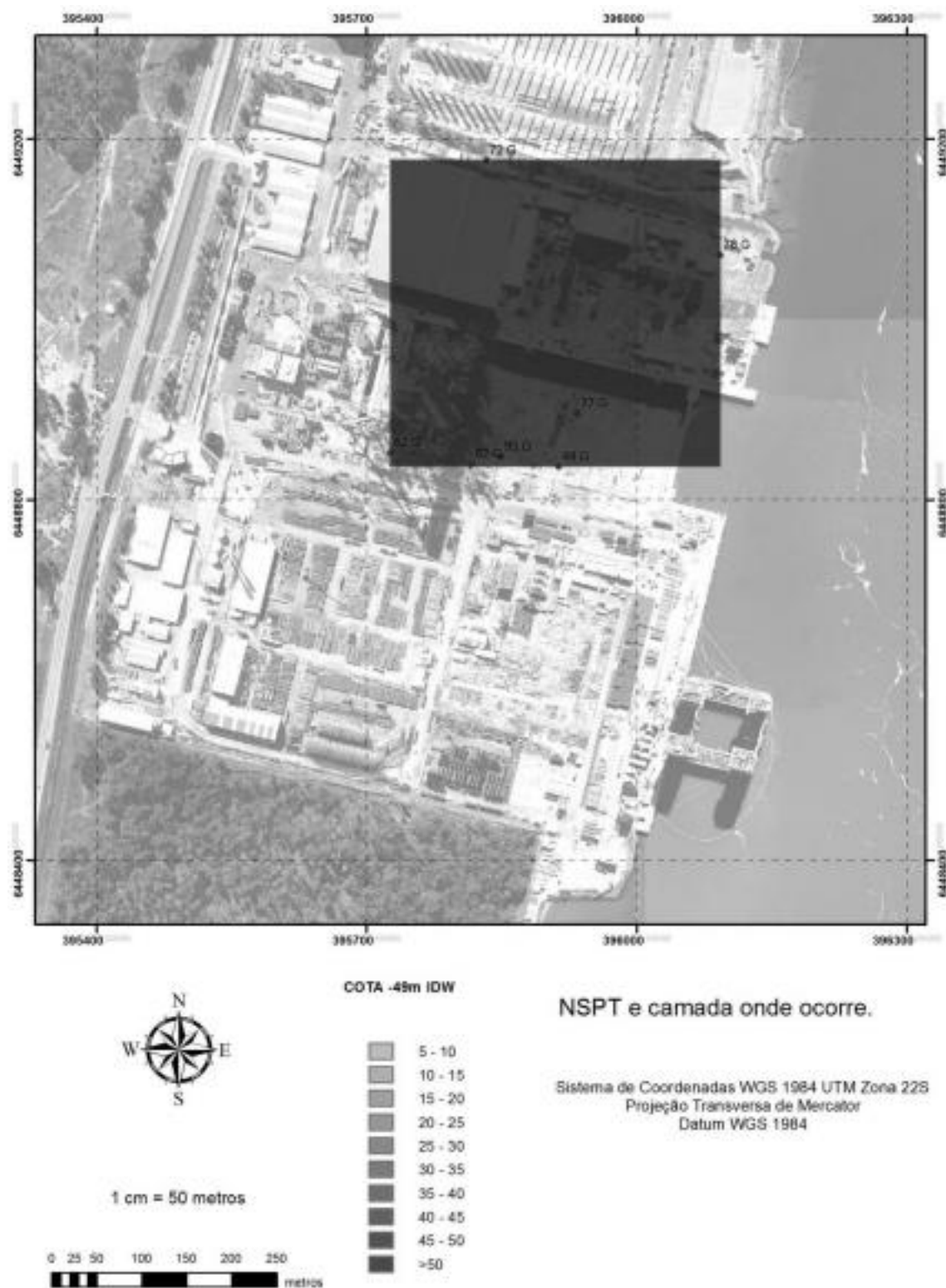


Figura A.0.53 - Distribuição do N_{SPT} na cota -49 m pelo método IDW.

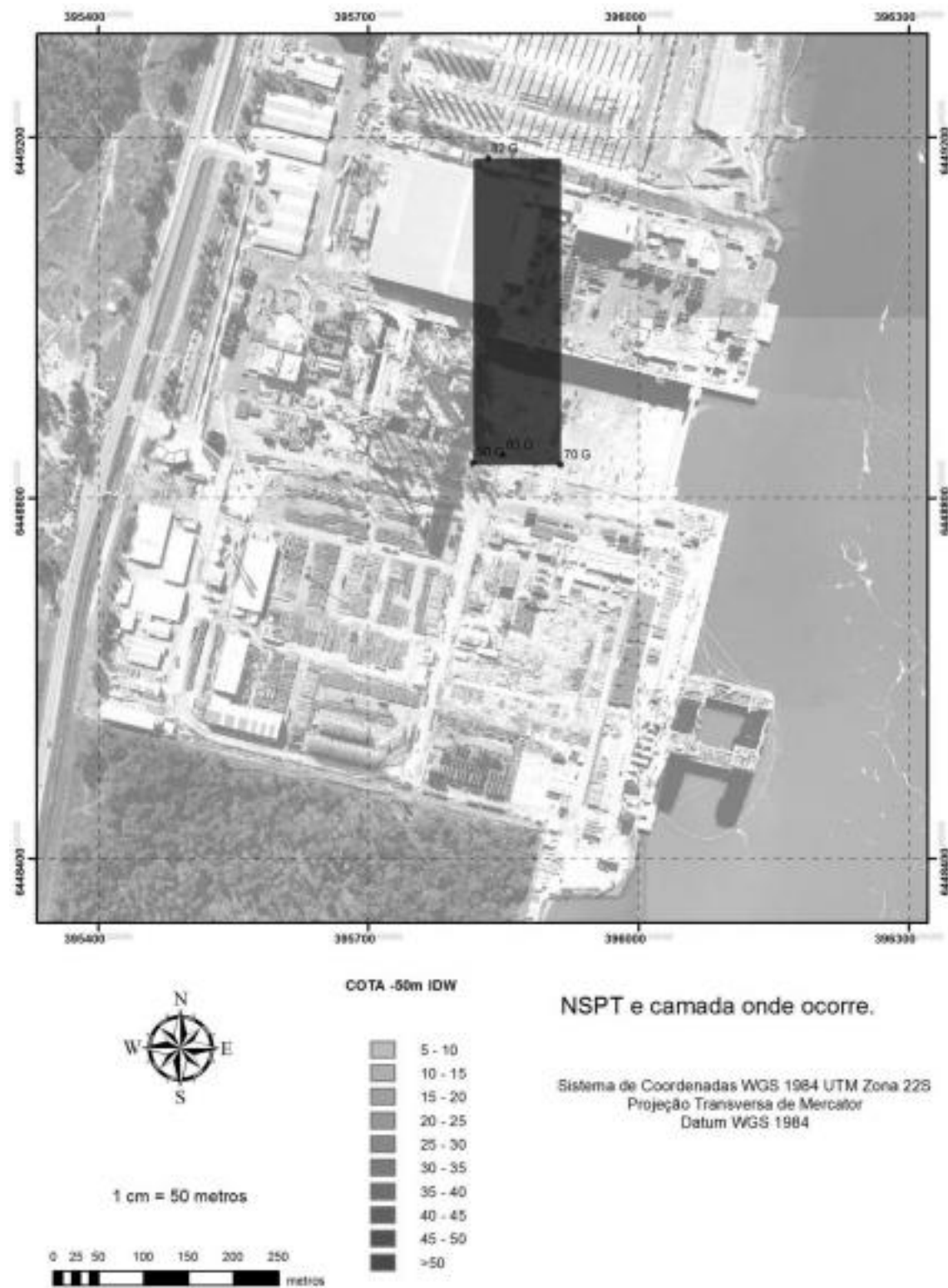


Figura A.0.24 - Distribuição do N_{SP} na cota -50 m pelo método IDW.

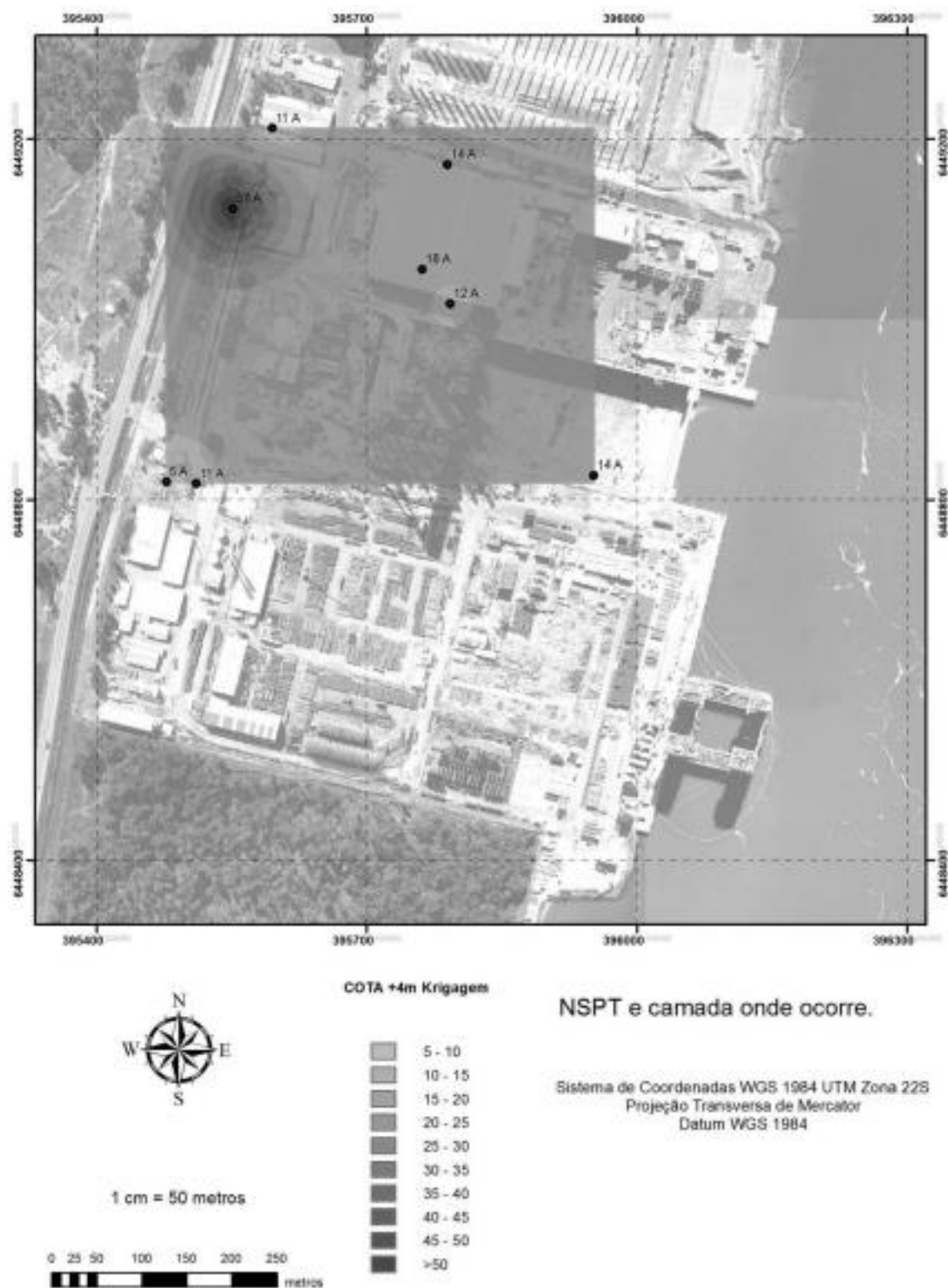


Figura A.0.55 - Distribuição do N_{SP} na cota +4 m pelo método Krigagem.

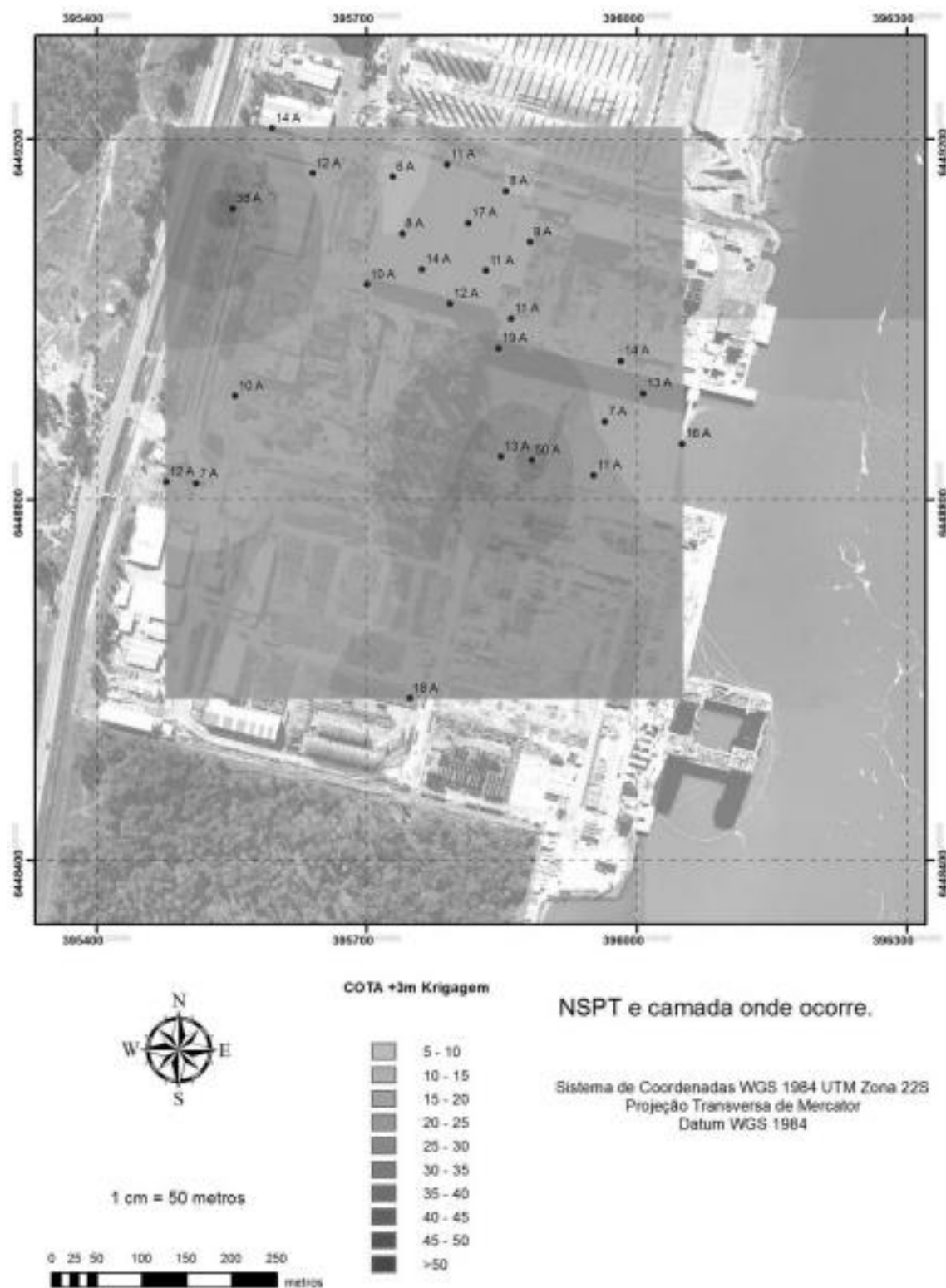


Figura A.0.56 - Distribuição do NSPT na cota +3 m pelo método Krigagem.

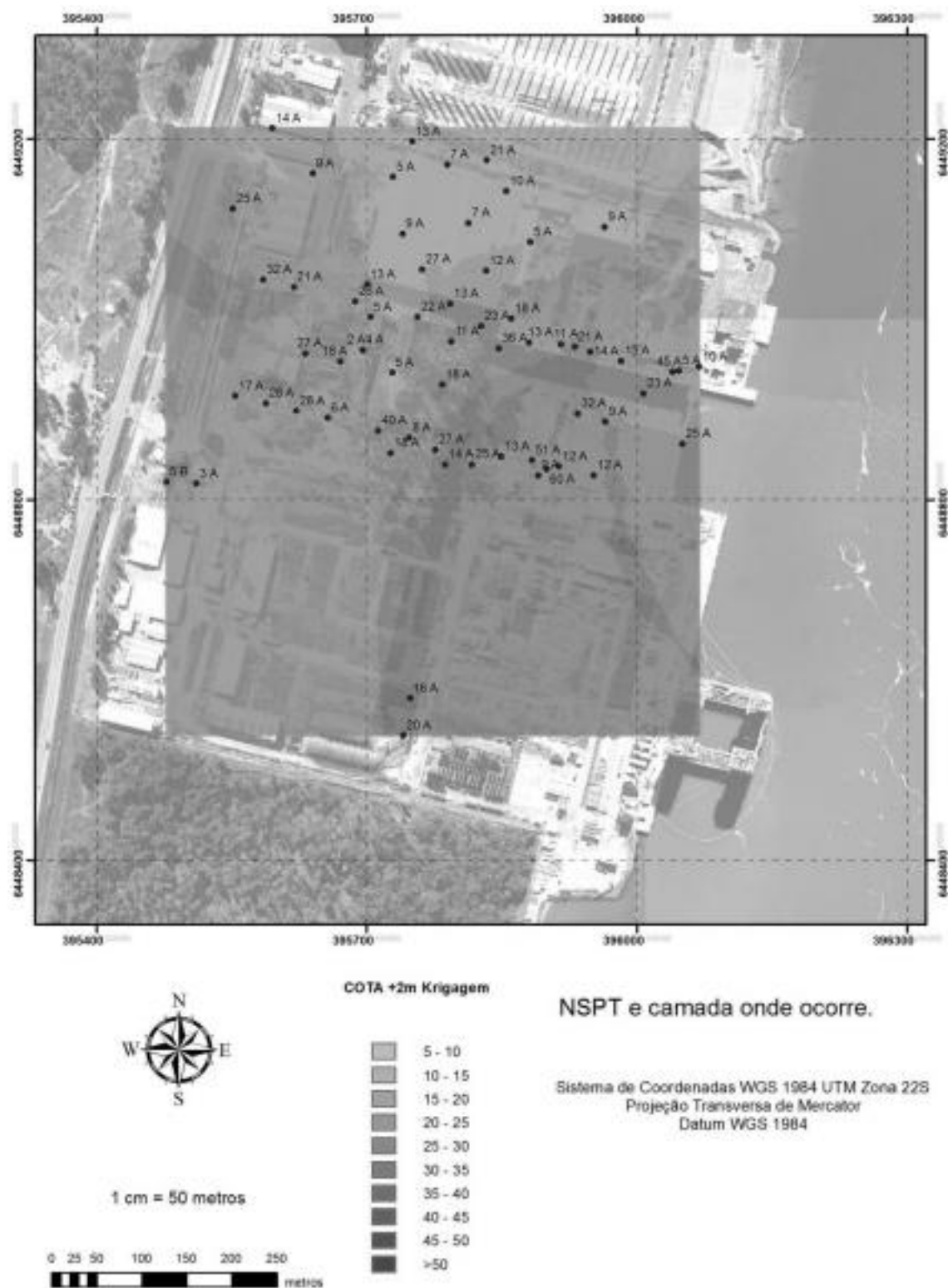


Figura A.0.57 - Distribuição do N_{sp} na cota +2 m pelo método Krigagem.

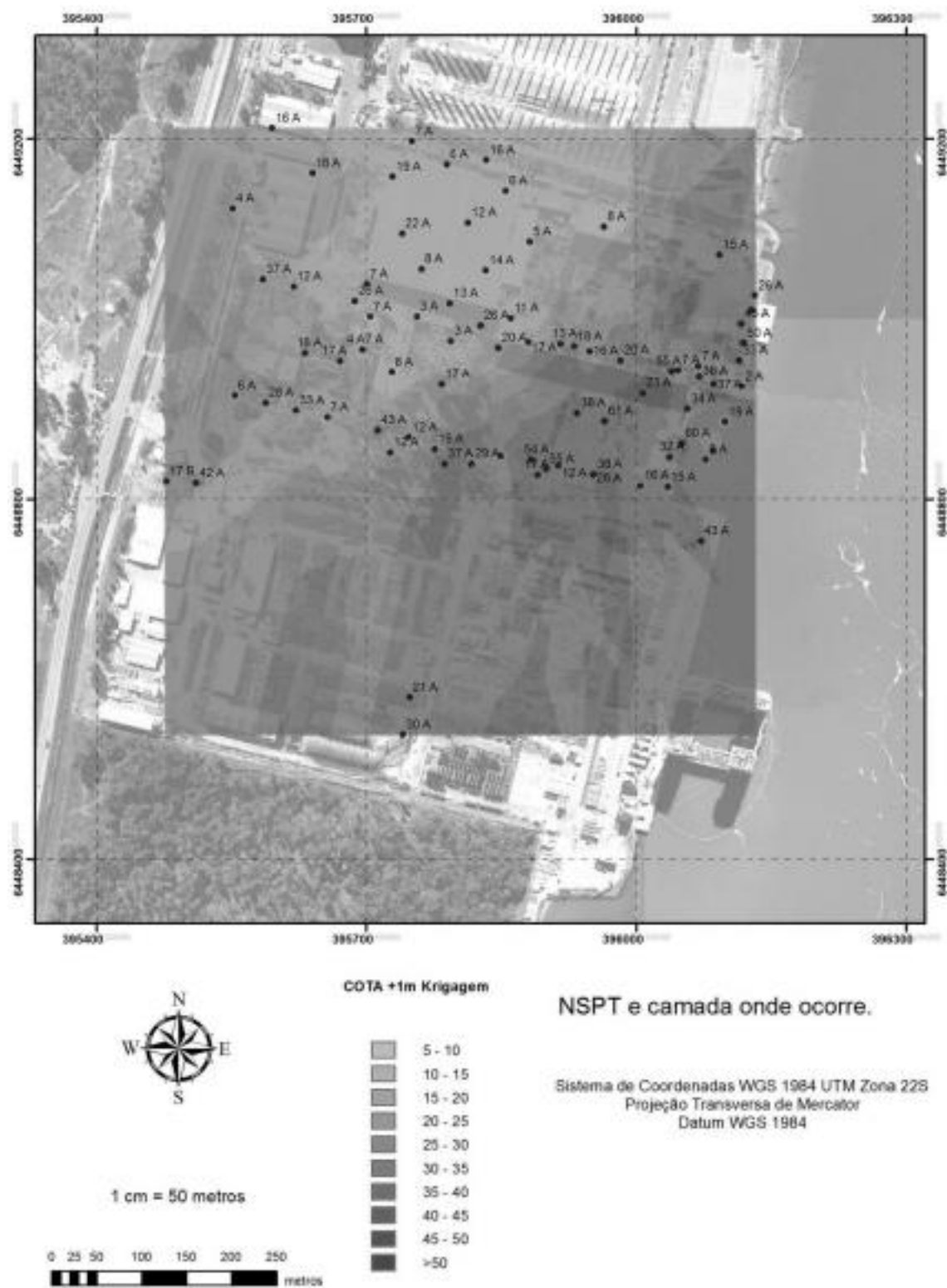


Figura A.0.58 - Distribuição do N_{sp} na cota +1 m pelo método Krigagem.

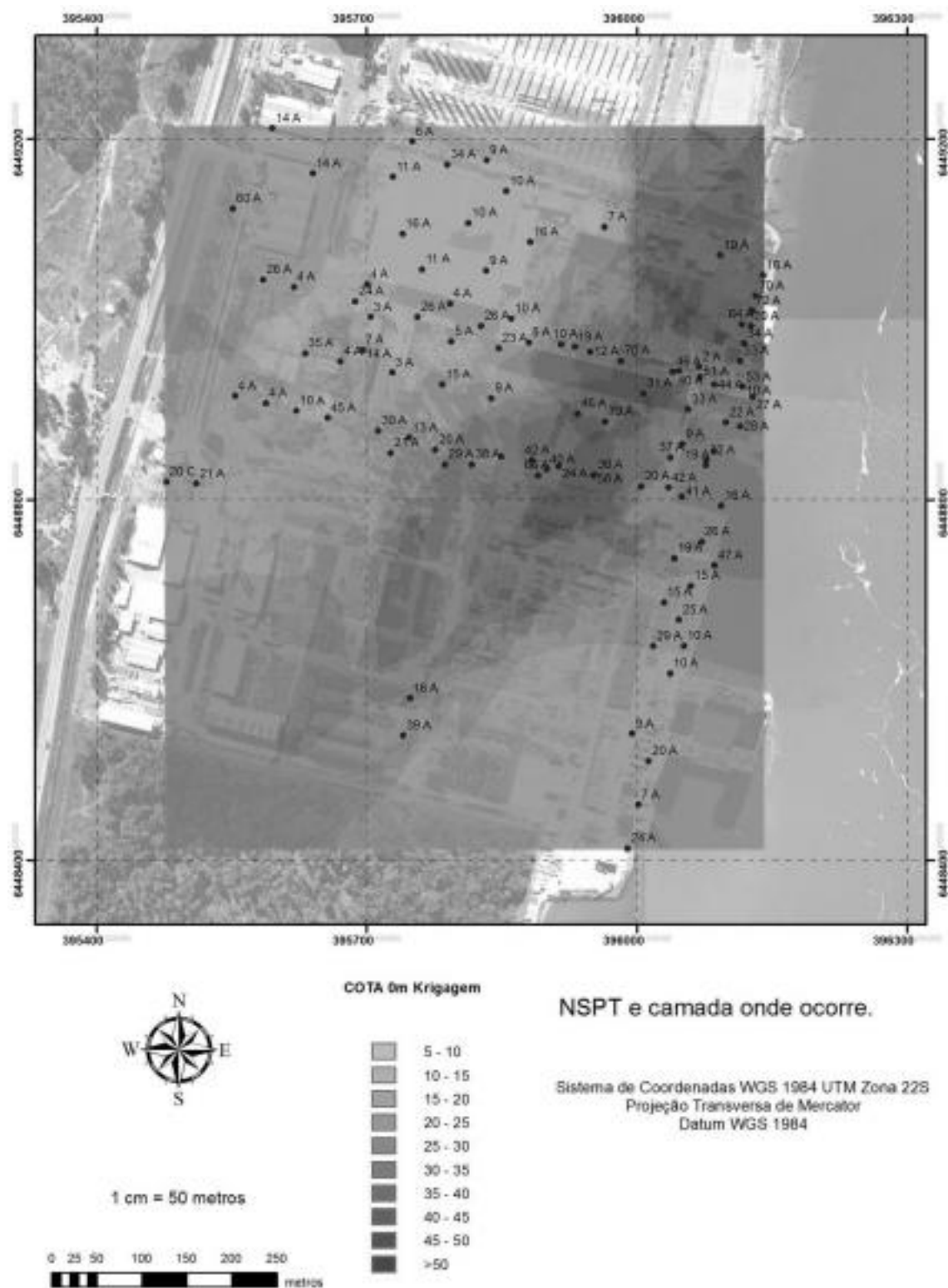


Figura A.0.59 - Distribuição do N_{spt} na cota 0 m pelo método Krigagem.

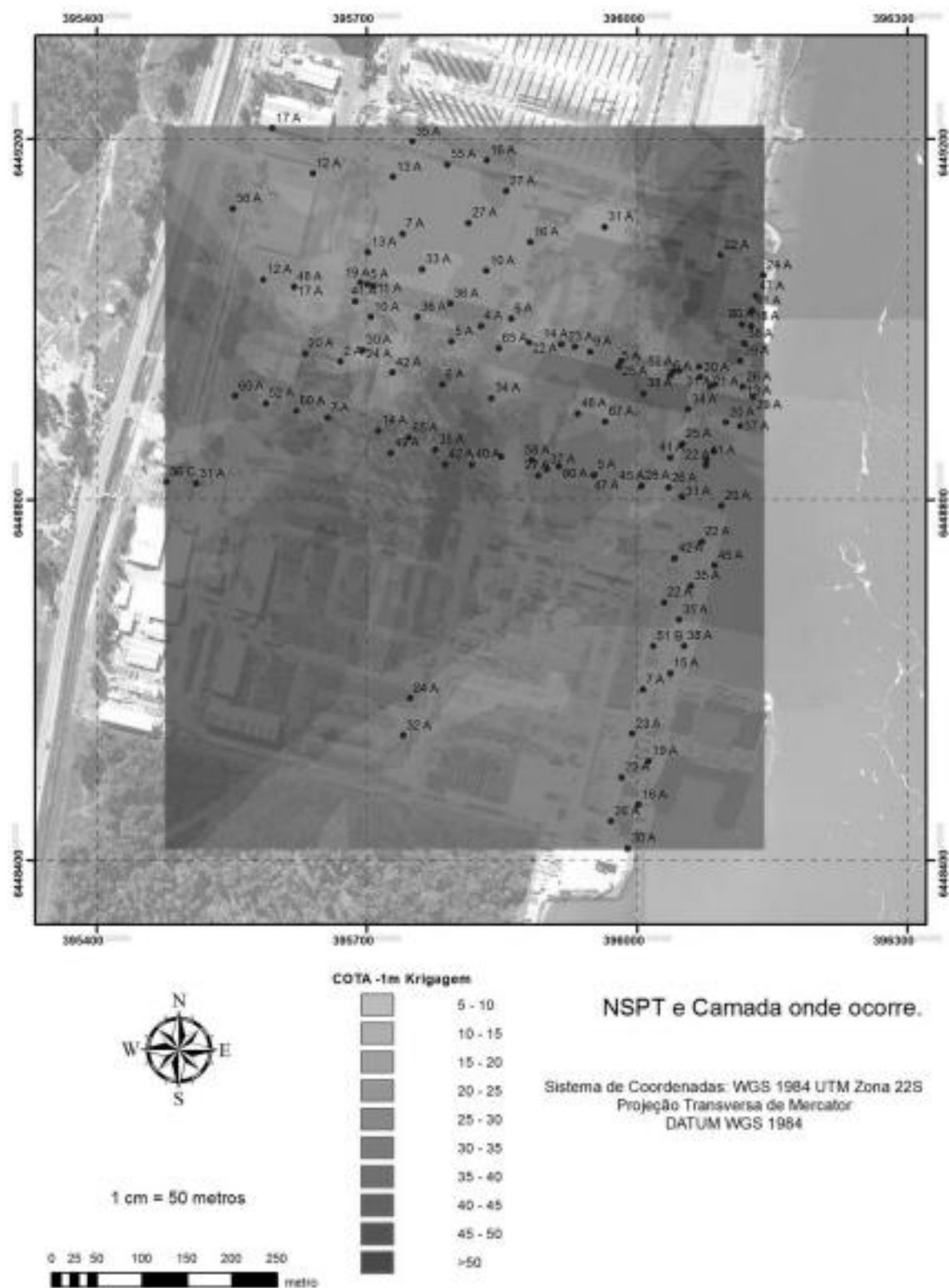


Figura A.0.60 - Distribuição do N_{527} na cota -1 m pelo método Krigagem.

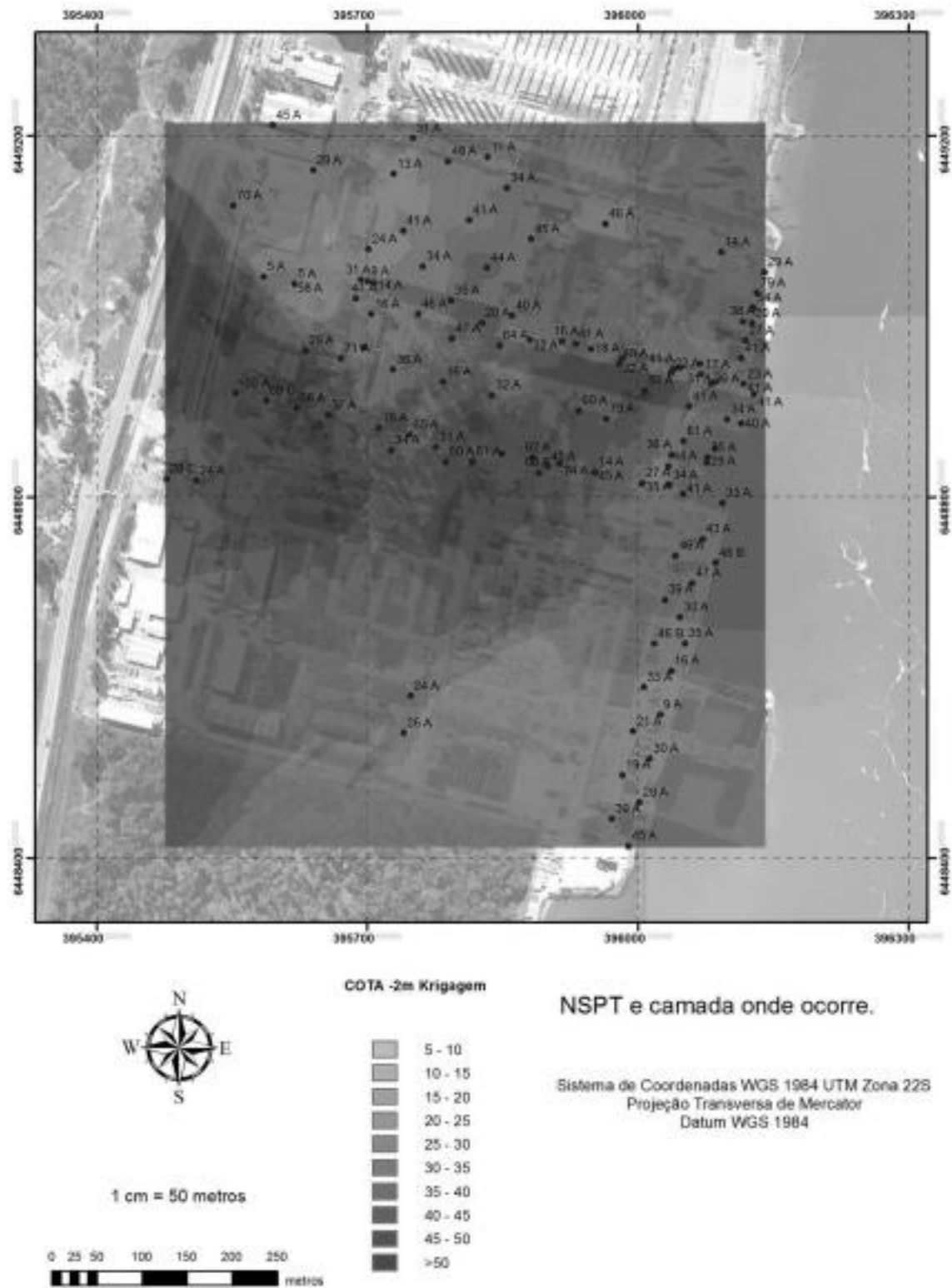


Figura A.0.61 - Distribuição do N_{crit} na cola -2 m pelo método Krigagem.

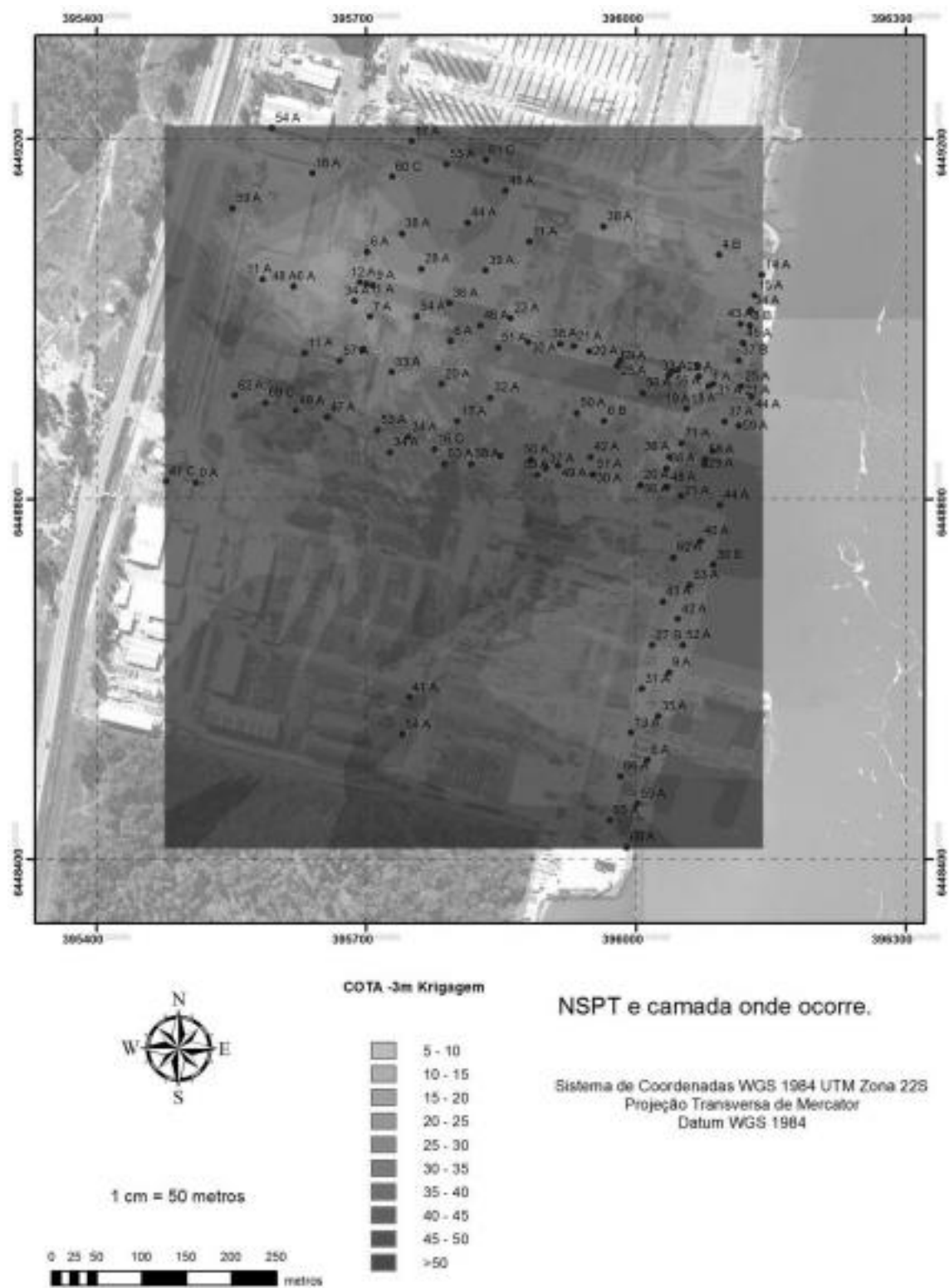


Figura A.0.62 - Distribuição do N_{spt} na cota -3 m pelo método Krigagem.

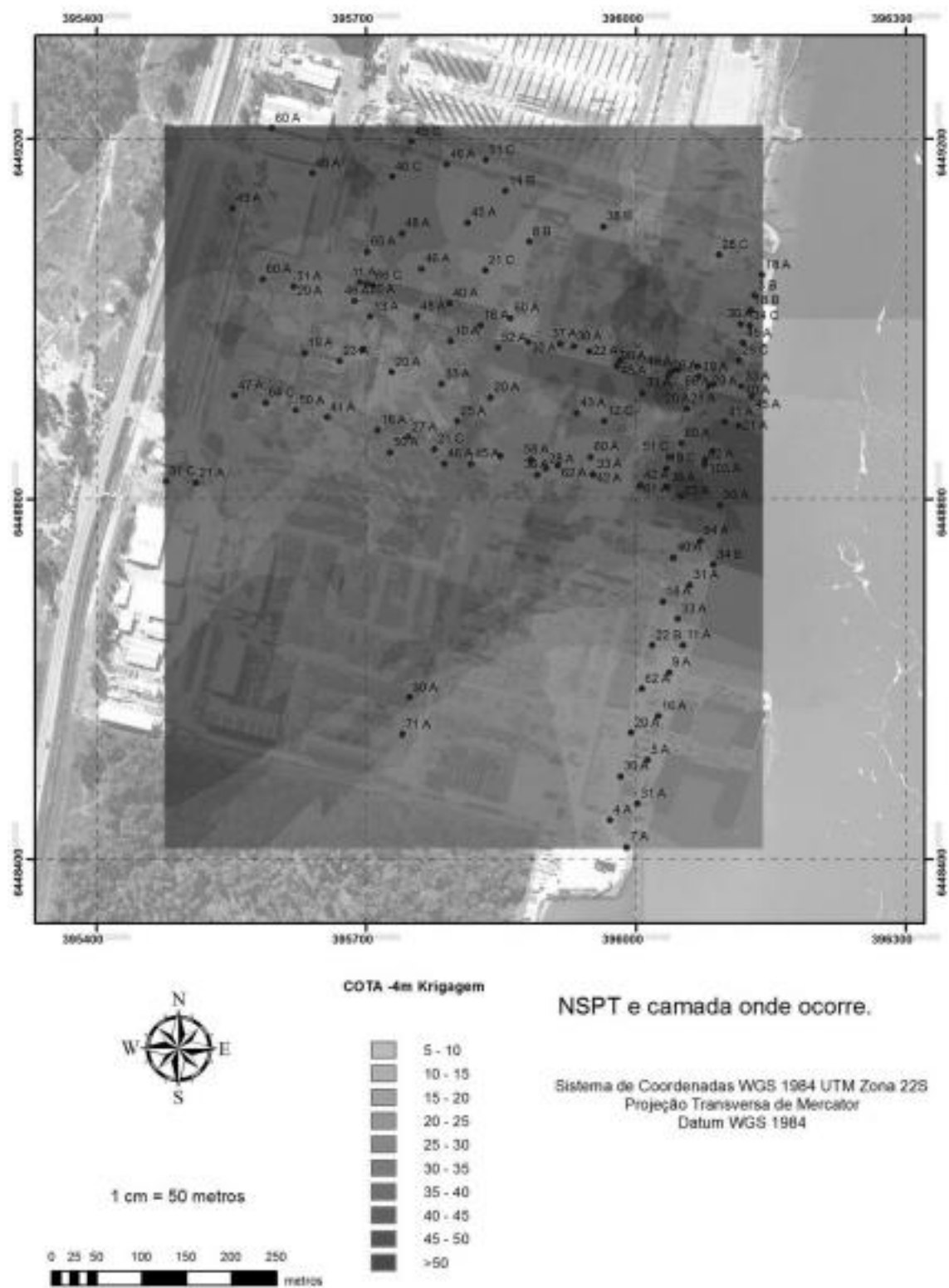


Figura A.0.63 - Distribuição do N_{spt} na cota -4 m pelo método Krigagem.

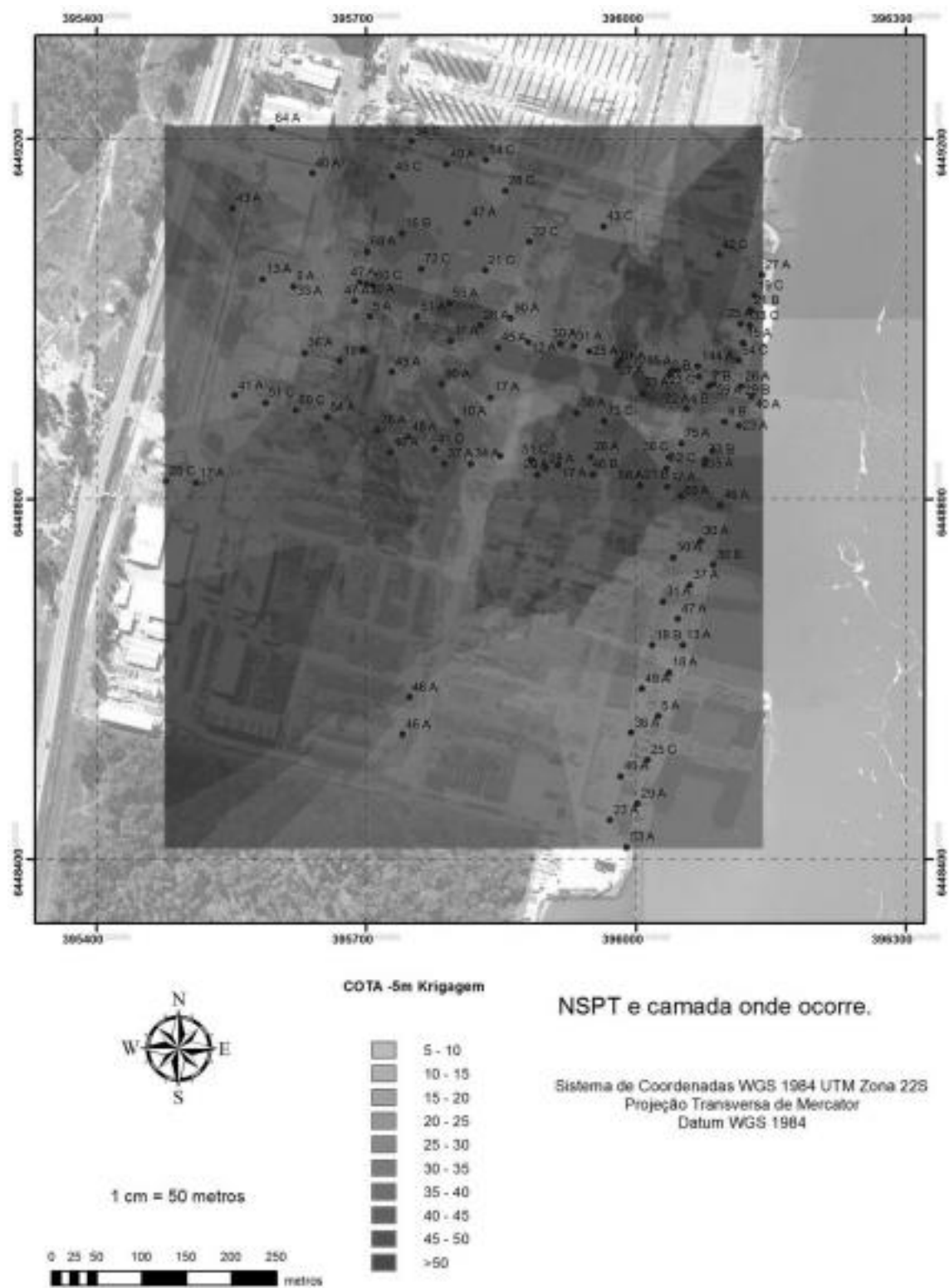


Figura A.0.64 - Distribuição do N_{spt} na cota -5 m pelo método Krigagem.

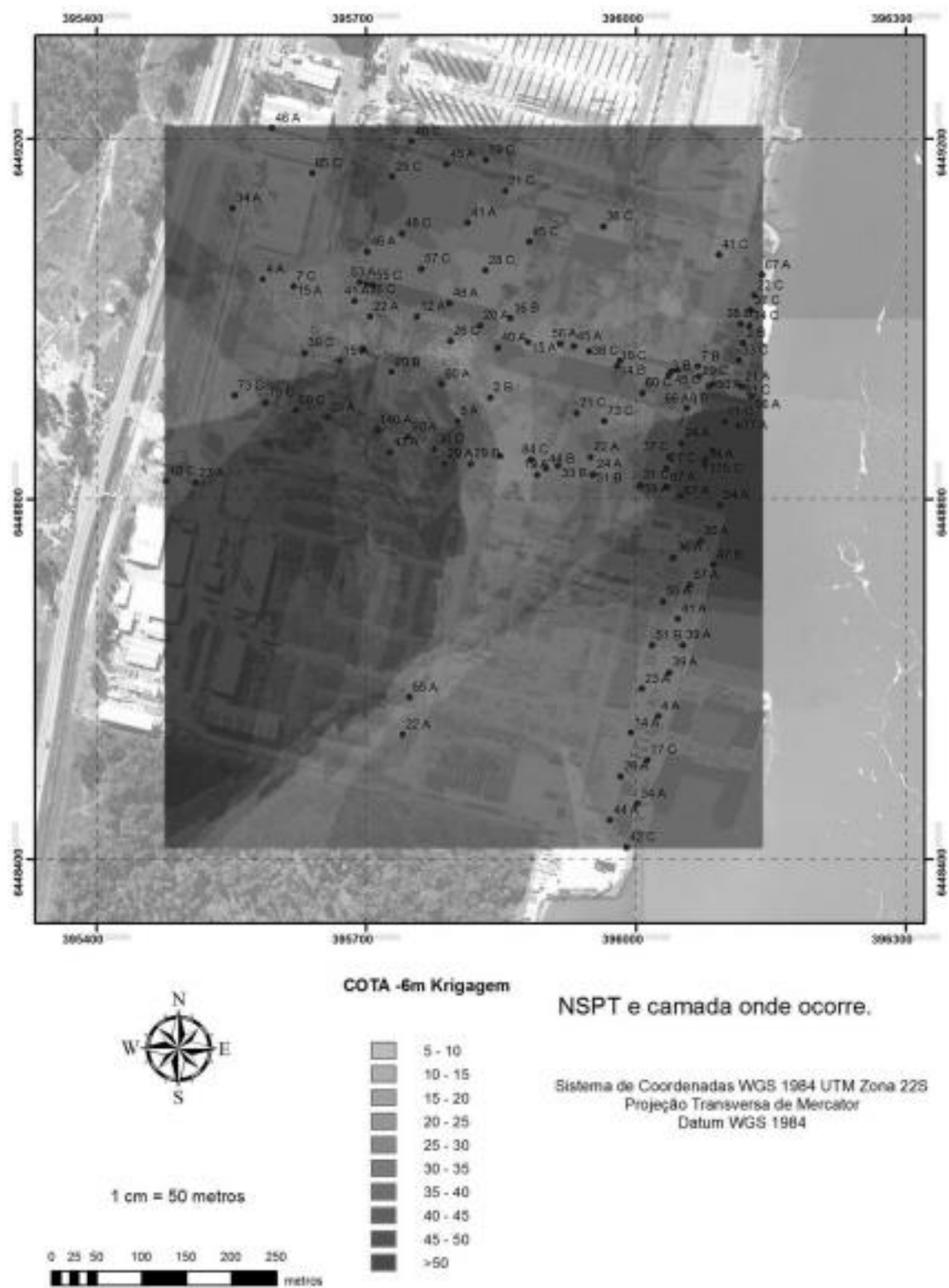


Figura A.0.65 - Distribuição do NSPT na cota -6 m pelo método Krigagem.

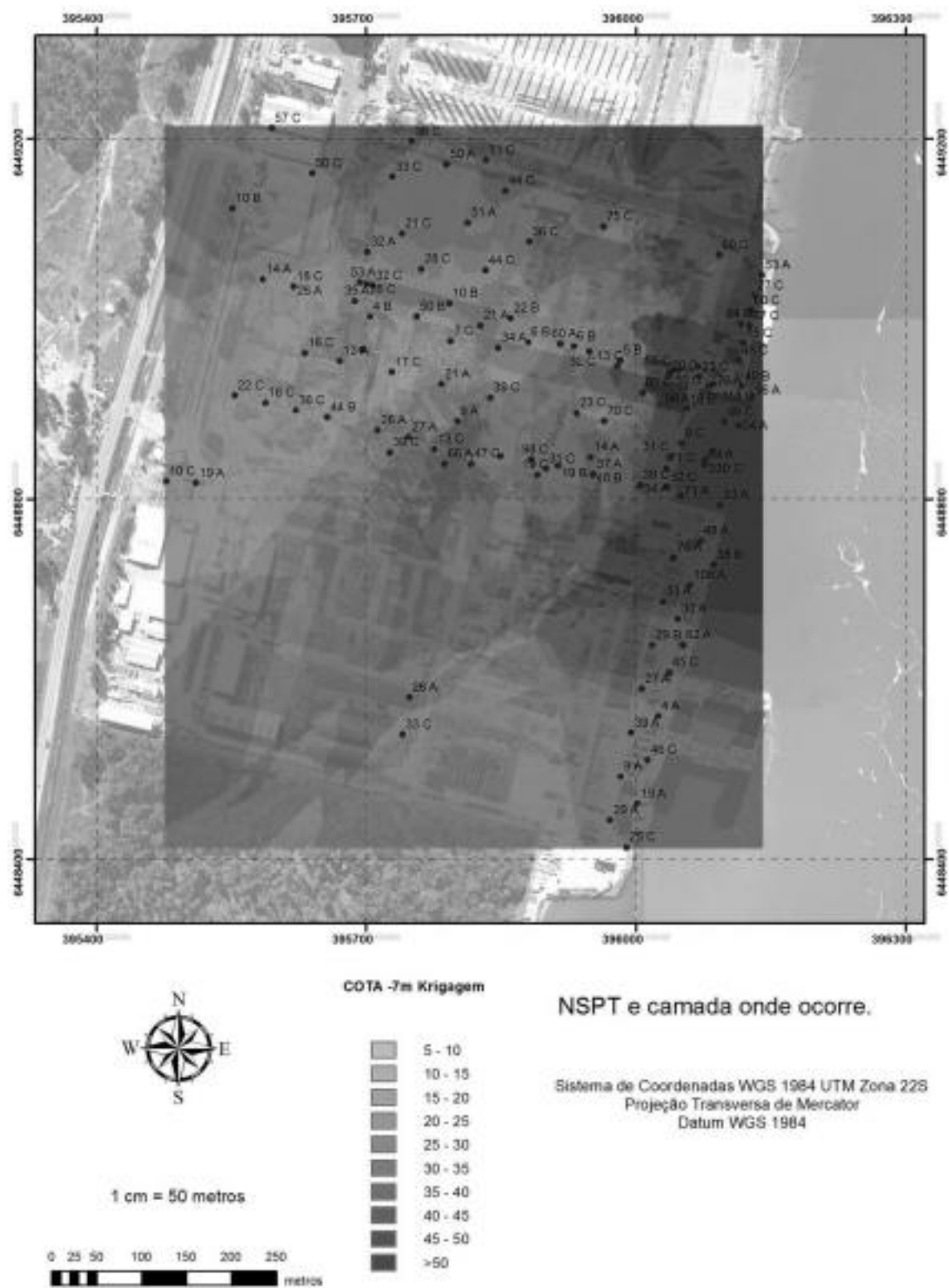


Figura A.0.66 - Distribuição do N_{spt} na cota -7 m pelo método Krigagem.

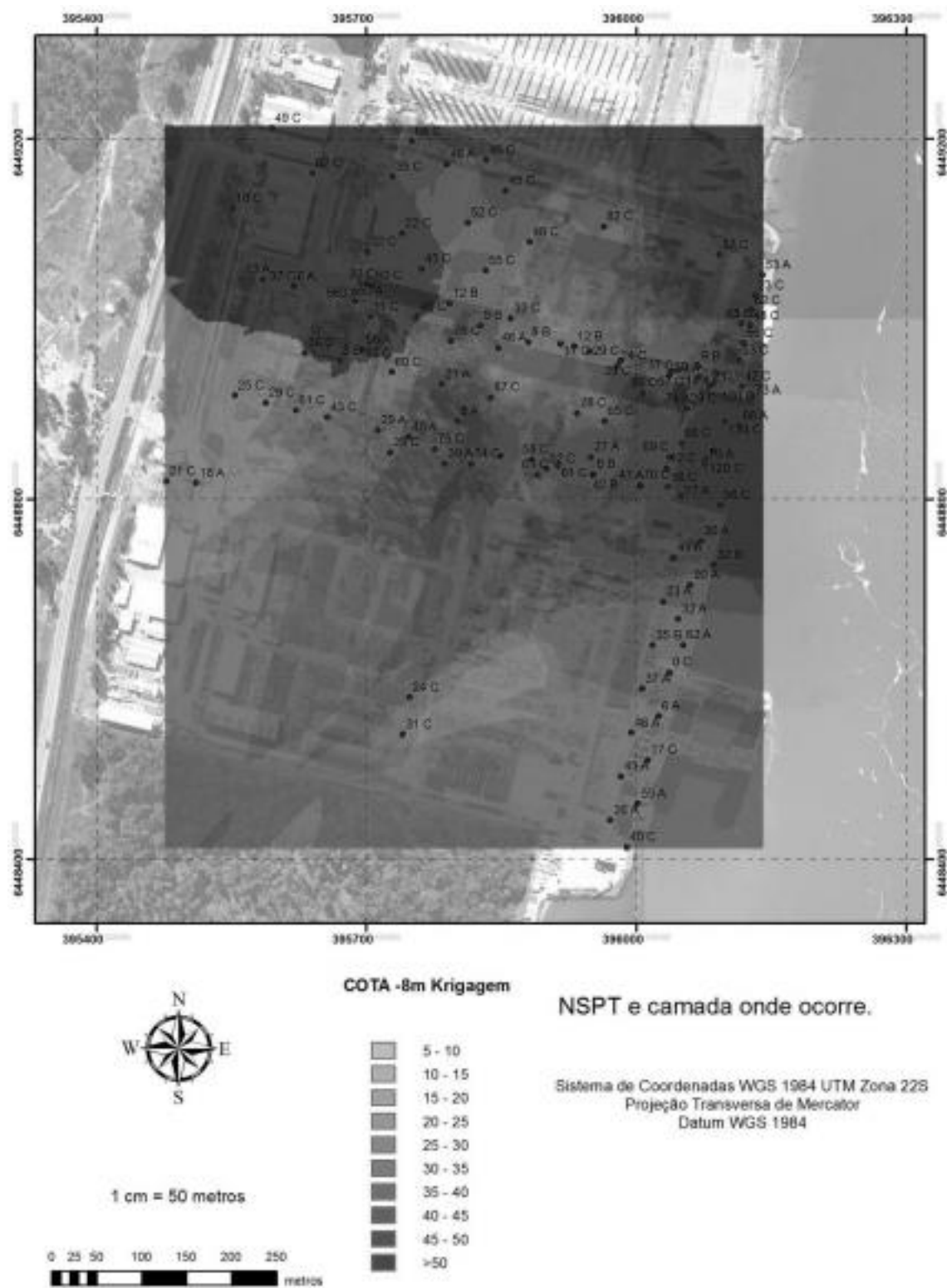


Figura A.0.67 - Distribuição do NSPT na cota -8 m pelo método Krigagem.

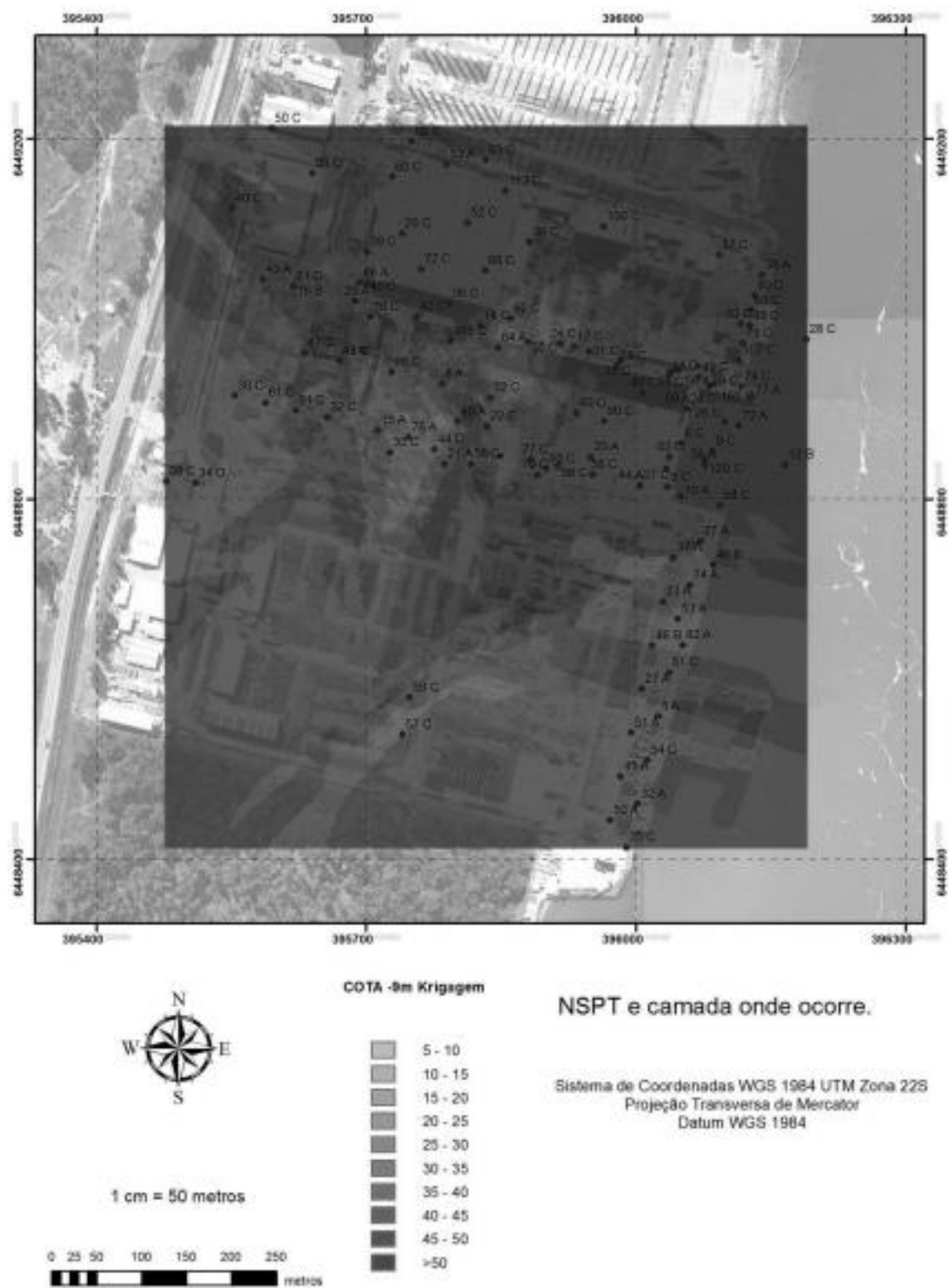


Figura A.0.68 - Distribuição do N_{spt} na cota -9 m pelo método Krigagem.

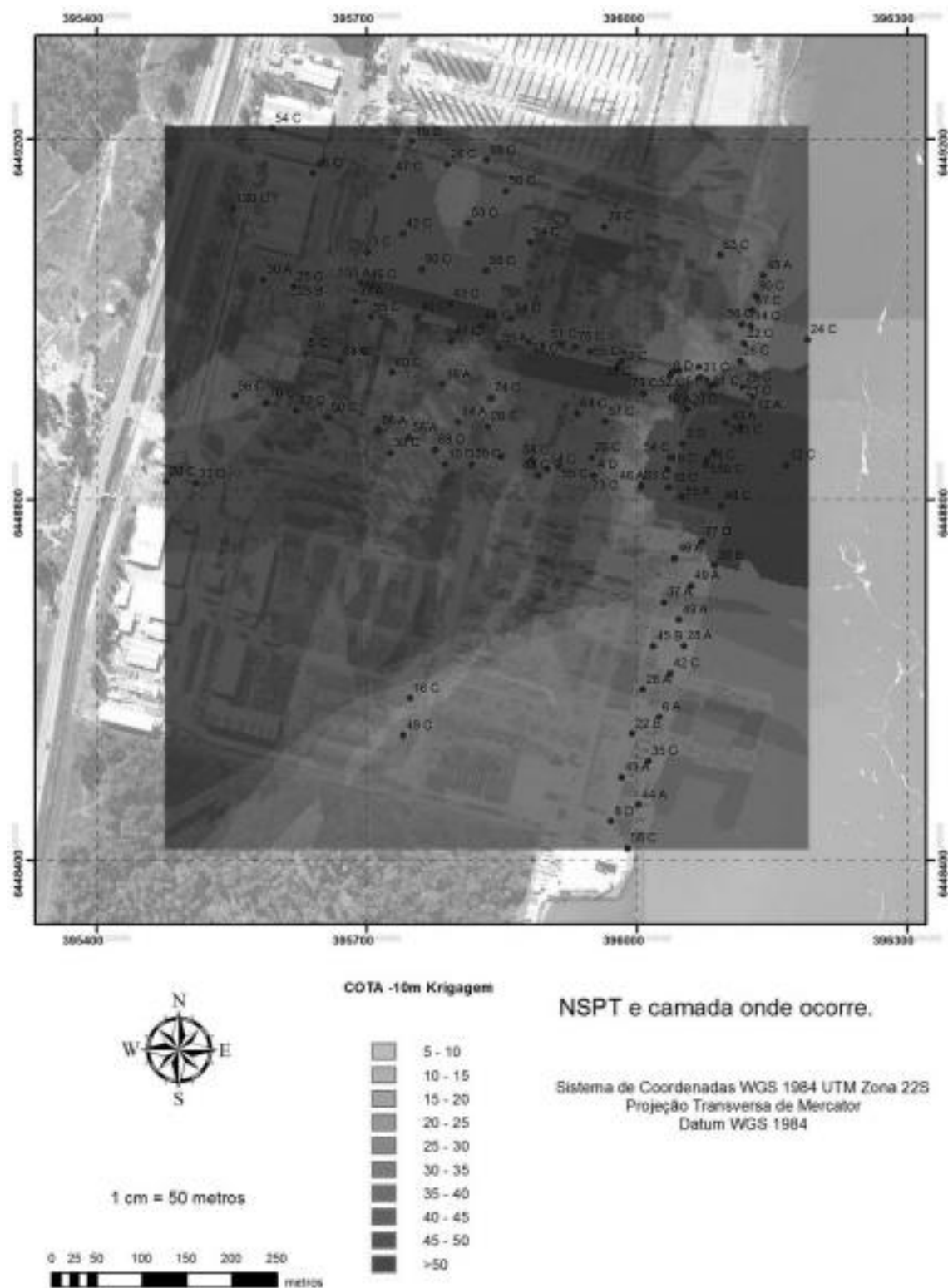


Figura A.0.69 - Distribuição do N_{SPT} na cota -10 m pelo método Krigagem.

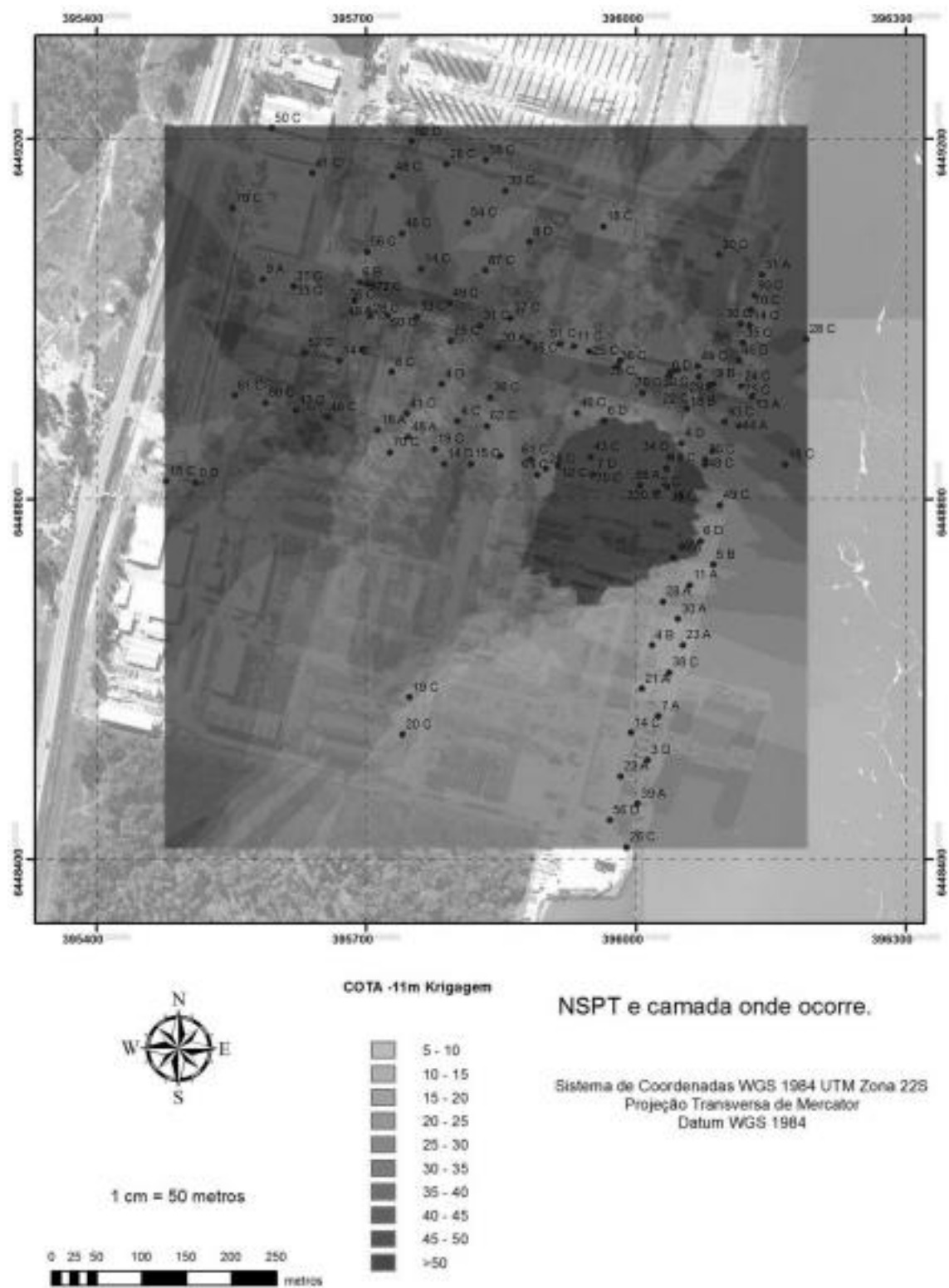


Figura A.0.70 - Distribuição do N_{SFF} na cota -11 m pelo método Krigagem.

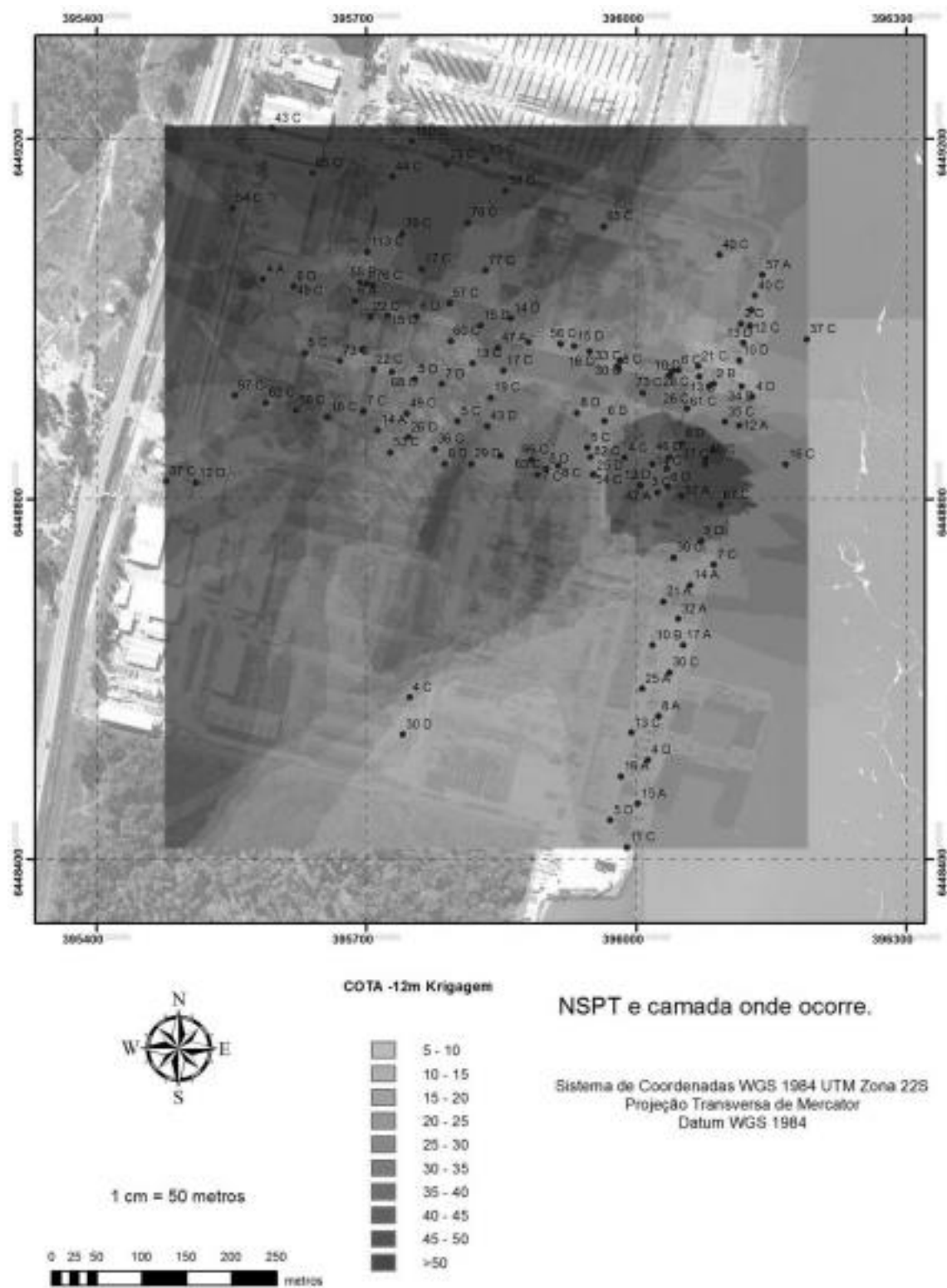


Figura A.0.71 - Distribuição do NSPT na cota -12 m pelo método Krigagem.

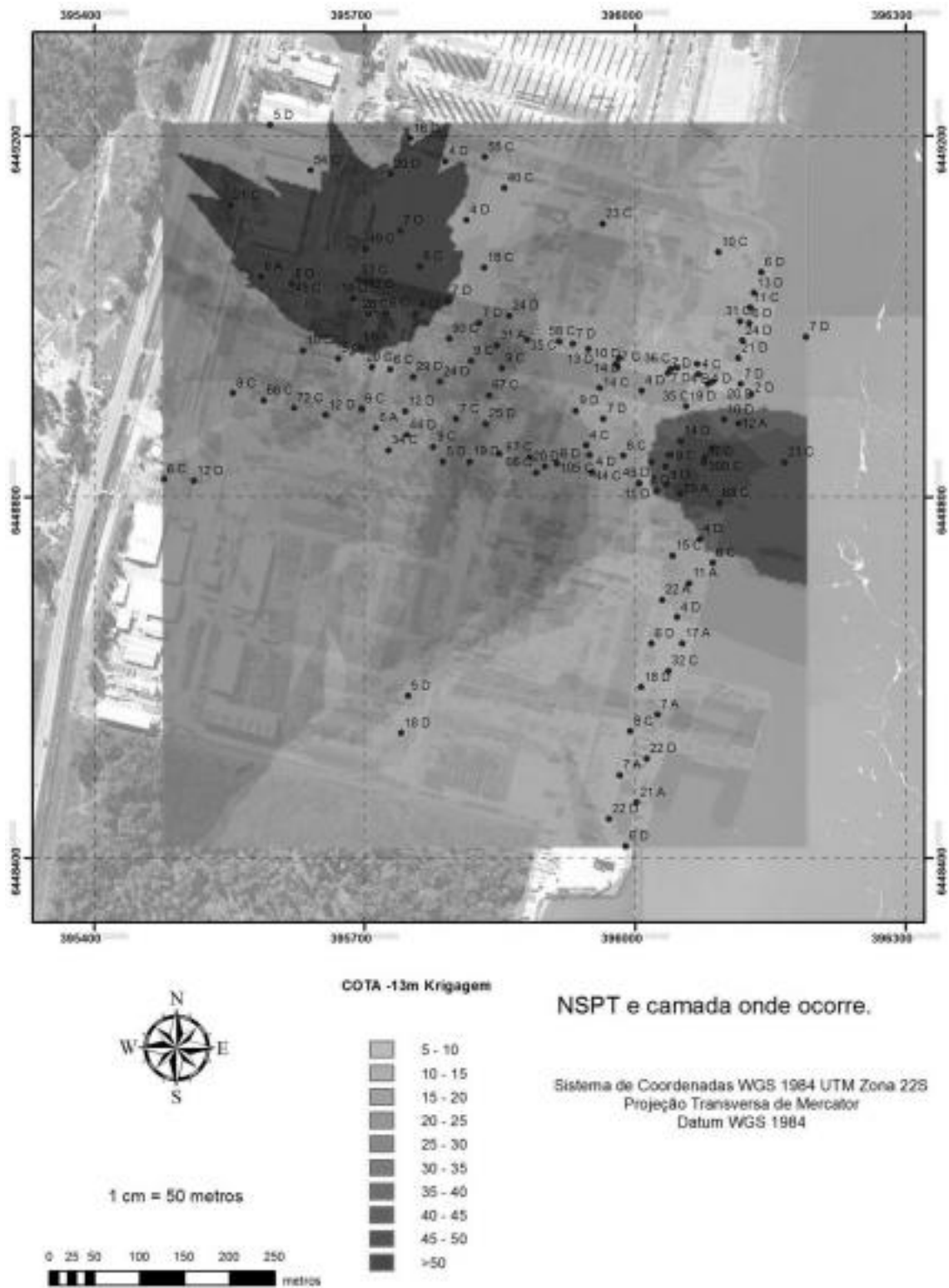


Figura A.0.72 - Distribuição do N_{SFH} na cota -13 m pelo método Krigagem.

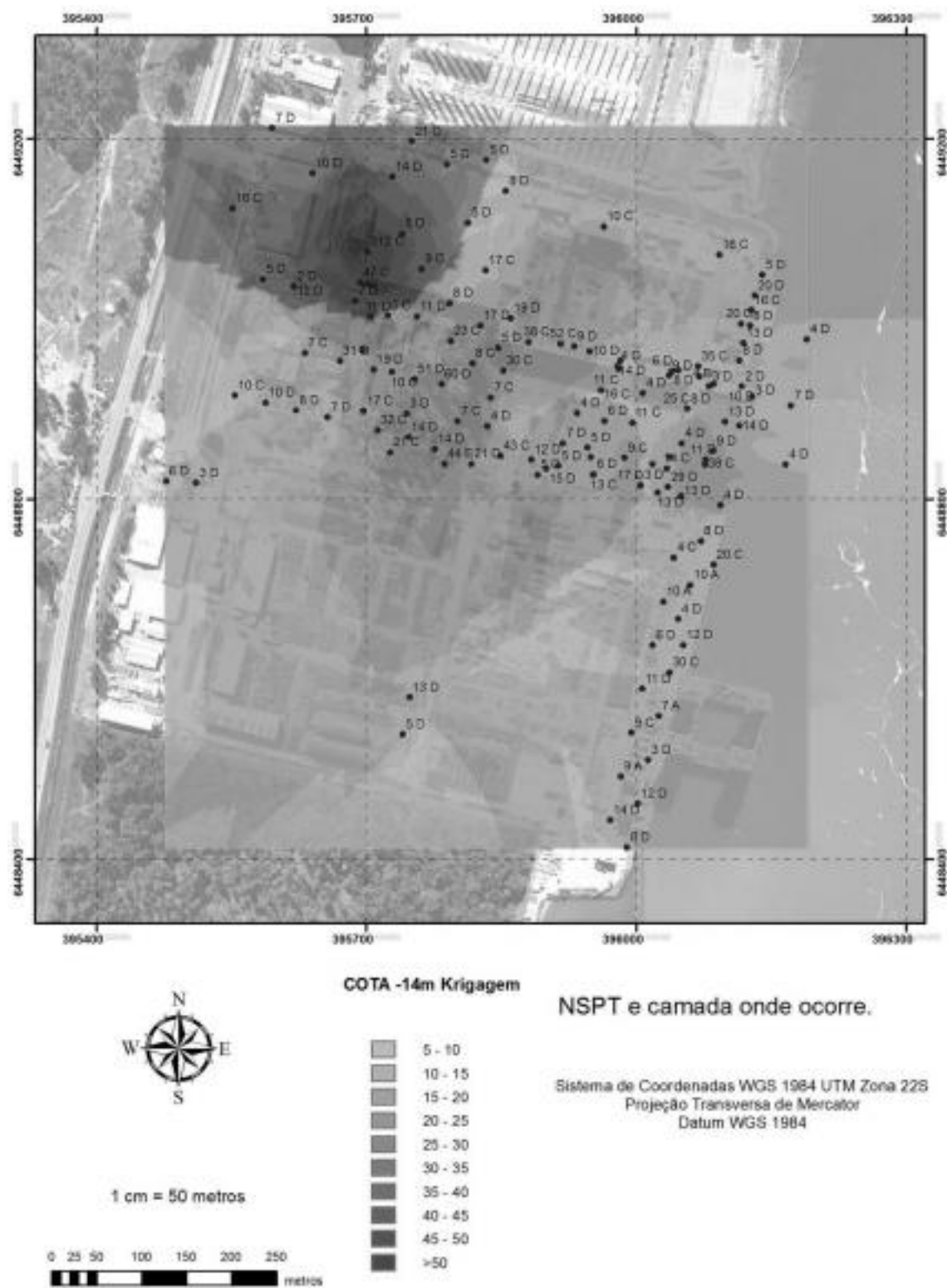


Figura A.0.13 - Distribuição do N_{SPT} na cota -14 m pelo método Krigagem.

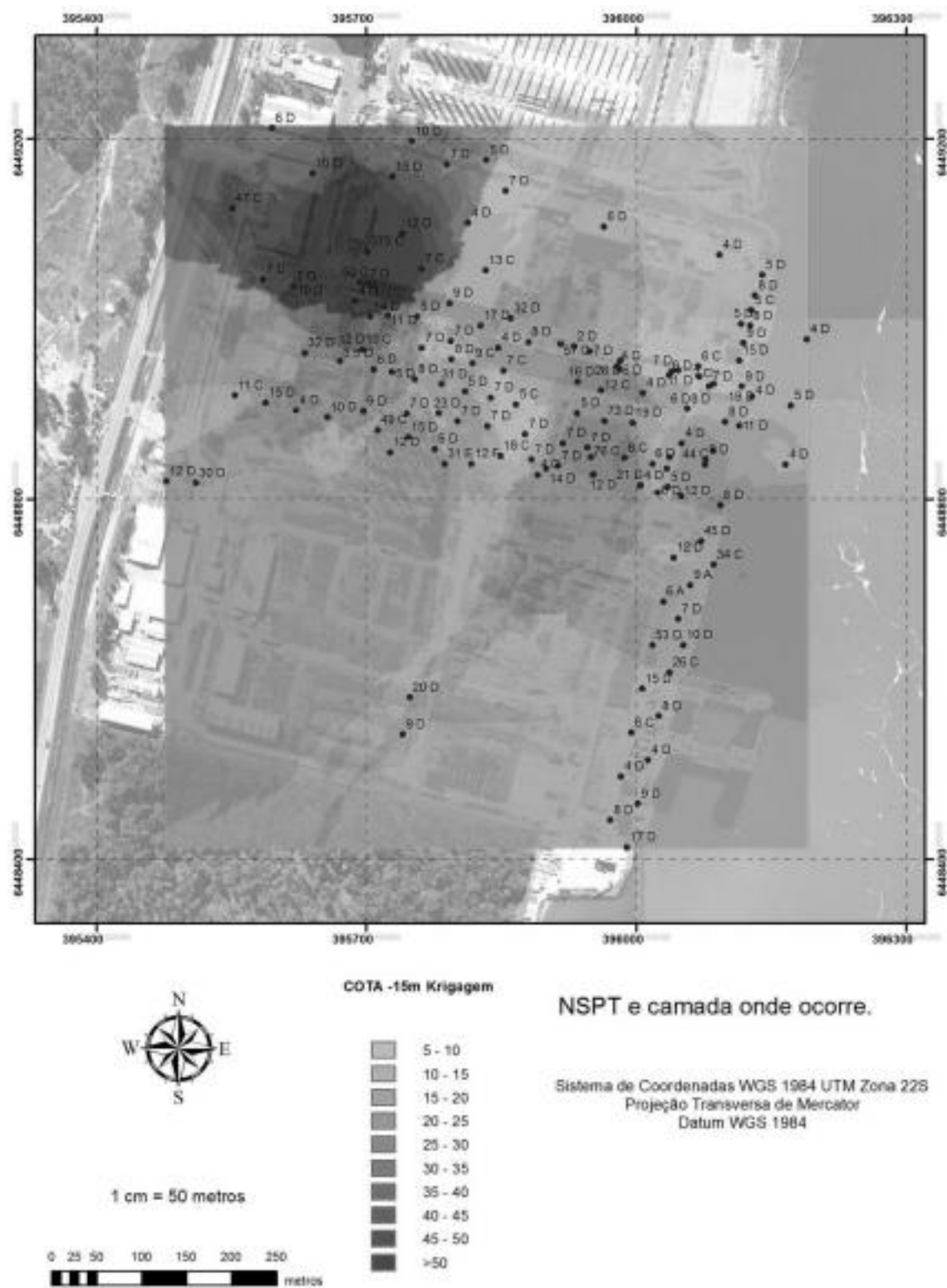


Figura A.0.74 - Distribuição do N_{SPT} na cota -15 m pelo método Krigagem.

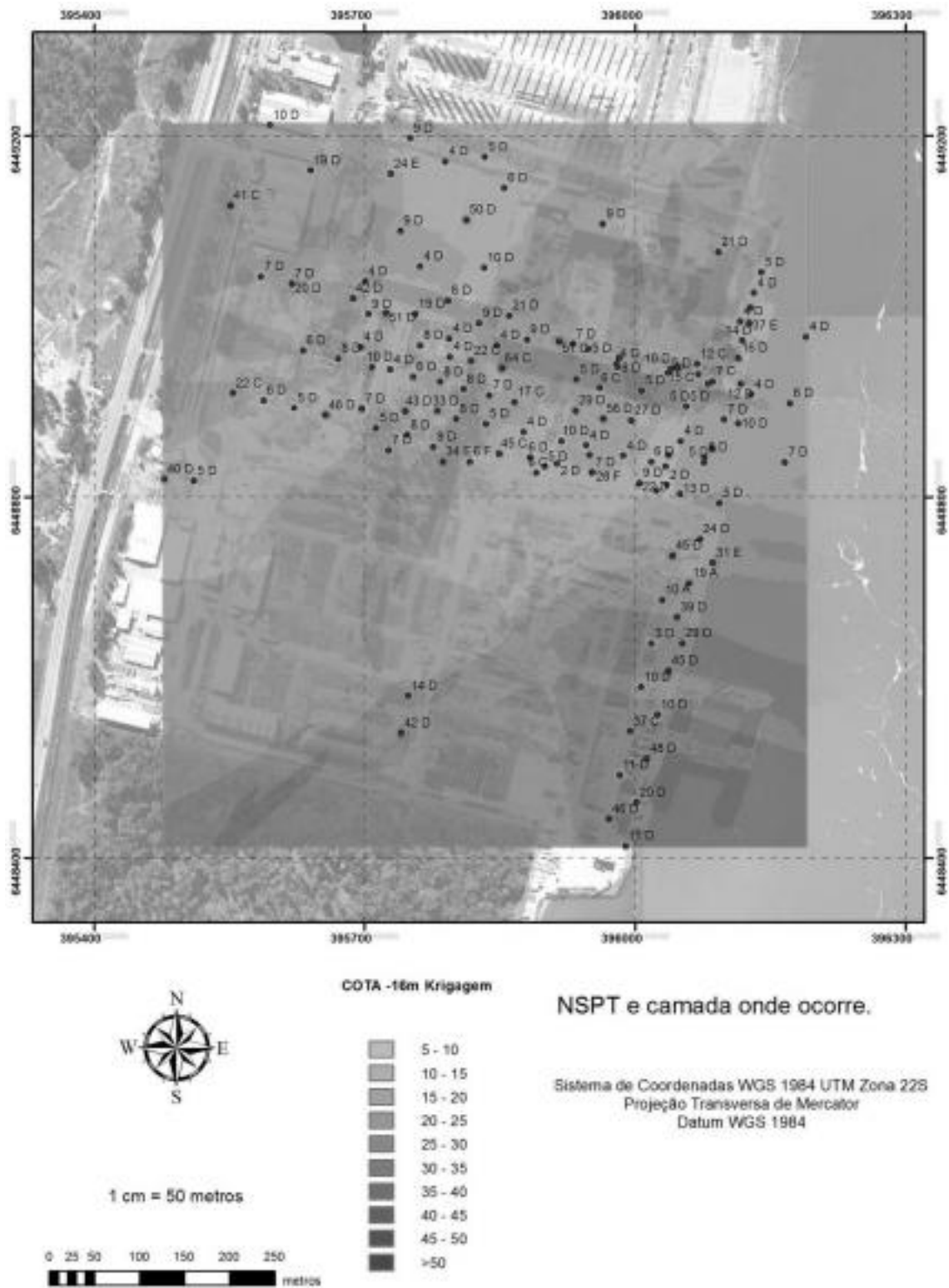


Figura A.0.75 - Distribuição do N_{SFF} na cota -16 m pelo método Krigagem.

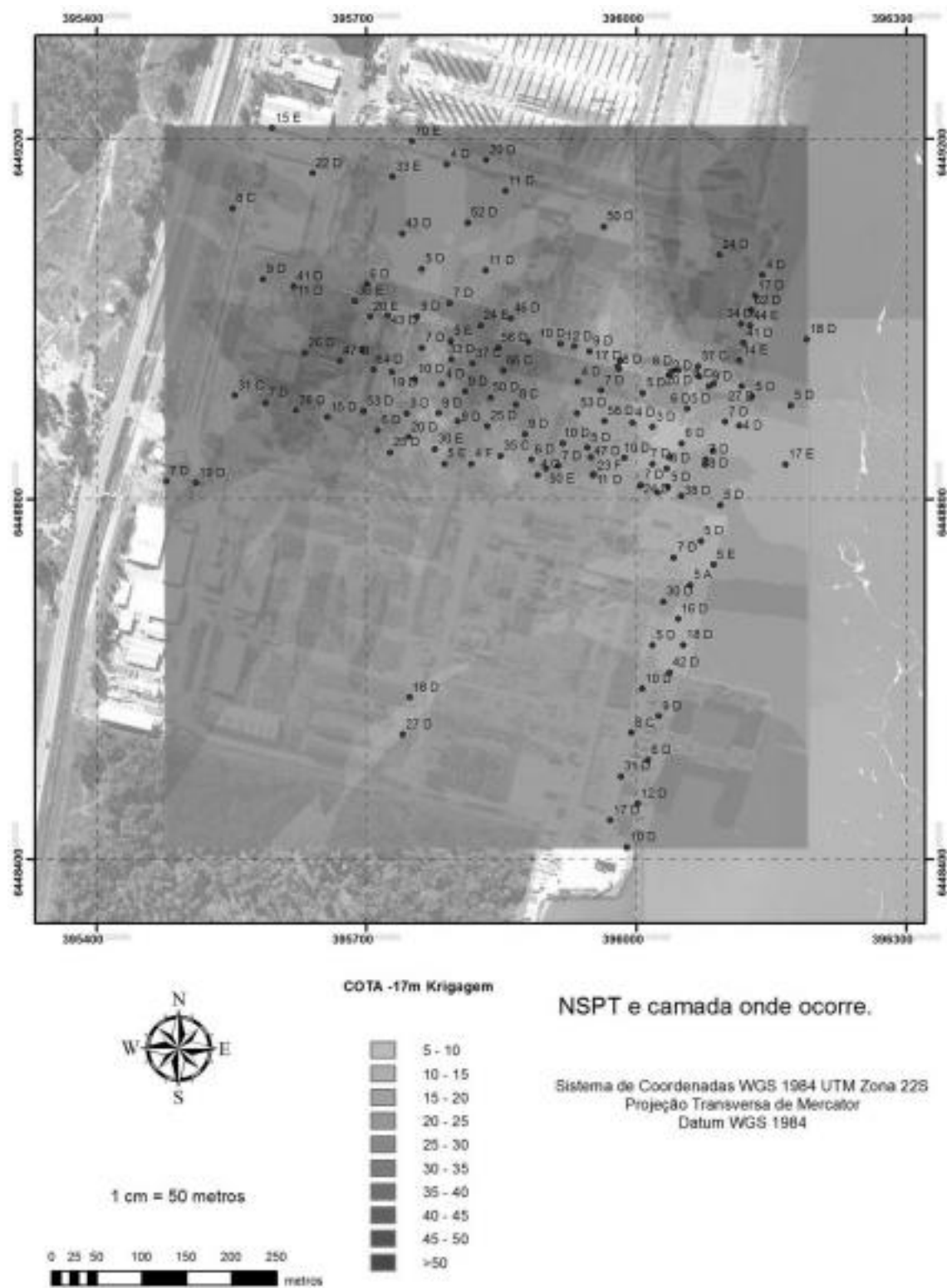


Figura A.0.76 - Distribuição do NSPT na cota -17 m pelo método Krigagem.

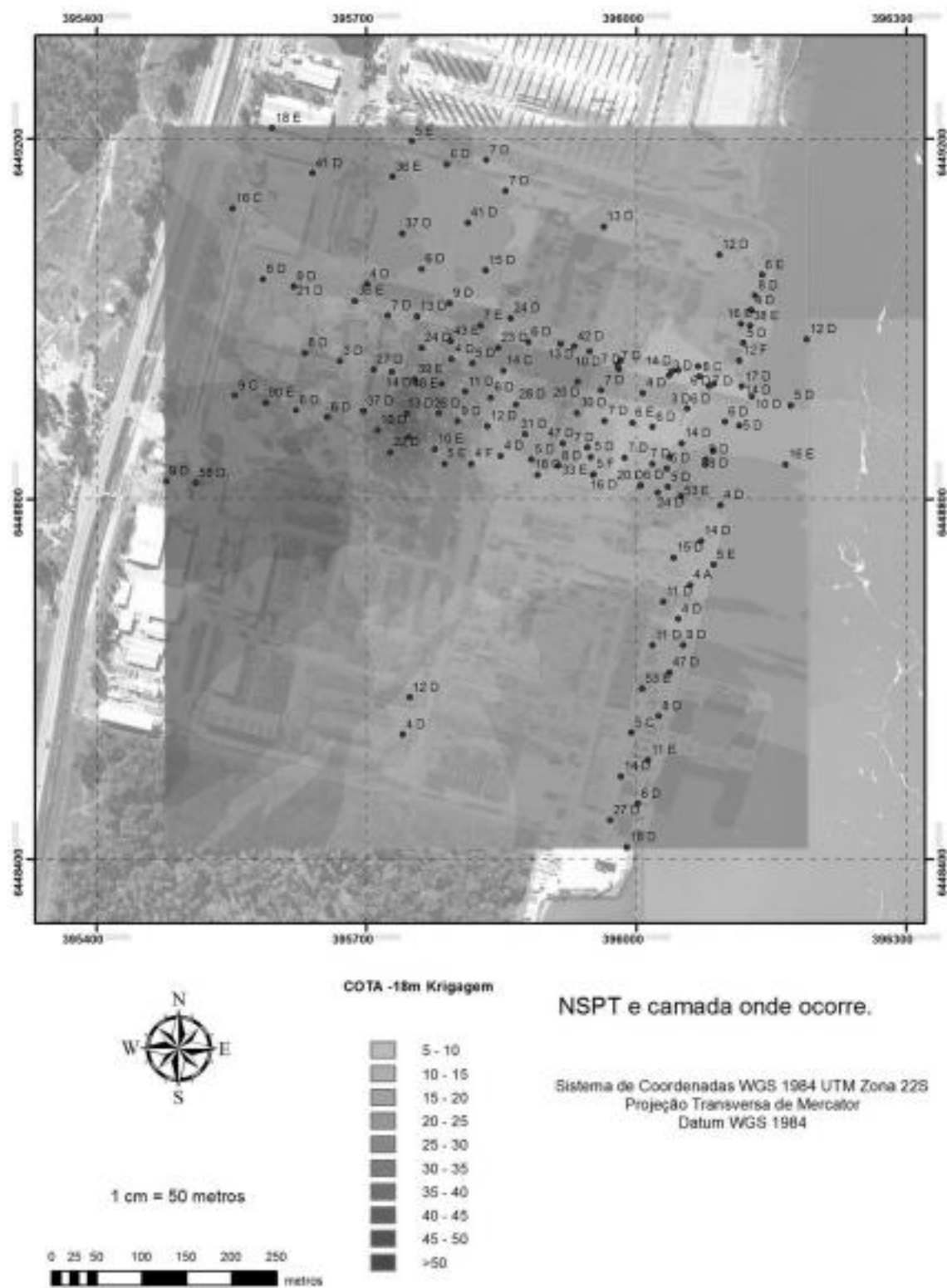


Figura A.0.77 - Distribuição do N_{SPT} na cota -18 m pelo método Krigagem.

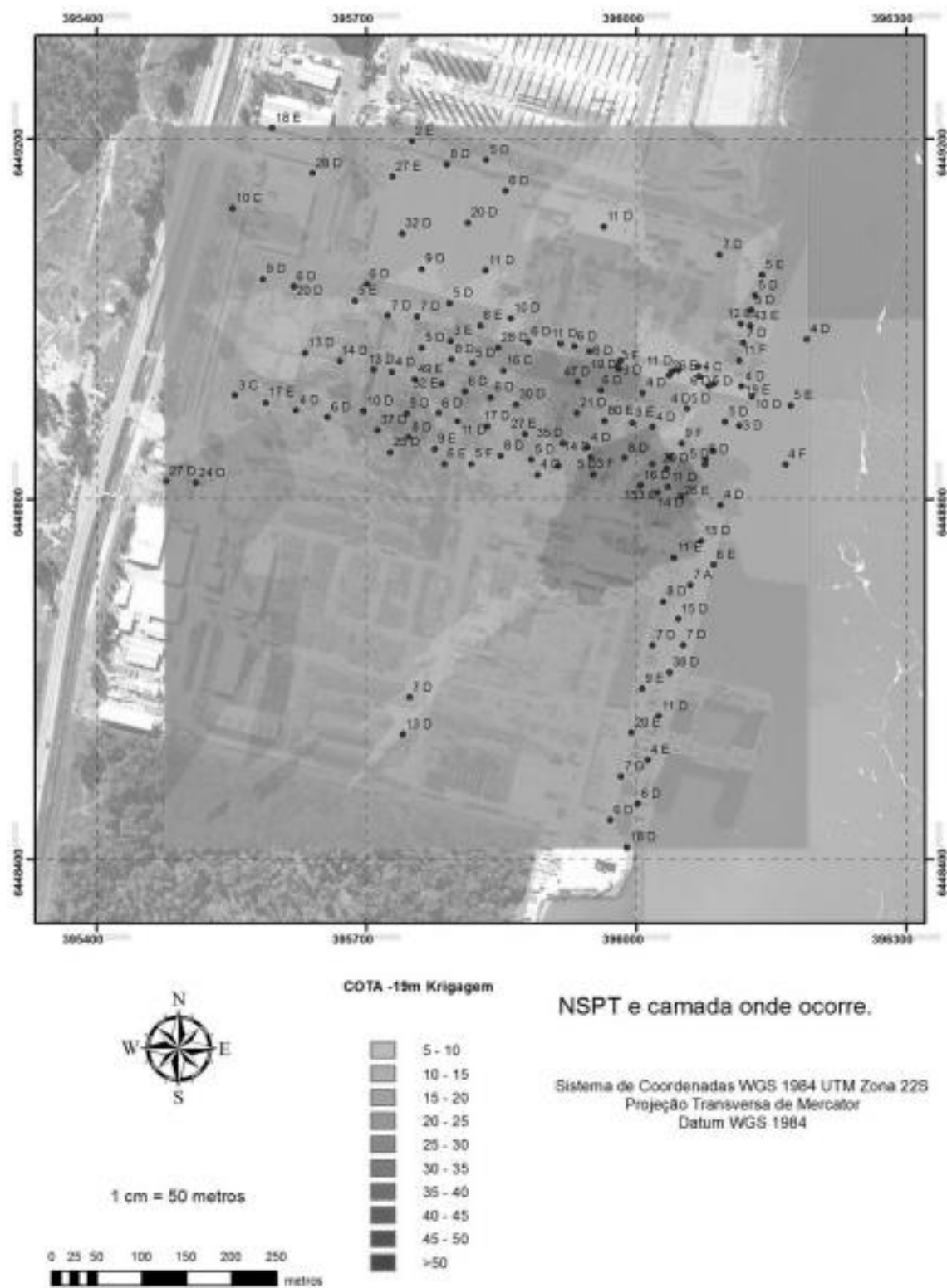


Figura A.0.78 - Distribuição do N_{SPT} na cota -19 m pelo método Krigagem.

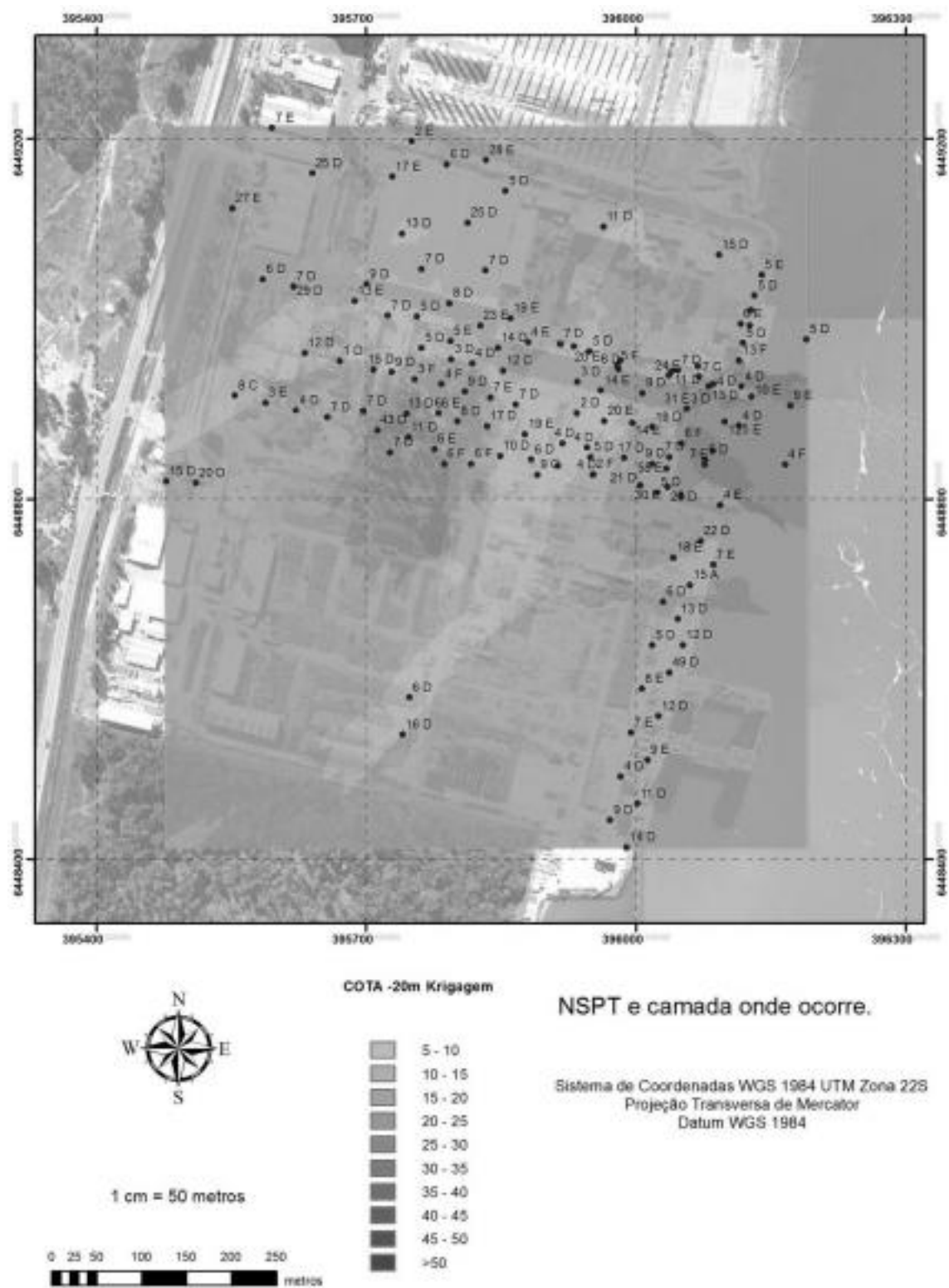


Figura A.0.79 - Distribuição do N_{SPT} na cota -20 m pelo método Krigagem.

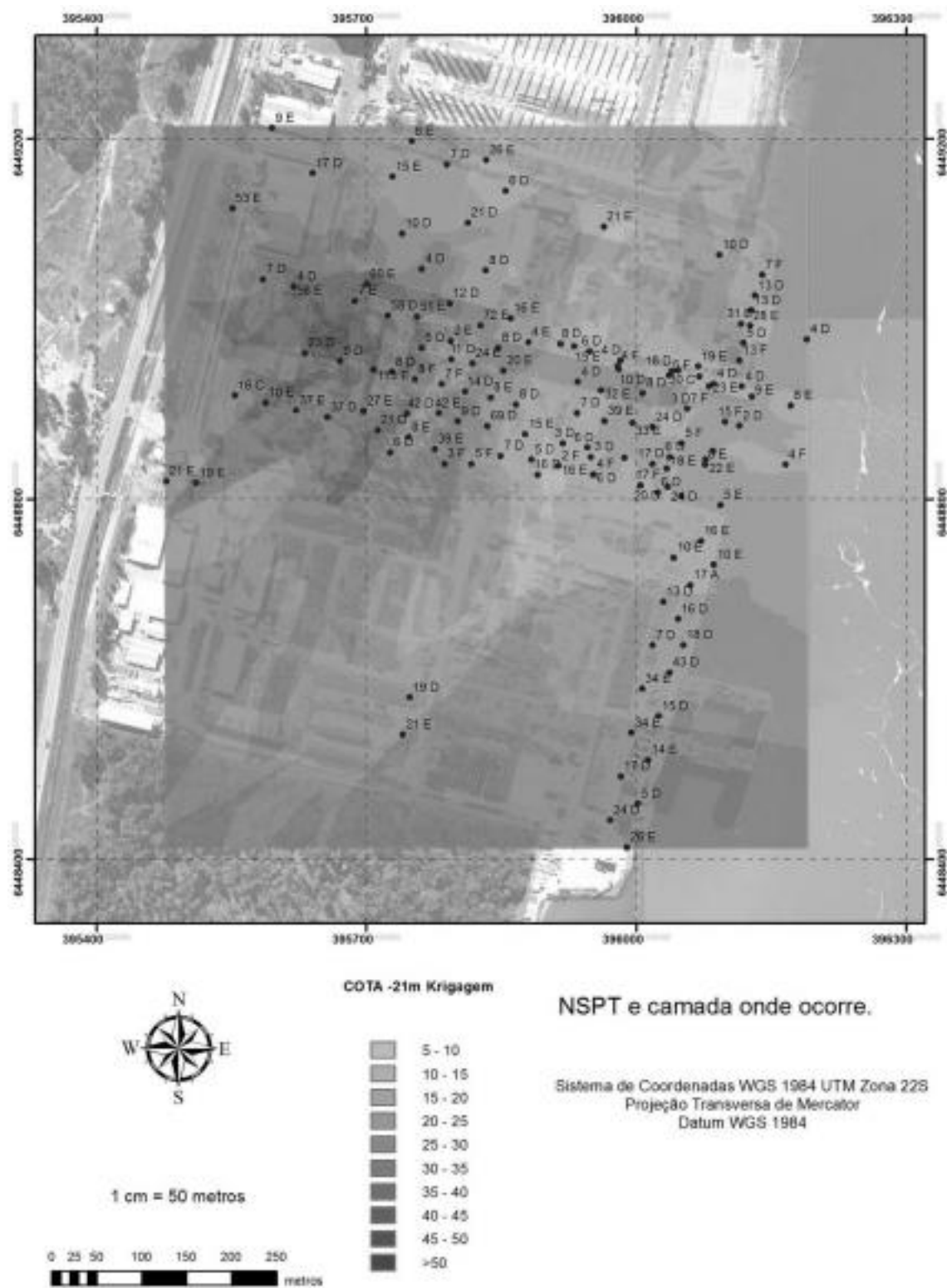


Figura A.0.80 - Distribuição do N_{SPT} na cota -21 m pelo método Krigagem.

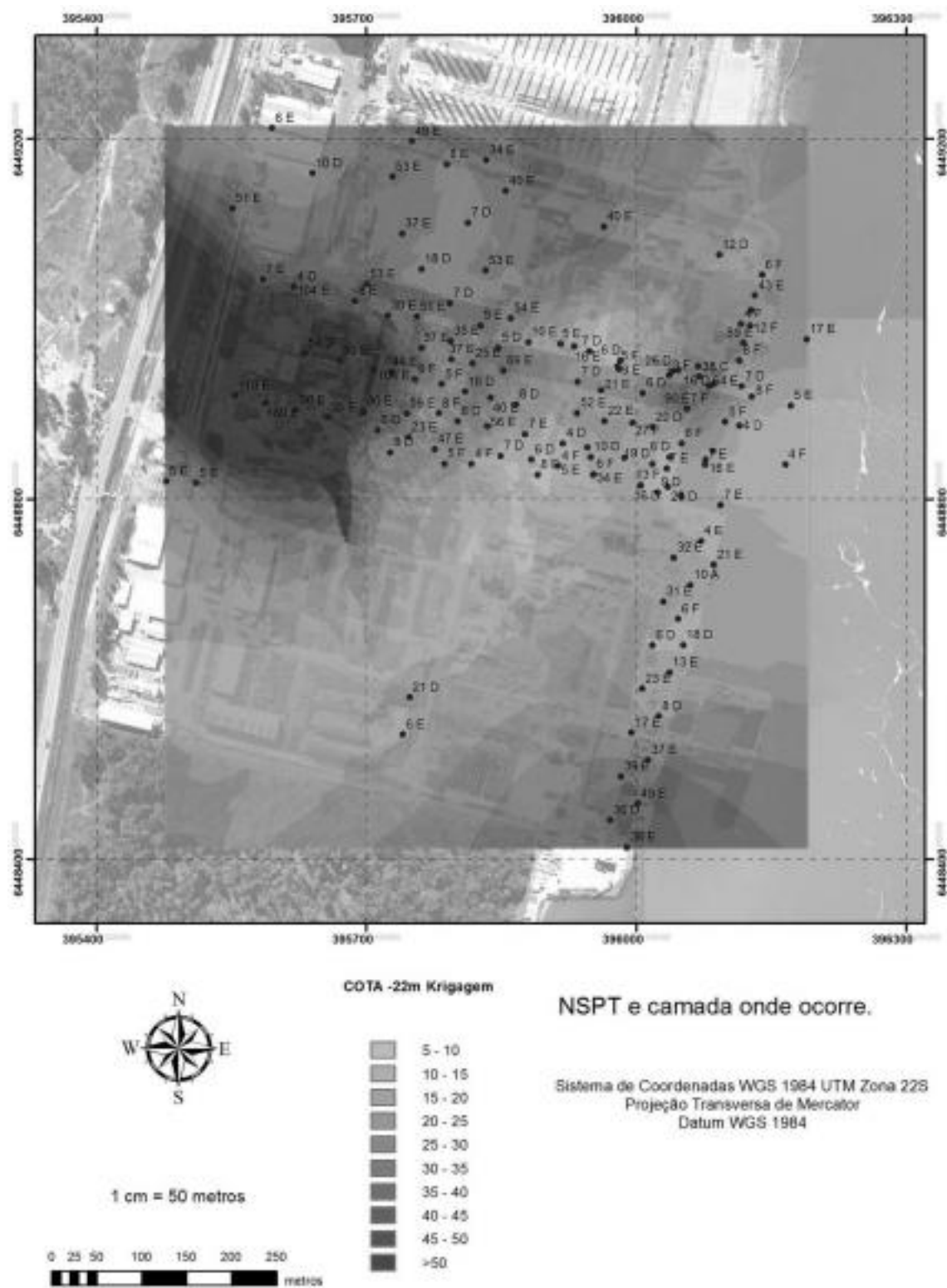


Figura A.0.81 - Distribuição do N_{SPT} na cota -22 m pelo método Krigagem.

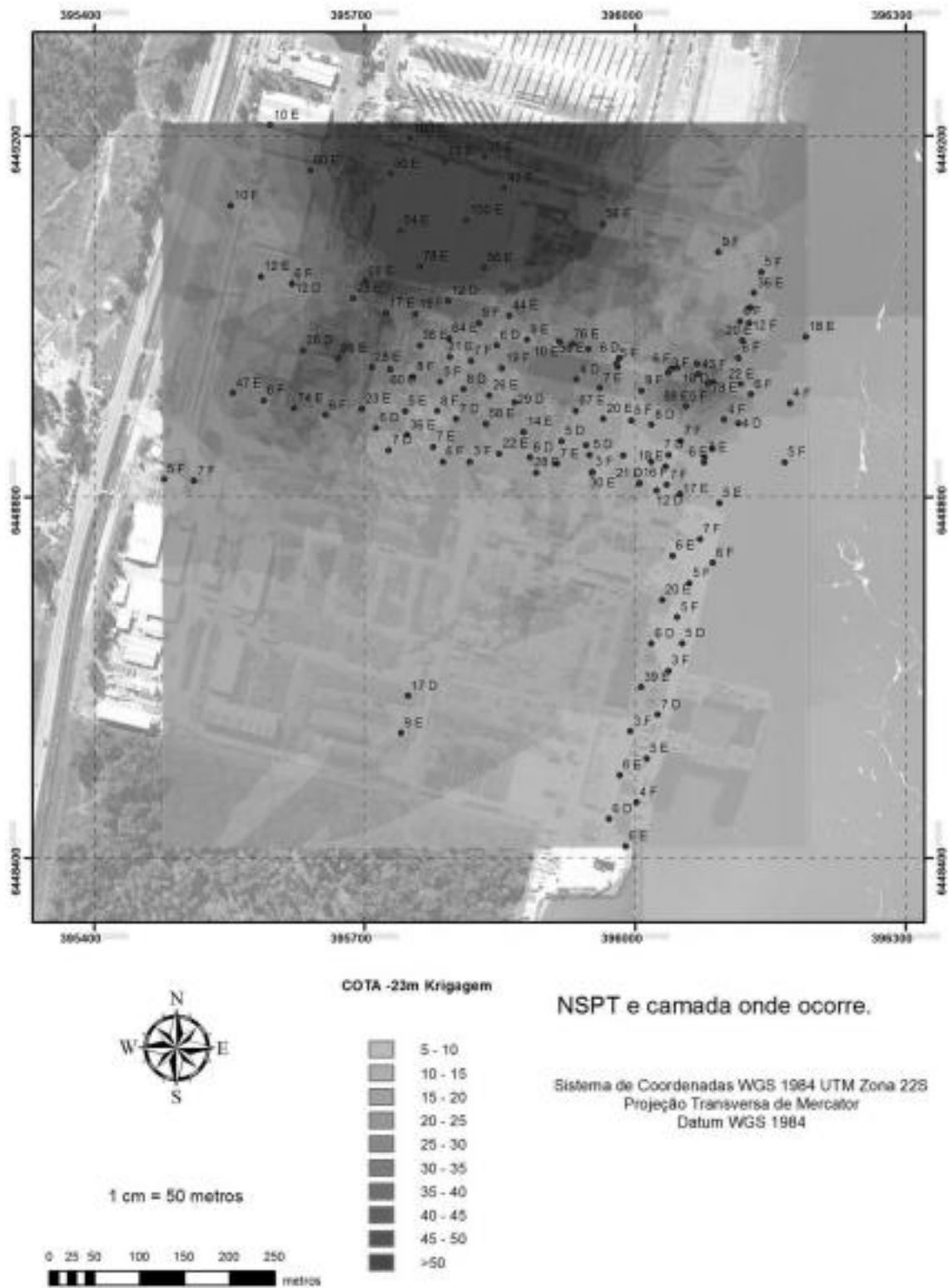


Figure A.0.82 - Distribuição do N_{SFF} na cota -23 m pelo método Krigagem.

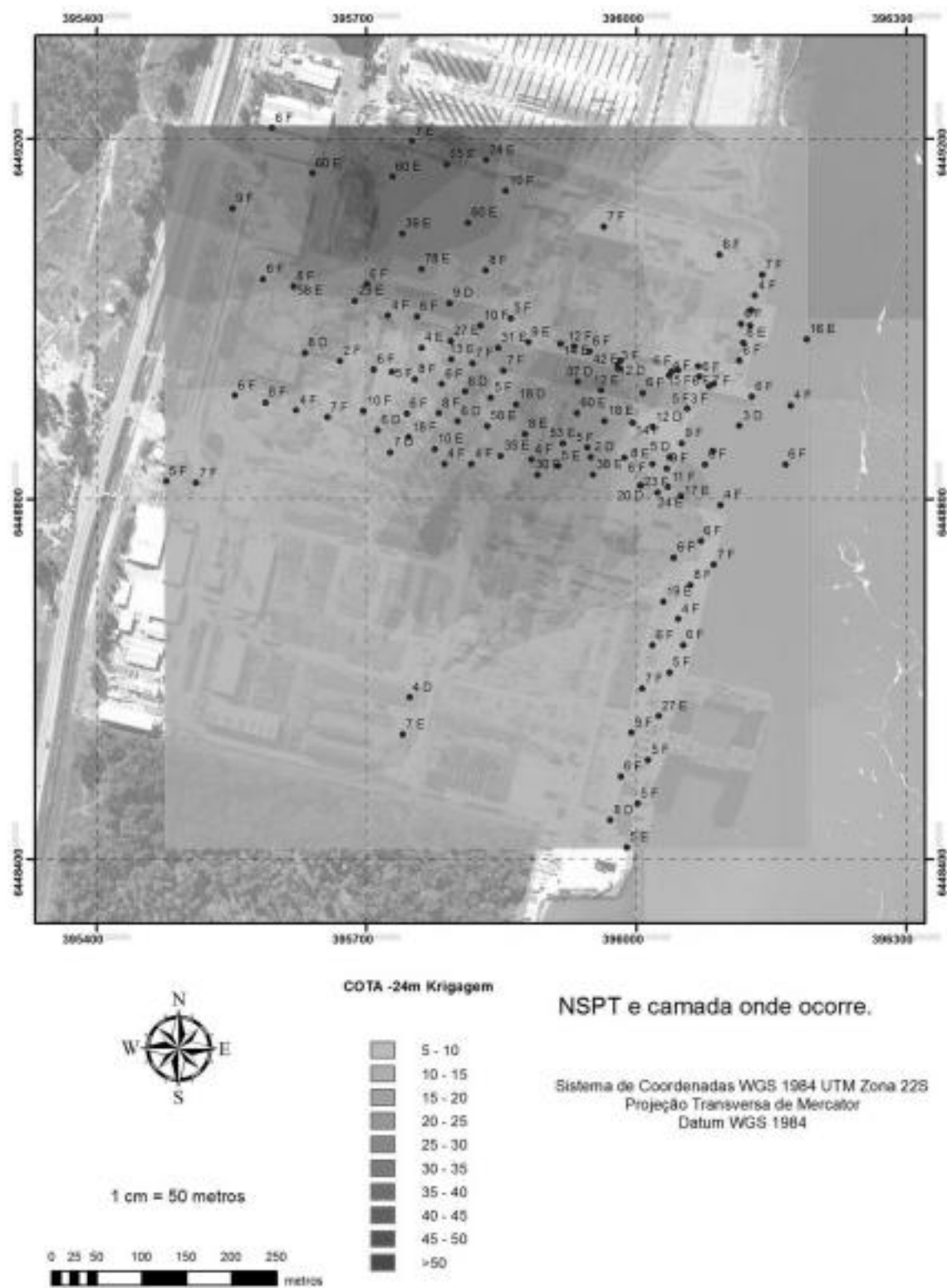


Figura A.0.83 - Distribuição do N_{SPT} na cota -24 m pelo método Krigagem.

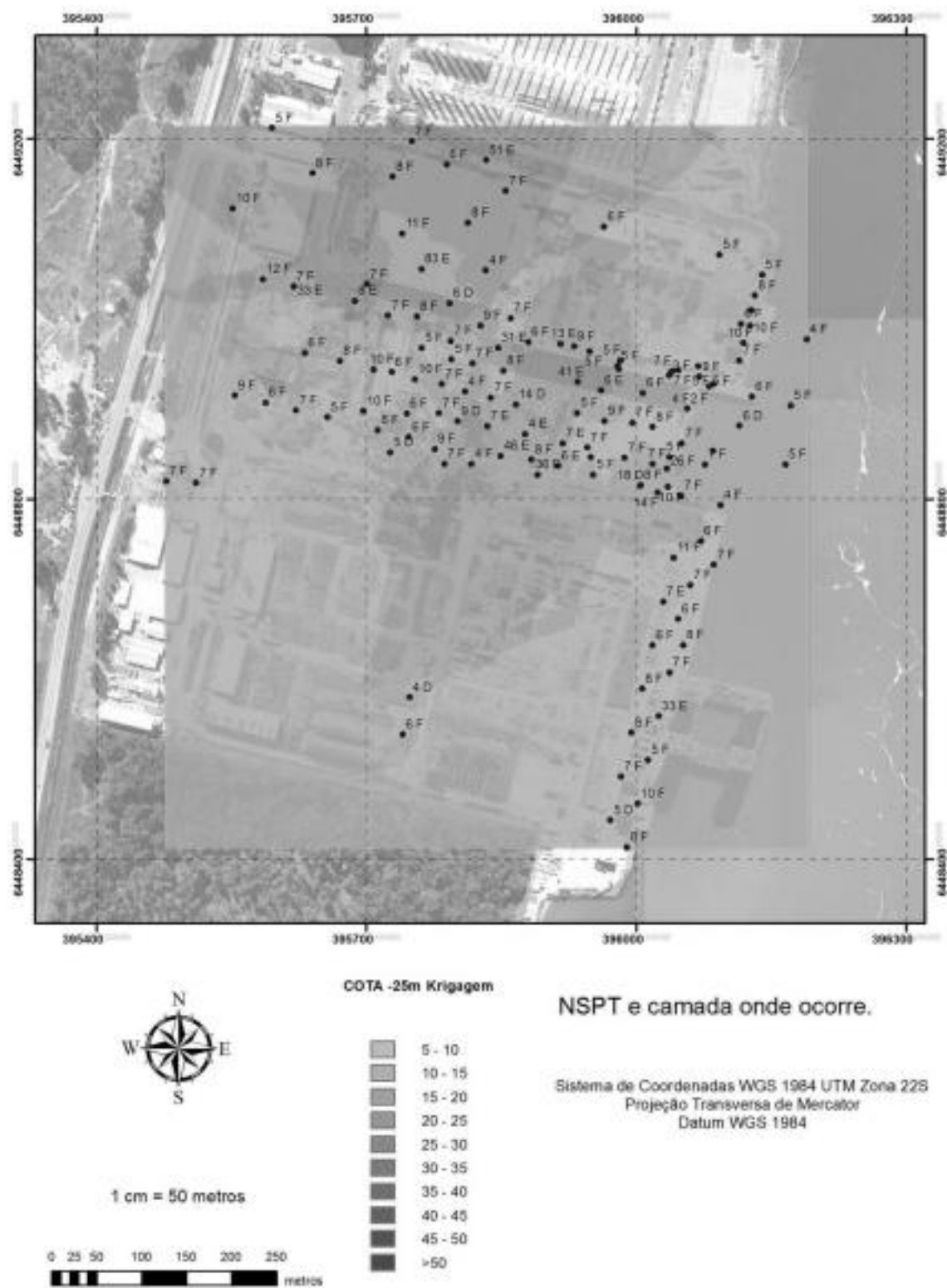


Figura A.0.84 - Distribuição do N_{SPT} na cota -25 m pelo método Krigagem.

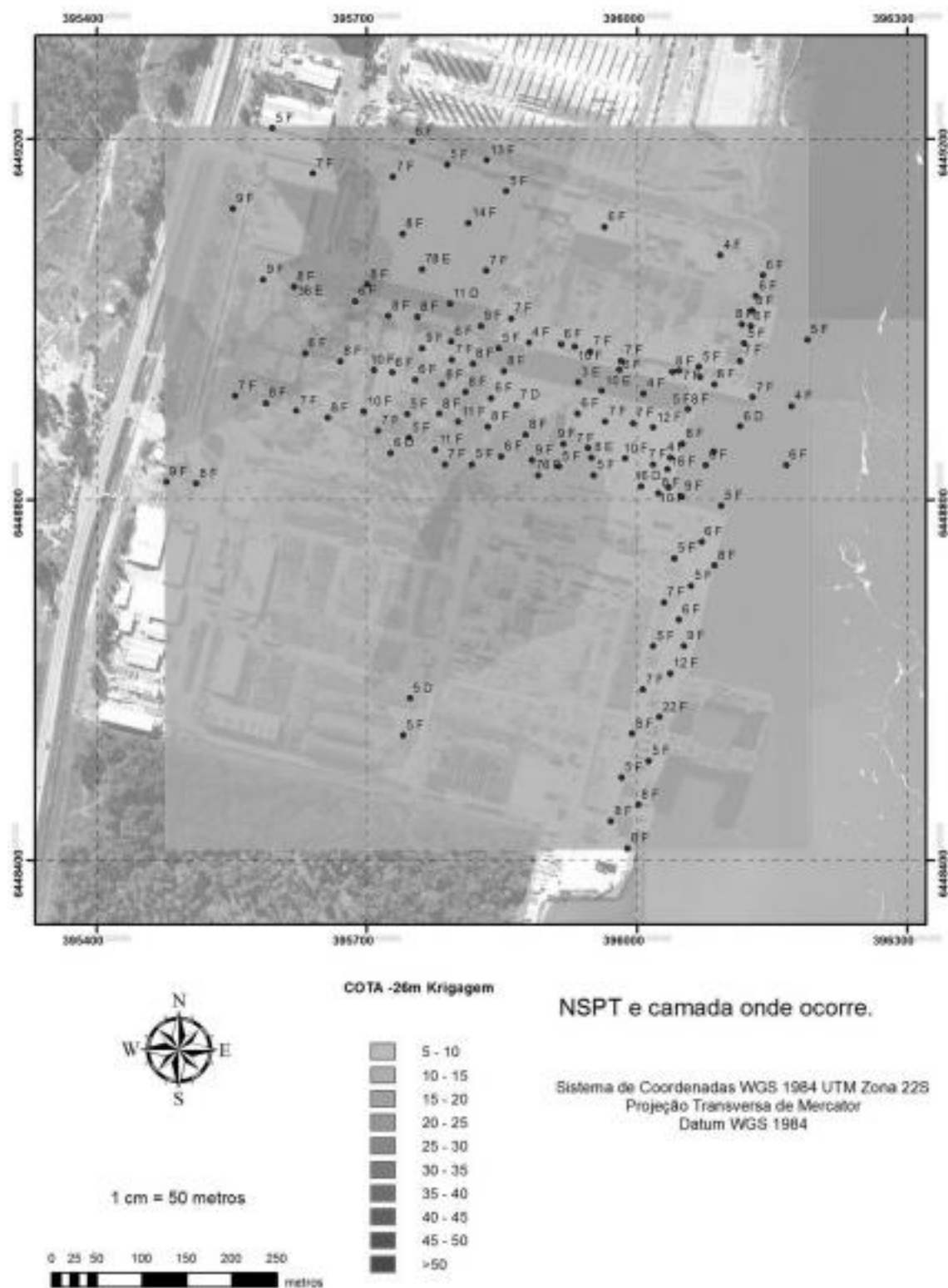


Figura A.0.85 - Distribuição do N_{SPT} na cota -26 m pelo método Krigagem.

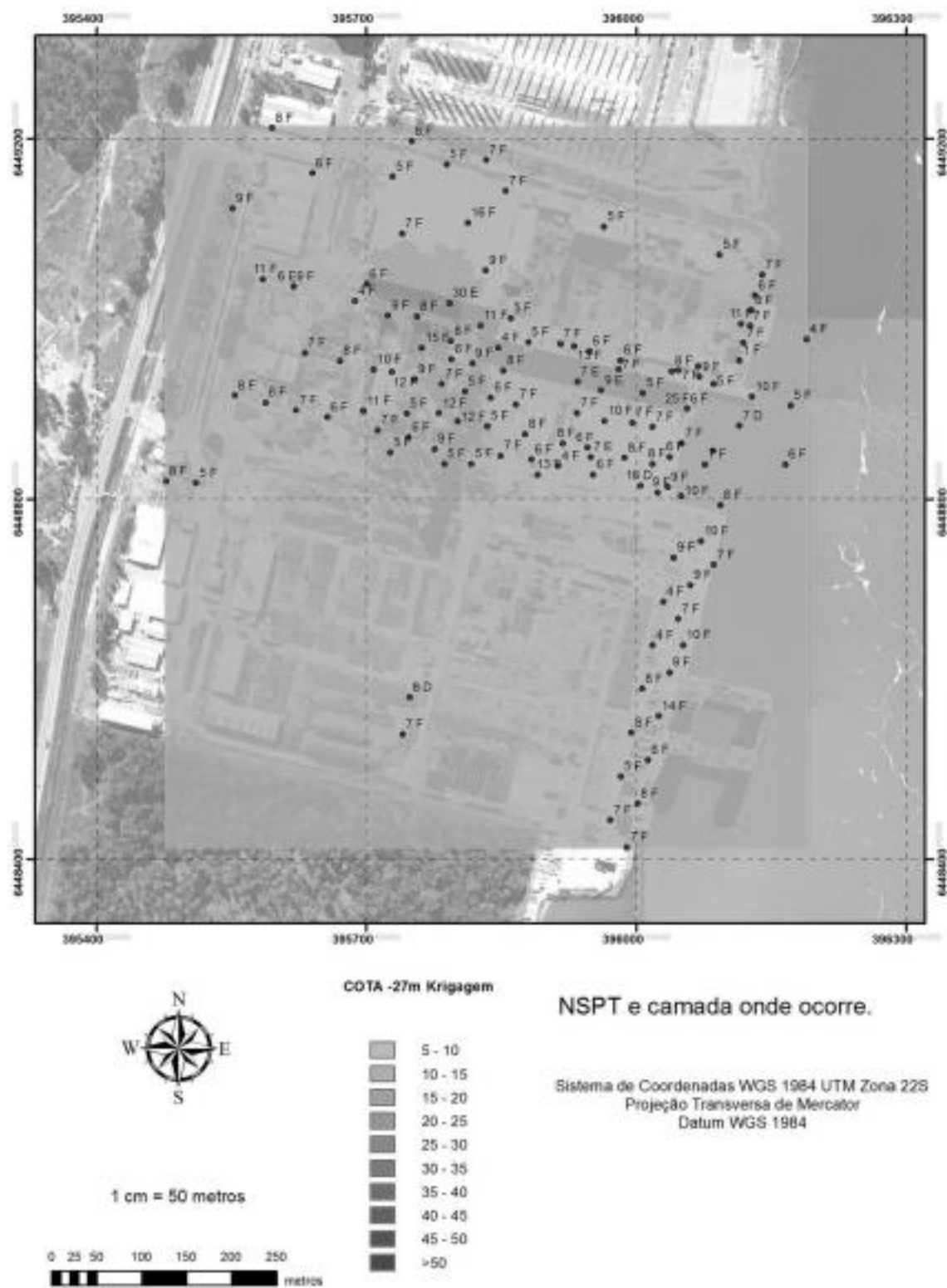


Figura A.0.86 - Distribuição do N_{SPT} na cota -27 m pelo método Krigagem.

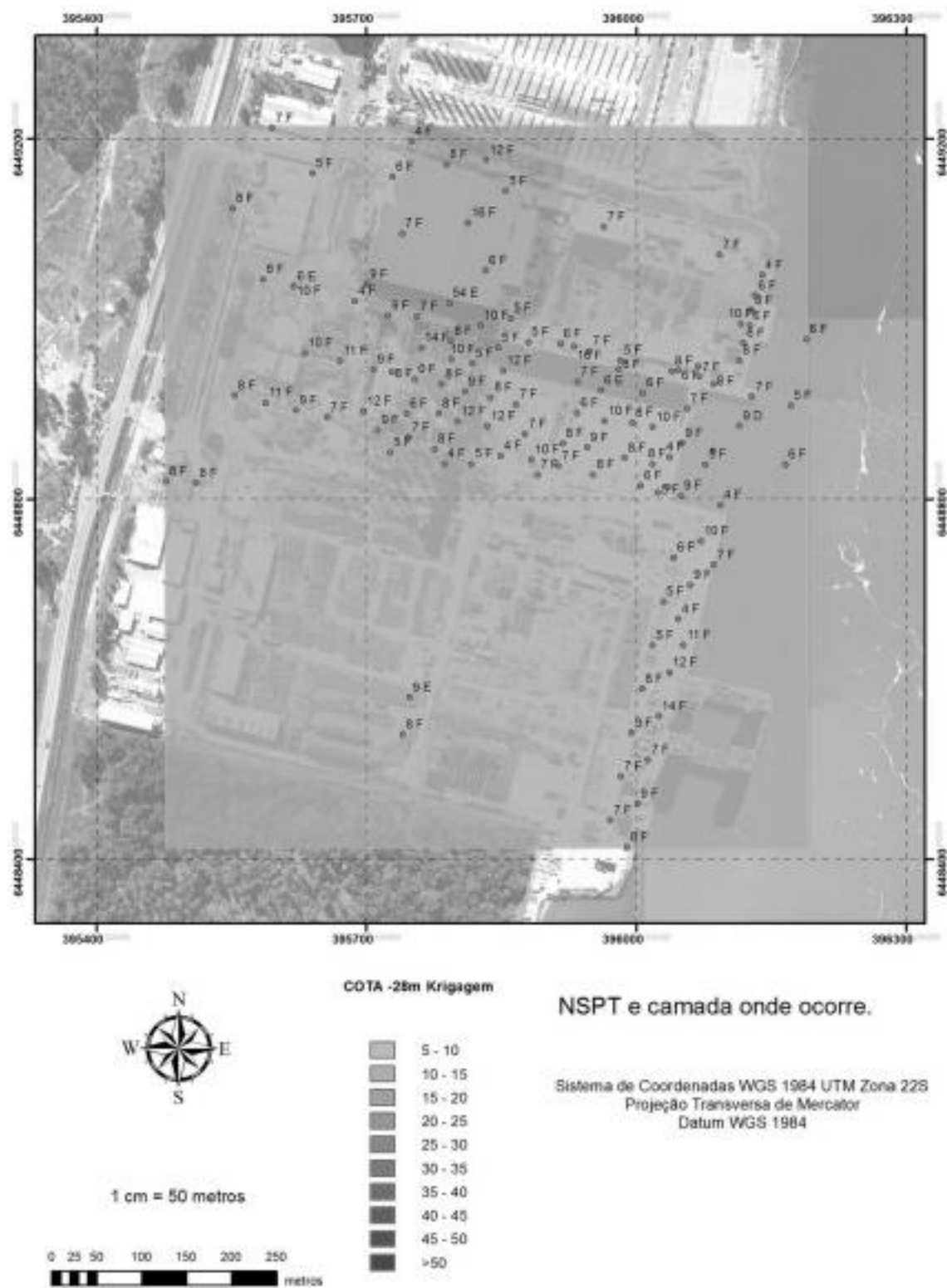


Figura A.0.87 - Distribuição do N_{SPT} na cota -28 m pelo método Krigagem.

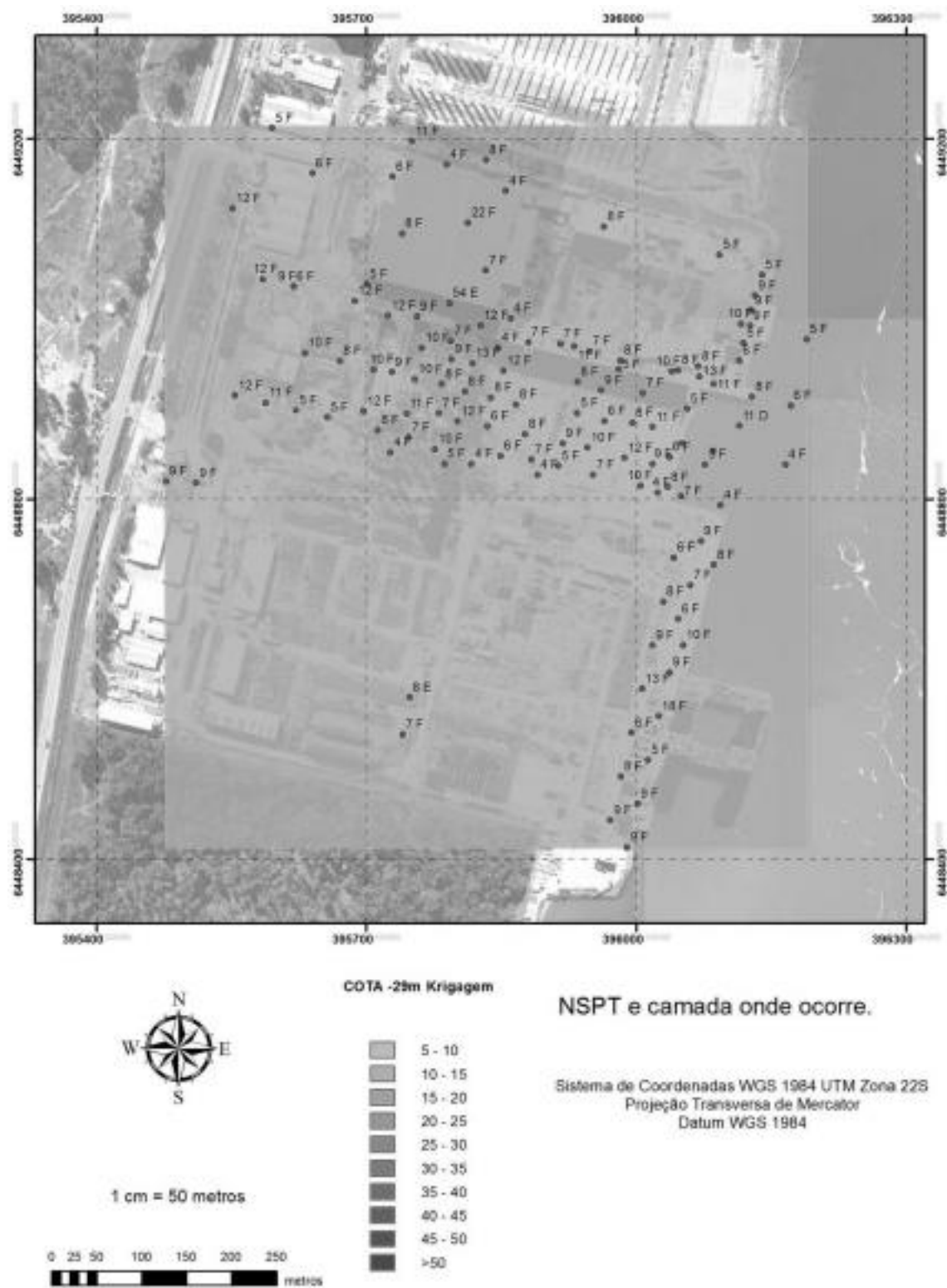


Figura A.0.88 - Distribuição do N_{SPT} na cota -29 m pelo método Krigagem.

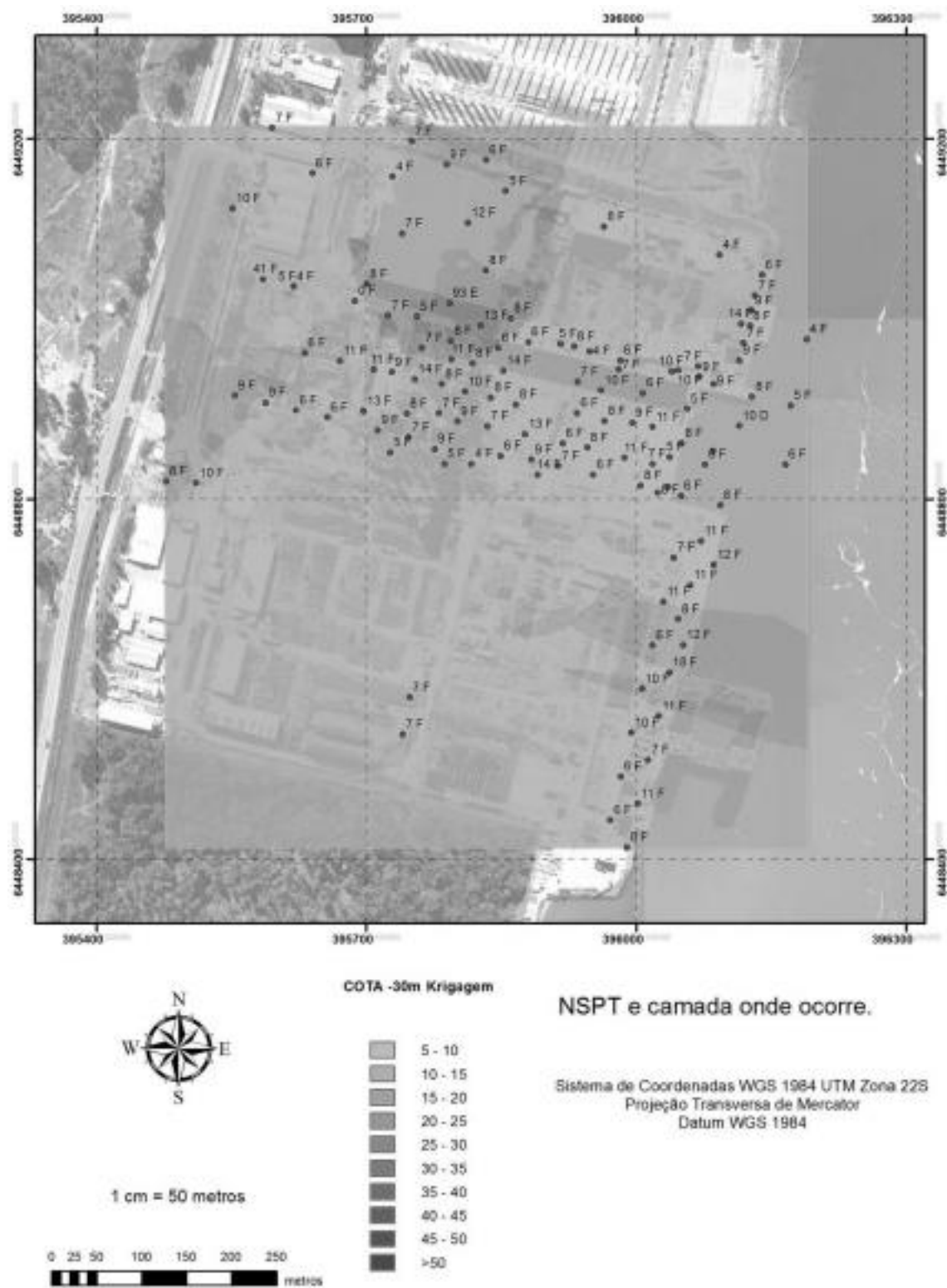


Figura A.0.89 - Distribuição do N_{SPT} na cota -30 m pelo método Krigagem.

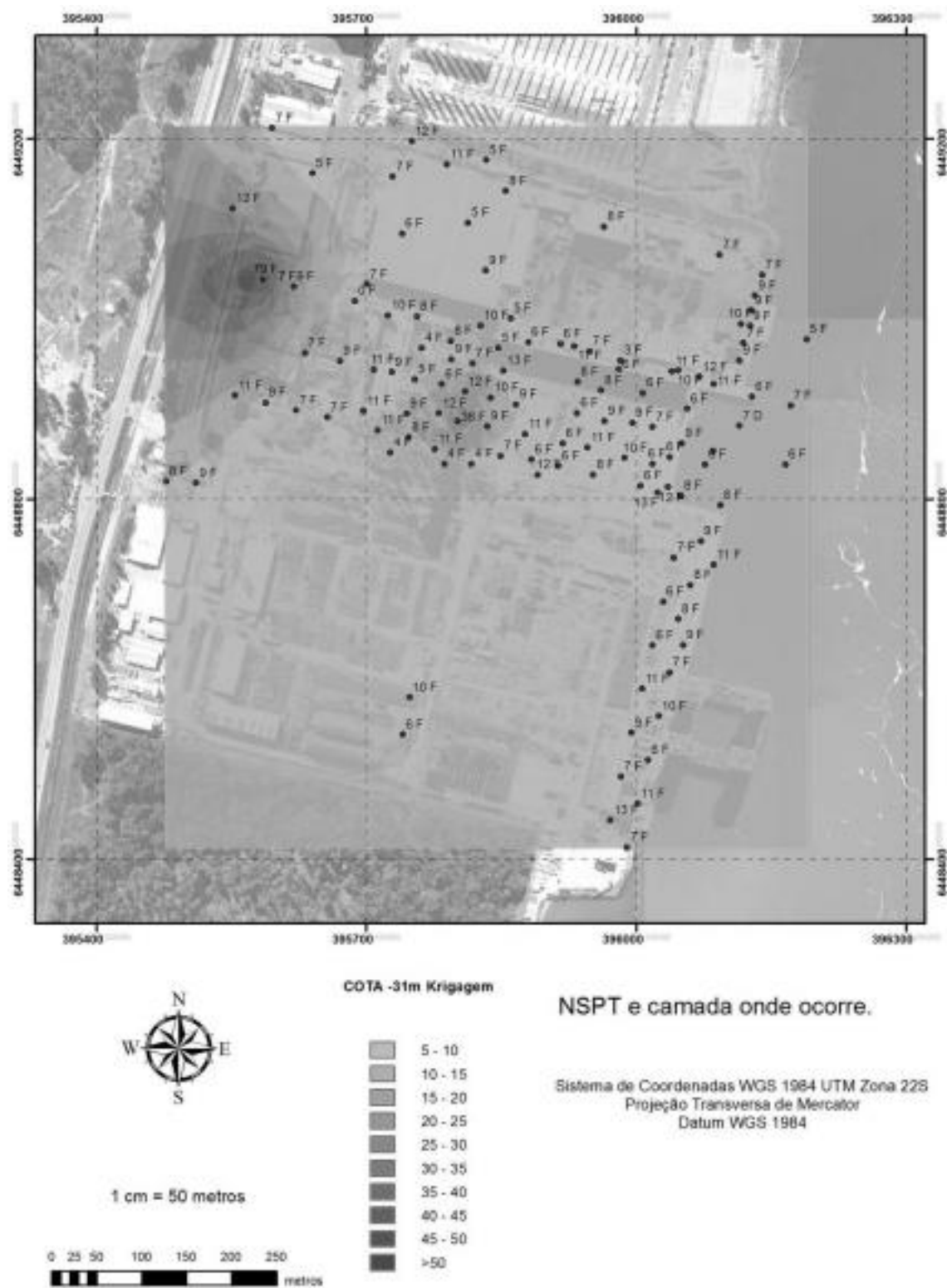
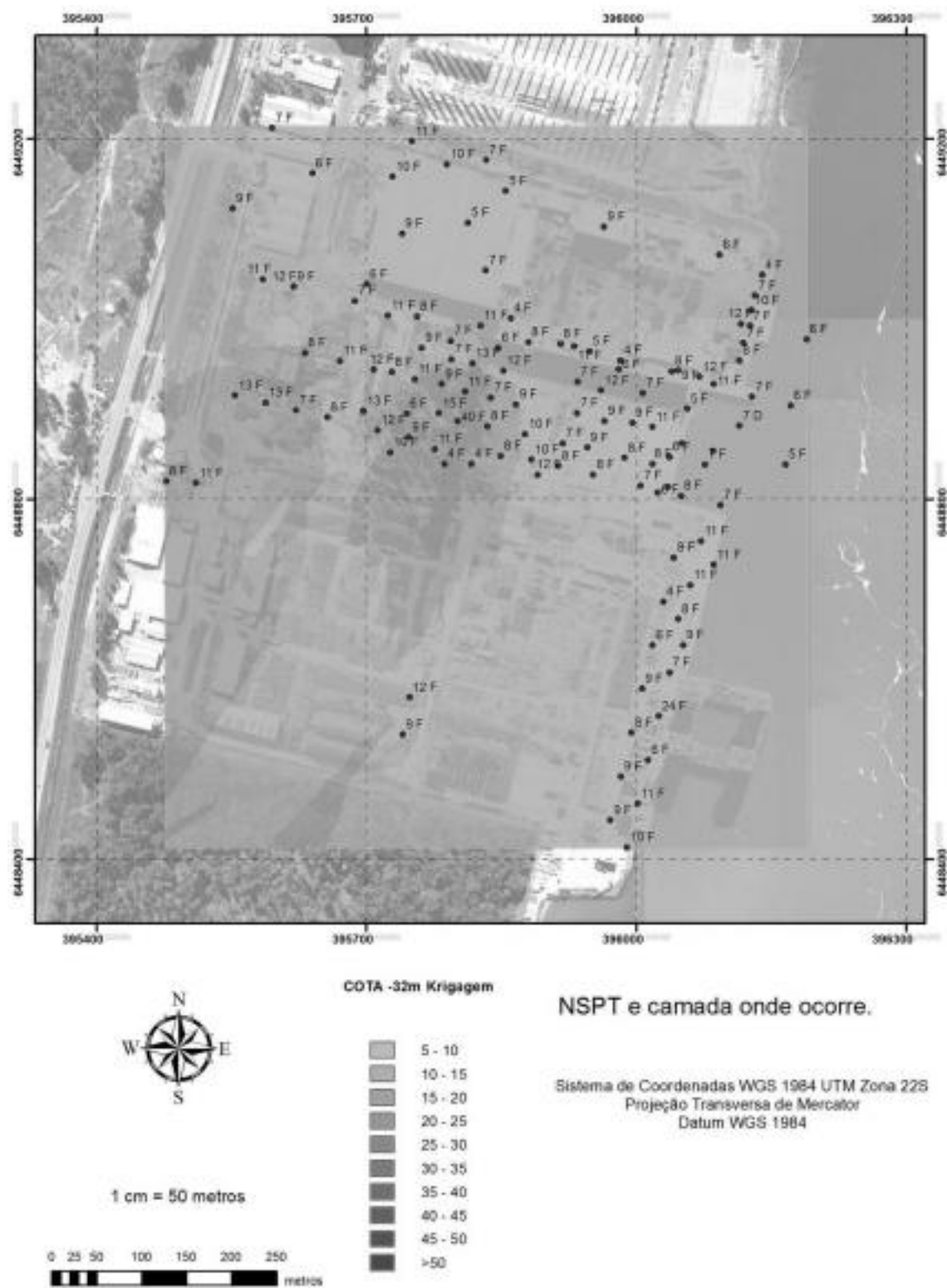


Figura A.0.90 - Distribuição do N_{SPT} na cota -31 m pelo método Krigagem.



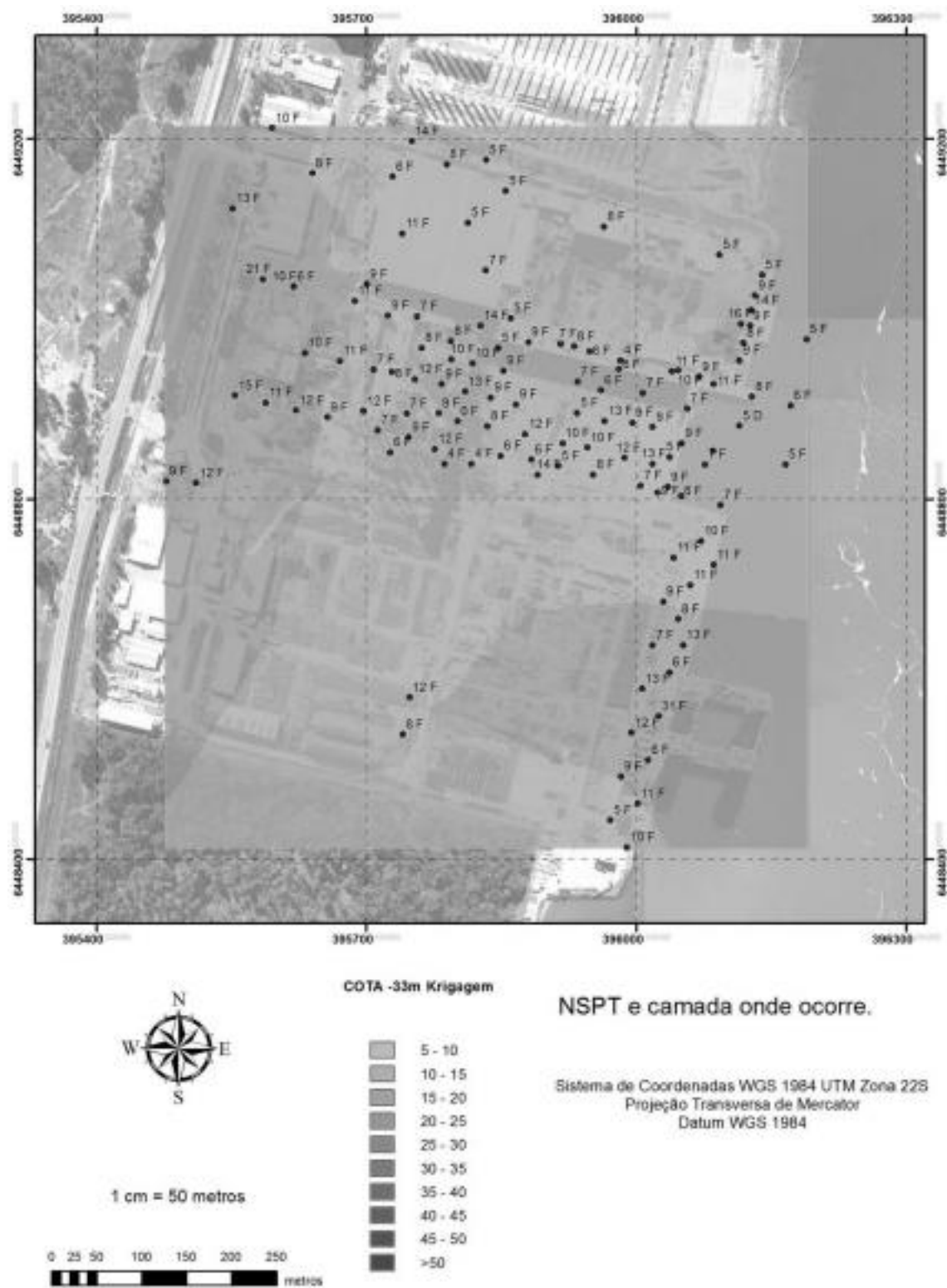


Figura A.0.92 - Distribuição do N_{SPT} na cota -33 m pelo método Krigagem.

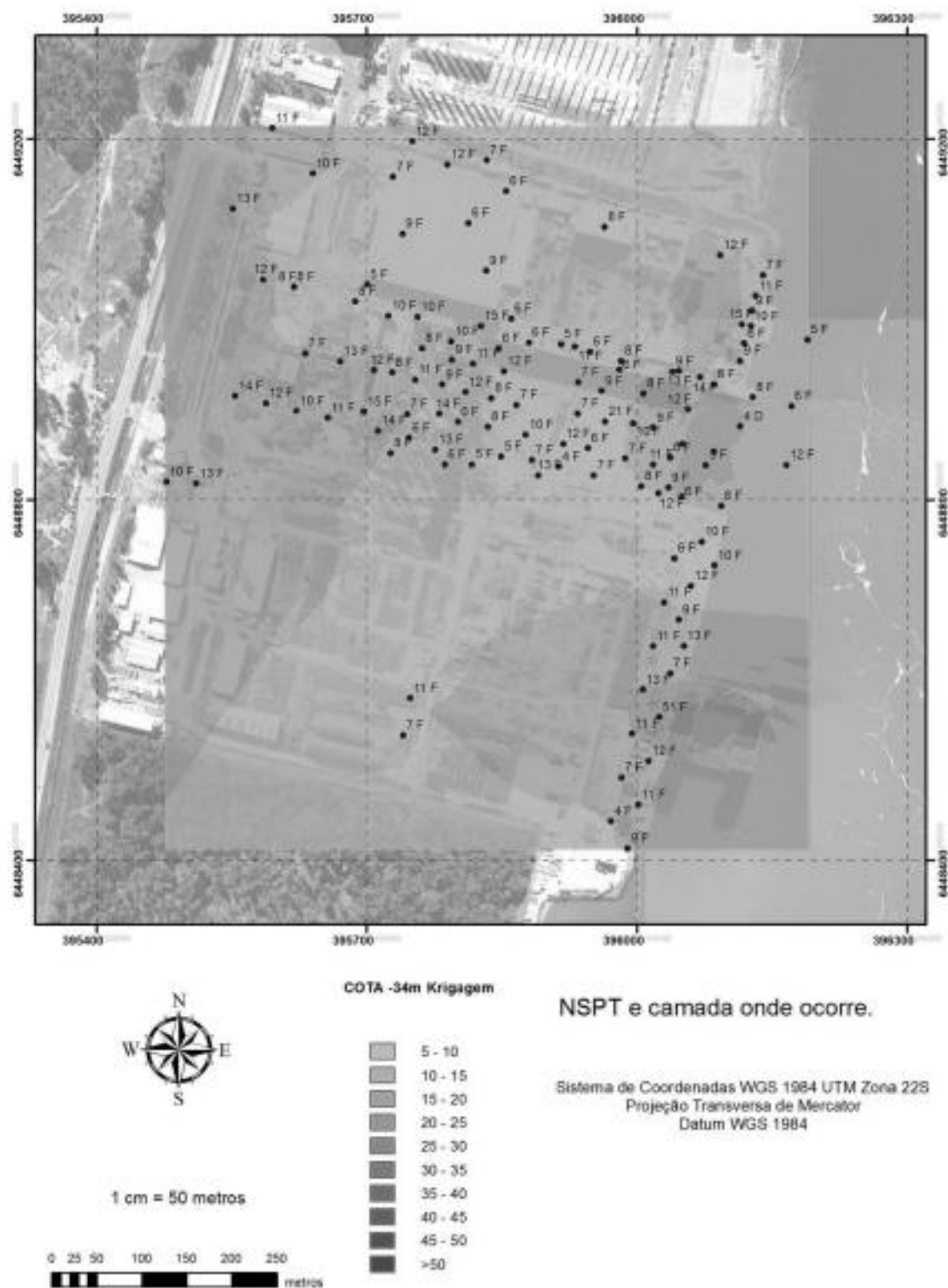


Figura A.0.93 - Distribuição do N_{SPT} na cota -34 m pelo método Krigagem.

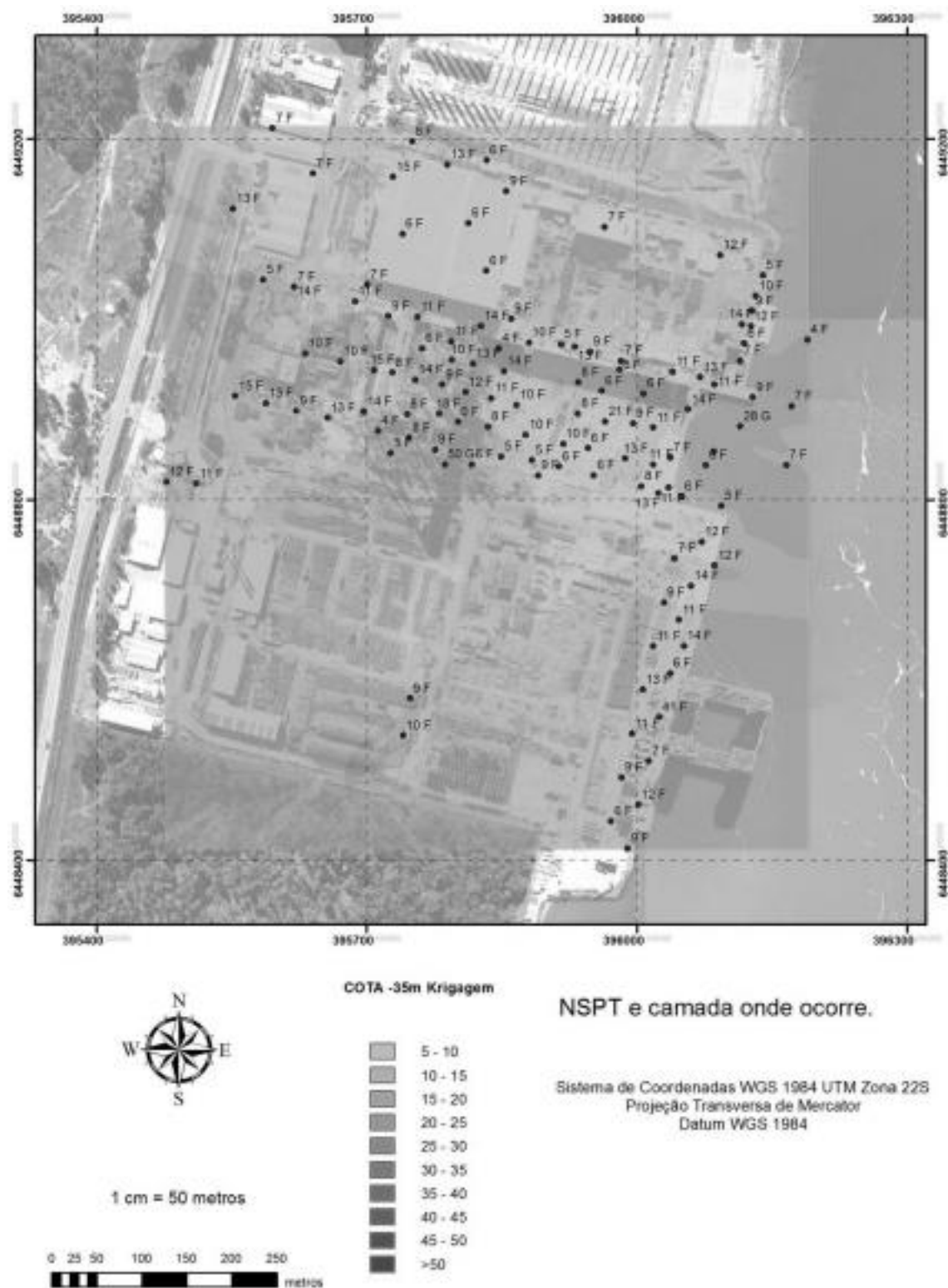


Figura A.0.94 - Distribuição do N_{SPT} na cota -35 m pelo método Krigagem.

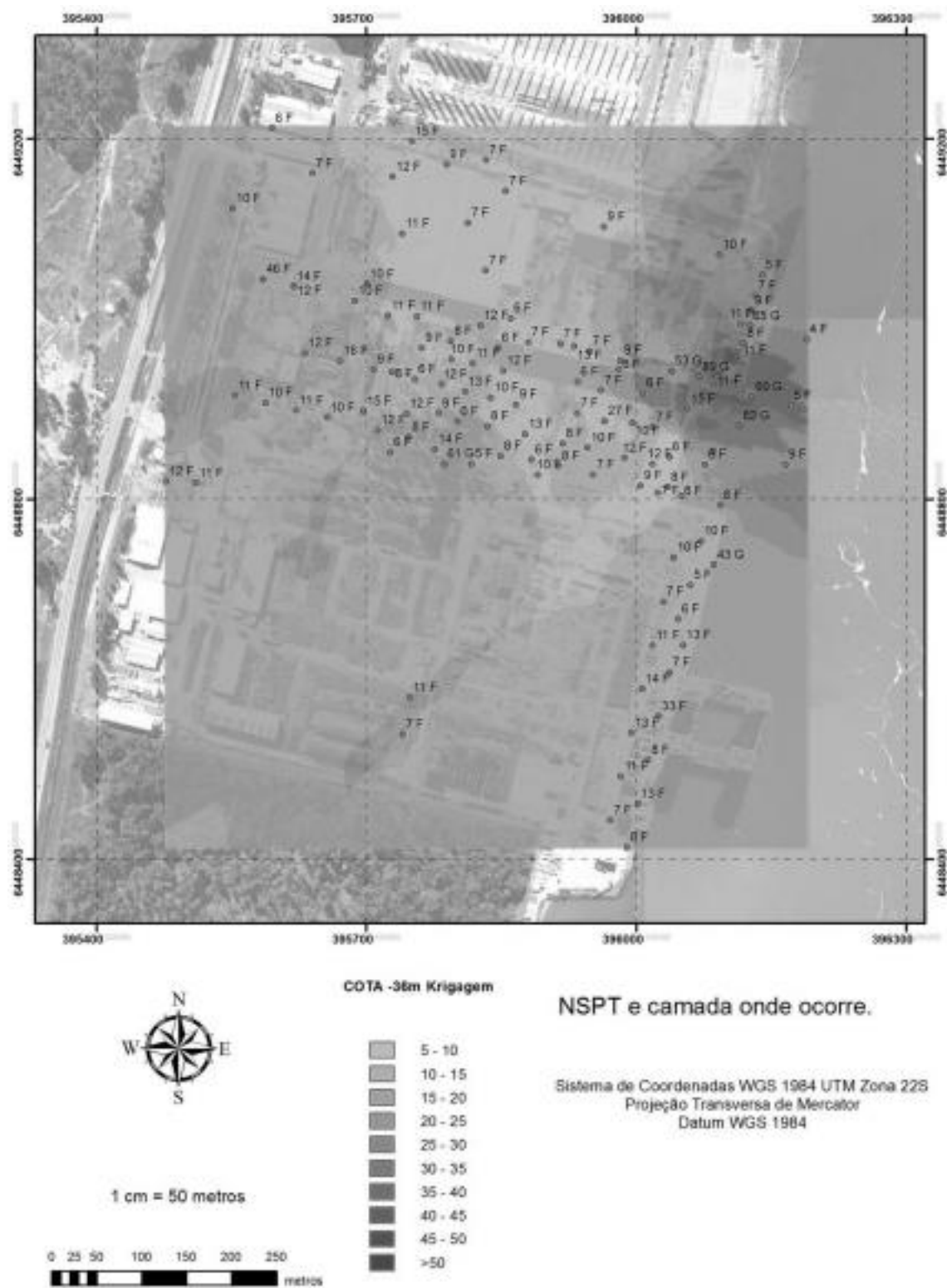


Figura A.0.95 - Distribuição do N_{SPT} na cota -36 m pelo método Krigagem.

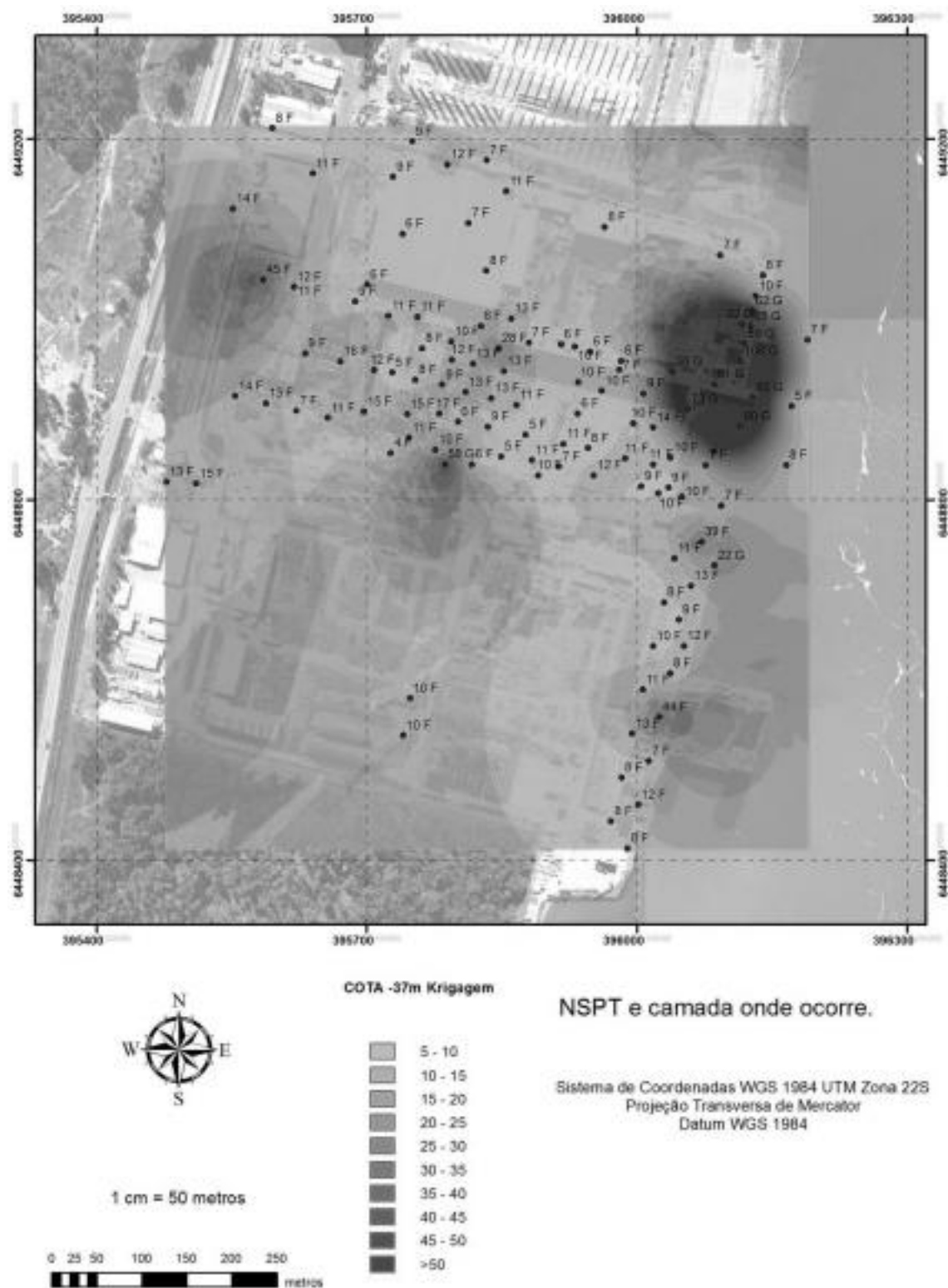


Figura A.0.96 - Distribuição do N_{SPT} na cota -37 m pelo método Krigagem.

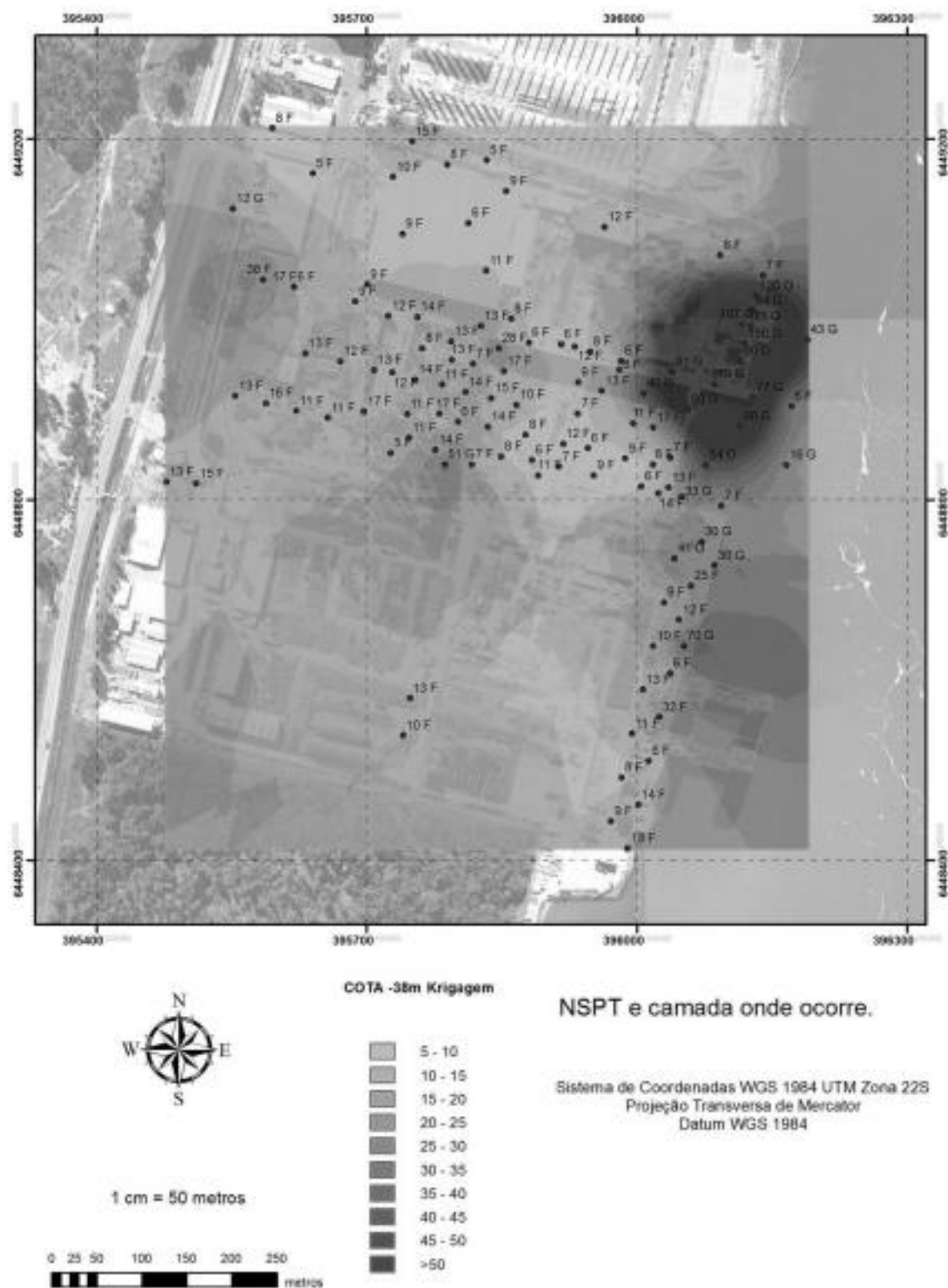


Figura A.0.97 - Distribuição do N_{SPT} na cota -38 m pelo método Krigagem.

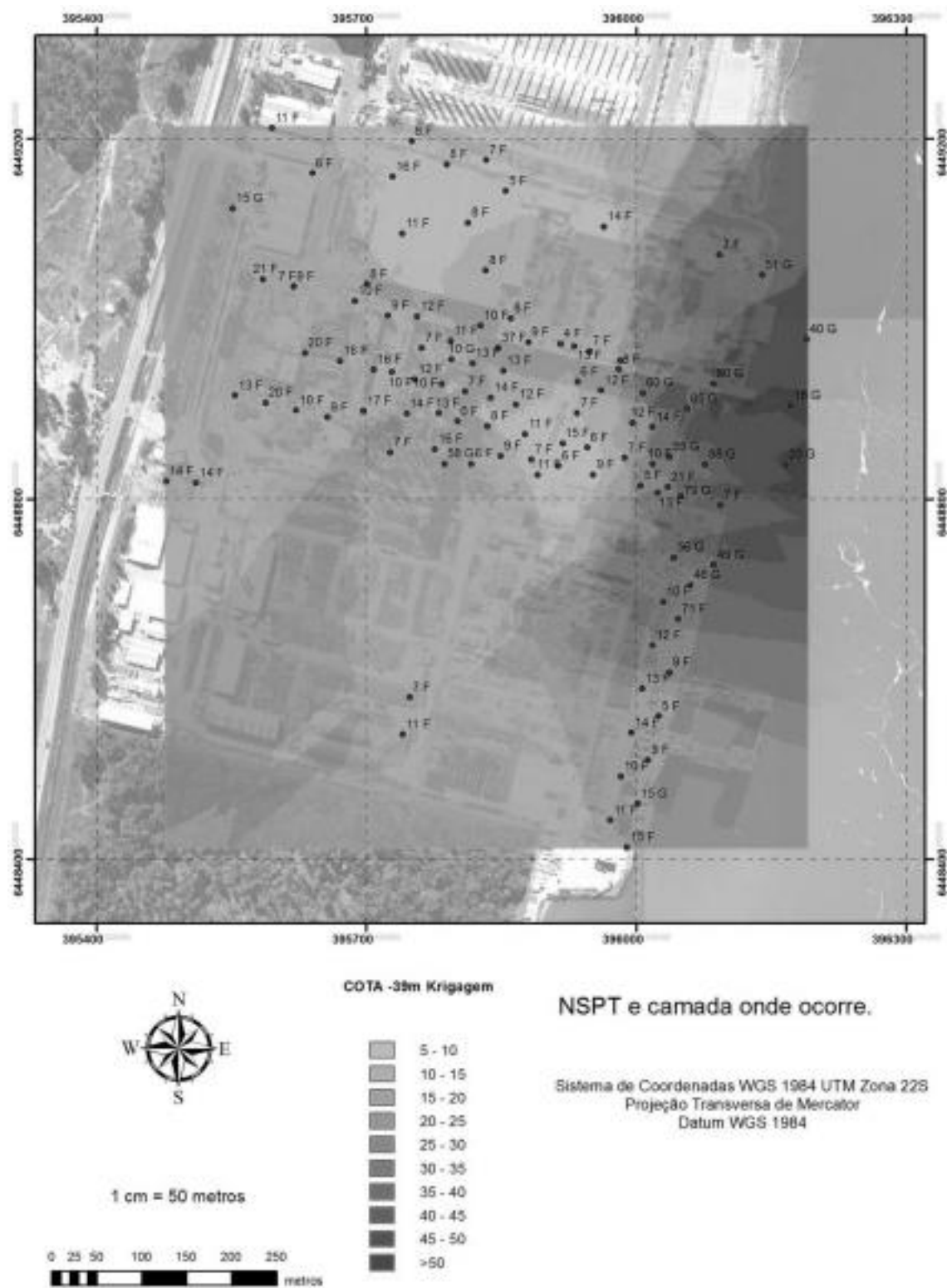


Figura A.0.98 - Distribuição do N_{SPT} na cota -39 m pelo método Krigagem.

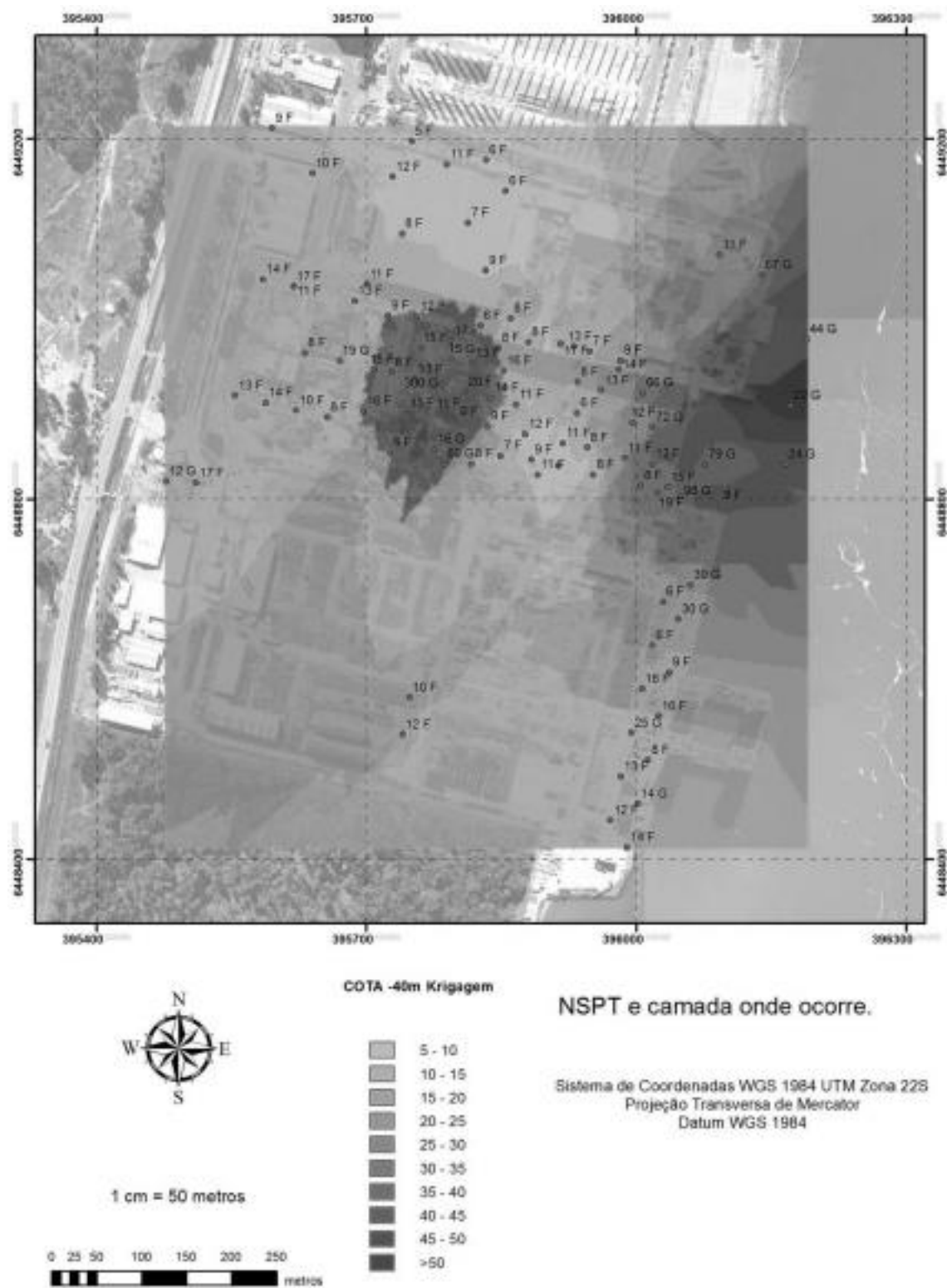


Figura A.0.99 - Distribuição do N_{SPT} na cota -40 m pelo método Krigagem.

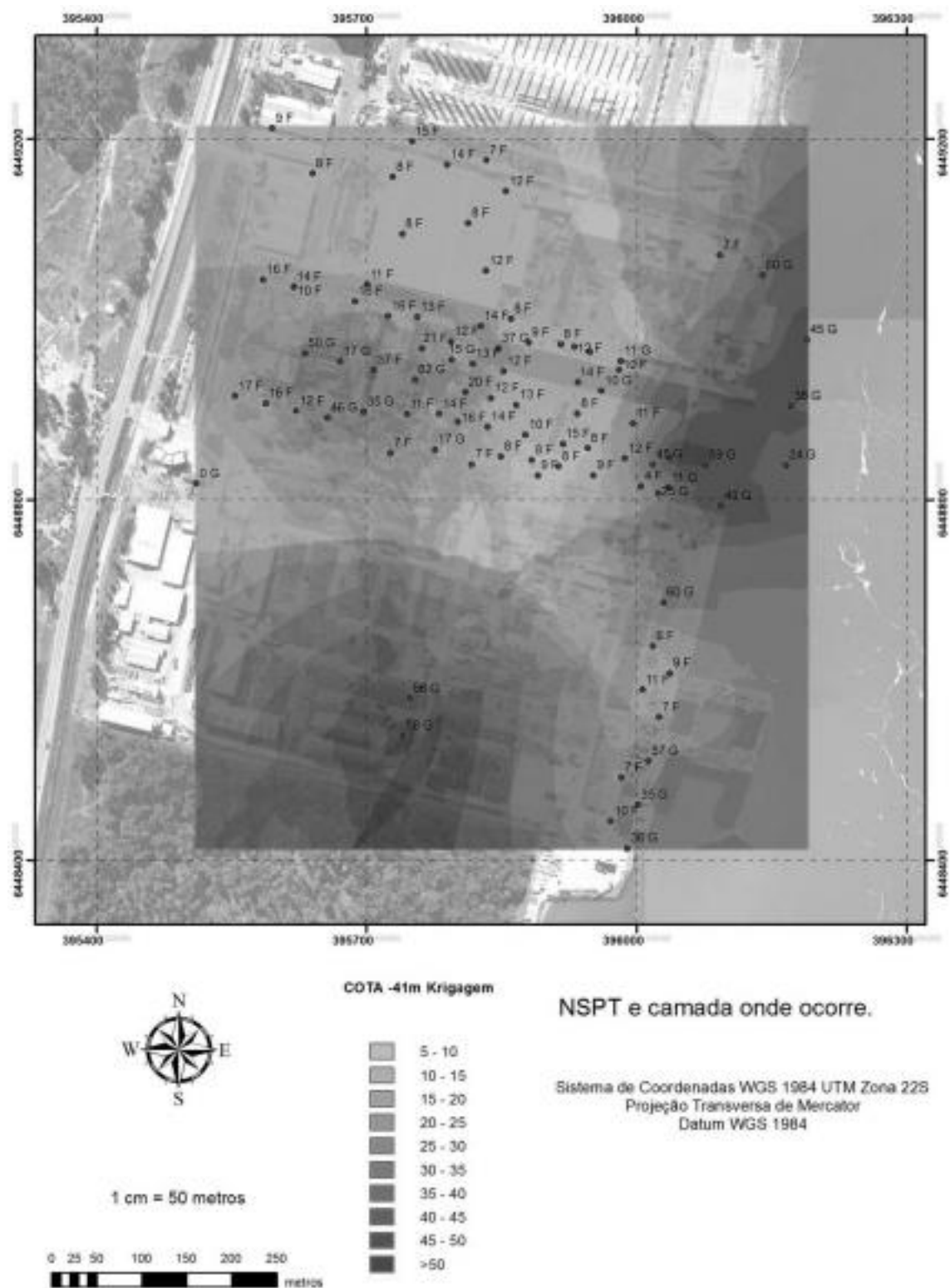


Figura A.0.100 - Distribuição do NSPT na cota -41 m pelo método Krigagem.

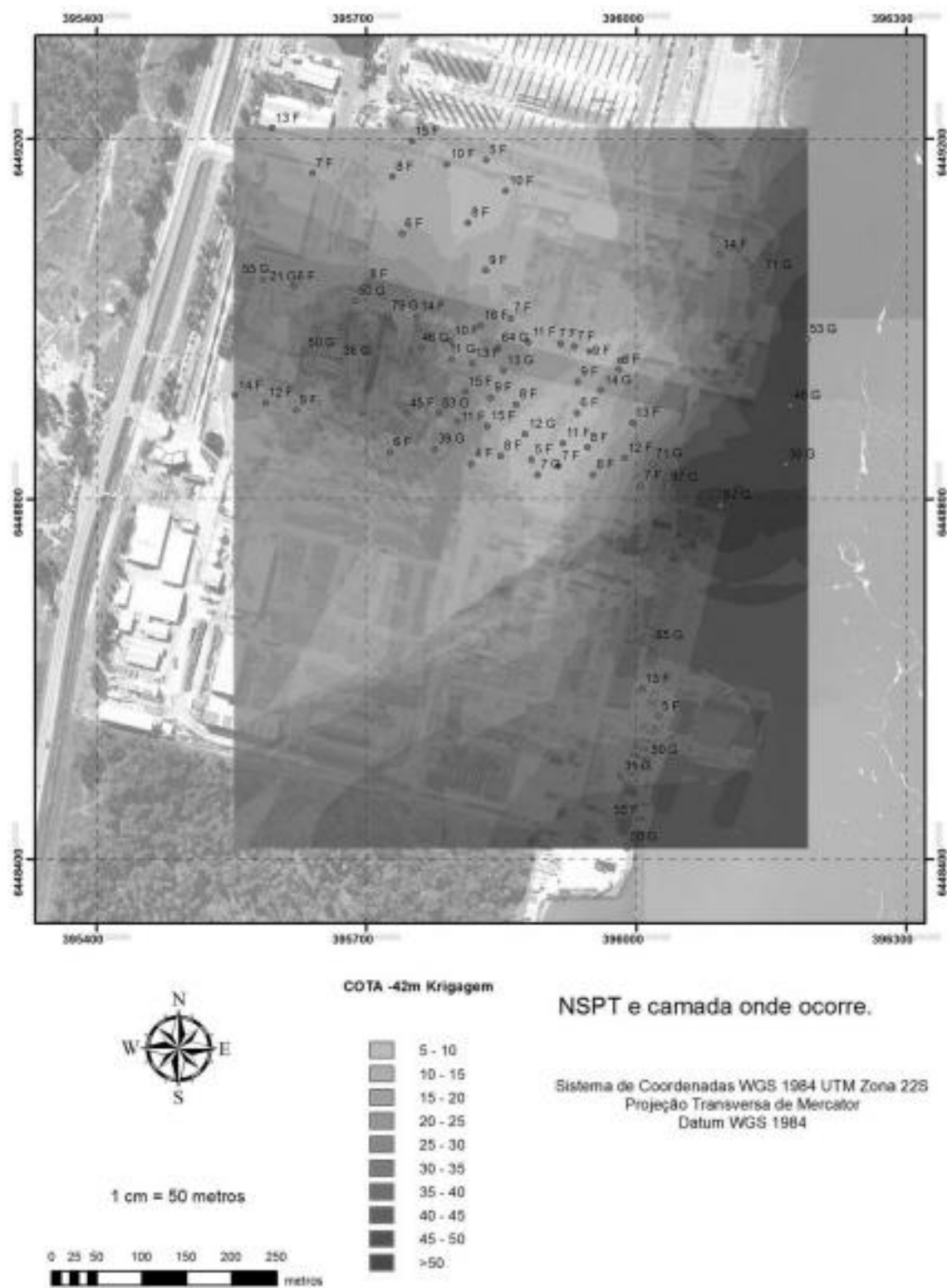


Figura A.0.101 - Distribuição do N_{spt} na cota -42 m pelo método Krigagem.

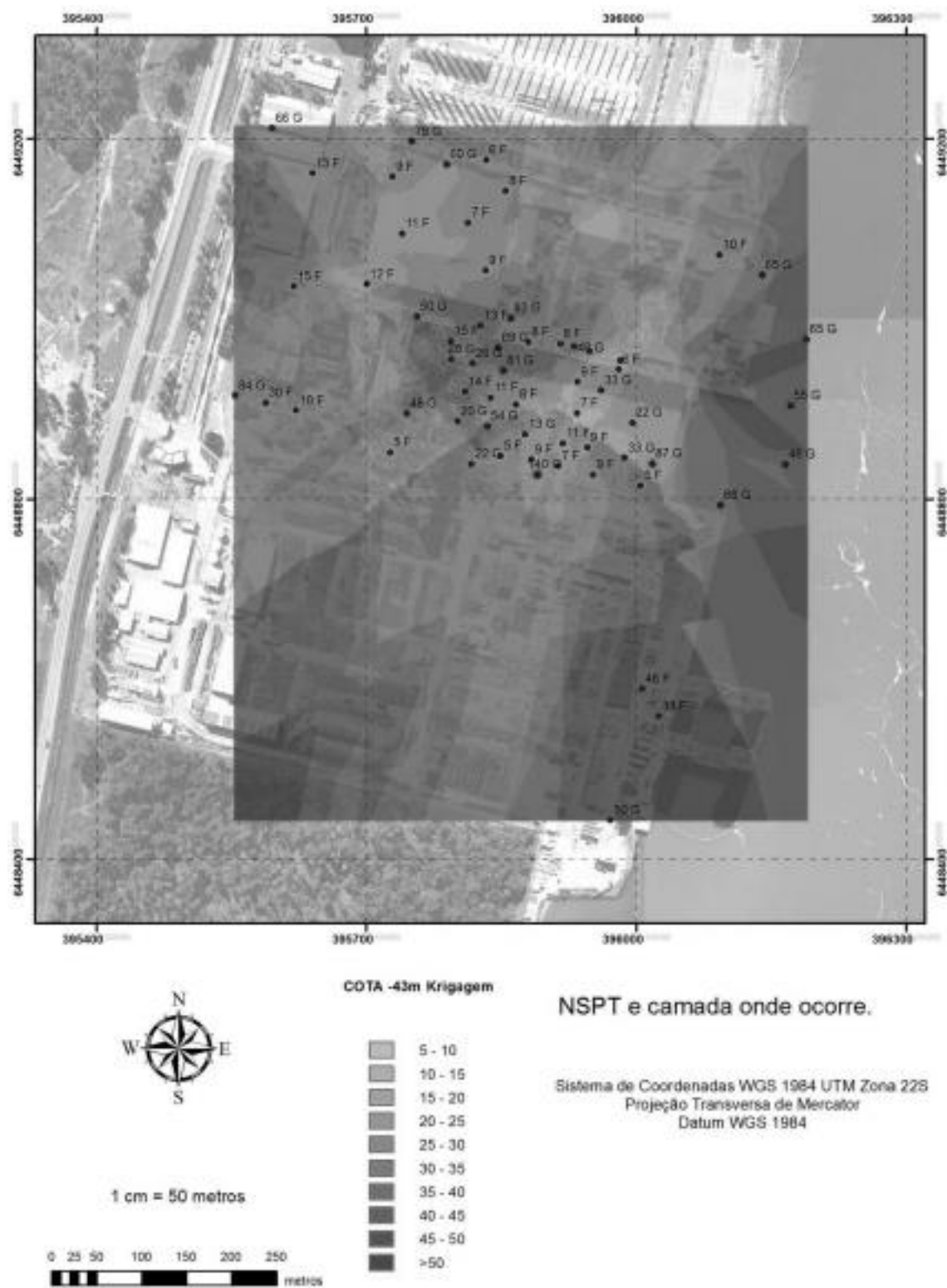


Figura A.0.102 - Distribuição do N_{eff} na cola -43 m pelo método Krigagem.

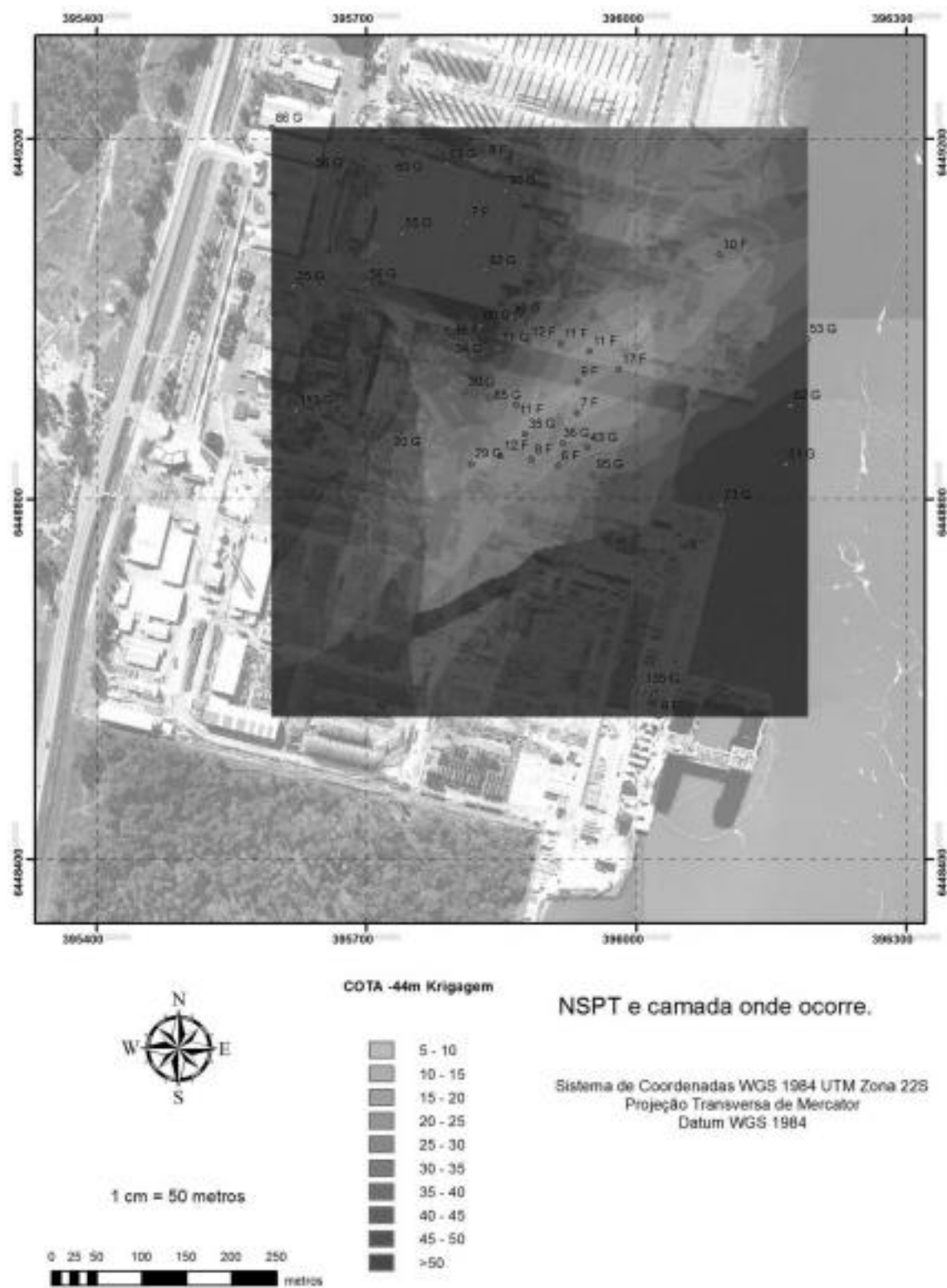


Figura A.0.103 - Distribuição do N_{spt} na cota -44 m pelo método Krigagem.

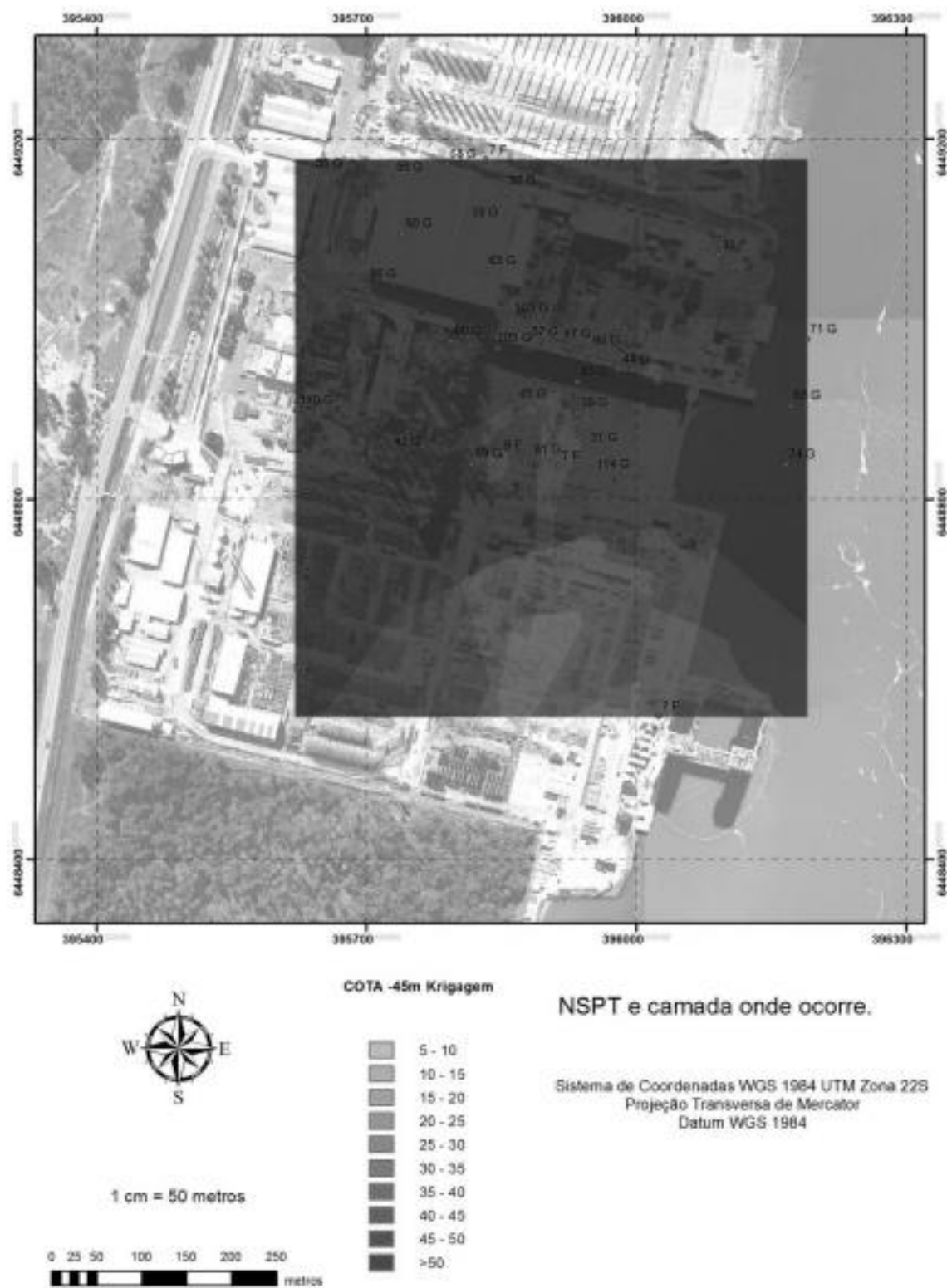


Figura A.0.104 - Distribuição do NSPT na cota -45 m pelo método Krigagem.

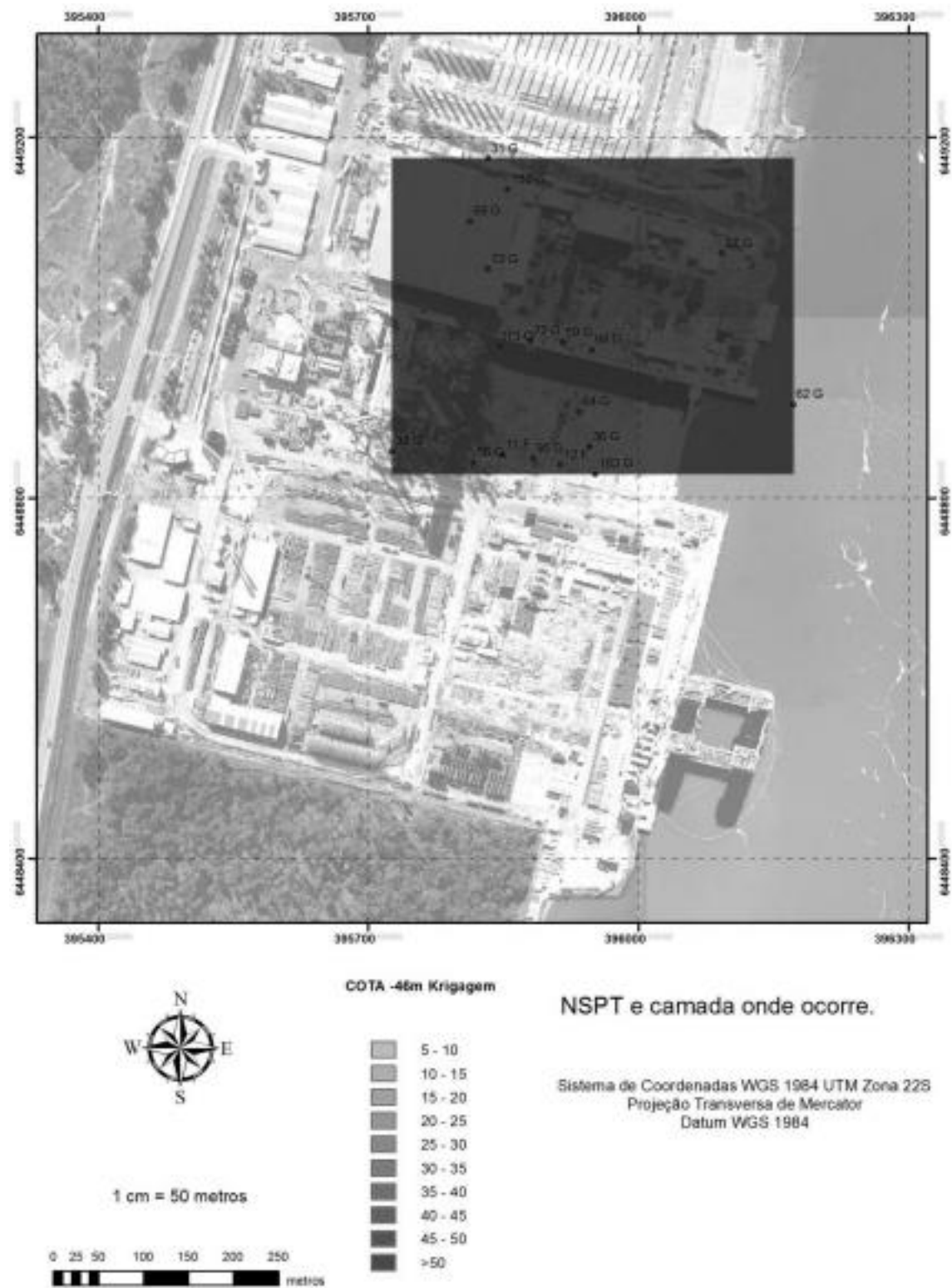


Figura A.0.105 - Distribuição do N_{spt} na cota -46 m pelo método Krigagem.

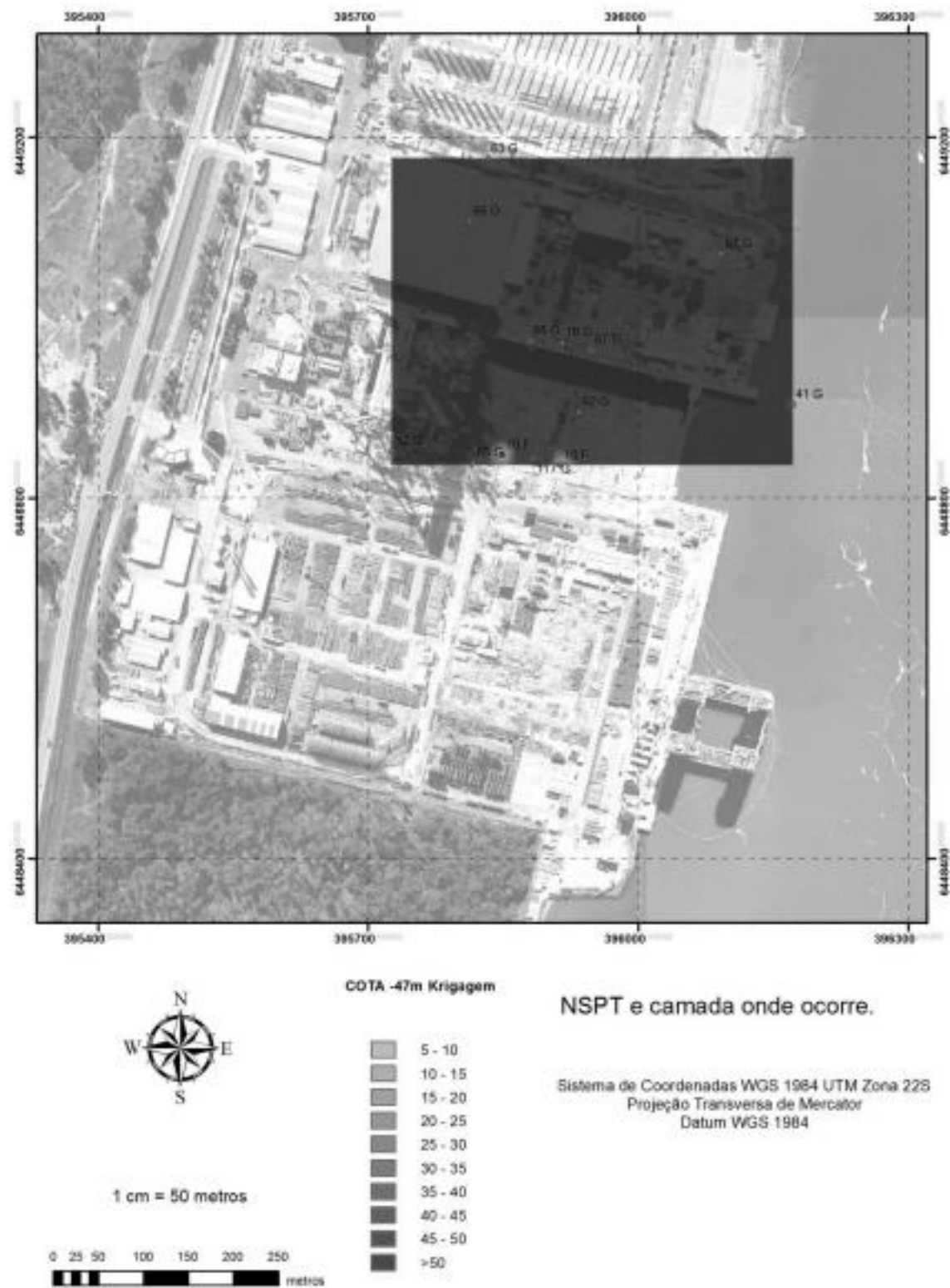


Figura A.0.106 - Distribuição do N_{eff} na cola -4/ m pelo método Krigagem.

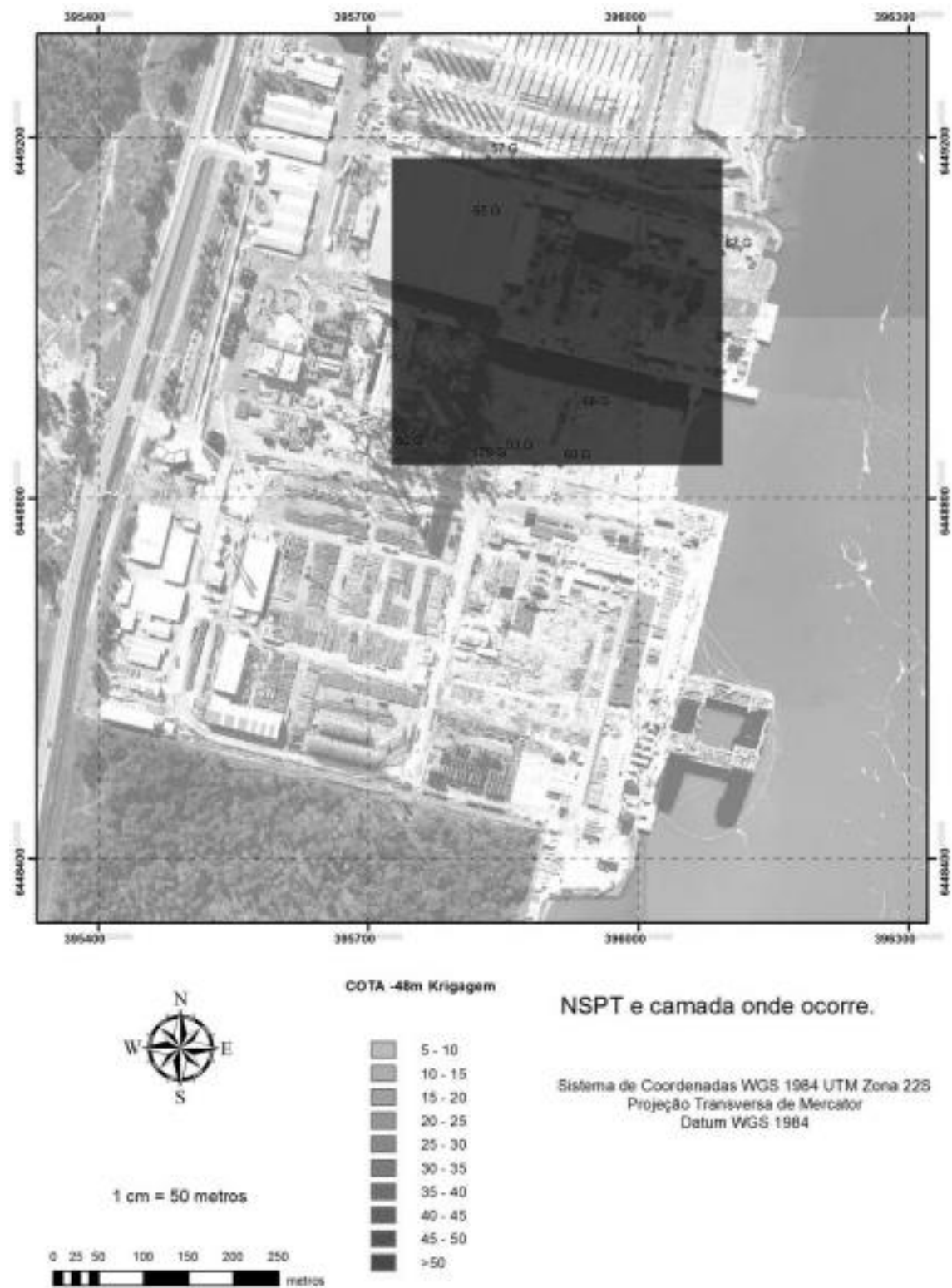


Figura A.0.107 - Distribuição do N_{eff} na cola -17 m pelo método Krigagem.

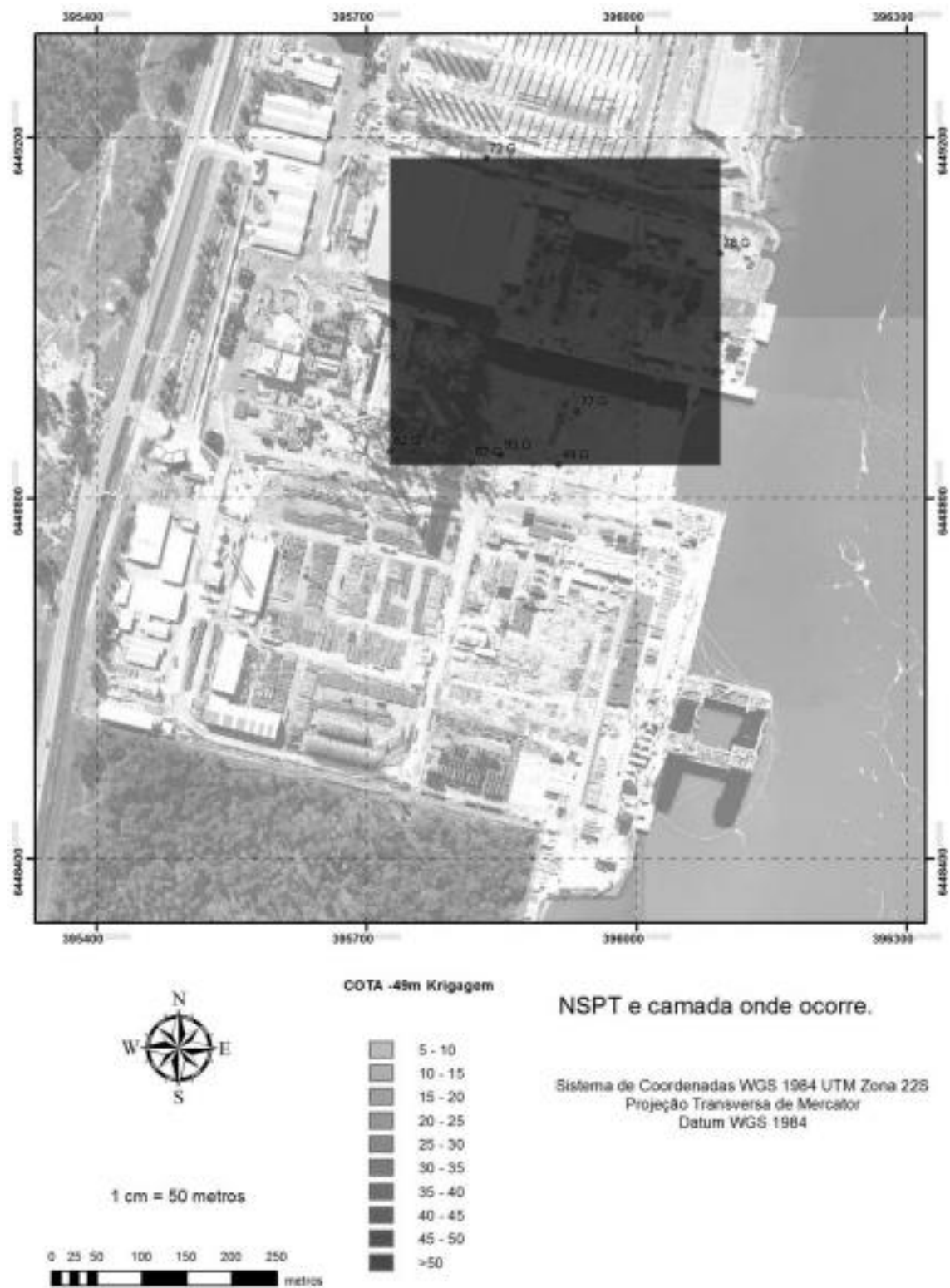


Figura A.0.108 - Distribuição do $N_{s,PT}$ na cota -49 m pelo método Krigagem.

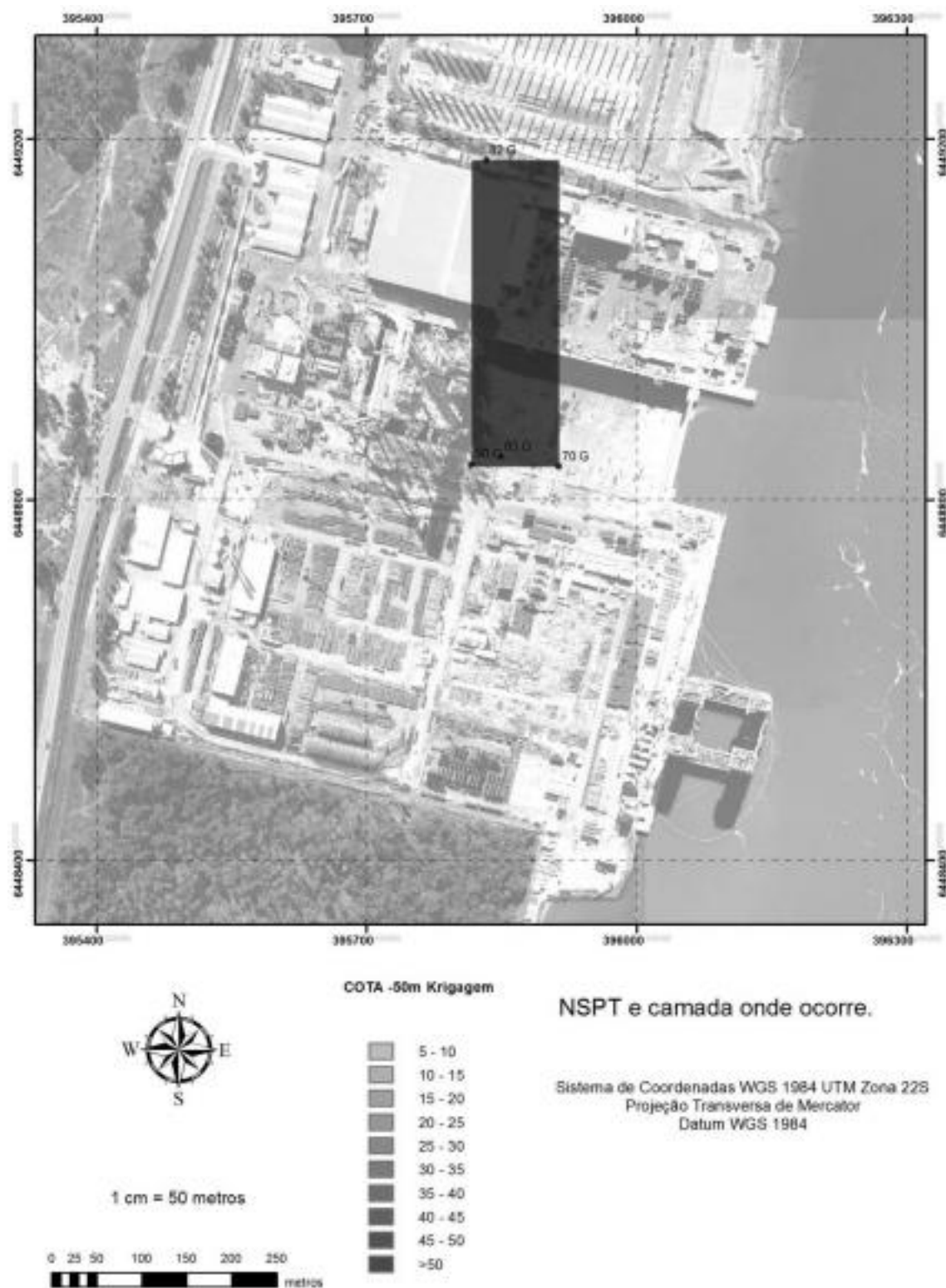


Figura A.0.109 - Distribuição do $N_{s,pt}$ na cota -50 m pelo método Krigagem.

APÊNDICE B – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA DISTRIBUIÇÃO DO N_{SPT}

Tabela B.1 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SPT} a cada metro, parte 1.

Cota (m)	Total de Amostras	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
7	8	5	57	17,8	16,3	92%
3	26	6	50	14,3	9,5	67%
2	63	2	60	17,5	11,8	67%
1	82	2	61	21,7	14,7	68%
0	103	2	219	26,5	26,1	99%
-1	114	2	80	30,1	17,1	57%
-2	116	5	100	37,6	17,3	46%
-3	119	0	118	37,1	20,5	55%
-4	119	3	114	36,1	19,4	53%
-5	119	2	153	39,0	24,5	63%
-6	119	2	175	39,3	26,1	66%
-7	119	1	330	42,2	39,1	93%
-8	118	0	134	48,8	54,0	111%
-9	122	5	180	55,6	51,4	92%
-10	122	3	350	52,8	59,6	113%
-11	125	0	330	40,5	36,6	90%
-12	133	2	225	33,4	30,7	92%
-13	134	2	600	27,9	59,1	212%
-14	137	2	312	17,0	30,1	177%
-15	115	2	375	18,2	36,5	201%
-16	141	2	100	16,5	16,2	98%
-17	143	2	70	19,8	17,0	86%
-18	138	3	112	16,0	16,1	102%
-19	138	2	153	13,1	16,1	122%
-20	137	1	125	12,8	14,3	112%
-21	137	2	113	17,2	16,4	95%
-22	137	3	180	25,5	27,2	107%
-23	136	3	150	22,2	25,1	113%
-24	132	2	78	13,5	15,4	114%
-25	132	2	83	9,6	10,1	105%
-26	128	3	78	8,1	9,1	107%
-27	126	1	30	7,8	3,5	45%
-28	124	0	54	8,1	4,9	60%
-29	121	1	54	8,5	5,0	59%

Tabela B.2 – Parâmetros estatísticos da distribuição do N_{SP} a cada metro, parte 2.

Cota (m)	Total de Amostras	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
-30	124	0	93	9,0	8,6	96%
-31	122	0	79	8,9	7,4	83%
-32	123	4	40	8,9	4,0	44%
-33	122	0	31	9,0	3,6	40%
-34	122	0	51	9,8	5,6	57%
-35	120	0	50	10,2	6,0	58%
-36	120	0	89	13,7	14,3	109%
-37	117	0	108	17,1	21,2	122%
-38	116	0	150	21,2	26,3	123%
-39	104	0	88	17,5	18,7	106%
-40	98	0	300	20,7	34,2	170%
-41	88	0	131	20,3	19,8	98%
-42	75	4	97	23,2	22,4	97%
-43	61	5	140	31,7	29,0	93%
-44	42	6	135	44,3	34,7	77%
-45	32	7	114	58,2	31,7	53%
-46	18	11	163	68,8	42,3	61%
-47	13	10	117	67,8	30,3	49%
-48	8	53	129	69,9	24,4	35%
-49	7	49	95	73,6	14,7	20%
-50	4	70	90	81,8	8,5	10%
-51	1	76	76	76,0	0,0	0%