

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

BANCO DE DADOS GEOLÓGICO – GEOTÉCNICOS COM BASE EM  
SONDAGENS À PERCUSSÃO E USO DE SIG: ANÁLISE ESPACIAL DA  
PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO E DO  $N_{SPT}$  PARA OBRAS DE  
FUNDAÇÃO EM JOÃO PESSOA – PB

Eng. WANESSA CARTAXO SOARES

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

São Carlos – SP

2011



## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 13 |
| 2 HIPÓTESES DE TRABALHO E OBJETIVOS .....                                  | 16 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....  | 18 |
| 3.1 Sondagens a percussão e o <i>Standard Penetration Test</i> (SPT) ..... | 18 |
| 3.1.1 Aspectos Gerais, Execução e Representação .....                      | 18 |
| 3.1.2 Utilização, Parâmetros e Correlações.....                            | 23 |
| 3.2 Bancos de Dados e SIG.....   | 27 |
| 3.2.1 Aspectos Gerais .....  | 28 |
| 3.2.2 Modelo Entidade e Relacionamento – MER (modelo conceitual).....      | 29 |
| 3.2.3 Modelo Relacional .....  | 30 |
| 3.2.4 Bancos de Dados Geográficos .....                                    | 33 |
| 3.2.5 Sistemas de Informação Geográfica (SIG) .....                        | 34 |
| 3.2.6 Bancos de dados e SIG.....   | 38 |
| 3.2.7 Bancos de dados geotécnicos .....                                    | 39 |
| 3.3 Métodos de Interpolação.....   | 44 |
| 3.3.1 Determinísticos.....   | 44 |
| 3.3.1.1 - Triangulação com Interpolação Linear – TIN.....                  | 44 |
| 3.3.1.2 Inverso Ponderado da Distância .....                               | 45 |
| 3.3.1.3 Spline.....  | 46 |
| 3.3.1.4 Topo to Raster .....   | 46 |
| 3.3.2 Geoestatística.....  | 47 |
| 3.3.2.1 Variáveis Regionalizadas .....                                     | 48 |
| 3.3.2.2 Variograma .....   | 49 |
| 3.3.2.3 Krigagem .....   | 53 |
| 3.3.2.4 Exemplos de Aplicação .....  | 54 |
| 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA .....   | 57 |
| 4.1 Localização, Aspectos Físicos e Sociais .....                          | 57 |
| 4.2 Aspectos Geológicos .....  | 58 |
| 4.3 Aspectos Geomorfológicos e Pedológicos .....                           | 61 |
| 4.4 Aspectos Geotécnicos.....  | 63 |
| 4.5 Aspectos da Hidrologia .....   | 67 |
| 4.6 Aspectos da Hidrogeologia .....  | 70 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.7 Aspectos do Clima.....   | 71  |
| 4.8 Aspectos da Vegetação.....   | 72  |
| 5 MÉTODO.....  | 73  |
| 5.1 Planejamento.....  | 74  |
| 5.2 Revisão Bibliográfica.....   | 75  |
| 5.3 Coleta e tratamento dos dados .....  | 75  |
| 5.3.1 Base Topográfica Digital.....  | 75  |
| 5.3.2 Modelo Digital do Terreno (MDT).....                                     | 77  |
| 5.3.3 Mapa de declividade .....  | 79  |
| 5.3.4 Mapa de Bacias Hidrográficas .....                                       | 79  |
| 5.3.5 Mapa Geológico.....  | 79  |
| 5.3.6 Seleção e organização dos boletins de sondagens .....                    | 80  |
| 5.3.7 Estruturação das planilhas do banco de dados das sondagens.....          | 81  |
| 5.3.8 Entrada dos dados de sondagens .....                                     | 84  |
| 5.3.8.1 Cotas das bocas dos furos de sondagens.....                            | 85  |
| 5.4 Interpolações.....   | 86  |
| 5.4.1 Superfície Freática.....   | 86  |
| 5.4.2 Índice de Resistência a Penetração ( $N_{SPT}$ ).....                    | 87  |
| 5.4.3 Impenetrável.....  | 89  |
| 5.4.4 Validação.....   | 90  |
| 5.4.5 Cartas para Fundações .....  | 90  |
| 5.4.6 Etapas de Campo .....  | 90  |
| 6 RESULTADOS E ANÁLISES.....   | 92  |
| 6.1 Base Topográfica Digital .....   | 92  |
| 6.1.1 MDT e Mapas Derivados .....  | 92  |
| 6.2 Boletins de Sondagens, Locação e Inserção dos Furos no Banco de Dados..... | 100 |
| 6.2.1 Estruturação das Planilhas do Banco de Dados das Sondagens.....          | 104 |
| 6.3 Interpolações.....   | 108 |
| 6.3.1 Superfície Freática.....   | 108 |
| 6.3.1.1 Topo To Raster .....   | 114 |
| 6.3.1.2 Krigagem ordinária.....  | 116 |
| 6.3.2 MDT Menos a Superfície Freática .....                                    | 120 |
| 6.3.3 Comparação Entre Períodos De Chuvas – Seco .....                         | 122 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 6.3.4   | Índice de Resistência à Penetração ( $N_{SPT}$ ) .....                        | 125 |
| 6.3.5   | Setor 1.....  | 127 |
| 6.3.5.1 | Parâmetros Geoestatísticos .....  | 128 |
| 6.3.5.2 | Profundidade: 1 a 5 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster ..... | 131 |
| 6.3.5.3 | Profundidade: 6 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster .....     | 135 |
| 6.3.5.4 | Profundidade: 10 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster .....    | 139 |
| 6.3.5.5 | Profundidade: 14 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster .....    | 142 |
| 6.3.6   | Setor 2.....  | 146 |
| 6.3.6.1 | Parâmetros Geoestatísticos .....  | 147 |
| 6.3.6.2 | Profundidade: 1 a 5 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster.....  | 149 |
| 6.3.6.3 | Profundidade: 12 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster .....    | 152 |
| 6.3.7   | Setor 3.....  | 156 |
| 6.3.7.1 | Parâmetros Geoestatísticos .....  | 157 |
| 6.3.7.2 | Profundidade: 1 a 5 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster.....  | 159 |
| 6.3.7.3 | Profundidade:12 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster .....     | 162 |
| 6.3.8   | Impenetrável à Percussão; $N_{SPT} > 50$ .....                                | 166 |
| 6.4     | validação das estimativas .....   | 170 |
| 6.5     | Mapas para uso de Fundações .....   | 177 |
| 6.5.1   | Tensão admissível para Fundações Diretas / Superficiais .....                 | 177 |
| 6.5.2   | Fundações Profundas.....  | 184 |
| 7       | CONCLUSÕES .....  | 188 |
| 8.      | REFERÊNCIAS.....  | 193 |
|         | APÊNDICE A .....  | 211 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1 Esquema ilustrativo do aparato de realização do SPT (Schnaid,2000). .....   | 20 |
| Figura 3.2 Boletim de sondagem (Concresolo, 2008). .....   | 22 |
| Figura 3.3 Exemplo de semivariograma (Camargo, 1997). .....  | 50 |
| Figura 3.4 Representação gráfica de semivariogramas experimentais e modelos teóricos (Camargo, 1997). .....  | 52 |
| Figura 4.1 Localização do município de João Pessoa – PB (Nascimento, 2008). .....  | 58 |
| Figura 4.2 Quadro resumo da situação estratigráfica das unidades geológicas da área de estudo. Fonte: Coutinho (1967) e de Martins (2006). .....   | 59 |
| Figura 4.3 Mapa com as principais unidades geológicas presentes na área de estudo. Fonte: Coutinho (1967) e Martins (2006). .....  | 60 |
| Figura 4.4 Falésias mortas. Timbó (fotos: A. S. T. de MELO, 1998 apud MELO; ALVES; GUIMARÃES, 2001). .....   | 62 |
| Figura 4.5 Perfil praiial de trecho da praia de Manaíra em janeiro de 2005 (a) e em junho de 2005 (b) (as rochas aflorando são na verdade de obras anteriores de contenção do processo erosivo – na foto (a) elas se encontram soterradas pelos sedimentos). Furrier (2007). ..... | 63 |
| Figura 4.6 Mineração em área urbana na cidade de João Pessoa. ....   | 64 |
| Figura 4.7 Mapa com as principais bacias hidrográficas presentes na área de estudo. ....   | 69 |
| Figura 4.8 Pluviosidade média mensal de João Pessoa, no período de 1912 a 1985 (SUDENE, 1990 apud FURRIER, 2007). .....  | 72 |
| Figura 5.1 Ilustração do arquivo txt com os parâmetros de entrada do módulo <i>Topo to raster</i> . .....  | 78 |
| Figura 5.2 Esquema ilustrativo da estrutura das tabelas .....  | 83 |
| Figura 5.3 Esquema representando a diferença de nível entre a cota da boca do furo de sondagem nos casos com realização de cortes no terreno anteriores a execução do ensaio. ....   | 86 |
| Figura 6.1 Articulação das folhas topográficas. ....   | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.2 Segmento das folhas topográficas de João Pessoa – PB. ....  | 94  |
| Figura 6.3. Segmento da Base topográfica digital (elementos vetorizados). ....   | 95  |
| Figura 6.4 Ilustração do Mapa Hipsométrico obtido a partir do MDT no formato <i>grid</i> . ....                              | 96  |
| Figura 6.5 Comparação entre as curvas de nível originais e as interpoladas a partir do MDT grid com 4 m de espaçamento. .... | 97  |
| Figura 6.6 Mapa de declividade obtido a partir do MDT. ....  | 99  |
| Figura 6.7 Croqui com locação dos furos de sondagem SP1 e SP2 (Concresolo, 2007). ...  | 100 |
| Figura 6.8 Perfil de sondagem SP1 (Concresolo, 2007). ....   | 101 |
| Figura 6.9 Perfil de sondagem SP2 (Concresolo, 2007). ....   | 102 |
| Figura 6.10 Distribuição das sondagens inseridas no banco de dados e especificação das utilizadas nas modelagens. ....       | 103 |
| Figura 6.11 Tabela de atributos do arquivo shape de pontos referentes aos furos de sondagem. ....                            | 105 |
| Figura 6.12 Tabela em formato dBase contendo os atributos das sondagens que variam com a profundidade. ....                  | 106 |
| Figura 6.13 Comando <i>join</i> , que gerencia a ligação entre tabelas. ....   | 107 |
| Figura 6.14 Tabela resultante da ligação. ....   | 108 |
| Figura 6.15 Disposição dos furos em que foi alcançado o NA. ....   | 109 |
| Figura 6.16 Exemplo de perfil de sondagem com NA referente a aquífero suspenso. ....   | 112 |
| Figura 6.17 Localização dos poços utilizados como dados adicionais. ....   | 113 |
| Figura 6.18 Superfície freática para o período seco do ano por meio do Topo to Raster. ...                                   | 115 |
| Figura 6.19 Variograma omnidirecional para a variável cota do NA. ....   | 117 |
| Figura 6.20 Validação cruzada com a krigagem ordinária para a variável N.A. ....   | 117 |
| Figura 6.21 Superfície freática para o período seco do ano por meio de krigagem ordinária. ....                              | 118 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.22 Subtração: MDT menos a superfície freática (diferença em metros). .....   | 121 |
| Figura 6.23 Superfície freática para o período chuvoso do ano por meio do Topo to Raster.<br>.....                                  | 123 |
| Figura 6.24 Superfície freática para o período seco do ano por meio do Topo to Raster. ..   | 124 |
| Figura 6.25 Setores utilizados nas interpolações do $N_{SPT}$ . .....   | 126 |
| Figura 6.26 $N_{SPT}$ nos diferentes níveis de profundidade no setor 1. ....  | 127 |
| Figura 6.27 Variograma omnidirecional para o $N_{SPT}$ médio entre as profundidades de 1 e 5m.<br>.....                             | 129 |
| Figura 6.28 Variograma omnidirecional para o $N_{SPT}$ a profundidade de 6 m.....   | 129 |
| Figura 6.29 Variograma omnidirecional para o $N_{SPT}$ a profundidade de 10 m.....  | 130 |
| Figura 6.30 Variograma omnidirecional para o $N_{SPT}$ a profundidade de 14 m.....  | 130 |
| Figura 6.31 Interpolação do valor médio do $N_{SPT}$ entre 1 e 5 m de profundidade no setor 1<br>(Krigagem ordinária). .....        | 132 |
| Figura 6.32 Interpolação dos valores do valor médio do $N_{SPT}$ entre 1 e 5 m de profundidade<br>no setor 1(Topo to Raster). ..... | 133 |
| Figura 6.33 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 6 m de profundidade no setor 1 (Krigagem<br>ordinária). .....                   | 136 |
| Figura 6.34 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 6 m de profundidade no setor 1(Topo to<br>Raster).....                          | 137 |
| Figura 6.35 Quadro com amostras obtidas nos ensaios com $N_{SPT} \leq 2$ a 6 metros de<br>profundidade no Setor 1.....              | 138 |
| Figura 6.36 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 10 m de profundidade no setor 1 (Krigagem<br>Ordinária).....                    | 139 |
| Figura 6.37 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 10 m de profundidade no setor 1(Topo to<br>Raster).....                         | 141 |
| Figura 6.38 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 14 m de profundidade no setor 1(Krigagem<br>Ordinária).....                     | 142 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.39 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 10 m de profundidade no setor 1(Topo to Raster).....                            | 144 |
| Figura 6.40 Quadro com amostras obtidas nos ensaios com $N_{SPT} \leq 2$ a 14 metros de profundidade no Setor 1. ....               | 145 |
| Figura 6.42 Variograma omnidirecional para o $N_{SPT}$ médio entre as profundidades de 1 e 5m no Setor 2. ....                      | 148 |
| Figura 6.43 Variograma omnidirecional para o $N_{SPT}$ médio 12 m no Setor 2. ....  | 148 |
| Figura 6.44 Interpolação dos valores do valor médio do $N_{SPT}$ entre 1 e 5 m de profundidade no setor 2 (Krigagem Ordinária)..... | 150 |
| Figura 6.45 Interpolação dos valores do valor médio do $N_{SPT}$ entre 1 e 5 m de profundidade no setor 2 (Topo to Raster).....     | 151 |
| Figura 6.46 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 12 m de profundidade no setor 2 (Krigagem ordinária). ....                      | 154 |
| Figura 6.47 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 12 m de profundidade no setor 2 (Topo to Raster).....                           | 155 |
| Figura 6.48 Histogramas do $N_{SPT}$ no Setor 3.....  | 156 |
| Figura 6.49 Variograma omnidirecional para o $N_{SPT}$ médio entre as profundidades de 1 e 5m no setor 3.....                       | 158 |
| Figura 6.50 Variograma omnidirecional para $N_{SPT}$ a 12 metros de profundidade no setor 3. ....                                   | 158 |
| Figura 6.51 Interpolação do valor médio do $N_{SPT}$ entre 1 e 5 m de profundidade no setor 3 (Krigagem ordinária). ....            | 159 |
| Figura 6.52 Interpolação dos valores do valor médio do $N_{SPT}$ entre 1 e 5 m de profundidade no setor 1(Topo to Raster).....      | 160 |
| Figura 6.53 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 12 m de profundidade no setor 3 (Krigagem ordinária). ....                      | 162 |
| Figura 6.54 Interpolação dos valores de $N_{SPT}$ a 12 m de profundidade no setor 3 (Topo to Raster).....                           | 163 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura 6.55 | Contexto urbano e geologia no Setor 3. ....  | 165 |
| Figura 6.56 | Profundidade do impenetrável à percussão ( $N_{SPT} > 50$ ) para o Setor 1. ....                     | 167 |
| Figura 6.57 | Profundidade do impenetrável à percussão ( $N_{SPT} > 50$ ) para o Setor 2. ....                     | 168 |
| Figura 6.58 | Profundidade do impenetrável à percussão ( $N_{SPT} > 50$ ) para o Setor 3. ....                     | 169 |
| Figura 6.59 | Sondagens utilizadas na validação das estimativas do Setor 1. ....                                   | 171 |
| Figura 6.60 | Sondagens utilizadas na validação das estimativas do Setor 2. ....                                   | 172 |
| Figura 6.61 | Sondagens utilizadas na validação das estimativas do Setor 3. ....                                   | 173 |
| Figura 6.62 | Tensão Admissível no Setor 1 em MPa. ....  | 178 |
| Figura 6.63 | Tensão Admissível no Setor 2 em MPa. ....  | 179 |
| Figura 6.64 | Tensão Admissível no Setor 3 em MPa. ....  | 180 |
| Figura 6.65 | Setor 1: Mapa com áreas propícias ao apoio de estacas de compactação (profundidade – 6 metros). .... | 183 |
| Figura 6.66 | Mapa de uso para fundações – 14 metros (Setor 1). ....   | 185 |
| Figura 6.67 | Mapa de uso para fundações – 12 metros (Setor 2). ....   | 186 |
| Figura 6.68 | Mapa de uso para fundações – 12 metros (Setor 3). ....   | 187 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 5.1 Principais etapas e atividades da pesquisa.....   | 73  |
| Tabela 5.2 Códigos das folhas que compõem a Carta Plani-altimétrica de João Pessoa – B.<br>.....   | 76  |
| Tabela 5.3 Sondagens utilizadas na pesquisa .....  | 85  |
| Tabela 5.4 Intervalos obtidos para as classes de valores de $N_{SPT}$ , de acordo com a<br>consistência/ compacidade dos solos.....        | 89  |
| Tabela 6.1 Classes de declividade e áreas.....   | 98  |
| Tabela 6.2 Parâmetros básicos do modelo variográfico ajustado para a superfície freática<br>.....  | 116 |
| Tabela 6.3 Parâmetros básicos do modelo variográfico ajustado para as interpolações do<br>Setor 1.....                                     | 128 |
| Tabela 6.4 Camada 1 – 5 m: Setor 1.....  | 134 |
| Tabela 6.6 Camada 1 – 5 m: Setor 2.....  | 149 |
| Tabela 6.7 Parâmetros básicos do modelo variográfico ajustado para as interpolações do   |     |
| Tabela 6.8 Camada 1 – 5 m: Setor 3.....  | 161 |
| Tabela 6.9 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do $N_{SPT}$<br>médio entre 1 e 5 metros (RMS = 1,53)..... | 174 |
| Tabela 6.10 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do $N_{SPT}$ a<br>6 metros (RMS = 3,2) .....              | 174 |
| Tabela 6.11 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do $N_{SPT}$ a<br>10 metros (RMS = 4,8) .....             | 175 |
| Tabela 6.12 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do $N_{SPT}$ a<br>14 metros (RMS = 5,4) .....             | 175 |
| Tabela 6.13 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 2 para o valor do $N_{SPT}$<br>médio entre 1 e 5 metros (RMS = 3,1)..... | 176 |

Tabela 6.14 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 2 para o valor do  $N_{SPT}$  a 12 metros (RMS = 4,2)..... 176

Tabela 6.15 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 3 para o valor do  $N_{SPT}$  médio entre 1 e 5 metros (RMS = 5,3) ..... 177

# 1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que o meio ambiente vem sofrendo freqüentes e intensas modificações e impactos, os quais, na maioria das vezes, são relacionados à atividade antrópica.

No que diz respeito ao solo, alguns desses processos implicam em conseqüências negativas sobre questões sócio-econômicas, claramente vinculadas aos fenômenos ambientais. Tais conseqüências geralmente se mostram na ocorrência de erosão, inundações, recalques, comprometimento da fertilidade de solos, contaminação de águas superficiais e subterrâneas e em muitas outras manifestações da natureza. Esses impactos negativos devem-se em parte ao não conhecimento do homem em relação ao meio físico, com suas potencialidades e vulnerabilidades frente aos diferentes tipos de uso e ocupação.

Mostra-se necessário uma constante inovação e aprimoramento de conhecimentos e procedimentos técnicos e científicos direcionados a atividades de planejamento e gestão, como forma de previsão e auxílio à prevenção dos efeitos indesejáveis.

Bancos de dados geológico-geotécnicos têm se mostrado importantes ferramentas de auxílio a tais atividades. Entretanto, as informações utilizadas nessas ferramentas nem sempre se encontram disponíveis e com fácil acessibilidade.

Este trabalho trata da estruturação de um sistema de apoio à decisão em ambiente de SIG; envolve a implementação de um banco de dados geológico-geotécnicos da cidade de João Pessoa – PB, a partir de sondagens à percussão com *Standard Penetration Test* (SPT), a ser utilizado como ferramenta de auxílio às ações de planejamento e gestão

urbanas do município, assim como instrumento adicional e alternativa técnico-científica em atividades do meio acadêmico e profissional.

As sondagens com realização do ensaio SPT representam o tipo de investigação geotécnica de campo mais comum na prática brasileira. As informações obtidas com o ensaio atuam como subsídio fundamental ao planejamento, projeto e execução de obras geotécnicas, uma vez que permitem a disponibilização de parâmetros essenciais às etapas de cálculo, análise e monitoramento dos mais diversos fins em obras civis (textura do solo, índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ), profundidade do nível d'água (N.A.), compactidade/consistência, etc).

A cidade de João Pessoa, capital do estado da Paraíba, já evidencia diversas manifestações ambientais negativas decorrentes da má utilização ou ausência de recursos direcionados às atividades de planejamento.

A pesquisa viabiliza a obtenção de informações geológico-geotécnicas importantes, de forma simples e concentrada, por meio do banco de dados digital que permitirá o armazenamento, fácil consulta e visualização dessas informações. Esse tipo de recurso atuará como valioso subsídio aos órgãos responsáveis pelo gerenciamento urbano e também ao meio acadêmico.

Dentro deste contexto mais geral, a pesquisa abrangeu atividades preparatórias fundamentais para a estruturação do Banco de Dados e para o posterior desenvolvimento das análises e modelagens espaciais propriamente ditas, destacando-se entre estas, a construção da base topográfica digital da área de estudo, a produção do Modelo Digital do Terreno e o processo de localização e incorporação das informações geológicas-geotécnicas obtidas nos boletins impressos das sondagens à percussão.

Nas atividades de análise e modelagens espaciais foram utilizados métodos de interpolação determinísticos (Topo to Raster) e geoestatísticos (Krigagem Ordinária). As principais variáveis espaciais estudadas foram profundidade do lençol freático (N.A.) e  $N_{SPT}$ , visando subsidiar obras de fundação.

Os principais produtos cartográficos gerados foram mapas do lençol freático, assim como mapas com uso sugerido para fundações em três setores distintos da área de estudo e para diferentes profundidades.

Outra etapa importante da pesquisa envolveu a realização de um estágio no exterior, na Universidad de Granada, Espanha, sob a supervisão do professor Clemente Irigaray

Fernandez, integrante do Departamento de Engenharia Civil da mencionada universidade, com larga experiência com o desenvolvimento de modelagens espaciais em ambiente do SIG ArcGis.

O estágio permitiu enriquecer teórica e praticamente o trabalho realizado, permitindo análises e tratamentos do objeto de estudo e promovendo intercâmbio técnico e científico entre as instituições envolvidas.

A pesquisa teve o apoio financeiro viabilizado com uma bolsa de doutorado da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo); assim como o estágio no exterior contou com uma bolsa de doutorado sanduíche pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Além da presente introdução (Capítulo 1), esta tese está estruturada nos capítulos descritos a seguir.

O Capítulo 2 expõe as hipóteses e os objetivos propostos na pesquisa.

O Capítulo 3 contempla a revisão bibliográfica abrangendo os temas técnico – científicos que deram embasamento teórico para o trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a caracterização da área de estudo.

O Capítulo 5 apresenta e analisa os resultados obtidos com a pesquisa.

O Capítulo 6 sintetiza as conclusões obtidas com os trabalhos realizados e propõe algumas linhas de investigação para continuidade da pesquisa.

## 2 HIPÓTESES DE TRABALHO E OBJETIVOS

As hipóteses de trabalho que nortearam a presente pesquisa foram:

- É técnico e cientificamente viável utilizar os métodos de interpolação determinísticos e geoestatísticos disponíveis nos programas SIG para generalizar e estimar as variáveis geotécnicas espaciais (profundidade do NA e  $N_{SPT}$ ) obtidas em furos individuais de sondagens à percussão.
- É possível estabelecer previsões do comportamento do terreno para obras de fundações e de outros aspectos geológico – geotécnicos de interesse aos projetos de engenharia civil a partir destas interpolações

Com base nas hipóteses de trabalho mencionadas anteriormente foram definidos os objetivos da pesquisa.

O objetivo geral proposto foi a estruturação de um banco de dados em SIG com variáveis espaciais de natureza geológico geotécnica obtidas em furos individuais de sondagens à percussão com ensaio Standard Penetration Test (SPT).

Vinculados a este objetivo geral foram definidas metas específicas para permitir a análise e a previsão de comportamento geológico – geotécnico dos terrenos utilizando este banco de dados em SIG. Tais metas específica abrangeram:

- Aplicação e avaliação de métodos determinísticos e probabilísticos de interpolação das profundidades do nível d'água (lençol freático ou livre) e dos valores de  $N_{SPT}$  obtidos nas sondagens à percussão



- Geração de documentos cartográficos com as generalizações espaciais obtidas para subsidiar a avaliação preliminar dos terrenos com relação às obras de fundações e outras aplicações geotécnicas.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A síntese da revisão bibliográfica realizada durante a pesquisa foi organizada em quatro grandes blocos que cobrem os principais temas técnico – científicos abrangidos pelo estudo, a saber: Sondagens à Percussão, Banco de Dados e SIG, Métodos de Interpolação Probabilísticos – Geoestatísticos.

### 3.1 SONDAGENS A PERCUSSÃO E O *STANDARD PENETRATION TEST* (SPT)

#### 3.1.1 Aspectos Gerais, Execução e Representação

A sondagem a percussão, ou sondagem de simples reconhecimento, é executada com a finalidade de se obter amostras pouco deformadas e valores quantitativos de resistência dos solos por meio de ensaios expeditos padronizados, denominados SPT (Standard Penetration Test) - também conhecidos como ensaios de penetração (SOUZA; SILVA; IYOMASA, 1998).

Ultimamente, vem crescendo o campo de mapeamento com caracterização geológico – geotécnica e estimativas de comportamento a partir de informações obtidas em sondagens de simples reconhecimento (LIMA, 1997; LOLLO, 1999; CULSHAW E NORTHMORE, 2002).

O Standard Penetration Test (SPT), segundo Schnaid (2000), é reconhecidamente a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação em praticamente todo o mundo, permitindo uma indicação da densidade de solos granulares, também aplicado à identificação da consistência de solos coesivos e mesmo de rochas brandas. O autor afirma que apesar da normalização do ensaio em 1958 pela ASTM, é comum em todo o mundo o uso de procedimentos não padronizados e equipamentos diferentes do padrão internacional (IRTP / ISSMFE), considerado como referência para normas de características variáveis em diversos países. Na América do Sul a normalização norte-americana é utilizada com frequência, enquanto o Brasil tem normalização própria, na qual se incluem a NBR 6484/2001, NBR 8036/83 e NBR 7250/82.

O ensaio consiste basicamente na cravação de um amostrador padrão no solo, através da queda livre de um peso de 65 kg caindo de uma altura determinada (75 cm). Para cada metro de profundidade, são registrados os números de golpes necessários à penetração de cada 15 cm, dos primeiros 45 cm. O índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) é dado pela soma de golpes para a penetração dos últimos 30 cm (dentro dos 45 cm já citados). A penetração persiste até o limite de sondagem, especificado pela norma e algumas vezes dado pelo impenetrável no substrato rochoso. Pelo ensaio, obtém-se amostras dos tipos de solo por metro penetrado, profundidade do nível d'água e do limite de sondagem, entre outros dados.

A norma NBR 6484 considera como procedimentos executivos das sondagens de simples reconhecimento: a perfuração a trado, o avanço por lavagem e a realização do SPT. Os equipamentos utilizados para a execução de sondagens de simples reconhecimento com SPT são: tripé com roldana, tubos de revestimento, sapata de revestimento, hastes de lavagem e penetração, amostrador padrão, martelo padronizado para cravação (65kg), cabeças de bater dos tubos de revestimento e das hastes de cravação, haste-guia do martelo, baldinho com válvula de pé, bomba d'água, trépano de lavagem, trados concha e helicoidal, medidor do nível d'água, fita métrica ou trena e recipientes para amostras (esquema ilustrado na Figura 3.1). A norma também exhibe especificações, dimensões e detalhes desses elementos utilizados (tubos, hastes e trados).

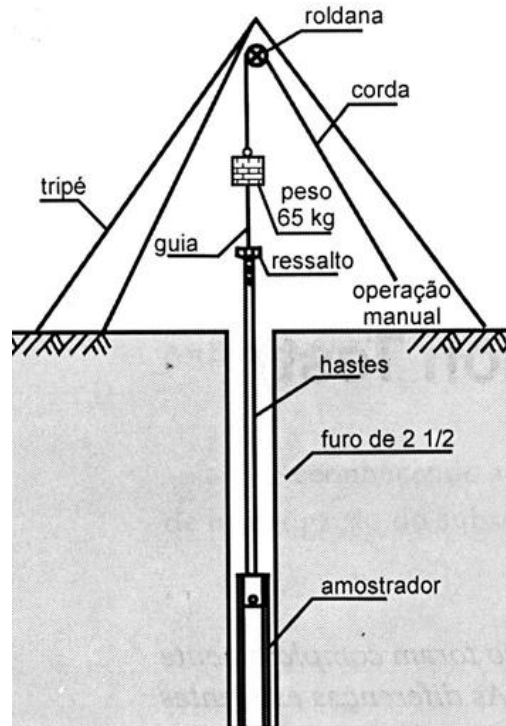


Figura 3.1 Esquema ilustrativo do aparato de realização do SPT (Schnaid,2000).

O processo de perfuração é iniciado com uso do trado concha, seguindo com o uso do trado helicoidal quando não for mais possível prosseguir com o primeiro. A etapa de perfuração a trado segue executada até acima do nível freático. Ao lençol ser atingido ou de condições de impenetrabilidade ao trado, o avanço é realizado mediante a utilização do trépano de lavagem com circulação de água, atendendo aos critérios apresentados na NBR 6484. A partir desta fase, torna - se obrigatório do uso dos tubos de revestimentos e o emprego de lamas de estabilização em situações mais particulares de instabilidade das paredes do furo.

O limite de sondagem é especificado pela NBR 6484 de acordo com vários critérios de contagem do  $N_{SPT}$  em função de determinadas penetrações obtidas. A ABGE (1999) indica como material impenetrável o correspondente à penetração inferior a 5 cm após 10 golpes consecutivos ou nos casos em que o número de golpes for superior a 50. Entretanto, Fonteles (2003) adverte que o limite de impenetrabilidade é condicionado pelo tipo de solução de elemento estrutural de fundação a ser utilizado, dentre outras restrições.

De posse dos perfis individuais preliminares de cada sondagem obtidos após a realização do ensaio, desenha-se, com as respectivas convenções, o perfil do subsolo de cada sondagem, que deve mostrar todas as camadas ou horizontes de solo encontrados, as

posições do nível d'água, o número de golpes  $N_{SPT}$  necessários à cravação dos últimos 30 cm do amostrador, profundidade do limite de sondagem e demais informações úteis que forem observadas (Quaresma et al., 1998). A Figura 3.2 exibe um perfil esquematizado em um boletim de sondagem.

Fonteles (2003) pontua que o baixo custo de operação em relação a outros ensaios de campo são contrastados pela gama de fatores envolvidos na execução propriamente dita da sondagem que, por consequência, acabam influenciando os valores do  $N_{SPT}$ . Os fatores são basicamente de duas ordens: material, representado pelos equipamentos e; humana, ou seja, as ações empreendidas pelos operadores do equipamento. Em comparação entre os processos executivos e equipamentos de sondagens com SPT segundo as normas da ABNT e da ASTM, Baillot & Ribeiro Júnior (1999) observam que as falhas humanas inerentes ao processo de liberação manual, tais como a imprecisão da altura de soltura, podem constituir fatores influentes nos valores do  $N_{SPT}$ , em detrimento dos valores analisados obtidos com o mecanismo automático de alçamento e liberação do martelo.

Diversos autores vêm estudando a influência da energia de ensaio nos resultados do SPT, tais como: Belincanta (1998), Aoki e Cintra (2000), Howie et. al. (2003), Odebrecht et. al. (2005), e, mais recentemente, Lukiantchuki, Oliveira e Esquivel (2011), Lukiantchuki, Esquivel e Bernardes (2011).

No Brasil, como um dos primeiros que pode ser mencionado é o de Belincanta (1998) que, em trabalho que avalia tais aspectos, e no qual experimenta um conjunto de equipamentos e procedimentos, busca identificar que componentes e quais suas contribuições no processo de transferência de energia mecânica geratriz do fenômeno de penetração do amostrador no solo. Com uso de instrumentação, o autor utiliza mecanismos manuais e automáticos de alçamento e liberação do martelo, composição de hastes novas e usadas, a utilização de cabo de aço e cordas flexíveis, entre outros.

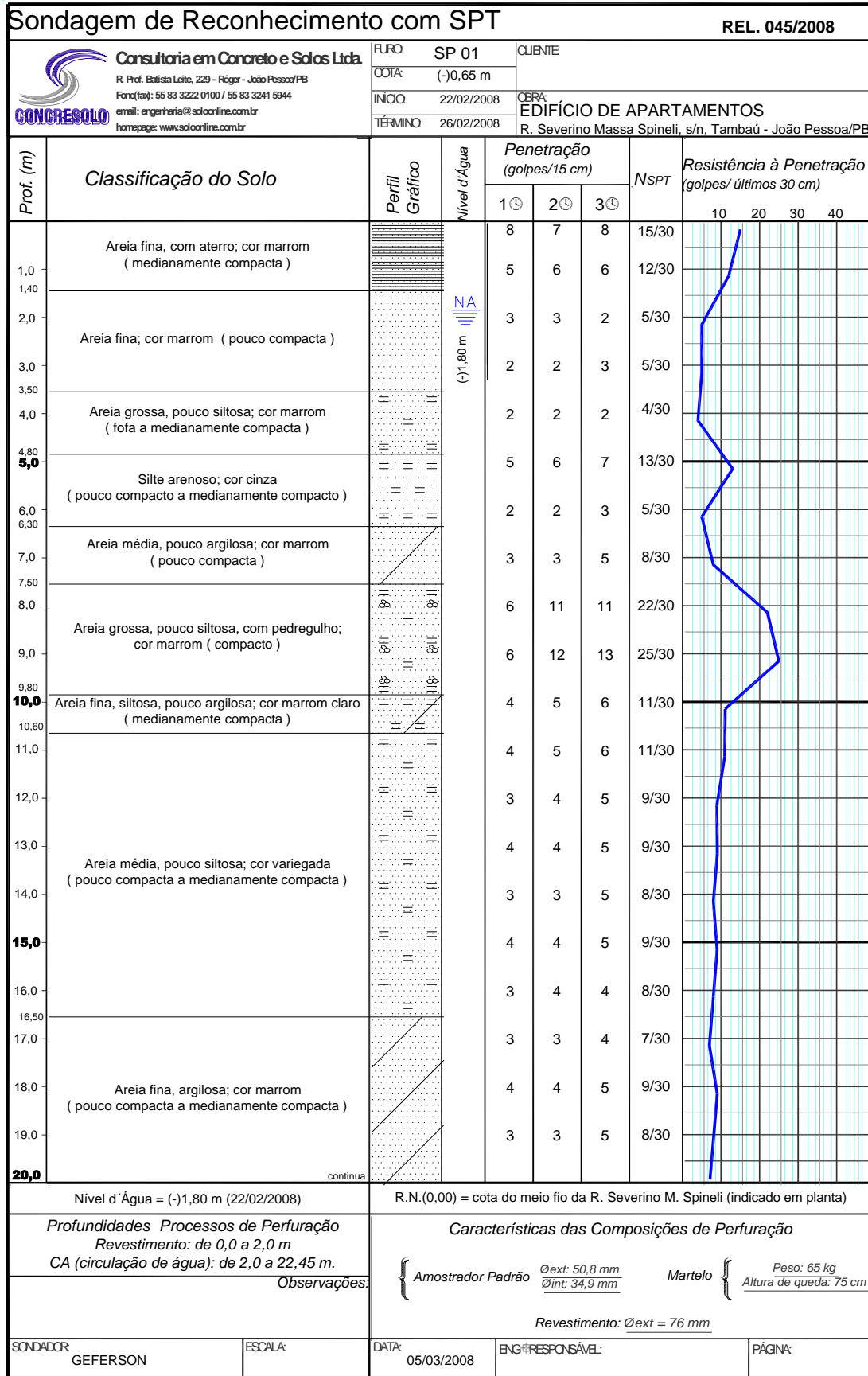


Figura 3.2 Boletim de sondagem (Concresolo, 2008).

Fonteles (2003) lista como principais observações acerca da eficiência do SPT, em função dos aparatos e procedimentos abordados, segundo Belincanta (1998) e Belincanta & Cintra (1998):

- o procedimento de cravação direta do amostrador sem a prévia perfuração por trado implica em valores de  $N_{SPT}$  mais altos do que aqueles obtidos em conformidade com o procedimento preconizado pela ABNT;

- o estado de conservação das hastes influenciam a eficiência, ou seja, composições mais antigas tendem a diminuir a eficiência;

- a eficiência foi maior nos ensaios em que se utilizou acionamento da queda do martelo por gatilho em contraposição àqueles com acionamento manual;

- não foi constatada diferença significativa de eficiência nos ensaios em que se utilizou cabo de aço e corda, estando ambos em bom estado de conservação;

- o uso ou não do coxim não se mostrou relevante do ponto de vista executivo e, portanto, pouco influencia a medida de eficiência do SPT.

A NBR 6122/96 cita as sondagens de reconhecimento à percussão como indispensáveis ao reconhecimento geotécnico para fins de projeto e execução de fundações. O índice de resistência à penetração é um guia útil na exploração de solos e na avaliação de condições do subsolo, desde que os resultados sejam interpretados corretamente (DAS, 2002). As abordagens modernas recomendam a correção do valor medido do  $N_{SPT}$  devido às limitações do ensaio, causadas por fatores que influenciam os resultados sem se relacionarem às características do solo, como o efeito da energia de cravação e do nível de tensões (SCHNAID, 2000).

### **3.1.2 Utilização, Parâmetros e Correlações**

Segundo Schnaid (2000), os dados de  $N_{SPT}$  geralmente são tratados sob duas classes de métodos: os indiretos e diretos. Os métodos indiretos utilizam os dados na previsão de parâmetros constitutivos, representativos do comportamento do solo obtidos por correlação com resultados de ensaios de campo e/ou laboratório. Nos métodos diretos, os dados são aplicados em formulações empíricas e/ou semi-empíricas com o intuito de prever um valor de tensão admissível ou o recalque de um elemento de fundação.

Vários autores sugerem correlações diversas a partir do  $N_{SPT}$ , usadas em estimativas de parâmetros geotécnicos (SKEMPTON, 1986; DÉCOURT, 1989; TEIXEIRA, 1996; TEIXEIRA; GODOY, 1996) e de módulo de deformabilidade em função da resistência de ponta do ensaio de cone (SCHMERTMANN, 1970). Também são apresentadas correlações utilizadas em cálculos de tensão admissível (MILITITSKY; SCHNAID, 1995) e de capacidade de carga (DÉCOURT; QUARESMA, 1978).

Aoki & Velloso (1975), desenvolveram um método assumindo que a carga admissível, para um elemento isolado, é representada pela soma das parcelas de resistência de ponta e da resistência lateral ao longo do fuste da fundação. Neste método, leva-se em consideração: os solos do perfil estratigráfico, valores de  $N_{SPT}$  para as resistências de ponta ( $R_p$ ) e lateral ( $R_l$ ) (obtidos por correlação com CPT) e coeficientes de correção relacionados ao tipo de elemento estrutural envolvido no cálculo.

A NBR 6484/2001 apresenta a compacidade dos solos grossos e os estados de consistência dos solos finos em função do  $N_{SPT}$ , mostrados nas Tabelas 3.1 e 3.2:

Tabela 3.1 compacidade de areias e siltes arenosos em função do  $N_{SPT}$ .

| $N_{SPT}$ | Compacidade              |
|-----------|--------------------------|
| $\leq 4$  | Fofa (o)                 |
| 5 – 8     | Pouco compacta (o)       |
| 9 -18     | Medianamente compacta o) |
| 19 – 40   | Compacta                 |
| > 40      | Muito compacta           |

Tabela 3.2 Consistência de argilas e siltes argilosos em função do  $N_{SPT}$ .

| $N_{SPT}$ | Consistência |
|-----------|--------------|
| $\leq 2$  | Muito mol    |
| 3 – 5     | Mole         |
| 6 -10     | Média        |
| 1 – 9     | Rija         |
| $\geq 20$ | Dura         |

Teixeira & Godoy (1996) propõem a seguinte correlação para a estimativa do módulo de deformabilidade quando não se dispõem de dados de ensaios de laboratórios nem de prova de carga sobre placa:

$$E = \alpha K N_{SPT} \quad (\text{Equação 1})$$

em que  $\alpha$  é um fator de correlação e  $K$  um coeficiente que relaciona a resistência de ponta do cone ( $q_c$ ) com o índice de resistência a penetração ( $N_{SPT}$ ) da sondagem SPT,



cujos valores, em função do tipo de solo, são apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Tabela 3.3 Fator  $\alpha$  (TEIXEIRA; GODOY, 1996).

| <b>Solo</b> | <b><math>\alpha</math></b> |
|-------------|----------------------------|
| Areia       | 3                          |
| Silte       | 5                          |
| Argila      | 7                          |

Tabela 3.4 Coeficiente K (TEIXEIRA; GODOY, 1996).

| <b>Solo</b>           | <b>K (MPa)</b> |
|-----------------------|----------------|
| Areia com pedregulhos | 1,1            |
| Areia                 | 0,9            |
| Areia siltosa         | 0,7            |
| Areia argilosa        | 0,55           |
| Silte arenoso         | 0,45           |
| Silte                 | 0,35           |
| Argila arenosa        | 0,3            |
| Silte argiloso        | 0,25           |
| Argila siltosa        | 0,2            |

Alves, Lopes e Aragão (2000) propõem um método de projeto de fundações superficiais em solo granular fofo melhorado com estacas de compactação. Foi sugerida a correlação para obtenção do módulo de deformabilidade do terreno melhorado em função do índice de resistência a penetração da sondagem SPT ( $N_{SPT}$ ):

$$E = \alpha N_{SPT} \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual  $\alpha$  depende do tipo de solo e, segundo os autores, se situa em uma faixa entre 1,5 e 3,0, sendo o valor mais baixo correspondente a solos arenosos e o valor mais alto a solos finos. O valor 2,5 é freqüentemente encontrado em areias finas ou siltosas ou argilosas.

Teixeira (1996) demonstrou fórmulas para a estimativa da tensão admissível de solos argilosos e arenosos, em função do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ):

- Solos argilosos: Partindo-se da fórmula de Skempton (1951), para capacidade de carga de fundações por sapata:  $\sigma_r = S_u N_c = 6 S_u$ . Considerando-se a correlação entre a resistência ao cisalhamento não-drenado e o  $N_{SPT}$ :  $S_u = 10 N$  (kPa) e o coeficiente de segurança em relação à ruptura de 3 resulta a tensão admissível, em MPa, de:

$$\sigma_a = \frac{N_{SPT}}{50} \quad (\text{Equação 3})$$

Recomenda-se utilizar esta correlação para o intervalo de  $5 < N_{SPT} < 25$

- Solos arenosos: Partindo-se da fórmula clássica de Terzaghi para capacidade de carga de fundações por sapata quadrada apoiadas em areia:

$$\sigma_r = \gamma \cdot H \cdot N_q + 0,4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (\text{Equação 4})$$

Considerando-se a correlação entre ângulo de atrito interno das areias com o  $N$ :  $\phi = \sqrt{20 \cdot N} + 15$ , para  $H = 1,5$  m,  $\gamma$  (peso específico) = 18 kN/m<sup>3</sup> e coeficiente de segurança em relação à ruptura de 3, resulta a tensão admissível:

$$\sigma_a = 50 + (10 + 4B) N_{SPT} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:  $B$  = lado da sapata;  $N_{SPT}$  = índice de resistência à penetração ( $5 < N_{SPT} < 25$ ) ( $B$  em metros e  $\sigma_a$  em kPa).

Cintra, Aoki e Albiero (2003) mencionam a seguinte fórmula (correlação empírica) como muito conhecida no meio técnico brasileiro para se estimar tensão admissível em fundações diretas por sapatas, em função do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ):

$$\sigma_a = \frac{N}{50} + q \quad (\text{Equação 6})$$

Em que o resultado é dado em MPa e  $N$  é o valor médio do  $N_{SPT}$  no bulbo de tensões (duas vezes a largura da sapata) e estaria idealmente entre 5 e 20 golpes. Os autores adicionam que a parcela  $q$  torna –se significativa em caso de tubulões.

Para fundações profundas, Cintra e Aoki (2010) listam valores limites de  $N_{SPT}$  para paradas (cotas de apoio) de diversos tipos de estacas (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 valores limites de  $N_{SPT}$  para paradas das estacas.

| Elemento estrutural              |               | Limite de $N_{SPT}$ para execução |
|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Estaca pré – moldada de concreto | $D < 30$ cm   | $15 < N_{SPT} < 25$               |
|                                  | $D > 30$ cm   | $25 < N_{SPT} < 35$               |
| Estaca de perfil metálico        |               | $25 < N_{SPT} < 55$               |
| Estaca tubada                    |               | $20 < N_{SPT} < 40$               |
| Estaca Strauss                   |               | $10 < N_{SPT} < 25$               |
| Estaca Franki                    | arenosos      | $8 < N_{SPT} < 15$                |
|                                  | argilosos     | $20 < N_{SPT} < 40$               |
| Estaca escavada com lama         |               | $30 < N_{SPT} < 80$               |
| Tubulão                          | Ar comprimido | $20 < N_{SPT} < 60$               |
|                                  | Céu aberto    | $20 < N_{SPT} < 60$               |
| Estaca hélice contínua           |               | $20 < N_{SPT} < 45$               |
| Estaca ômega                     |               | $20 < N_{SPT} < 40$               |
| Estaca raiz                      |               | $N_{SPT} > 60$                    |

### 3.2 BANCOS DE DADOS E SIG

Bancos de dados eletrônicos, comentados e analisados por vários autores, entre eles Bastos e Zuquette (2002), têm se mostrado instrumentos de gestão importantes no armazenamento e tratamento de informações, com potencial para serem largamente utilizados em diversas áreas.

Rengers et al. (2002) acentuam que o campo de sistemas de bancos de dados de armazenamento e recuperação de superfícies geotécnicas e informações de sondagens

sofre importante desenvolvimento, que se torna possível com a crescente velocidade de cálculo e capacidade de manejo de dados a baixo custo.

Augusto Filho (2005a) acrescenta que a implementação de banco de dados eletrônicos na gestão urbana vem se ampliando e consolidando em paralelo ao desenvolvimento e disseminação das ferramentas computacionais no que diz respeito a programas e computadores. Entretanto, o emprego específico de bancos de dados geotécnicos como mais um instrumento de gestão urbana já não conta com muitas experiências consolidadas nos municípios brasileiros.

### **3.2.1 Aspectos Gerais**

Ao longo dos anos, desde o surgimento dos primeiros sistemas gerenciadores de banco de dados (SGBD), foram criados vários modelos de dados geográficos que, apesar de muitas vezes terem a pretensão de se constituírem em ferramentas genéricas, refletem as condicionantes tecnológicas dos SGBDs à época de sua criação (BORGES; DAVIS, 2005).

Date (2004) define os bancos de dados como um método moderno de armazenamento e organização das informações ou certo número de arquivos referentes a uma determinada área de aplicação, seja um conjunto de aplicações circundando um conjunto de dados, ou ainda, um sistema computadorizado que guarda registros com objetivo geral de armazenar, manter e tornar a informação disponível aos diversos usos.

Essencialmente, um banco de dados é estruturado por arquivos de dados (data-base), um conjunto de softwares e uma linguagem de manipulação do banco de dados (sendo a linguagem de exploração padronizada a structure query language - SQL) (BASTOS, 2005).

A autora define que os bancos de dados possuem células básicas para armazenamento das informações especificadas como campos, que constituem espaços reservados aos diferentes tipos de dados (similares às colunas das tabelas) e os registros que devem ser tratados, como uma unidade de informação de um dado (as linhas das tabelas).

Independente de sua natureza e dos seus objetivos específicos de aplicação, um banco de dados em meio eletrônico deve envolver uma coleção integrada de informações interrelacionadas (texto, número, imagens, vídeos, sons, etc.), organizadas em meios de armazenamento (programas) de tal forma que podem ser tratados por vários usuários e para diferentes fins (AUGUSTO FILHO, 2005).

O autor enfatiza que a criação de um banco de dados passa pelo estabelecimento do seu projeto com a determinação dos elementos (informações) que serão incluídos e quais serão suas relações internas.

As principais estruturas dos bancos de dados modernos são do tipo hierárquica, relacional e em rede. O sistema gerenciador de um banco de dados - SGBD abrange um conjunto de módulos de programas que respondem pela organização, o armazenamento, o acesso, a segurança e a integridade das informações, atuando como interface entre os usuários, os programas de aplicação e os sistemas operacionais (BASTOS, 2005).

O Banco de dados em modelo relacional representa os dados e os relacionamentos por um conjunto de tabelas, cada uma com número de colunas e nomes únicos. O modelo relacional difere do modelo de rede e do hierárquico no que diz respeito ao uso de ponteiros ou elos, uma vez que os modelos relacionais recorrem a ligação lógica, que corresponde a intersecção entre as linhas (registros) e as colunas (campos) das tabelas. Atualmente, os sistemas de gerenciamento de bancos de dados estruturam-se à base do modelo relacional, que será abordado mais adiante.

### **3.2.2 Modelo Entidade e Relacionamento – MER (modelo conceitual)**

Conforme Setzer e Silva (2005), ao elaborar um projeto para organização de uma base de dados, inicialmente, deve-se entender de modo aprofundado a informação a ser trabalhada, por meio de um processo de abstração. Os autores mencionam que o modelo conceitual é importante na abstração das informações, podendo ser elaborado juntamente com o modelo descritivo. Um dos modelos conceituais mais usados em banco de dados é o modelo entidade relacionamento (MER), que se mostra mais simples e abrangente, usado para a representação das estruturas de informação. O MER é composto, além dos atributos, por entidades e relacionamentos. As entidades são os objetos do mundo real, enquanto o relacionamento é uma entidade que, por sua vez, une entidades, sendo os atributos, por fim, os valores dados às entidades e/ou aos relacionamentos.

### 3.2.3 Modelo Relacional

O modelo relacional é um dos mais utilizados no armazenamento de informações. Date (2004) caracteriza esse modelo como um sistema em que, no mínimo, os dados são vistos pelo usuário como tabelas que realizam operações do tipo seleção (restrição), projeção e junção. Setzer e Silva (2005) também definem um modelo relacional como um no qual os dados são representados por tabelas de valores, denominadas de relação, são bidimensionais e organizadas em linhas e colunas.

Um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) é um software que manipula o acesso à base de dados, executando operações necessárias à mesma (DATE, 2004). Assim, um SGBD realiza as seguintes funções: define os dados que serão trabalhados no banco; manipula os mesmos (recuperação e atualização); garante a segurança e a integridade dos dados; garante a existência de um dicionário de dados, esse contém informações sobre os dados (metadados) e assegura um bom desempenho do banco de dados, garantindo a realização das funções anteriormente citadas.

Bastos (2005) define o termo *Structure Query Language* (SQL) como uma linguagem padrão para exploração e comunicação dos dados, utilizada nos sistemas de gerenciamento de banco de dados relacionais. A SQL é usada como linguagem de definição de dados (DDL) e linguagem de manipulação de dados (DML). Significa uma linguagem estruturada para formulação de consultas ao banco de dados.

A autora lista os seguintes SGBDs comerciais existentes, dentre os quais alguns se destacam por serem os mais utilizados e completos:

- ORACLE - um dos mais conhecidos, sendo potente e eficiente, com extensão para orientação a objeto, apresentando uma linguagem proprietária de extensão ao SQL bem completa (PL/SQL), admite o uso de banco de dados distribuídos (em rede), pode ser executado em vários sistemas operacionais, inclusive, o Windows;

- INTERBASE - SGBD não muito popular, porém bastante eficiente para aplicações de pequeno e médio porte, tratando-se de um programa que está disponível livremente para cópia (política de expansão do software); sua concepção de SQL também é boa, o que facilita a programação da base de dados e possibilitando sua utilização para aplicações com multiusuários;

- DB2 (Database 2) – software histórico, sendo, assim como o ORACLE, um dos mais potentes e eficientes sistemas de gerenciamento de banco de dados, e ambos são mais usados em grandes aplicações;

- ACCESS - uma das mais conhecidas implementações do modelo relacional de banco de dados, representa uma plataforma para computador pessoal, (Elmasri, Navathe, 2000). Esse sistema de gerenciamento de banco de dados vem sendo bastante difundido dentro do mapeamento geotécnico pela sua facilidade na aquisição e de interação com alguns SIG existentes no mercado, como é o caso do ARCINFO, do IDRISI, do ARCGIS e do SPRING.

A maioria dos SGBDs comerciais utiliza o modelo relacional para organizar, armazenar e manipular sua base de dados. Setzer e Silva (2005) e Date (2004), apresentam os seguintes termos sobre o modelo relacional:

- Relação - pode ser pensada, como uma tabela de valores, ou um arquivo plano (bidimensional);

- Tupla - corresponde a uma linha de uma tabela, quando se pensa numa relação como uma tabela de valores, assim, observa-se numa tupla um conjunto de valores de dados que estão relacionados entre si;

- Atributo - corresponde a uma coluna de uma tabela, que apresenta sempre dados da mesma natureza na referida coluna;

- Cardinalidade - número de tuplas de uma relação;

- Grau - número de atributos de uma relação;

- Valores - dados do mundo real (que podem ser representados por números, caracteres, dados alfanuméricos, etc.);

- Chave primária - identificador único de uma tabela, sendo uma coluna ou uma combinação de colunas, que tem a propriedade de que nenhum par de linhas e colunas tenha valores iguais ao desta coluna;

- Base de dados ou banco de dados - conjunto de relações (tabelas);

Setzer e Silva (2005) citam ainda algumas propriedades que caracterizam um modelo relacional tradicional, tais como:

- as tabelas devem ter nomes diferentes uma das outras;
- cada célula de uma relação pode ser vazia ou conter um único valor, ser atômica, monovalorada;
- não podem existir duas linhas iguais; cada coluna deve ter um nome; duas colunas distintas devem ter nomes diferentes;
- a ordem das linhas é irrelevante do ponto de vista do usuário;
- a ordem das colunas deve também ser irrelevante,
- os valores de uma relação devem pertencer a um mesmo universo, que é o domínio da coluna;
- duas colunas podem pertencer ao domínio.

Date (2004) define ainda uma propriedade do modelo relacional, segundo a qual qualquer operação (seleção, inserir, apagar, etc.) entre relações (tabelas) sempre resulta em outra relação.

Bastos (2005) acrescenta que os operadores usados na SQL são os relacionais, lógicos e aritméticos. Os relacionais destinam-se a fazer operações condicionais ou de seleção, são estes: = (igual); > (maior que); >= (maior ou igual); < (menor); <= (menor ou igual); < > (diferente). *like* se mostra um poderoso operador, que permite selecionar apenas a linha que é especificada. Os operadores lógicos são usados em operações de decisão, comparação e seleção, e resultam das operações falso (false) ou verdadeiro (true). Podem ser destacados os seguintes operadores lógicos:

- and - usados para unir duas ou mais condições, o resultado da operação será verdadeiro (true) se as condições forem verdadeiras;
- or - operador usado para unir duas condições sendo o resultado da operação verdadeiro se, pelo menos, uma das condições for verdadeira.

Os operadores matemáticos ou aritméticos são basicamente quatro: + (adição); - (subtração); \* (multiplicação); / (divisão) e, ainda, % (módulo).



### 3.2.4 Bancos de Dados Geográficos

Banco de dados denominados de geográficos ou geoespaciais são sistemas de gerenciamentos capazes de armazenar e manipular dados com representações geométricas (ponto, linha e polígonos) e informações referenciadas geograficamente (SILBERSCHATZ; KORTH; SUDARSHAN, 2006). Lisboa Filho e Lochpe (1996); Antenucci (1991) apresentam conceitos de alguns termos relacionados a banco de dados geográficos, propostos pelo U.S. National Digital Cartographic Standard, e listados por Bastos (2005) da maneira a seguir:

Identidade é a denominação pela qual os elementos modelados em bancos de dados geográficos podem se apresentar; Atributo é a característica da entidade, normalmente não-espacial, a que se podem associar valores qualitativos e quantitativos.

Camada é a representação pela qual os objetos espaciais podem ser agrupados em temas. É acrescentado que os dados manipulados em bancos de dados geográficos apresentam as seguintes características: podem ser qualitativos e quantitativos; possuir localização geográfica e uma geometria; ter um relacionamento topológico (relações de vizinhança espacial); possuir um componente temporal, com características sazonais, temporais ou periódicas.

A aquisição dos dados geográficos depende da obtenção dos dados que, por sua vez, podem ser por meio de mapas e/ou levantamento de campo. Como métodos de aquisição de dados podem-se mencionar a digitalização em mesas ou com base em materiais obtidos por scanner e GPS. O armazenamento desses dados envolve a maneira como os quais serão modelados, os tipos de objetos gráficos utilizados, os tipos de relacionamentos entre os objetos espaciais (gráficos), a topologia dos objetos e os modelos de representação dos dados. Como objetos gráficos encontram-se os pontos, as linhas e os polígonos, e, ainda, a representação das entidades em superfícies contínuas, como é o caso dos modelos digitais de terreno e imagens (BASTOS, 2005).

Quanto ao tipo de relacionamento, os dados geográficos podem ser: os usados para construção de objetos complexos com base nos objetos mais simples; os que podem ser calculados com apoio em coordenadas; e os que precisam ser fornecidos no momento da entrada de dados gerando os relacionamentos entre os objetos espaciais (pontos, linhas e polígonos), entre eles a topologia. Tais relacionamentos entre os objetos gráficos podem proporcionar a realização de análises geográficas e espaciais com os dados armazenados.

### 3.2.5 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

A tecnologia dos sistemas de informação geográfica – SIG permite a captura de dados referenciados espacialmente, assim como a integração, análise e apresentação no gerenciamento dos mesmos. Muito usados em trabalhos de mapeamento geotécnico, o uso de SIG tem se mostrado de extrema importância em tais atividades, como as de caracterizações geológico - geotécnicas (VIEIRA et al.,2005) e outras também envolvidas com planejamento urbano (WALSBY, 1998; RUIZ; RAMON; ALORDA, 2002; CHACÓN et al., 2006; FERNÁNDEZ et al., 2008; PALACIOS, 2010).

Barros (1998) define os SIG como ferramentas de apoio ao geoprocessamento que consistem de dados integrados e controlados através de utilitários de software e hardware. Goodchild (1985) apud Barros (2000) conceitua SIG como um sistema integrado para capturar, armazenar, manipular, e analisar informações referentes às relações em uma natureza geográfica.

Ozemoy (1981) apud Paredes (1994) especifica os sistemas de informações geográficas da seguinte maneira: um conjunto automático de funções que provê aos profissionais especializados o armazenamento, a recuperação, manipulação e reprodução gráfica dos dados localizados geograficamente.

Rocha (2000) define o SIG como um sistema com capacidade para aquisição, armazenamento, tratamento, integração, processamento, recuperação, transformação, manipulação, modelagem, atualização, análise e exibição de informações digitais georreferenciadas, topologicamente estruturadas, associadas ou não a um banco de dados alfanuméricos.

Os SIG modernos resultaram da junção de várias disciplinas e técnicas de processamento de dados espaciais, tais como, desenho digital e computação gráfica; fotogrametria, análises espaciais utilizando dados raster, interpolação de dados pontuais e sensoriamento remoto (AUGUSTO FILHO, 2005).

Outra característica básica de um SIG é sua capacidade de armazenar a topologia de um mapa, ou seja, uma estrutura de relacionamentos espaciais, envolvendo vizinhança, proximidade e pertinência (CÂMARA, 1994). O autor ainda menciona que eles fornecem a estrutura ideal para as análises em diferentes escalas e utilizando diferentes formas de representação dos dados e resultados (mapas, imagens, tabelas, gráficos de tendência, etc). Também oferecem ferramentas que possibilitam a elaboração de modelagens


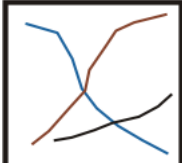

matemáticas, implantação de sistema de entrada e análise de dados em tempo real e a personalização do sistema para diferentes usuários.

A capacidade de acessar diversos modelos matemáticos e estatísticos, as informações nas bases de dados e delas retirar subsídios para o processo de tomada de decisões, permite estruturar o sistema de avaliação de riscos geológico-geotécnicos e ambientais em SIG como um Sistema de Apoio à Decisão – SAD, tornando-o uma ferramenta efetiva da política de melhoria contínua, princípio básico da gestão ambiental (JANSSEN, 1992; STAIR, 1998).

Borges (2004) informa que, ao trabalhar em um ambiente de sistema de informação geográfica, existem dois tipos de dados a serem armazenados: os dados gráficos – cartográficos; e os não gráficos - alfanuméricos.

O autor acrescenta que nos dados gráficos ou cartográficos existem duas formas a serem consideradas para a representação dos dados espaciais: o formato vetorial (vetor) e o matricial (raster). A estrutura do formato vetorial é composta por primitivas gráficas conhecidas como ponto, linha e polígono, que são representadas por coordenadas x e y em um sistema cartesiano (Tabela 3.6). No formato matricial os dados são representados em uma matriz de células composta por n linhas e m colunas. Cada célula da matriz é denominada de pixel (picture element). Cada pixel tem como peculiaridade um terceiro valor z que indica o valor do nível de cinza que pode variar de 0 – 255 tons (0 preto e 255 branco).

Tabela 3.6 Características das primitivas gráficas. (Yuaça – 1997, adaptado por Borges, 2004)

|    |    |   |
|---|---|--|
| <b>PONTOS</b>   | <b>LINHAS</b>   | <b>POLÍGONOS</b>   |
| <b>FORMATO</b>  | <b>FORMATO</b>  | <b>FORMATO</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Única coordenada x, y;</li> <li>• Sem comprimento;</li> <li>• Sem área.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadeia de coordenadas x, y com ponto inicial e final;</li> <li>• Tem comprimento mas não área.</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadeia de coordenadas com mesmo ponto inicial;</li> <li>• Tem comprimento e área.</li> </ul>              |
| <b>EXEMPLOS</b>   | <b>EXEMPLOS</b>   | <b>EXEMPLOS</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acidente de trânsito;</li> <li>• Árvore de rua;</li> <li>• Altitude;</li> <li>• Título de árvores;</li> <li>• Início e final de linhas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estradas;</li> <li>• Redes de drenagem;</li> <li>• Linhas de rotas;</li> <li>• Linhas de falhas;</li> <li>• Limites de áreas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parcelas;</li> <li>• Rodovias;</li> <li>• Construções;</li> <li>• Solos;</li> <li>• Distritos.</li> </ul> |

A tabela 3.7 apresenta a comparação entre os dois formatos, apresentando suas vantagens e desvantagens.

Tabela 3.7 Comparação entre formatos vetorial e raster (Carvalho, 2000)

| MODELO           | VANTAGENS  | DESVANTAGENS  |
|------------------|--|---|
| <b>VETORIAL</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrutura compacta;</li> <li>• Eficiência da análise de relacionamentos espaciais;</li> <li>• Feições são representadas precisamente, por pontos, linhas e polígonos.</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrutura complexa exigindo programas sofisticados e caros;</li> <li>• Operações de superposição de níveis de informação, mais complexas.</li> </ul>                     |
| <b>MATRICIAL</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicidade de implementação das operações de superposição;</li> <li>• Programas mais baratos e simples de usar;</li> <li>• Representação mais adequada de fenômenos contínuos no espaço.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade de representação de relacionamentos topológicos;</li> <li>• Dificuldades na associação de atributos a feições;</li> <li>• Arquivos muito grandes.</li> </ul> |

No que diz respeito aos dados alfanuméricos ou não gráficos, constituem os atributos, em meio tabular, concernentes às primitivas gráficas. Segundo ROCHA (2000), esses atributos podem ser: Atributos dos dados espaciais, que fornecem informações descritivas através de identificadores comuns, normalmente chamados de geocódigos, que estão armazenados tanto nos registros alfanuméricos como nos espaciais. E os Atributos Georreferenciados, onde a preocupação é apenas georreferenciar alguma característica específica, sem descrever as suas feições espaciais. O autor também indica que um SIG pode atuar como um Sistema de Apoio à Decisão que permite a integração de dados espaciais e não espaciais na solução de problemas.

Em João Pessoa, o uso de SIG em atividades de geoprocessamento cresce constantemente, segundo informações da Secretaria de Planejamento Urbano e também de profissionais do meio acadêmico.

Com essa ferramenta, Borges (2004) realiza o mapeamento das áreas de conflito com a legislação ambiental e de riscos decorrentes da instalação de postos de combustíveis na cidade. Por meio de um sistema de informações geográficas, Silva (2002) faz a análise espacial de riscos ambientais na bacia do Rio Cuiá, localizada em João Pessoa, que, de acordo com o autor, vem sofrendo com uma ocupação urbana desordenada, a qual exerce grande influência sobre os processos ambientais que ocorrem na área.

Com esse recurso, Mendes e Lorandi (2002) indicam áreas susceptíveis a construções residenciais de pavimento térreo com fundações diretas por sapatas, na região de São José do Rio Preto, a partir de informações de 1500 sondagens. Teixeira (2003) implementa esse mesmo tipo de estudo de viabilidade para a região de Belo Horizonte.

### **3.2.6 Bancos de dados e SIG**

De acordo com Yuaça (2003), os bancos de dados georreferenciados e interligados a Sistemas de Informação Geográfica – SIG, também têm alcançado grande expansão de aplicação prática em vários municípios brasileiros, subsidiando ações de gerenciamento de finanças, como atualização cadastral para cálculo de impostos territoriais, ou de planejamento de infra-estrutura urbana, como seleção de locais para implementação de postos de saúde ou escolas públicas.

Os SGBD acoplados em sistemas de informação geográfica – SIG, onde as informações armazenadas apresentam um atributo específico de coordenada geográfica (dados georreferenciados), apresentam o perfil mais adequado para a implementação de uma banco de dados geotécnicos. A espacialização (objetos geográficos: pontos, linhas, polígonos, células, etc.) constitui-se em importante atributo para o correto gerenciamento, interpretação e modelagem das informações armazenadas (AUGUSTO FILHO, 2005a). O autor acrescenta que um projeto genérico de banco de dados em SIG pode ser caracterizado por duas linhas principais de coleta de dados quanto às suas naturezas: atributos (texto e números) e dados espaciais (objetos geográficos), conforme sintetizado na Figura 3.3.

O autor enfatiza que propostas de estruturas gerais auxiliam na modelagem dos bancos de dados antes do início de sua implementação, permitindo otimizações e minimizando decisões errôneas no seu projeto. Esta modelagem envolve a definição mais precisa possível dos seguintes parâmetros do banco de dados: seus usuários potenciais; os tipos de dados (atributos e objetos geográficos) a serem armazenados; os tratamentos prévios eventualmente necessários; as funções de pesquisa e análise destes dados; as formas de consulta e saída de resultados; a eventual necessidade de interfaces customizadas; as bases cartográficas a serem utilizadas como referência para o georreferenciamento do banco de dados.



Figura 3.3 Projeto genérico de um banco de dados em ambiente de SIG (Teixeira & Christofoletti, 1997).

### 3.2.7 Bancos de dados geotécnicos

Sobre países da Europa em que foram desenvolvidos bancos de dados com informações de sondagens, Bastos e Zuquette (2005) mencionam a Itália, Inglaterra, França, Escócia, Espanha e outros. No Brasil, pode-se citar Valente (2000) e Fonteles (2003), entre outros que são mencionados ao longo desta revisão bibliográfica.

Segundo Ellison et al. (2002), um banco de dados proveniente de sondagens, juntamente com o modelo digital do terreno (MDT) e mapas geológicos, é essencial para possibilitar relações 3D de geologia, para uma melhor visualização e entendimento.

Como exemplo de bancos de dados geotécnicos, pode-se mencionar o caso dos mapas geológicos da região de Wrexam, Inglaterra, produzidos pelo Serviço Geológico Britânico (BGS), em escala de 1:10.000, que são armazenados por Laxton e Becken (1996) em um banco de dados. Como objetivos, os autores buscam fazer uma conexão entre os dados dos mapas digitalizados e as tabelas de bancos de dados relacionais contendo

informações básicas e espaciais; estruturar as consultas espaciais e não-espaciais, e com a união de dados alcançadas, produzir mapas derivados; aperfeiçoando a qualidade da cartografia dos mapas geológicos da referida região.

Colman-Sadd, Ash e Nolan (1997) desenvolvem um banco de dados para elaborar legendas de mapas geológicos, o GEOLEGEND, com estrutura relacional para gerenciamento de unidades de mapas geológicos em um sistema de informação geográficas, no Canadá. O GEOLEGEND tem como objetivos produzir mapas que descrevem detalhes da geologia, habilitar o usuário a ser capaz de selecionar uma área independente da topografia ou do mapa de contornos geológicos, elaborar um sistema alfanumérico para legenda, e estabelecer um padrão na descrição das unidades geológicas (BASTOS, 2005).

Na Finlândia, Tarveinem e Paukola (1998) utilizam um banco de dados para armazenar informações geoquímicas das argilas, sedimentos orgânicos e águas subterrâneas, observando uma concentração natural de Arsênico, Floreto e de outros elementos com teores acima do recomendado.

Com dados de sondagens, Nathanail e Resenbaum (1998) recorrem a um sistema de banco de dados para gerenciar informações geotécnicas espaciais, com a finalidade de selecionar um local favorável à instalação de um forno de uma indústria de aço, na porção nordeste da Inglaterra. Os dados são armazenados em um banco e desenvolveram-se técnicas para o gerenciamento espacial, usando-se um sistema de informação geográfica e geoestatística. No tratamento das informações, os autores utilizam Dbase (gerenciamento do banco de dados); IDRISI (sistema de informação geográfica); GEOEAS e GSLIB (modelagem geoestatística); SURFER (modelagem de superfícies de contornos) e GRAPHER (plotagem de gráficos).

Elaborado para armazenar dados provenientes de furos de sondagens, o banco de dados estruturado por Brodie (1998) com tabelas e gerenciado pelo ORACLE foi utilizado na modelagem da superfície freática, com o software MODFLOW, que tratava os dados armazenados para gerar modelos da hidrogeologia.

Interagindo com um banco de dados e SIG, Kim, Pyeon e Eo (2000) desenvolvem um mapa para o sistema de transportes (ITS) da Coréia, com a finalidade criar um sistema que unisse imagens de vídeos a mapas digitais de rodovias, usando, como área-teste, as vias da Universidade Nacional de Seoul (SNU).



Para aquisição dos dados, os autores consideram como área-alvo uma via de circulação, estradas parciais e suas construções periféricas da SNU. Foram usados equipamentos de aquisição de imagem de vídeo, um modelo de GPS para localização dos pontos, um programa para processamento de imagens e um SIG. Os dados que alimentaram o banco eram extraídos de mapas de vias e topográficos, fotos aéreas digitalizadas, imagens de vídeo, e aquisição de dados locais com o DGPS.

Com a finalidade de construir um sistema de visualização gráfica, Ferreira (1988) apresenta o sistema DATAGEO, que conta com um subsistema de digitalização de mapas e, ainda, subsistemas de tratamento discreto e estatístico da informação, todos eles integrados. O banco de dados é desenvolvido mediante o uso de algoritmos construídos em Pascal, com estrutura de armazenamento das informações na forma hierárquica.

Caracterizando um sistema de captura para a geração de mapas, Moreira (1993) elabora um banco de dados, GEOBASE, com informações geotécnicas para produzir um mapa de unidades geotécnicas do terreno. Nesse trabalho, o autor elabora um sistema de aquisição ou entrada de dados (campo e laboratório) e, após a armazenagem dos mesmos, são elaborados mapas com auxílio de um SIG.

Em Recife – PE, Coutinho, Monteiro, Oliveira (1996) elaboram um banco de dados para armazenar as informações das argilas orgânicas, moles e médias, que foi implementado em uma planilha eletrônica com construções de macros (são rotinas de programa computacional ou bloco de instruções identificadas por uma única palavra ou um rótulo) na linguagem de programação Visual Basic. As informações armazenadas no banco de dados eram provenientes de ensaios de campo e laboratoriais realizados em pontos na região metropolitana de Recife. Os autores implementaram o banco em uma planilha eletrônica.

Bastos (2005) menciona os trabalhos de Meira e Calijuri (1996); e Meira (1996), como os responsáveis por automatizar o processo de elaboração de mapeamento geotécnico na Universidade Federal de Viçosa, desenvolvendo um sistema auxiliar chamado GeoGIS, elaborado com a finalidade de unir o mapeamento geotécnico convencional com a cartografia geotécnica digital. Para tanto, foram desenvolvidos módulos para gerenciamento das investigações de campo, para ensaios laboratoriais, mapoteca digital e um módulo para análises geotécnicas.

Diniz (1998) coordena um projeto para elaboração de um banco de dados geoambiental do Estado de São Paulo, partindo das várias cartas geotécnicas já existentes. A autora realiza a compilação dessas cartas, integrando os produtos numa única base de

dados e disponibilizando essas informações de maneira mais eficiente para os diversos usuários, por meio de um aplicativo em CD-Room.

Para exemplificar e justificar a importância de criar um banco de dados de metadados, Moretti (1998) cita o mapeamento sistemático do Brasil, com os mapas produzidos pelo Projeto Radam, IBGE e DSG, no qual se tem um mapa-índice que abrange as escalas de 1:1.000.000, 1:250.000, 1:100.000, e 1:50.000, e permite a visualização das informações secundárias (o conteúdo do banco de dados, consultas, relatórios de saída).

Com informações da cidade de Curitiba, pode-se citar os trabalhos de Talamini Neto & Celestino (2001), Salamuni e Stellfeld (2001) e Chamecki et al (2001). Estes últimos utilizam um banco de dados, com informações geotécnicas de estudos de solos para a fundação de 300 edificações da cidade. Salamuni e Stellfeld (2001) elaboram uma base de dados com informações georreferenciadas da geologia e da geomorfologia da Bacia sedimentar do município. Os dados eram provenientes de mapas geológicos e geomorfológicos, sondagens e ainda fotografias de afloramentos rochosos.

Talamini Neto & Celestino (2001) usam SIG na integração de informações provenientes de cartas topográficas, de boletins de sondagens, levantamento de campo análises geoestatísticas e, assim, elaborar o mapeamento do subsolo da cidade, o qual teve a finalidade de orientar o planejamento do uso do espaço subterrâneo.

Augusto Filho (2005a), em relatório técnico que trata de banco de dados geológico – geotécnico a partir de sondagens em Belo Horizonte, trata das etapas de desenvolvimento de tal recurso, desde a determinação e relações internas dos elementos incluídos até a modelagem em ambiente de SIG dos mesmos. Tais etapas e procedimentos são descritos a seguir.

O objeto geográfico primário utilizado para o armazenamento dos furos de sondagem no banco de dados geotécnicos em SIG é o ponto, representando os furos de sondagem georreferenciados em uma base cartográfica. A este objeto geográfico podem ser acrescentados várias tabelas de atributos, cujos os campos poderão ser do tipo texto, numérico, imagens, sons, etc.

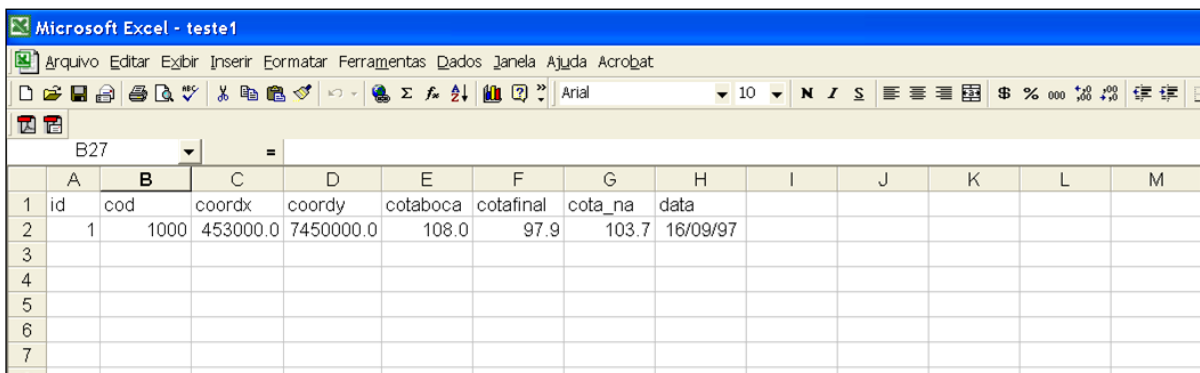
As tabelas de atributos das sondagens podem ser estruturadas utilizando programas de planilha eletrônica ou de banco de dados da linha Office do sistema operacional Windows. Posteriormente, estes dados podem ser incorporados na plataforma de SIG a ser utilizada para gestão e análise dos dados cadastrados das sondagens.

Para fins de modelagem preliminar do banco de dados geotécnicos foram definidos dois formatos básicos de planilhas como estrutura inicial de armazenagem dos dados das sondagens à percussão. Uma destas planilhas apresenta os dados gerais dos furos de sondagem a ser cadastrados, destacando seu identificador (id), suas coordenadas geográficas (coordx e coordy), cotas da boca, do fim do furo e do nível d'água (cotaboca, cotafinal e cota\_na), conforme ilustrado na Figura 3.4.

Cabe observar que esta planilha principal também gera os pontos (objetos geográficos) representativos da posição dos furos de sondagem na base cartográfica utilizada. Outros atributos de interesse (numérico, texto, data ou imagem), tais como descrições mais detalhadas do local da sondagem, obra associada, firma executora, data da execução, etc. poderão ser incorporados a esta planilha geral.

Uma segunda planilha, trazendo a descrição em profundidade de cada furo de sondagem será interligada em ambiente de SIG a planilha geral anterior, através de um campo de identificador comum, que no exemplo apresentado na Figura 3.5 é o campo id.

O autor enfatiza que os SIG modernos dispõem de ferramentas estatísticas que facilitarão o desenvolvimento destas correlações. A utilização combinada da distribuição espacial das principais unidades geológico-geotécnicas, os furos de sondagem cadastrados, permite uma melhor controle das condições de contorno e da validação dos resultados obtidos por estas correlações.



|   | A  | B    | C        | D         | E        | F         | G       | H        | I | J | K | L | M |
|---|----|------|----------|-----------|----------|-----------|---------|----------|---|---|---|---|---|
| 1 | id | cod  | coordx   | coordy    | cotaboca | cotafinal | cota_na | data     |   |   |   |   |   |
| 2 | 1  | 1000 | 453000.0 | 7450000.0 | 108.0    | 97.9      | 103.7   | 16/09/97 |   |   |   |   |   |
| 3 |    |      |          |           |          |           |         |          |   |   |   |   |   |
| 4 |    |      |          |           |          |           |         |          |   |   |   |   |   |
| 5 |    |      |          |           |          |           |         |          |   |   |   |   |   |
| 6 |    |      |          |           |          |           |         |          |   |   |   |   |   |
| 7 |    |      |          |           |          |           |         |          |   |   |   |   |   |
| 8 |    |      |          |           |          |           |         |          |   |   |   |   |   |

Figura 3.4 Exemplo de planilha geral para cadastramento dos furos de sondagem (Augusto Filho, 2005a).

|    | A  | B     | C    | D                    | E  |
|----|----|-------|------|----------------------|--|
| 1  | id | cotas | spt  | unidade              | descricao  |
| 2  | 1  | 107.0 | 3.8  | Solo coluvionar.     | Argila plastica c/ areia(f/m), blocos (dcm) de rocha (diabasio).Cor marrom-escuro. |
| 3  | 1  | 106.0 | 7.3  | Solo coluvionar.     | Argila plastica c/ areia(f/m), blocos (dcm) de rocha (diabasio).Cor marrom-escuro. |
| 4  | 1  | 105.0 | 9.0  | Solo coluvionar.     | Argila plastica c/ areia(f/m), blocos (dcm) de rocha (diabasio).Cor marrom-escuro. |
| 5  | 1  | 104.0 | 11.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) argilosa. Cor amarelo-variegado.                                       |
| 6  | 1  | 103.0 | 20.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) argilosa. Cor amarelo-variegado.                                       |
| 7  | 1  | 102.0 | 39.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) c/ argila. Cor amarelo-avermelhado.                                    |
| 8  | 1  | 101.0 | 50.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) c/ argila. Cor amarelo-avermelhado.                                    |
| 9  | 1  | 100.0 | 50.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) c/ argila. Cor amarelo-avermelhado.                                    |
| 10 | 1  | 99.0  | 50.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) c/ argila. Cor amarelo-avermelhado.                                    |
| 11 | 1  | 98.0  | 50.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) c/ argila. Cor amarelo-avermelhado.                                    |
| 12 | 1  | 97.9  | 50.0 | Solo residual jovem. | Areia (f/m) c/ argila. Cor amarelo-avermelhado.                                    |
| 13 |    |       |      |                      |  |
| 14 |    |       |      |                      |  |
| 15 |    |       |      |                      |  |

Figura 3.5 Exemplo de planilha com a descrição em profundidade de cada furo de sondagem (AUGUSTO FILHO, 2005a).

### 3.3 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

Landim (2000) define como métodos geoestatísticos aqueles que levam em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas; enquanto os métodos determinísticos não consideram esse aspecto, pois utilizam apenas os valores envolvidos nos processos.

#### 3.3.1 Determinísticos

##### 3.3.1.1 - Triangulação com Interpolação Linear – TIN

Operando com a triangulação de Delauney, na qual triângulos são criados a partir de pontos originais de entrada, sem que nenhum venha a interceptar o outro formando uma rede triangular irregular.

O processo conecta os pontos amostrados através desses triângulos interpolando os valores entre eles. É considerado um método direto, pois os contornos derivam do padrão original dos dados (LANDIM, 2000).

O autor lista, como vantagens do método, as seguintes características: é fácil de ser entendido, rápido, fiel aos dados originais, e bom para uma visualização rápida. Como desvantagens, menciona: gera superfícies triangulares (não indicado para mapas que devem apresentar contornos suaves), valores acima ou abaixo dos reais não podem ser extrapolados, e acrescenta que a triangulação não permite a extrapolação além das posições das amostras, então as estimativas se limitam estritamente à área amostrada.

Tem ainda como vantagens tratar-se de um método exato e sem viés. Muito utilizado para visualizações 3D, pois tem uma estrutura de dados compacta, que facilita o processamento mais rápido das modelagens tridimensionais. Apresentam a vantagem de não exigir grades regulares nos processos de interpolação.

### **3.3.1.2 Inverso Ponderado da Distância**

Nos métodos com inverso ponderado da distância, o peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó do grid a ser estimado. Sendo assim, os pontos amostrados de localização próxima ao nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distante, e ao calcular o valor de um nó, a soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados é igual a 1, o que promove uma proporcionalidade entre os pesos da vizinhança.

Landim (2000) lista como vantagens desse método: é fácil de se entender matematicamente, o algoritmo é bem conhecido e discutido, é disponível em muitos softwares, utiliza pouco tempo de computação e é razoavelmente fiel aos valores amostrados originais. Ele acrescenta que como o método não estima valores maiores que os máximos nem menores que os mínimos, é bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas, sendo indicado para analisar variações de pequena amplitude entre os dados irregularmente distribuídos. Como desvantagens, pode-se citar que a influência de valores locais anômalos é dificilmente removida, pois os dados em clusters podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso.

### 3.3.1.3 Spline

A função spline interpola os dados amostrais em pequenos grupos de poucos pontos, obtendo polinômios com graus menores e mantendo assim a continuidade da função de aproximação quanto de suas derivadas. Esse processo suaviza a superfície resultante, que passa exatamente pelos pontos originais.

### 3.3.1.4 Topo to Raster

A interpolação pelo método *topo to raster* é essencialmente uma técnica discretizada de funções do tipo *spline*, modificada para se ajustar a modelos digitais de terreno identificando mudanças abruptas, como vales de drenagem e topos de morros. Utiliza-se uma técnica iterativa de diferenças finitas, sendo otimizada para ter a eficiência computacional dos métodos de interpolação locais, sem perder a continuidade de superfície de métodos globais de interpolação.

*Topo to Raster* consiste num método designado especificamente para a criação de modelos digital de terreno (MDT) hidrológicamente corretos. É baseada no programa desenvolvido por Michael Hutchinson (1988, 1989). O processo é direcionado a obter vantagens dos tipos de dados de entrada disponíveis e mais comuns. O manual do ArcGis enfatiza que a água é a força primária erosiva determinante das formas gerais de relevo. Por essa razão, a maioria da forma das superfícies resulta de um padrão de drenagem conectado. *Topo to Raster* faz uso dessa premissa e impõe condições ao processo de interpolação para que o mesmo obedeça ao mencionado padrão de drenagem conectado.

Essas condições produzem superfícies com mais acurácia mesmo utilizando poucos dados de entrada. A condição de drenagem global também elimina a necessidade de edição para remover pontos irrealistas de fundos de vales ou outros aspectos com profundidades não suavizadas (*sinks*).

O programa não impõe condições de drenagem que contradigam os dados de elevação de entrada; ou seja, ele não negligencia valores definidos e inseridos em função do processo de interpolação.

O processo de reforço de drenagem (*drainage enforcement process*) tem como objetivo a remoção dos pontos com profundidade não suavizados que não tenham sido identificados previamente nos dados de entrada. Ele tem como suplemento a incorporação de dados de fluxo em elementos de linha (rios, etc).

No início do processo, *Topo to Raster* usa informações inerentes a dados de contorno (curvas de nível), identificando áreas de máxima curvatura em cada curva e também as de taludes mais íngremes para a criação de redes de cursos d'água. Essas informações são usadas para assegurar as propriedades hidrogeomorfológicas do modelo de saída e podem também ser usadas para verificar a sua acurácia em relação às linhas de fluxo também utilizadas. Existe uma condição de viés mínimo no algoritmo que delega aos contornos de entrada um efeito mais forte na superfície de saída.

### **3.3.2 Geoestatística**

Os métodos estatísticos clássicos constituem uma etapa preliminar praticamente obrigatória, segundo Sturaro (1994), quando se trabalha com amostragens e processamento de uma quantidade significativa de dados e de variáveis. O autor acrescenta que além desses métodos classificarem e depurarem as informações possibilitam também análises interpretativas quanto aos modelos de distribuição de probabilidade, correlações e ajustes de funções de regressão.

Entre as diversas situações relacionadas à geotecnia que podem surgir para a aplicação da Estatística, destaca-se a avaliação espacial de padrões de distribuição de propriedades quantitativas (GENEVOIS, 1992; PACHECO; LIMA, 1996; RIBEIRO, 2000; CULSHAW et al, 2002).

Entretanto, a variabilidade de natureza espacial e temporal de propriedades geotécnicas exibe comportamento demasiadamente complexo para ser avaliada pelos métodos estatísticos usuais, necessitando de análises que permitam a modelagem e estimativas apropriadas à obtenção de distribuições representativas no espaço, possibilitadas pela geoestatística (LANDIM, 1988; NATHANAIL; FERGUSON; TUCKER, 1998a).

A geoestatística, como estudo que envolve fenômenos espaciais, é utilizada em diferentes campos na modelagem de variáveis regionalizadas, como engenharia de minas

(AVSAR; OZTURK; BOUAZZA, 2002), avaliação de riscos (NATHANAIL et al. 1998b), estabilidade de taludes e maciços rochosos (LANA; GRIPP; GRIPP, 2001) e sondagens (SCRADEANU; MARUNTEANU, 1998; AUGUSTO FILHO; RIDENTE JR; ALVES,1999; MENDES, 2001). Destacam-se a seguir os trabalhos relacionados a este último tema, uma vez que se trata de assunto chave no desenvolvimento da pesquisa proposta.

### **3.3.2.1 Variáveis Regionalizadas**

A variabilidade espacial de algumas características do solo vem sendo uma das preocupações de pesquisadores praticamente desde o início do século. Os procedimentos usados inicialmente baseavam-se na estatística clássica e utilizavam grandes quantidades de dados amostrais, visando caracterizar ou descrever a distribuição espacial da característica em estudo.

Krige (1951), em trabalho com dados de concentração de ouro, conclui que somente a informação dada pela variância seria insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para tal, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surge o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial.

Matheron (1963, 1971), baseado nas observações de Krige, desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, a partir dos fundamentos da geoestatística, segundo a qual uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

A teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes (BURROUGH, 1987): uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; um ruído aleatório ou erro residual.

Para tanto, algumas hipóteses são necessárias, como a da Estacionariedade de 2ª Ordem, e a Hipótese Intrínseca, que são discutidas de maneira mais aprofundada em David (1977), Burrough (1987), Camargo (1997), Isaaks e Srivastava (1989), Yamamoto (1994), Landim (2003), Fonteles (2003), entre outros.



Segundo Olea (1975, 1977), as principais características de uma variável regionalizada são:

- *Localização*: uma variável regionalizada é numericamente definida por um valor, o qual está associado a uma amostra de tamanho, forma e orientação específicos. Essas características geométricas da amostra são denominadas *suporte geométrico*. O suporte geométrico não necessariamente compreende volumes, podendo se referir também a áreas e linhas. Quando o suporte geométrico tende a zero, tem-se um ponto ou amostra pontual e o suporte geométrico é imaterial. Ou seja, a teoria das variáveis regionalizadas considera a geometria das amostras, distintamente da estatística clássica onde a forma, o tamanho e a orientação não são considerados. Um experimento estatístico clássico como o lançamento de moedas têm resultados que são independentes se a moeda é grande ou pequena, leve ou pesada, e de como é lançada.

- *Anisotropia*: algumas variáveis regionalizadas são anisotrópicas, isto é, apresentam variações graduais numa direção e rápidas ou irregulares em outra.

- *Continuidade*: dependendo do fenômeno sendo observado, a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser grande ou pequena. Apesar da complexidade das flutuações, uma continuidade média geralmente está presente. A continuidade espacial da variável regionalizada pode ser analisada a partir do variograma, conforme descrito a seguir.

### 3.3.2.2 Variograma

O variograma é uma ferramenta que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

Considere - se uma variável regionalizada, onde  $X = Z(x)$  e  $Y = Z(x + h)$ . Neste caso, referem-se ao mesmo atributo (por exemplo, o teor de zinco no solo) medido em duas posições diferentes, em que  $x$  denota uma posição em duas dimensões, com componentes  $(x_i, y_i)$ , e  $h$  um vetor distância (módulo e direção) que separa os pontos.

O nível de dependência entre essas duas variáveis regionalizadas,  $X$  e  $Y$ , é representado pelo variograma,  $2\gamma(h)$ , o qual é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância  $h$ .

A Figura 3.6 ilustra um semivariograma experimental com características muito próximas do ideal. O seu padrão representa o que, intuitivamente, se espera de dados de campo, isto é, que as diferenças  $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$  decresçam à medida que  $h$ , a distância que os separa decresce. É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, é esperado que  $\gamma(h)$  aumente com a distância  $h$ .

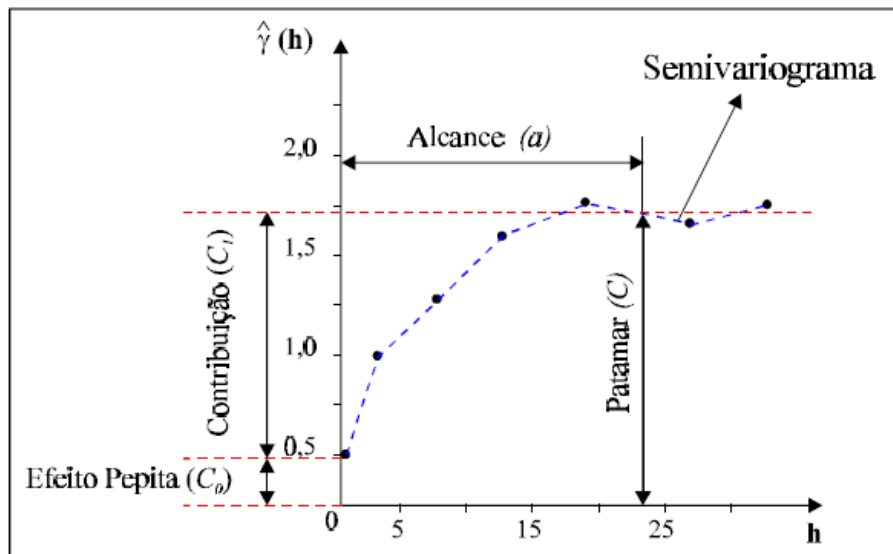


Figura 3.6 Exemplo de semivariograma (Camargo, 1997).

Os parâmetros do semivariograma observados são :

– *Alcance (a)*: distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.

– *Patamar (C)*: é o valor do semivariograma correspondente a seu *alcance (a)*. Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ( $\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$ ) torna-se invariante com a distância.

– *Efeito Pepita (C0)*: por definição,  $\gamma(0)=0$ , Entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado *Efeito Pepita (C0)*. O valor de  $C0$  revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (Isaaks e Srivastava, 1989), mas é impossível quantificar se a maior

contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

– *Contribuição (C1)*: é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita ( $C_0$ )

É importante que o modelo ajustado represente a tendência de  $\gamma(h)$  em relação a  $h$ . Deste modo, as estimativas obtidas a partir da posterior krigagem serão mais exatas e, portanto mais confiáveis. O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, mas interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode-se ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório.

Os modelos aqui apresentados são considerados modelos básicos, denominados de modelos isotrópicos por Isaaks e Srivastava (1989). Estão divididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar. Modelos do primeiro tipo são referenciados na geoestatística como modelos transitivos. Alguns dos modelos transitivos atingem o patamar (C) assintoticamente. Para tais modelos, o alcance ( $a$ ) é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar (Camargo, 1997).

Modelos do segundo tipo não atingem o patamar, e continuam aumentando enquanto a distância aumenta. Tais modelos são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão.

- *Modelo Efeito Pepita* - muitos semivariogramas experimentais apresentam uma descontinuidade na origem. Quando  $|h|=0$ , o valor do semivariograma é estritamente zero. Porém quando  $|h|$  tende a zero, o valor do semivariograma pode ser significativamente maior que zero, isto é, ocorre uma descontinuidade na origem. Tal descontinuidade é modelada através do modelo de efeito pepita. Na literatura geoestatística, aparece como uma constante ( $C_0$ ) na equação do semivariograma, e deve ser entendido que  $C_0 = 0$  quando  $|h| = 0$ .

- *Modelo esférico* - O modelo esférico é um dos mais utilizados e no qual se constata, geralmente, que a tangente na origem atinge o patamar a uma distância de  $2/3$  da amplitude variográfica  $a$ .

- *Modelo exponencial* - Este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (Isaaks e Srivastava, 1989).

- *Modelo gaussiano* - O modelo gaussiano é um modelo transitivo, muitas vezes usado para modelar fenômenos extremamente contínuos (Isaaks e Srivastava, 1989). Semelhante no modelo exponencial, o modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente e o parâmetro  $a$  é definido como o alcance prático ou distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (Isaaks e Srivastava, 1989). O que caracteriza este modelo é seu comportamento parabólico próximo à origem.

A Figura 3.7 exibe a representação gráfica desses modelos.

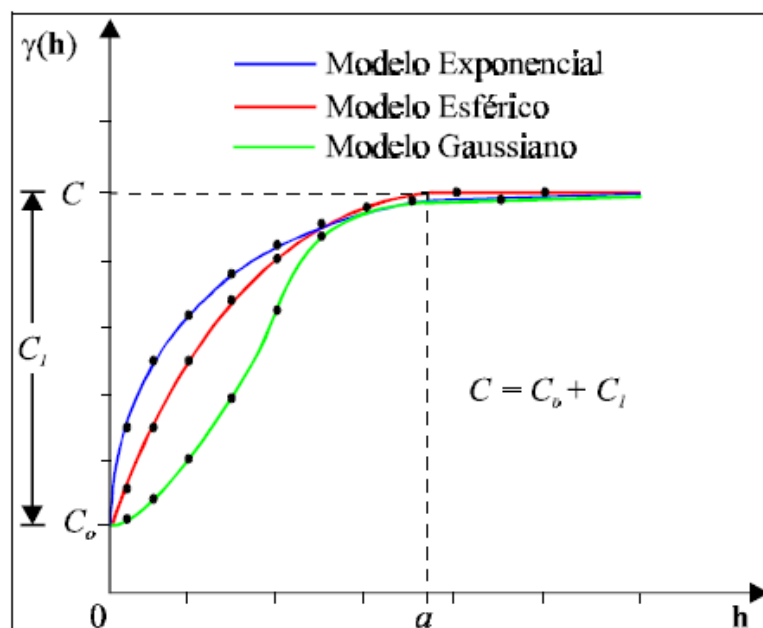


Figura 3.7 Representação gráfica de semivariogramas experimentais e modelos teóricos (Camargo, 1997).

A anisotropia pode ser facilmente constatada através da observação dos semivariogramas obtidos para diferentes direções (Camargo, 1997). No caso de similaridade bastante grande entre diferentes variogramas (caso simples e menos freqüente), a distribuição espacial do fenômeno é denominada *isotrópica*. Neste caso, um único modelo é suficiente para descrever a variabilidade espacial do fenômeno em estudo.

Por outro lado, se os semivariogramas não são iguais em todas as direções, a distribuição é denominada *anisotrópica*. Se a *anisotropia* é observada e é refletida pelo mesmo *Patamar* ( $C$ ) com diferentes *Alcances* ( $a$ ) do mesmo modelo, então ela é denominada *Geométrica*. O fator de anisotropia geométrica é definido como a razão entre o

alcance na direção de menor continuidade ( $a_2$ ) e o alcance na direção de maior continuidade ( $a_1$ ). Neste caso, o fator de anisotropia geométrica é sempre menor que a unidade e o ângulo de anisotropia é igual ao ângulo da direção de máxima continuidade.

Existe ainda um outro tipo de anisotropia em que os semivariogramas apresentam os mesmos *Alcances* ( $a$ ) e diferentes *Patamares* ( $C$ ). Neste caso, a anisotropia é denominada *Zonal*. Como a isotropia, a anisotropia zonal também é um caso menos freqüente presente nos fenômenos naturais.

O mais comum é encontrar combinações da anisotropia zonal e geométrica, denominada *anisotropia combinada*. Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a anisotropia zonal pode ser considerada como um caso particular da anisotropia geométrica, ao se supor um fator de anisotropia muito grande. Nesta condição, o alcance implícito na direção de menor continuidade é muito grande. A estrutura do semivariograma é então adicionada somente para a direção de maior continuidade.

### **3.3.2.3 Krigagem**

Diferente dos métodos convencionais de estimação, a krigagem está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas. Inicialmente, o método de krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos (Burgess e Webster, 1980a,b), mapeamento hidrológico (Kitanidis e Vomvoris, 1983), mapeamento atmosférico (Lajaunie, 1984) e outros campos correlatos.

A krigagem ordinária foi e tem sido bastante empregada na estimativa pontual e na estimativa de blocos, mais especificamente no caso de recursos minerais (DAVID, 1977; BROOKER, 1979; 1991). Trata-se de uma combinação linear de pesos e amostras mais próximas para o caso dos dados se adequarem a uma distribuição normal com média e variância conhecidas.

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a  $1/N$  ( $N$  = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem,

o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínimas (Camargo, 1997).

Os estimadores lineares e não-lineares dos krigagem, ao contrário da análise de superfície de tendência, são métodos de interpolação para estimativas locais (Yamamoto, 1998). Faz-se necessária a definição dos pontos a serem utilizados na estimativa por interpolação. Os pontos selecionados, segundo critérios específicos descritos adiante, constituem a vizinhança local de estimativa. Estes pontos podem estar distribuídos, formando agrupamentos com arranjos aleatórios e/ou semi-regulares dentro de um raio de influência relacionado à amplitude modelada na etapa de análise variográfica exploratória (Rivoivairard, 1987).

Yamamoto (2001) explica que os critérios de seleção de pontos visam garantir a pesquisa dos melhores pontos a serem interpolados, evitando assim algum vício sistemático que possa ser refletido em uma eventual sobrestimativa. Basicamente são aplicados três critérios, a saber: i)  $n$  pontos mais próximos;  $n/4$  pontos mais próximos por quadrante e;  $n/8$  pontos mais próximos por octante.

Para mais detalhes e deduções matemáticas do método, pode –se indicar os trabalhos de David (1977), Burrough (1987), Camargo (1997), Isaaks e Srivastava (1989), Yamamoto (1994), Peres (1998), Landim (2003), Fonteles (2003), entre outros.

#### **3.3.2.4 Exemplos de Aplicação**

Sturaro (1994), em trabalho com uso de um banco de dados de sondagens de simples reconhecimento (SPT), aplica técnicas de krigagem ordinária, para estimativas de resistência de solo, e cokrigagem para a estimativa do nível do lençol freático e topo do impenetrável. Xavier (1999), que utilizou as mesmas técnicas e procedimentos no sítio da Usina Nuclear de Angra dos Reis, realiza trabalho semelhante.

Ribeiro Jr. (1995) apresentou um estudo da variabilidade espacial da densidade do solo, ilustrando e discutindo conceitos geoestatísticos como análise descritiva espacial, variografia, krigagem ordinária e validação cruzada.

Aplicando a metodologia geoestatística da krigagem ordinária, Sturaro e Landim (1996) verificam o comportamento espacial de sondagens SPT por meio de 720 furos em Bauru – SP, no mapeamento de valores médios de SPT para a camada superficial delimitada no perfil de alteração da área. Também para essa região e com a mesma metodologia, Peres (1998) produz mapas estimados do SPT para diversas profundidades, perfis e seções esquemáticas mostrando detalhes da área estimada. Com base na análise variográfica, verificaram a presença de uma elevada componente aleatória (efeito pepita), justificada por uma série de problemas de execução ou, mesmo, de não padronização deste ensaio, realizado por diversas empresas de prospecção.

Marinoni & Tiedemann (1998), em trabalho com centenas de furos de sondagem em Berlim, mostram que dentro de uma análise geoestatística, o conhecimento da correlação espacial de dados geométricos inseridos tais como dados morfológicos ou espessuras de camadas pode ser usado para criar modelos geológicos.

Augusto Filho et al. (1999) usaram a geoestatística para subsidiar a compartimentação geotécnica da área urbana do município de São José do Rio Preto (SP), visando à elaboração de um plano de controle de erosões para o município. Os autores apresentaram conclusões relacionadas à escarificabilidade e condições de fundação da área de estudo; aos compartimentos geotécnicos e à ocorrência de erosões; à aplicabilidade da geoestatística na estimativa de variáveis geotécnicas.

Sturaro et al. (2000) apresentam uma técnica geoestatística pelo emprego da krigagem indicativa, que permite a geração de mapas probabilísticos de variáveis, os quais podem ser integrados para a obtenção de mapas indicativos. Os autores exemplificam a metodologia a partir de sondagens de simples reconhecimento da região de Bauru – SP, com a avaliação de mapas geotécnicos de favorabilidade à locação de aterros sanitários, pela integração de mapas probabilísticos referentes às variáveis espessura do solo e profundidade do lençol freático.

Folle et al. (2001) apresentaram a krigagem ordinária como uma ferramenta eficiente para geração de mapas de resistência de solo  $N_{SPT}$ , realizadas em três níveis distintos, definidos de acordo com a variação média do índice de penetração com a profundidade. Em continuação, Folle (2002) explorou a krigagem ordinária para a estimativa dos valores de  $N_{SPT}$  e aplicou o processo de simulação sequencial Gaussiana, a fim de avaliar a precisão das estimativas realizadas pelo método de krigagem ordinária, quantificando as incertezas associadas.

Dyminski et al. (2002) e Miqueletto e Dyminski (2004) utilizaram duas metodologias na análise de um banco de dados composto por informações de NSPT: krigagem ordinária e redes neurais para estimativa das informações do  $N_{SPT}$ .

No Ceará, Fonteles (2003) realiza a caracterização geotécnica da porção nordeste do município de Fortaleza com dados de sondagens de simples reconhecimento, com atividades que se desenvolveram desde a montagem de um banco de dados geotécnicos, aplicação de geoestatística para a elaboração do mapa de superfície freática, construção de um modelo geológico 3D de superfície até o mapeamento de uma superfície do impenetrável ao amostrador do SPT. O autor conclui que a krigagem ordinária pode ser uma boa ferramenta para a modelagem da superfície freática, acrescentando mais conclusões sobre o tema em Fonteles et. al (2006).

Visando ao zoneamento de áreas que apresentassem risco de deslizamento, Jesus et al. (2005) realizaram uma aplicação em mapeamento geotécnico por meio da krigagem ordinária, para auxílio no planejamento urbano de ocupações futuras da cidade de Salvador/BA. Os parâmetros geotécnicos estimados foram o ângulo de atrito, a coesão, o peso específico dos grãos e o índice de vazios do solo.

A partir do Banco de Dados da Carta Geotécnica do Recife, que conta com cerca de 1500 sondagens SPT da cidade, Genevois e Oliveira (2005) aplicam a geoestatística para o estudo da variável espessura de camadas de argila orgânica do município, que apresenta subsolo com grandes bolsões de solo mole. Como produto, os autores geram mapas de distribuição de camadas de argila orgânica.

Para mais trabalhos sobre geoestatística e  $N_{SPT}$  pode-se citar Folle et al. (2006b) e Schuster et al. (2007, 2008), que também utilizaram dados de ensaios de cone (CPT).



## 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

### 4.1 LOCALIZAÇÃO, ASPECTOS FÍSICOS E SOCIAIS

A cidade de João pessoa, capital da Paraíba, localiza-se na zona costeira (porção leste) do estado e conta com a particularidade de abrigar o ponto mais oriental das Américas. O município situa-se entre as coordenadas geográficas 34°52'30" de Longitude Oeste e 7°7'30" de Latitude Sul (Figura 4.1). Limita-se ao norte com o município de Cabedelo (18km); ao sul com o município do Conde (13km); a oeste com os municípios de Bayeux (6km) e Santa Rita (12km); e a leste com o Oceano Atlântico. Abrange uma área de 210 km<sup>2</sup>, dos quais 160,6 km<sup>2</sup> são de área urbana e 49,4 km<sup>2</sup> de preservação ambiental (BORGES, 2004).

Com população recenseada pelo IBGE em 2007 de 674.762 habitantes, João Pessoa apresenta, de acordo com Silva, Filho e Silva (2002), um índice de urbanização bastante alto, não dispondo de zona rural, uma vez que os vazios urbanos correspondem praticamente a áreas de preservação (mata atlântica, manguezais, vegetação de restinga, espelhos d'água) e loteamentos ainda não ocupados.

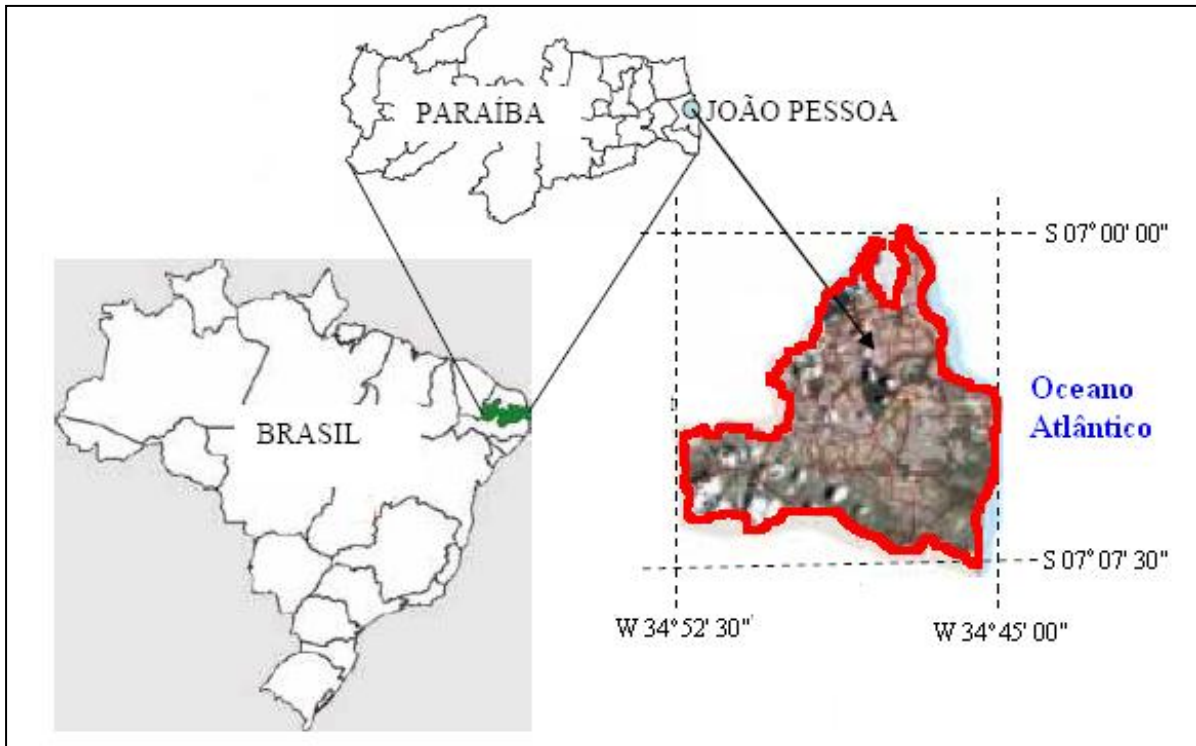


Figura 4.1 Localização do município de João Pessoa – PB (Nascimento, 2008).

## 4.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

Regionalmente, a área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba, que ocupa uma extensa faixa ao longo do litoral dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. As principais unidades geológicas presentes na região de João Pessoa são constituídas, basicamente, de sedimentos inconsolidados recentes de origem fluvial e marinha e de rochas sedimentares brandas, abrangendo os períodos geológicos Holoceno a Cretáceo (MABESOONE; ALHEIROS, 1988; BORGES, 2004).

A Figura 4.2 apresenta o quadro resumo da situação estratigráfica das principais unidades geológicas presentes na área de estudo, segundo Coutinho (1967) e Martins (2006). A Figura 4.3 apresenta a distribuição espacial destas unidades.

Na área de estudo podem ser identificados três grandes unidades de sedimentos inconsolidados recentes (Quaternário): os depósitos aluvionares, os depósitos marinhos com contribuição fluvial e os depósitos arenosos de origem predominantemente eólica.

| IDADES    |             | UNIDADES GEOLÓGICAS  |
|-----------|-------------|--|
| ERA       | PERÍODO     |  |
| CENOZÓICA | QUATERNÁRIO | Sedimentos inconsolidados de origem aluvio-coluvionar.   |
|           |             | Sedimentos inconsolidados de origem marinha com contribuição fluvial.  |
|           |             | Sedimentos arenosos inconsolidados (dunas).  |
| MESOZÓICA | TERCIÁRIO   | Argilitos, siltitos e arenitos brandos das Formações Riacho Morno (superior) e Guararapes (inferior) do Grupo Barreiras. |
|           | CRETÁCEO    | Calcários, calcários argilosos e calcoarenitos da Formação Gramame do Grupo Paraíba.                                     |

Figura 4.2 Quadro resumo da situação estratigráfica das unidades geológicas da área de estudo. Fonte: Coutinho (1967) e de Martins (2006).

Os aluviões fluviais são sedimentos predominantemente arenosos com lentes de material siltooso e argilosos e níveis de cascalho variegado. São encontrados também áreas de sedimentos argilo-siltosos ricos em matéria orgânica. Esta unidade ocorre nos vales das principais drenagens presentes na área de estudo (Rios Paraíba, Gramame, Jaguaribe, etc., Figura 4.2).

Os depósitos marinhos compõem uma estreita faixa costeira, com maior expressão no extremo nordeste da área estudada. São constituídas de areias bem classificadas, de granulação fina a média e contendo restos de animais marinhos (conchas). Constituem as praias e restingas atuais. Nos estuários das principais drenagens, estes sedimentos recebem contribuição de material mais fino (silte e argila) e matéria orgânica, podendo ocorrer áreas de mangues.

Os depósitos arenosos de origem eólica e marinha (material retrabalhado) são constituídos por areias e ocorrem na forma de bolsões restritos nas porções central e leste de área, sobre os platôs, cerca de 40 metros acima do nível de costa atual (Figura 4.2).

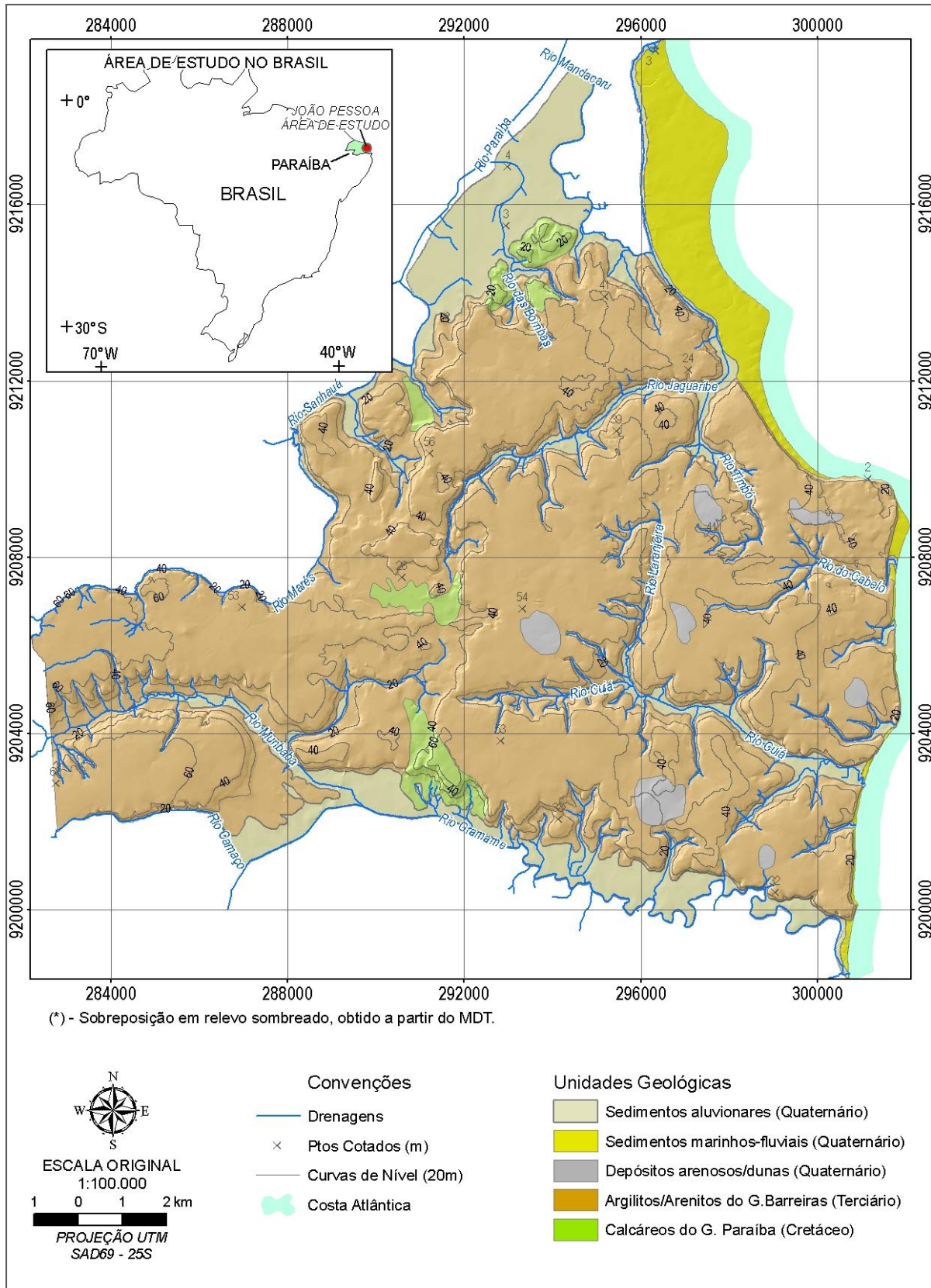


Figura 4.3 Mapa com as principais unidades geológicas presentes na área de estudo. Fonte: Coutinho (1967) e Martins (2006).

Sob estas formações quaternárias, ocorre o Grupo Barreiras de idade terciária, englobando as Formações Guararapes (superior) e Riacho Morno (inferior), constituídas predominantemente de arenitos silticos-argilosos, argilas areno-siltosas e leitos conglomeráticos, sem a presença de fósseis. Os sedimentos são comumente mal selecionados e com predominância de areia e argila. Apresentam cores avermelhadas, variegadas e horizontes esbranquiçados associados à ocorrência de intercalações caulínicas (MABESOONE; CAMPOS e SILVA; BEURLIN, 1972; BIGARELLA, 1975). Esta unidade predomina amplamente em termos de área de ocorrência no município de João Pessoa (76% da área total), de acordo com o mapa geológico apresentado na Figura 4.3.

A unidade geológica mais antiga aflorante na região estudada é representada pela Formação Gramame do Grupo Paraíba de idade cretácea (mesozóico). Esta formação apresenta cerca de 40 metros de espessura, compreendendo rochas sedimentares químicas com contribuição detrítica (sedimentos clásticos), formadas por calcários (de água rasa), calcoarenitos litorâneos e horizontes de fosfato na sua porção basal. Presença de fósseis (amonóides e foraminíferos). A denominação original da formação ocorreu em 1940, referindo-se às ocorrências de afloramentos de calcário no vale do Rio Gramame, na porção sul da área de estudo. Esta unidade também está presente de forma descontínua e associadas à vales de drenagem nos setores norte e central investigada (Figura 4.3).

### **4.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E PEDOLÓGICOS**

A área de estudo está inserida, basicamente, em dois domínios geomorfológicos distintos, cada um abrangendo várias unidades morfológicas. Caracterizados por Furrier (2007), os domínios recebem as denominações de Baixos Planaltos Costeiros e Baixada Litorânea.

Os Baixos Planaltos Costeiros estão inseridos na macrocompartimentação dos Tabuleiros Litorâneos, sustentada pelos sedimentos areno-argilosos mal consolidados do Grupo Barreiras. Constituem superfícies aplainadas e suavemente inclinadas para o leste, sendo abruptamente interrompidos pelos entalhes fluviais.

Os limites desse domínio com a planície marinha são assinalados por uma linha de falésias (vivas) esculpidas, na atualidade, por processos marinhos, ou por uma linha de falésias mortas (inativas – Figura 4.4), nas quais os processos marinhos influentes na sua forma cessaram.



Figura 4.4 Falésias mortas. Timbó (fotos: A. S. T. de MELO, 1998 apud MELO; ALVES; GUIMARÃES, 2001).

A Baixada Litorânea corresponde a terrenos relativamente planos de baixa altitude, formados por sedimentos depositados no Quaternário. Possuem altitudes modestas, geralmente inferiores a 10 metros, embora ocorram planícies fluviais mais afastadas da linha de costa com altitudes superiores (FURRIER, 2007).

A Baixada é composta de formas variadas que resultam da acumulação de sedimentos marinhos, fluviais e flúvio-marinhos. Suas feições geomorfológicas são divididas em praias, terraços marinhos, planícies marinhas, planícies flúvio-marinhas, planícies fluviais e terraços fluviais.

As praias do litoral de João Pessoa sofrem forte variação sazonal quanto ao seu perfil, apresentando acumulação nos períodos de verão (Figura 4.5(a)) e erosão nos períodos de inverno (Figura 4.5 (b)).



Figura 4.5 Perfil praias de trecho da praia de Manaíra em janeiro de 2005 (a) e em junho de 2005 (b) (as rochas aflorando são na verdade de obras anteriores de contenção do processo erosivo – na foto (a) elas se encontram soterradas pelos sedimentos). Furrier (2007).

Em conversão da nomenclatura do Mapa Pedológico do Estado da Paraíba (2004) para o novo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 1999), Borges (2004) menciona que a distribuição dos solos em João Pessoa está intimamente relacionada ao relevo local.

Sobre os Tabuleiros Litorâneos do Grupo Barreiras predominam: Argilossolos Vermelho-Amarelos, muitas vezes associados aos Latossolos Vermelho-Amarelos e aos Espodosolos (Podzóis) (arenosos e argilosos de baixa fertilidade e lixiviados sobre os sedimentos terciários). Nas planícies fluviais, desenvolvem-se Neossolos Flúvicos e Gleissolos (de várzea aluviais e hidromórficos), nas flúvio-marinhas, são encontrados os Solos Indiscriminados de Mangue, e nas marinhas, ocorrem os Neossolos Quartzarênicos (arenosos de praias, restingas e cordões litorâneos) (NASCIMENTO, 2008).

#### 4.4 ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Tuma (2004), em trabalho de mapeamento geotécnico da Grande João Pessoa (a capital mais as cidades de Cabedelo, Santa Rita e Bayeux), aborda aspectos dentre os quais alguns são mencionados a seguir. O autor identificou que os principais usos e ocupações do solo são destinados para fins habitacionais, instalações industriais, pecuária, agricultura e mineração (Figura 4.6).



Figura 4.6 Mineração em área urbana na cidade de João Pessoa.

A rede hidrográfica está representada por pequenos, médios e grandes afluentes, com destaque para o rio Paraíba do Norte onde nas suas margens se concentra a atividade de extração de areia através de desmonte hidráulico.

Entre os materiais inconsolidados residuais, aqueles resultantes da alteração das rochas sem ação de transporte, estão representados os solos superficiais da Formação Gramame e do Grupo Barreiras. Já entre os materiais inconsolidados retrabalhados, aqueles resultantes da ação dos agentes externos, fazem parte os materiais de praia, sedimentos aluvionares, depósitos de colúvio e os sedimentos de mangue (TUMA; SOARES, 2001).

Sobre potencial a erosão, os autores apresentam as seguintes considerações:

- as áreas consideradas de alto potencial à erosão somam 19% da superfície total e concentram-se, principalmente, nas margens dos rios a partir do trabalho progressivo das águas correntes nos materiais de cobertura onde os declives passam de 10% e, secundariamente, na ação da erosão marinha que atua na destruição das saliências e reentrâncias do relevo representado pelas falésias abruptas do Grupo Barreiras, na porção sudeste da área.
- A atuação dos processos erosivos de intensidade média ocorre em 76% da área total, em terrenos contendo solos residuais com comportamento mecânico variável de acordo com a inclinação natural do terreno, proteção da



cobertura vegetal e o desenvolvimento de processos antrópicos. A instalação de processos erosivos dos tipos sulcos e ravinamentos são mais visíveis nos horizontes superficiais do solo em locais de desmatamento clandestino, áreas de empréstimo abandonadas, cortes de barrancos em vias de acesso e ocupações urbanas em áreas inadequadas.

- Já onde os terrenos possuem baixas altitudes e baixas declividades, ao longo do litoral nordeste da área mapeada, ou onde afloram litologias calcárias caracterizadas por certa resistência mecânica, os processos erosivos atuam com baixas intensidades em 5% da superfície total.

Para Tuma *et al.* (2003), entre os principais impactos ambientais observados destacam-se os assentamentos urbanos em locais desfavoráveis, edificações na orla costeira, contaminações dos mananciais hídricos, entre outros problemas.

É acrescentado que a área apresenta uma vocação geológica privilegiada quanto à ocorrência de grandes quantidades e variedades de materiais empregados na construção civil. Esta diversidade decorre da área estar situada numa bacia sedimentar marginal da costa Atlântica. O potencial natural da região está representado por extensos depósitos de areia, de argilas e importantes jazidas de calcário.

Na margem do rio Paraíba do Norte ocorrem enormes depósitos de areia, argila e cascalho, provenientes do trabalho de erosão do rio nos tabuleiros do Grupo Barreiras. Os materiais argilosos são usados para cerâmica comum (telhas e tijolos) e areia e brita como argamassas, concretos, etc. Nessas áreas são mais visíveis os impactos ambientais gerados pela execução irregular das atividades de mineração.

A posição estratigráfica dos materiais da Formação Gramame está abaixo do pacote sedimentar do Grupo Barreiras, sendo assim, as camadas do calcário afloram somente nas áreas topograficamente arrasadas do terreno. As jazidas desse material destinam-se, principalmente, a fabricação de cimento. A lavra deste material é conduzida por empresas legalizadas por processo mecanizado a céu aberto, mas também ocorre a extração irregular por grupos de garimpeiros que operam na ilegitimidade.

Com respeito as atividade de fundações em João Pessoa, Soares (2005), em função dos equipamentos disponíveis e economicamente viáveis e das áreas de maior demanda em construção, os tipos de estacas mais utilizados são:

- Estacas de compactação (Tripé ou torre);

- Estacas escavadas (perfuratriz sobre caminhão);
- Estacas Franki (Franki);
- Estacas metálicas (torre);
- Estacas pré-moldadas de concreto (torre).

O autor divide o relato em função de duas áreas: a primeira sendo a parte alta de João Pessoa, em relação ao nível do mar, com predominância do Grupo Barreiras. Nessa região, na grande maioria dos casos, o perfil geotécnico apresenta a existência de solos coesivos (siltes argilosos) e inexistência de lençol freático, pelo menos até profundidades mais resistentes que oferecem boa capacidade de suporte. Dessa forma, a solução escolhida para as fundações são estacas escavadas (perfuratriz sobre caminhão) geralmente a 12 metros de profundidade na região do grupo barreiras ao norte do Rio Jaguaribe ou tubulões a céu aberto. No trecho que corresponde ao sul do rio, na região da Cidade Universitária (Bairros do Castelo Branco, Bancários, etc) o autor menciona a ocorrência de fundações diretas (superficiais) com profundidade variando entre 1 e 1,5 metros.

A outra área é a região litorânea, com perfil geotécnico constituído por solos granulares (areias, areias siltosas) e presença de lençol freático. Por razões óbvias, as estacas escavadas e os tubulões a céu aberto se tornam inadequados para essa área. Às vezes há ocorrência de uma camada intermediária compressível que ora se apresenta como silte arenoso, ora silte argiloso, ou argila siltosa mole, variando de 7,0 m a 12,0 m de profundidade.

Soares (2000) menciona a ocorrência de argila orgânica mole em trecho da planície, de 13,5m a 23,0m de profundidade; e Conceição (1977), em trabalho com realização de vários ensaios geotécnicos de laboratório e in situ estuda uma argila situada próxima ao leito do Rio Jaguaribe no trecho em que este desemboca na base da falésia. O autor encontra uma camada de 10 metros de espessura de argila mole e ao final dos ensaios (classificação, palheta (Vane Test), consolidação, compressão não confinada, triaxial não consolidado não drenado e consolidado drenado), observa que é pré – adensada.

Soares (2005) lista as soluções de fundações mais usuais nesta área (planície) em ordem de maior ocorrência:

- Melhoria com Estaca de Compactação – aumenta a capacidade de carga de solos arenosos e reduz os recalques das fundações, viabilizando o uso de

fundações diretas. As sapatas de fundação são assentadas sobre as estacas, que, geralmente, são de areia e brita, ou traços fracos de solo cimento. Com espaçamentos eixo a eixo entre 80 e 100 cm, alcançando no máximo 5 m de profundidade, as estacas não são projetadas como elemento estrutural e sim como parte de um sistema em que o solo tem sua resistência aumentada para valores de tensões admissíveis da ordem de 5 kgf/cm<sup>2</sup>. Com poucas quantidades de finos, a compactação do solo litorâneo é bastante eficiente e têm-se prédios com mais de 30 lajes com esse tipo de solução de fundação. Pelo fato de utilizarem-se materiais de menor custo, reduzir o volume de sapatas e de escavações, de mão de obra e de ter uma alta produção, em torno de 60 m diários, essa solução se torna bastante econômica em relação às demais, e desde que os estudos de recalques e distorções angulares sejam favoráveis, a melhoria de solo com estacas de compactação é aprovada e utilizada como solução de fundação da obra.

- Estacas Tipo Franki - No caso de inviabilidade para a solução em melhoria, é necessário atravessar a camada compressível de modo que a ponta da estaca se encontre em profundidades inferiores ou iguais a 14,0 m, por questão de custos;
- Estacas Metálicas – Para profundidades ainda maiores (de 18,0 m a 34,0 m)
- Estacas Pré-Moldadas de Concreto – Ainda no caso cujo alcance necessário é para maiores profundidades (de 15,0 m a 21,0 m) e as sondagens SPT não apresentam, ao longo da cravação, valores superiores a 20/30;
- Tubulões Pneumáticos – Em obras como pontes ou viadutos.

Ultimamente, vem crescendo bastante o uso de estacas tipo hélice contínua, em ambos os setores da cidade (parte alta e baixa), uma vez que esse tipo de fundação não apresenta limitações com o lençol freático. Nas praias, as estacas hélice contínua costumam alcançar mais de 20 metros de profundidade, onde o  $N_{SPT}$  atinge mais de 50 golpes.

#### **4.5 ASPECTOS DA HIDROLOGIA**

João Pessoa está situada na bacia do Baixo Paraíba e seus principais cursos d'água são os rios Paraíba e Gramame. O primeiro rio citado é margeado por exuberantes manguezais formando um grande estuário na sua desembocadura no oceano Atlântico, enquanto que o vale do rio Gramame, possui na sua foz, extensas barras arenosas

configurando a este estuário uma característica lagunar. De maior importância para o abastecimento de João Pessoa, são os rios Marés, Sanhauá, Jaguaribe e Mumbaba-Gramame que são os grandes provedores de água da cidade. A Figura 4.7 mostra as bacias hidrográficas de João Pessoa com a rede hidrográfica principal.

Segundo Coutinho (1967), o curso dendrífico da rede hidrográfica localizada no território foi definido pela inclinação do terreno, já que as formações geológicas estão dispostas em arranjo tabular horizontal; acrescenta que a Formação Guararapes do Grupo Barreiras, situada mais ao sul tem uma horizontabilidade nas camadas e um aspecto mais estratificado. De acordo com Carvalho (1999), esta situação é típica de áreas que possuem rochas sedimentares que provocam uma “estratificação da permeabilidade”.

Também merecendo destaque encontra-se o rio Jaguaribe, que corta a cidade no sentido sul e norte. Nóbrega (2002) lembra que o rio Jaguaribe, até a década de trinta, tinha sua foz na divisa entre as praias do Bessa (última praia ao norte de João Pessoa) e de Intermares (primeira praia do sul do município de Cabedelo, este ao norte de João Pessoa). O Jaguaribe então foi desviado com o objetivo de melhorar as condições sanitárias dos terrenos do bairro do Bessa que apresentava-se como área doentia pela presença dos alagados que dominavam toda sua extensão. O rio tem uma extensão aproximada de 21 km desde a sua nascente ao sul de João Pessoa, até a sua desembocadura no mar da praia do Intermares. Trata-se de um rio que percorre vários níveis topográficos e que tem sofrido alterações antrópicas, inclusive com ocupação de assentamentos subnormais nas suas vertentes. (LEMOS, 2004).

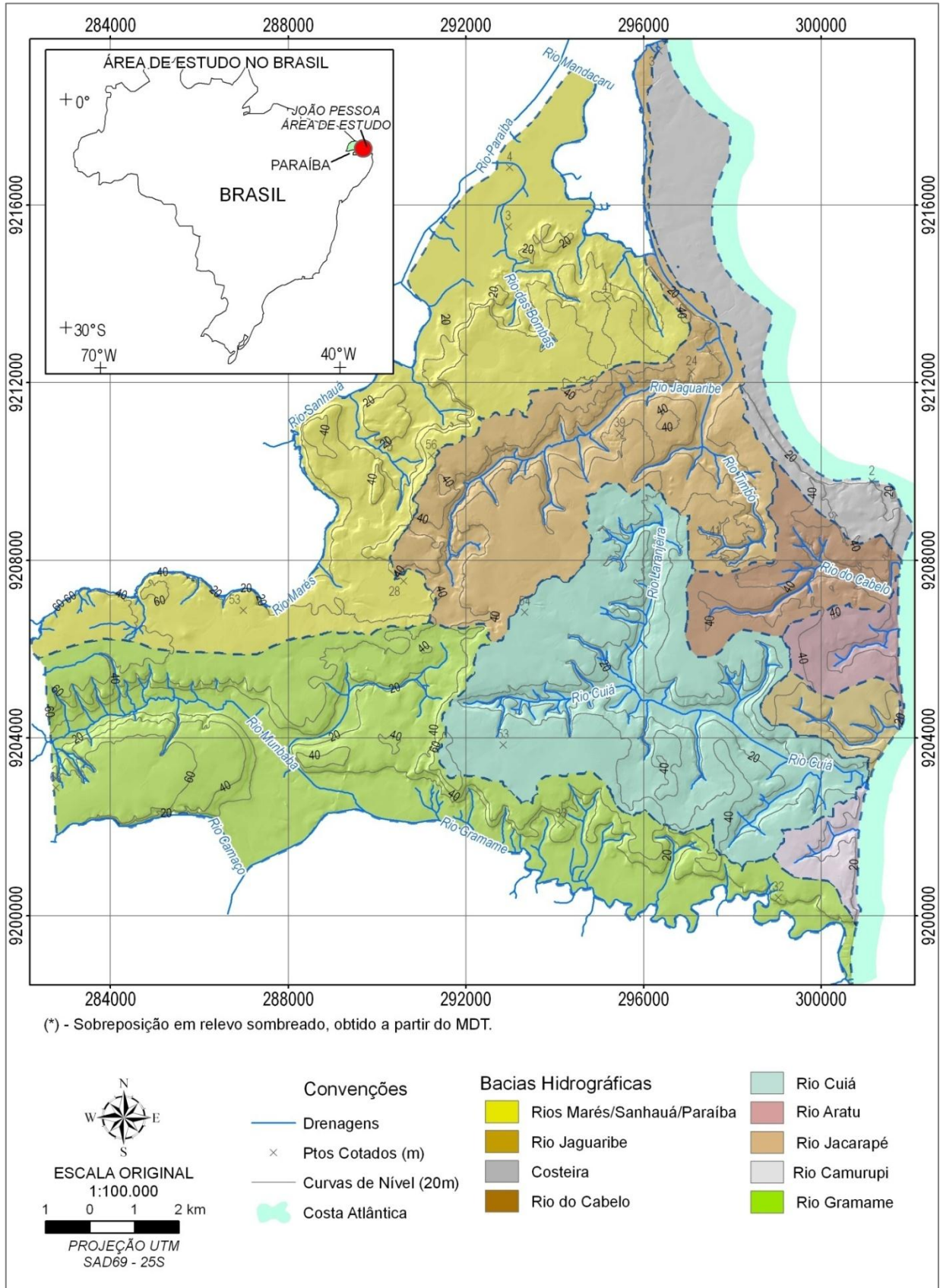


Figura 4.7 Mapa com as principais bacias hidrográficas presentes na área de estudo.

#### 4.6 ASPECTOS DA HIDROGEOLOGIA

Melo e Alves (2001), em capítulo (a partir do qual foi baseado este item) sobre águas subterrâneas na região de João Pessoa, especificam dois sistemas que ocorrem na área:

- um sistema livre, contido, sobretudo no Barreiras e nos sedimentos inconsolidados do Quaternário, e, de maneira mais restrita, nos calcários da Formação Gramame e nos arenitos da Formação Beberibe.

- Um sistema confinado nos sedimentos Beberibe, caso se encontrem sotopostos à Formação Gramame ou sob níveis confinantes, argilosos das formações do Barreiras.

O aquífero Beberibe é um dos mais importantes da região nordeste, pois além de ser relativamente profundo (>100m), está, na sua porção mais oriental, confinado pelos calcários das formações Gramame, sendo, portanto, de difícil contaminação. (FURRIER,2007).

A formação Beberibe apresenta uma espessura superior a 165 metros. O aquífero encontra-se numa área com pluviometria relativamente elevada e boas condições de alimentação indireta. Acrescenta-se a sua posição geológica favorável, com suave inclinação para o mar e com superposição de níveis impermeáveis diversos. Esses fatores contribuem para a formação de um aquífero artesianos que, dependendo da dissecação, produz excelentes condições de emanações, ressurgências e fontes, quando situadas longe das zonas de recarga direta. A alimentação é feita de duas maneiras:

Direta, pelas precipitações ao longo de suas faixas de exposição planas e arenosas, com taxas de infiltração que variam de 15% a 30% da pluviosidade anual (SUDENE, 2001); ou indireta, por meio de infiltração vertical do lençol freático que lhe é sobreposto (Barreiras ou depósitos quaternários).

O aquífero Gramame, referente aos calcários, produz quantidade reduzida de água subterrânea e de qualidade química medíocre. Sua alimentação se faz verticalmente: ascendente, quando proveniente do aquífero Beberibe e descendente, a partir do Barreiras ou dos sedimentos quaternários. As possibilidades de uma circulação cárstica existem nos calcários puros, mas a permeabilidade média é sempre baixa uma vez que as camadas margosas são predominantes.

Os sedimentos que constituem o Barreiras ocupam uma extensão considerável na área estudada. Quanto à espessura, o grupo é mais possante na faixa litorânea, variando de

40 a 70 metros, mas podem existir setores em que essas espessuras podem ultrapassar os 80 metros.

O aquífero Barreiras é de relativa importância na área, produzindo água de boa qualidade. No geral, apesar de sua extensão, o aquífero Barreiras apresenta, no seu todo, possibilidades hidrológicas relativamente fracas em virtude de sua baixa permeabilidade, da existência de ressurgências nas encostas dos vales e da alimentação dos rios e desempenha um papel importante como reservas de água subterrânea.

Essas reservas de água subterrânea são restritas aos níveis mais arenosos e conglomeráticos, encerrados entre níveis mais finos e argilosos. A circulação subterrânea se realiza com substancial perda de carga por três razões: drenagem permanente do aquífero para os cursos d'água que dissecam a área; drenagem para o nível confinado sub-superficial (Formação de Beberibe, se a diferença do potencial hidrodinâmico o permitir); escoamento para o oceano.

A alimentação desse aquífero é feita, exclusivamente, pela infiltração das águas das chuvas anuais, cujas taxas são estimadas em 15%, variando para mais ou para menos, em função do seu condicionamento morfológico. A circulação ocorre diretamente ou indiretamente para o mar, condicionada pela rede hidrográfica, configuração geomorfológica, constituição geológica e relações tectono-estruturais (LUMMERTZ, 1977).

Os depósitos quaternários constituem sistemas aquíferos livres e acham-se bem distribuídos pela planície aluvial dos rios Jaguaribe e Timbó e pela planície litorânea. Sua permeabilidade está relacionada com o seu conteúdo em silte e argila. Nos locais mais afastados do litoral, predominam depósitos areno-argilosos de granulação média e fina, ocasionalmente grosseira e até conglomerática (colúvies do Barreiras e sedimentos aluviais). Nos setores mais próximos da costa, esses depósitos são fluviomarinhos, tornando-se siltico-argilosos e apresentam coloração cinza-escuro a preto.

#### **4.7 ASPECTOS DO CLIMA**

De acordo com a classificação de W. KÖPPEN, o clima é do tipo As` caracterizado como quente e úmido com chuvas de outono e inverno. A média térmica anual é de: mínima de 23° C; máxima de 28° C; e amplitude térmica de 5° C (BORGES, 2004).

No contexto pluviométrico, a cidade de João Pessoa apresenta períodos de estações seca (primavera-verão) e chuvosa (outono-inverno) bem definidos. A pluviosidade média mensal em mm de João Pessoa é exibida na Figura 4.8; Furrier (2007) comenta a observação dos períodos mais chuvosos (março – agosto) e mais secos (setembro – fevereiro).

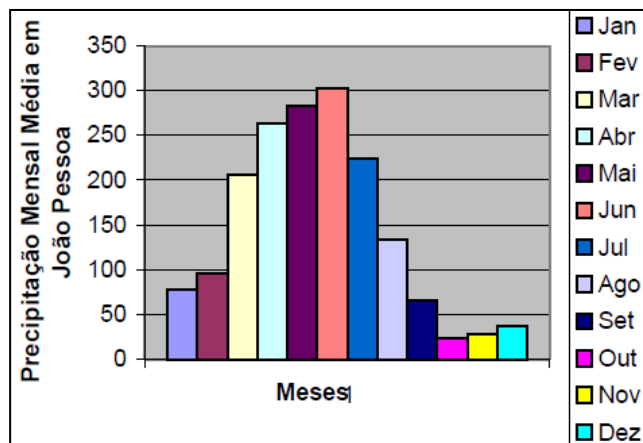


Figura 4.8 Pluviosidade média mensal de João Pessoa, no período de 1912 a 1985 (SUDENE, 1990 *apud* FURRIER, 2007).

#### 4.8 ASPECTOS DA VEGETAÇÃO

A vegetação de João Pessoa aparece, segundo Carvalho, F. e Carvalho, M. (1985), representada por formação vegetal pioneira, caracterizada por uma formação do tipo herbácea, de fisiologia própria para ambientes salinos; campos e matas de restinga, manguezais, mata úmida – latifoliada perenifólia costeira – ou mata atlântica e cerrado.



## 5 MÉTODO

A pesquisa foi estruturada segundo as etapas e atividades apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Principais etapas e atividades da pesquisa.

| <b>Etapas</b>                            | <b>Atividades</b>   |
|--|---|
| Planejamento                             | Revisão bibliográfica preliminar<br>Definição do tema, hipóteses de trabalho e objetivos<br>Definição da ferramenta computacional<br>Definição da área de estudo  |
| Revisão Bibliográfica                    | Fundamentação teórica orientada para atender às diretrizes definidas na etapa do planejamento   |
| Coleta e Tratamento dos Dados            | Base topográfica digital<br>MDT<br>Mapa de Declividade<br>Mapa de Bacias Hidrográficas<br>Mapa Geológico<br>Seleção e organização dos boletins de sondagem<br>Estruturação das planilhas do banco de dados<br>Entrada dos dados das sondagens no banco de dados |
| Interpolações a partir do Banco de Dados | Interpolação da superfície freática com métodos determinísticos (Topo to Raster) e geoestatísticos (krigagem ordinária)<br>Interpolação do $N_{SPT}$ com Topo to Raster e Krigagem Ordinária  |
| Análise dos Resultados                   | Validação das interpolações<br>Premissas quanto ao comportamento do terreno frente à obras de fundações   |
| Conclusões                               | Elaboração das conclusões obtidas com a pesquisa<br>Desmembramentos potenciais para o estudo  |

## 5.1 PLANEJAMENTO

Esta etapa englobou atividades voltadas à preparação da pesquisa, envolvendo a realização de uma revisão bibliográfica preliminar, a definição do tema, das hipóteses de trabalho e dos objetivos discutidos anteriormente.

Dado a natureza da pesquisa relacionada à utilização de ferramentas computacionais e banco de dados, nesta etapa também foi feita a escolha do SIG para cumprir esta função. Optou-se pelo uso de SIG visto que se trata de um programa que agrega muito bem as funções de gerenciamento e análise de uma base de dados de natureza espacial, característica intrínseca das variáveis geotécnicas a serem estudadas.

Em particular, optou-se por utilizar o ArcGIS, pois o Departamento de Geotecnia dispõe de licença de uso e ele apresenta uma estrutura organizacional que permite a realização das atividades relacionadas ao projeto em questão (banco de dados relacional), incluindo ferramentas avançadas de edição, suporte a metadados, interfaces convenientemente facilitadas à utilização do usuário e leitura direta de uma variedade considerável de dados.

Mais importante que estas características, dado o escopo da presente pesquisa, o ArcGIS também possui ferramentas de análise estatísticas, assim como de métodos de interpolação determinísticos e geoestatísticos.

Outro fator condicionante a opção pelo software apresentou-se na observação de que os órgãos municipais de João Pessoa (Secretaria de Meio Ambiente – SEMAM e Secretaria de Planejamento – SEPLAN) colaboradores e diretamente interessados no melhor andamento da pesquisa utilizam o ArcGIS como plataforma das atividades de geoprocessamento. Diante desse contexto, a escolha de um SIG cujos produtos resultassem em formatos compatíveis aos dos gerenciados pelos usuários em potencial foi influenciada de maneira relevante.

A definição da área de estudo também aconteceu na etapa de planejamento. O município de João Pessoa (PB) foi escolhido pela possibilidade de acesso a um acervo muito grande de boletins de sondagem à percussão realizados neste município, fornecidos gentilmente pela empresa Concesolo - Consultoria em Concreto e Solos Ltda.

Além disso, a própria Prefeitura Municipal de João Pessoa manifestou interesse na pesquisa e disponibilizou uma série de dados que foram utilizados nos estudos realizados.

## **5.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A etapa de revisão bibliográfica sistemática iniciou-se em seguida à etapa de planejamento da pesquisa, buscando consolidar uma fundamentação teórica nos principais temas técnicos envolvidos no trabalho. Uma síntese dessa revisão foi apresentada no item 2 deste texto.

## **5.3 COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS**

### **5.3.1 Base Topográfica Digital**

Como início das atividades de levantamento e preparação das bases cartográficas digitais, foi adquirida a carta com as folhas topográficas do município de João Pessoa, em escala 1:10.000, disponibilizada pelo INTERPA – Instituto de Terras e Planejamento Agrícola do Estado da Paraíba. A Tabela 5.2 apresenta os códigos das folhas constituintes da carta.

A carta apresenta Projeção UTM - Meridiano Central 33<sup>o</sup>; Datum Horizontal : SAD 69 Chuá (MG); Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba (SC). Tais especificações correspondem à Zona UTM 25S (Fuso 25).

As folhas (Tabela 5.2) foram convertidas em imagens de formato Bitmap (escaneadas) e resolução de 400 d.p.i. Foram então georreferenciadas individualmente em coordenadas geográficas com o Datum SAD 69.

Seguiu –se então do recorte de cada folha e, ainda em coordenadas geográficas, as folhas foram articuladas em um mosaico. O mosaico foi então projetado para coordenadas plano - retangulares no sistema de projeção UTM.

Tabela 5.2 Códigos das folhas topográficas em escala 1:10.000 de João Pessoa – PB.

| <b>Código</b> | <b>Folha</b>                       |
|---------------|------------------------------------|
| H12           | SB – 25 – Y – C – III – I – NE – C |
| I11           | SB – 25 – Y – C – III – I – N0 – F |
| I12           | SB – 25 – Y – C – III – I – NE – E |
| J11           | SB – 25 – Y – C – III – I – SO – B |
| J12           | SB – 25 – Y – C – III – I – SE – A |
| J13           | SB – 25 – Y – C – III – I – SE – B |
| K10           | SB – 25 – Y – C – III – I – SO – C |
| K11           | SB – 25 – Y – C – III – I – SO – D |
| K12           | SB – 25 – Y – C – III – I – SE – C |
| K13           | SB – 25 – Y – C – III – I – SE – D |
| L11           | SB – 25 – Y – C – III – I – SO – F |
| L12           | SB – 25 – Y – C – III – I – SE – E |
| L13           | SB – 25 – Y – C – III – I – SE – F |

Como etapa seguinte à obtenção e georreferenciamento do mosaico, partiu-se para a etapa de vetorização dos elementos presentes no documento e necessários à posterior geração do MDT. Tais elementos correspondem às curvas de nível, com espaçamento de 5 metros e amplitude de cotas variando de 0 a 70 metros, a rede de drenagem e pontos cotados, totalizando 1812 com cotas variando de 1 a 71 metros.

Como dados auxiliares, foram utilizados arquivos em formato shape fornecidos pelas Secretarias de Meio Ambiente e de Planejamento do município, com as curvas de nível, os lotes e ruas da cidade. O arquivo que continha as curvas de nível representou um impasse ao andamento do projeto, visto que as curvas, apesar de especificadas com o mesmo sistema de projeção da base georreferenciada, apresentavam-se de maneira discordante e muitas vezes com erros de ajuste inaceitáveis (mais de 10 metros de distância), além de haver trechos não digitalizados ou com especificação de elevação não compatível às da Carta Plani-altimétrica.

Tais arquivos foram adequados e ajustados à base topográfica digital produzida na etapa anterior, e, adicionalmente, foram digitalizados a rede de drenagem e os pontos cotados representados na carta.

Para realização dessas etapas foram utilizados comandos do software ArcGis 9.1 referentes à inserção ou exclusão de vértices constituintes das feições de classe das linhas, mudança de posição de tais vértices, além da digitalização manual (comando *sketch*). Também foi necessária a quebra de elementos vetoriais compostos por linhas (*split tool*) para o aumento de curvas que não se encaixavam adequadamente ao traçado original da carta.

Como os boletins de sondagens (melhor detalhados mais adiante) utilizados apresentam locações dos furos em função do endereço, o qual exhibe o nome da rua e número do terreno, foi necessário também o ajuste do arquivo em formato shape contendo os lotes do município, fornecido pelas secretarias mencionadas, uma vez que representa um dos temas fundamentais à locação das sondagens. Tal arquivo, representado por elementos vetoriais de polígonos, cujo atributo de maior interesse ao trabalho é o número do lote, foi ajustado às representações correspondentes na Base Topográfica Digital.

### 5.3.2 Modelo Digital do Terreno (MDT)

No âmbito da pesquisa, o MDT se mostrou fundamental ao processo de inserção dos furos de sondagem (na definição das cotas de boca dos furos) e atuou como base para as modelagens posteriores.

Foram testados dois métodos na elaboração do modelo: a triangulação por interpolação linear (TIN) e o Topo to Raster.

Com o Topo to Raster, o MDT no formato *grid* foi produzido a partir do módulo *Spatial Analyst* utilizando-se a rotina *topo to raster by file*. Para definição do espaçamento de malha máximo, considerou-se o critério do erro cartográfico admissível, que corresponde a 0,5 mm da escala e trabalho adotada. Na escala de 1:10.000, este erro corresponde a 5 metros. Para dados de entrada, a rotina requer as curvas de nível, pontos cotados e linhas de drenagem; e para controlar o modelo de interpolação, são definidos parâmetros especificados através de um arquivo no formato texto (Figura 5.1).

```

mdt3 - Notepad
File Edit Format View Help
Contour D:\base_banco\curvas cotas
Point D:\base_banco\ptos_cotados cotas
#Sink D:\data\sinks_200.shp
Stream D:\base_banco\drenagem
#Lake D:\data\lakes\polygon
Boundary D:\base_banco\limite_curvas
ENFORCE ON
DATATYPE CONTOUR
ITERATIONS 40
ROUGHNESS_PENALTY 0.00000000000
DISCRETE_ERROR_FACTOR 1
VERTICAL_STANDARD_ERROR 0.00000000000
TOLERANCES 2 100
ZLIMITS 0 72
#EXTENT -810480.62500000000 8321785.00000000000 810480.62500000000 101.
CELL_SIZE 5
#MARGIN 20
#OUT_STREAM
#OUT_SINK
OUT_DIAGNOSTICS D:\base_banco\diag2.txt

```

Figura 5.1 Ilustração do arquivo txt com os parâmetros de entrada do módulo *Topo to raster*.

Foram realizados vários testes com o intuito de refinar os resultados da interpolação do MDT, tal como a redução do espaçamento da malha. Ao tentar definir o tamanho de célula a partir de 2,5m, observou-se como efeito negativo um aumento significativo no tempo de processamento e nos arquivos produzidos, assim como a necessidade de capacidade de memória computacional muito maior que a disponível. Em medida alternativa a esse fator, a área de estudo foi dividida em quatro setores e as interpolações realizadas separadamente, para obter o espaçamento mínimo de malha 4m. Após esse processo, reuniram-se os setores já interpolados com a ferramenta de mosaico, obtendo, assim, o MDT para a toda a área de estudo com uma melhor precisão, devido à redução do espaçamento da malha.

Também foi analisado o MDT gerado pela Triangulação de Delaney (TIN). Para direcionar a escolha e validação do algoritmo de interpolação que melhor definisse o MDT, entre os métodos Topo to Raster (malha de 4 e 5 m) e TIN, foram extraídos deles os valores de cota interpolados (estimados) nos locais dos pontos cotados originais, previamente obtidos da Base Topográfica Digital. Para a extração destas cotas, recorreu-se ao comando *Extract values to points* do módulo *Spatial Analyst Tools*. Em seguida, os valores extraídos foram utilizados em conjunto aos originais no cálculo do *Root Mean Square Error – RMS* ou erro médio quadrático, calculado pela equação:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(z - z_i)^2}{n}} \quad (\text{Equação 7})$$

em que  $n$  é o número total de pontos;  $z$  o valor do ponto original e  $z_i$  o valor estimado.

Seguindo recomendação do manual do ArcGis 9.1, foram geradas curvas de nível a partir do MDT produzido (comando *3D Analyst >Surface Analysis > Contour*) com espaçamento entre si de 2,5 metros (metade do intervalo das curvas iniciais interpoladas – 5m), as quais foram comparadas visualmente as curvas de nível originais vetorizadas das folhas topográficas. Essa comparação representa uma das formas de validação do resultado obtido.

### **5.3.3 Mapa de declividade**

A partir do MDT, foi gerado o mapa de declividade (comando *slope*), organizada em classes destacando restrições potenciais ao parcelamento dos solos (em função de aspectos como controle de erosão, dificuldades para implantação de serviços de infraestrutura, movimentos de massa, etc) com intervalos: [0 – 6]; [6,1 – 12]; [12,1 – 20]; [20,1 – 30]; [30,1 – 98] (%) (Lei Federal 6.766/79, IPT, 1991).

### **5.3.4 Mapa de Bacias Hidrográficas**

Foi elaborado também o Mapa de Bacias Hidrográficas, por meio do módulo Arc Hydro e dos arquivos de drenagem. As bacias hidrográficas obtidas automaticamente foram agrupadas de forma a definir as principais áreas de captação e fluxo d'água superficial que posteriormente subsidiaram as interpolações e análises das profundidades do lençol freático na área estudada.

### **5.3.5 Mapa Geológico**

O mapa geológico de João Pessoa foi cedido ainda não finalizado pela SEMAM-Secretaria de Municipal de Meio Ambiente. Foi então ajustado ao publicado por Coutinho (1967) e citado por Martins (2006).

### 5.3.6 Seleção e organização dos boletins de sondagens

O processo de coleta e reunião dos boletins de sondagens e informações referentes aos mesmos, como relatórios técnicos e locações dos furos, foi realizado em João Pessoa - PB. Os dados foram disponibilizados do acervo técnico da empresa Concesolo – Consultoria em Concreto e Solos Ltda, que atua na área de investigações geotécnicas, particularmente em sondagens à percussão com o ensaio SPT, na cidade de João Pessoa - PB.

A empresa realiza as sondagens segundo as normas vigentes da ABNT (NBR 6484/2001; NBR 8036/1983).

Os furos são nivelados em relação a RN indicado em planta com cota arbitrada de 0,0 m. O relatório do ensaio inclui as sondagens representadas em perfis individuais com: determinação do tipo de solo e suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível d'água, os índices de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) a cada metro, cota do furo em relação ao RN adotado e demais informações pertinentes. A última folha mostra planta do local da obra contendo a posição da referência de nível (RN) e localização dos furos.

Entre as informações exibidas em cada boletim, correspondentes a cada furo, destacam-se:

- Obra associada;
- Endereço do local em que os furos foram realizados, com nome da rua, número do terreno e bairro;
- Data da realização da sondagem;
- Cota da boca do furo, dada em relação ao meio fio da rua;
- Profundidade do nível d'água;
- Profundidade do topo e base das camadas de solo;
- Características das amostras de solo, como cor, compacidade e granulometria;
- Valores do índice de resistência à penetração  $N$  de cada metro de profundidade;



- Profundidade do impenetrável ou limite de sondagem.

Em observação do material referente aos relatórios disponíveis na empresa, foi constatada a existência de arquivos organizados por ano, desde 1975. Optou-se por copiar todo o acervo, em virtude da pesquisa ser realizada no estado de São Paulo e com o intuito de diminuir a necessidade de deslocamentos para coleta de material, além de permitir à aluna a opção de trabalhar com o maior número de sondagens possível. Ao todo, foram realizadas mais de 10.000 cópias, incluindo perfis de sondagens e croquis com locações.

Após o processo de coleta e de reunião dos boletins de sondagens, deram-se início as etapas de triagem do material para observação da distribuição das sondagens na área de estudo.

Dentro do montante de material copiado, a amostragem de estudo utilizada na pesquisa alcançou mais de 4.500 perfis de furos, que representam quantidade considerável de dados quando comparada a trabalhos com caráter semelhante. A tarefa de separar as sondagens por localização se mostrou extensa e laboriosa, principalmente pela opção de reorganizar o acervo por códigos referentes ao número do relatório de cada perfil, ao ano realizado e ao bairro em que se localiza, de modo a evitar repetição de perfis ao contabilizar o total de boletins.

Ao final da triagem, obtiveram-se as quantidades de boletins de sondagens referentes à observação preliminar da distribuição dos furos na área de estudo.

### **5.3.7 Estruturação das planilhas do banco de dados das sondagens**

A estruturação das tabelas utilizadas como instrumentos de captura e armazenamento das informações contidas em cada boletim de sondagem foi obtida em função dos seguintes dados:

- Data da realização da sondagem;
- Profundidade do nível d'água;
- Profundidade do topo e base das camadas de solo;

- Características das amostras de solo, como cor, compactidade e granulometria;
- Valores do índice de resistência à penetração  $N_{SPT}$  de cada metro de profundidade;
- Profundidade do impenetrável ou limite de sondagem.

A premissa básica adotada que direcionou a elaboração do modelo de tabela utilizado consiste na constatação de que a disposição dos campos referentes às informações de cada boletim possibilite a execução das interpolações posteriores, incluindo os métodos geoestatísticos.

Para tanto, foi concebida uma rotina de estágios que envolvem a geração e relação de camadas e tabelas que atendessem às necessidades do projeto por meio das ferramentas do ArcGIS 9.1.

Inicialmente, procede-se a geração de um arquivo em formato *shape* de pontos que representam a localização dos furos de sondagem, inseridos manualmente (comando *sketch*) na base de dados digital a partir dos temas (planos de informação) contendo os lotes e nomes das ruas, de acordo com as especificações de locação de cada croqui dos relatórios de sondagem.

Após a inserção dos pontos que representam os furos, foram acrescentados, na tabela de atributos do shape, campos referentes às informações contidas nos boletins de sondagem que não variam com a profundidade e apresentam valores únicos para cada furo (coord. X, corrd. Y, ID do furo, data, nível d'água, limite de sondagem, etc.).

No decorrer do processo, são geradas linhas nas tabelas que representam cada ponto inserido e, por conseguinte, cada furo de sondagem e suas respectivas informações relevantes a pesquisa.

Mostrou-se necessário, adicionalmente, a concepção de uma tabela que permitisse, por sua vez, a captura, armazenamento e manipulação das informações contidas nos perfis de sondagem que variassem com a profundidade (valores de N, tipo de solo, cor, textura, compactidade, etc.).

Optou-se então pelo formato dBase file (.dbf), pois o mesmo possibilita a realização de edições em programas auxiliares como Excel assim como o retorno para a plataforma

ArcGIS, além de ser compatível com o relacionamento e junção de tabelas (aspecto fundamental à interação com a tabela de atributos do arquivo shape gerado anteriormente).

Nas versões do ArcGIS 9.3 em diante já é possível vincular as tabelas no formato básico do Excel (formato .xls), sem necessidade de elaboração de uma em formato .dbf.

Após a etapa de geração desses arquivos, é realizada a ligação entre as duas tabelas (comando *join*). O esquema da Figura 5.2 ilustra o princípio básico do processo (junção em função do ID).

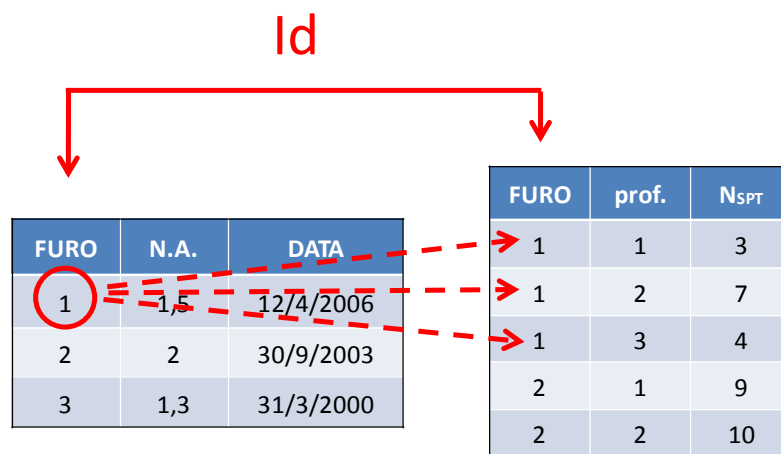


Figura 5.2 Esquema ilustrativo da estrutura das tabelas

A tabela resultante reúne todos os campos provenientes das originais, repetindo, inclusive, as linhas referentes às informações contidas nos campos que não variam com a profundidade, oriundas da tabela do arquivo *shape*.

Entretanto, para a realização das interpolações e modelagens seguintes, é necessário que os campos que contêm os atributos e informações de estudo pertençam a um arquivo em formato shape, o que não ocorre com a tabela ligada, em formato dBase. Procedeu-se, então, a geração de um segundo arquivo no formato desejado, a partir da tabela ligada (comando *display X e Y*). Como resultado, obteve-se um novo plano de informação representando a um shape de pontos envolvendo todos os campos de atributos correspondentes às informações que serão utilizadas nas etapas posteriores.

### 5.3.8 Entrada dos dados de sondagens

Pelo fato das sondagens não apresentarem coordenadas provenientes de nenhum procedimento de georreferenciamento, foi necessário localizar os furos por dados de endereço dos croquis existentes. Para isso, foram recorridos aos nomes de ruas, números de lotes, bairros, e qualquer outra informação que pudesse auxiliar a busca.

Uma vez que a referência principal para a localização eram os lotes (terrenos, que, por sua vez, encontram-se dispostos em função de ruas, praças, e outros elementos da malha urbana), foi utilizado o auxílio adicional de imagens de satélite em alta resolução, juntamente aos outros planos de informação, para a verificação e localização dos furos dispostos nos croquis impressos, referenciados de acordo com os tipos de obras. Diante das áreas disponíveis e porcentagem de cobertura de nuvens, optou - se pelas imagens em formato Quickbird com 0,6 m de resolução espacial colorida (3 bandas).

Dos furos analisados na triagem inicial muitos não apresentavam a localização de maneira adequada e foi impossibilitada a sua localização.

Não obstante, foi permitido localizar a posição de 1.881 sondagens. Observaram-se cerca de três furos por lote encontrado, uma vez que cada campanha geralmente é realizada dentro de um só lote. Para distribuir melhor os componentes dessa amostra (visto que muitos se encontram com distância muito próxima em relação a outros), foram inseridos, no banco de dados, 705 furos (cerca de um por lote). Essa medida demonstrou-se necessária devido às escalas de trabalho do estudo, pois ao realizar os primeiros testes de interpolação com todos os furos de cada lote, a krigagem informava a presença de furos muito próximos e solicitava um tratamento inicial (trabalhar com a média dos furos, o maior valor, etc).

Em função disso, para cada um dos 705, existem cerca de um ou dois furos a mais, a distâncias próximas, pertencentes às campanhas correspondentes. Assim, 1176 foram deixados em separado por se incluírem no grupo dos furos extras, ainda não inseridos, mas com localização confirmada (cada furo inserido foi indexado aos extras com mesma localização - lote). Esses furos extras foram reservados, então, para etapa posterior as análises, como forma de verificar os modelos obtidos. Suas informações e valores foram comparados aos estimados a partir dos modelos. Dessa forma, foi possível realizar uma etapa de validação dos resultados obtidos. A Tabela 5.3 resume um quantitativo do número de sondagens utilizado.

Tabela 5.3 Sondagens utilizadas na pesquisa

| <b>N. de sondagens</b> | <b>Situação</b>  |
|------------------------|--|
| 705                    | Inseridas no banco de dados  |
| 1176                   | Não inseridas e reservadas para comparação / validação das estimativas |
| 1881                   | Total  |

### **5.3.8.1 Cotas das bocas dos furos de sondagens**

Um aspecto importante considerado no trabalho diz respeito às cotas de boca dos furos (nível em que a perfuração e cravação são iniciados e a partir do qual é feita a contagem de profundidade).

Numa situação ideal, a boca dos furos seria considerada como coincidente com o nível de superfície, ou o valor de cota do MDT. Entretanto, devido à realização de escavações e aterros para diversos fins (assim alterando-se a disposição de cotas originais do terreno) antes de alguns ensaios de sondagem, considerou-se a hipótese dos perfis apresentarem bocas dos furos em níveis discrepantes do que seria o nível de superfície.

A altura relativa em que se inicia o ensaio é obtida a partir do desnível entre a boca do furo e um RN adotado – na maioria das vezes sendo o meio fio da rua em que o lote se encontra, e admitido aqui como exatamente o valor de cota do MDT, ou seja, supondo-se que não há diferença de níveis entre o RN e o terreno.

Nos perfis de sondagem, a altura da boca do furo é dada em valores negativos quando o ensaio se inicia em níveis abaixo do RN e em valores positivos na situação inversa.

Como etapa de testes e avaliação da relevância dos efeitos dessa diferença, esse aspecto foi então levado em conta para a entrada dos dados nas tabelas, visto que influenciam diretamente os valores de profundidade atingida. Caso o furo se inicie com desnível negativo em relação ao MDT, a profundidade real das camadas atingidas em

relação à superfície seria mascarada pela profundidade de ensaio alcançada (ex.: um valor de profundidade de ensaio a 4 m seria na verdade 5 m se no início do ensaio a boca do furo se encontrava a 1 m abaixo do RN (superfície)). A Figura 5.3 exibe um esquema ilustrativo da situação.

Para ajustar essa condição, foi considerada, além da profundidade de ensaio (correspondente às variações de metro em metro até a parada) a profundidade corrigida. Essa é encontrada somando-se (furo abaixo do RN → prof. aumentada) ou subtraindo-se (furo acima do RN → prof. diminuída). Tal critério foi adotado para os casos em que o  $\Delta H$  da boca do furo ultrapassasse 1 m de diferença.

Por meio da definição dessa correção, foram analisados então os efeitos e a necessidade de considerar tal procedimento nas modelagens posteriores.

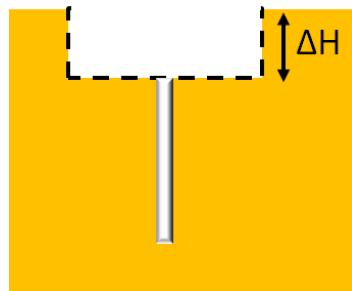


Figura 5.3 Esquema representando a diferença de nível entre a cota da boca do furo de sondagem nos casos com realização de cortes no terreno anteriores a execução do ensaio.

## 5.4 INTERPOLAÇÕES

### 5.4.1 Superfície Freática

Para a interpolação da superfície freática, separaram-se os furos que dispunham de dados referentes ao nível d'água em função de dois períodos: março – agosto (período de chuvas) e setembro – fevereiro (estação mais seca). Os furos realizados no período seco ultrapassaram em número os realizados no período de chuvas, por isso os testes para toda a área de estudo foram realizados com o primeiro grupo. Juntamente a estes, foram utilizados, como forma de auxílio, pontos tirados das linhas de drenagem e dados de poços

fornecidos pela empresa HIDROTEC, localizados nos trechos em que as sondagens não persistiram até profundidades que alcançassem o nível d'água.

Utilizaram – se dois métodos para a modelagem do lençol freático: Topo to Raster e Krigagem Ordinária. O modelo obtido com o Topo to Raster se mostrou mais satisfatório, por isso as análises posteriores dos produtos derivados do N.A. foram realizadas utilizando apenas este método.

Tais análises incluíram a subtração da superfície freática obtida do MDT, como forma de se avaliar a adequabilidade do modelo e também de se obter um modelo que representasse a profundidade do nível d'água, fator limitante na escolha de tipos de fundações.

As análises de comparação da variação de nível da superfície freática entre os dois períodos (estações) – seco /chuvoso foram realizadas somente para a planície Costeira, pois é onde os furos com valores de N.A. correspondentes ao período chuvoso encontram-se na sua maioria.

#### **5.4.2 Índice de Resistência a Penetração ( $N_{SPT}$ )**

Para as interpolações dos valores de  $N_{SPT}$  os testes iniciais foram realizados para diferentes profundidades que abrangiam toda a área que continha os furos de sondagem. Entretanto, a diferença de comportamento geotécnico das diferentes unidades geológicas não se mostrava bem caracterizada ao se avaliar a área como um todo. Além disso, foram observadas incompatibilidades nos processos de modelagem (tais como definição do passo do variograma, que é influenciado pela distribuição/regularidade das sondagens em planta) ao se avaliar a variabilidade do índice de resistência englobando todos os furos.

Também havia muitas porções de sondagens nas extremidades da área total que se encontravam isoladas em relação às demais, e, em alguns casos, separadas por redes de drenagem. As estimativas realizadas nos espaços entre essas porções, especialmente nos vales de drenagem, não sugeriram valores reais.

Decidiu-se então realizar as análises desta etapa de forma a compartimentar a área de estudo em três diferentes setores, exibidos na seção de resultados (Capítulo 6). Os

setores foram determinados de acordo com as áreas que apresentavam maior densidade de sondagens.

Para a interpolação dos valores de  $N_{SPT}$ , selecionaram –se as profundidades mais adequadas para o suporte de fundações, tal como proposto por Zuquette (1987).

No caso de fundações superficiais ou diretas, em todos os três setores, optou – se por avaliar a tensão admissível das camadas superficiais com a formulação empírica muito comum no meio técnico brasileiro (segundo Cintra, Aoki e Albiero, 2003):

$$\text{Tensão admissível} = N_{SPT} / 50 \quad (\text{Equação 8})$$

em que o  $N_{SPT}$  é o valor médio no bulbo de tensões e o resultado é dado em MPa.

Considerou -se uma sapata quadrada de lado 2 metros, apoiada a 1 metro de profundidade (uma simplificação para a cota de apoio mais comum de 1,5 metros, já que as camadas eram regulares de metro em metro), o que promoveria um bulbo de tensões de raio 4 metros.

Então foram utilizadas as camadas de solo referentes as profundidades entre 1 e 5 metros. O  $N_{SPT}$  médio entre esses níveis foi calculado para cada ponto de sondagem e depois utilizado nos testes de interpolações.

Para fundações profundas, no Setor 1 utilizaram-se os  $N_{SPT}$  às profundidades de 6 e 14 metros de profundidade por serem estas as cotas de apoio da estacas mais freqüentemente executadas nesta área: estacas de compactação como melhoria do terreno (6 metros) e estaca tipo Franki (14 metros).

Após análises dos perfis neste setor se observou a ocorrência de uma camada com faixa de valores com índices de resistência menores (solo mole/fofo), situada entre 9 e 11 metros de profundidade. Optou-se então por realizar testes de interpolação do  $N_{SPT}$  também na profundidade de 10 metros, de forma a refinar a caracterização geotécnica da área de estudo.

Para as áreas do grupo barreiras (Setores 2 e 3), optou-se por interpolar os valores do índice a uma profundidade de 12 m devido à predominância de execução de estacas escavadas à este nível.



Definidos os níveis a ser analisados em cada setor, as estimativas foram realizadas por meio da krigagem ordinária e do Topo to Raster.

As classes de valores exibidos foram estabelecidas de acordo com as tabelas da NBR 6484 (2001) para o grau de compactação das areias e consistência das argilas em função dos valores de  $N_{SPT}$ .

Diante da quantidade de furos e variedade de descrição das texturas dos solos, nos casos em que os intervalos da norma para areias e argilas não se equivalem totalmente, buscaram-se valores intermediários e obtiveram-se as seguintes classes:

Tabela 5.4 Intervalos obtidos para as classes de valores de  $N_{SPT}$ , de acordo com a consistência/ compactação dos solos

| $N_{SPT}$ | Consistência / Compactação             |
|-----------|--|
| $\leq 2$  | Argilas muito moles / Areias fofas     |
| 3 – 5     | Argilas moles / Areias fofas           |
| 6 -10     | Argilas médias / Areias médias         |
| 11 – 19   | Argilas rijas / Areias compactas       |
| 20 - 40   | Argilas duras / Areias compactas       |
| > 40      | Argilas duras / Areias muito compactas |

### 5.4.3 Impenetrável

No critério de definição do impenetrável, levaram-se em conta as sugestões propostas pela ABGE (1999) (Manual de Sondagens), resultando na profundidade em que se atingisse  $N_{SPT} > 50$  golpes. Também se buscou utilizar o critério de parada de sondagens recomendado pela ABNT (observar se o valor se repete por três metros seguidos). Utilizou – se o método Topo to Raster.

#### **5.4.4 Validação**

A etapa de validação das estimativas obtidas foi realizada com a seleção de 21 furos de sondagens não utilizados nas interpolações, distribuídos pelos três setores. Buscaram-se pontos situados tanto em trechos com mais amostras interpoladas como não, assim como nas extremidades dos setores.

Os valores estimados para o  $N_{SPT}$  foram comparados com os reais e calculado o RMS.

#### **5.4.5 Cartas para Fundações**

A carta para fundações diretas ou superficiais foi obtida com a divisão do mapa de  $N_{SPT}$  médio obtido para a camada entre 1 e 5 metros, e o resultado exposto em forma de tensão admissível, em MPa.

Para fundações profundas, foi utilizada a tabela proposta por Cintra e Aoki (2010), que relaciona intervalos do  $N_{SPT}$  com cotas de apoio a tipos de estaca.

#### **5.4.6 Etapas de Campo**

Após alcançar um número razoável de informações inseridas no banco de dados e depois de uma etapa de realização de interpolações das principais variáveis, era necessário o contato com os profissionais geotécnicos da área de estudo para sessões de consulta, discussões e análises com respeito aos dados e produtos reunidos e gerados.

Ao longo da pesquisa, foram feitas etapas de campo na cidade de João Pessoa, PB, com visitas a empresa fornecedora dos dados. Além da Coneresolo (empresa disponibilizadora das sondagens), também foi visitada a Copesolo – Estacas e Fundações Ltda, empresa do município que desenvolve e executa projetos geotécnicos incluindo as principais obras de fundações. Realizaram-se reuniões com checagem dos dados e sugestões de abordagem segundo um contexto de prática geotécnica local (ex: camadas de

solo mais importantes, como trechos de argila mole e o alcance do calcário como impenetrável ao amostrador em certos pontos).

Como exemplo, pode-se citar o aspecto mencionado de que é muito comum a realização de cortes com cerca de 1 m de profundidade na área em que são realizadas as estacas de compactação na planície costeira. Então a cota de apoio das estacas, especificada como até 5 m, torna-se, na realidade, 6 m no enfoque desta pesquisa. Por isso, para a interpolação dos valores do índice na cota de apoio das mencionadas estacas, optou-se por utilizar a profundidade de 6 m.

Na segunda etapa, foram realizadas discussões dos resultados e análises dos modelos interpolados de acordo com a experiência local e de projetos de obras de fundações mais realizados no município.

As reuniões referentes à pesquisa de campo englobaram muitos aspectos – desde caracterização da área (predominância de determinados tipos de solo em respectivas áreas, espessura de certas camadas, etc), comportamento e variação do NSPT, profundidade em que é alcançado o calcário, até características e detalhes dos tipos de obras e fundações do município. As etapas de campo em João Pessoa compuseram a primeira parte do processo de validação dos modelos, uma vez que os mesmos foram expostos e discutidos com os diretores técnicos da Coneresolo e Copesolo, com a verificação e confirmação de alguns detalhes e considerações.

## 6 RESULTADOS E ANÁLISES

### 6.1 BASE TOPOGRÁFICA DIGITAL

As Figuras 6. 1 a 6.3 esquematizam a articulação das folhas topográficas da base digital da área de estudo e os elementos digitalizados (curvas de nível, drenagem e pontos cotados).

#### 6.1.1 MDT e Mapas Derivados

As Figuras 6.4 a 6.5 apresentam, respectivamente, a hipsometria obtida a partir do MDT (gerado pelo método Topo to Raster com malha de 4 m) e as curvas intermediárias geradas a partir dele visando à comparação com as curvas topográficas de entrada.

Observa-se que as curvas interpoladas a partir do MDT grid apresentam traçados razoavelmente coincidentes com os das curvas de nível da base topográfica original. Além disso, a maioria das curvas intermediárias geradas a partir do MDT (intervalo de 2,5 m) também apresenta um traçado compatível com a base topográfica de entrada.

Pelo Topo to Raster, os RMS obtidos foram de 0,67 (malha de 4 m) e 0,61 (malha de 5 m). A partir do TIN, foi obtido o RMS de 1,3.

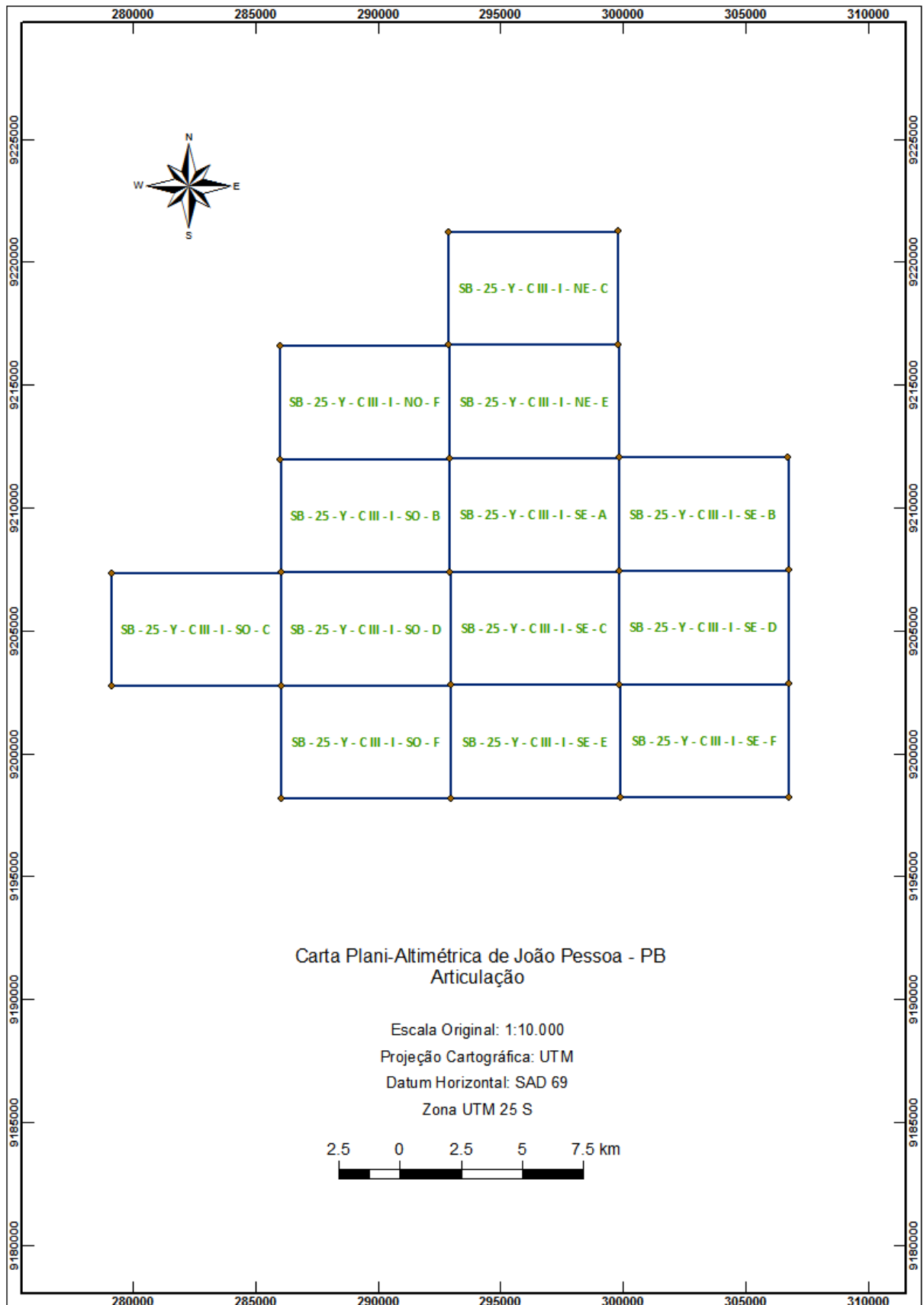


Figura 6.1 Artulação das folhas topográficas.

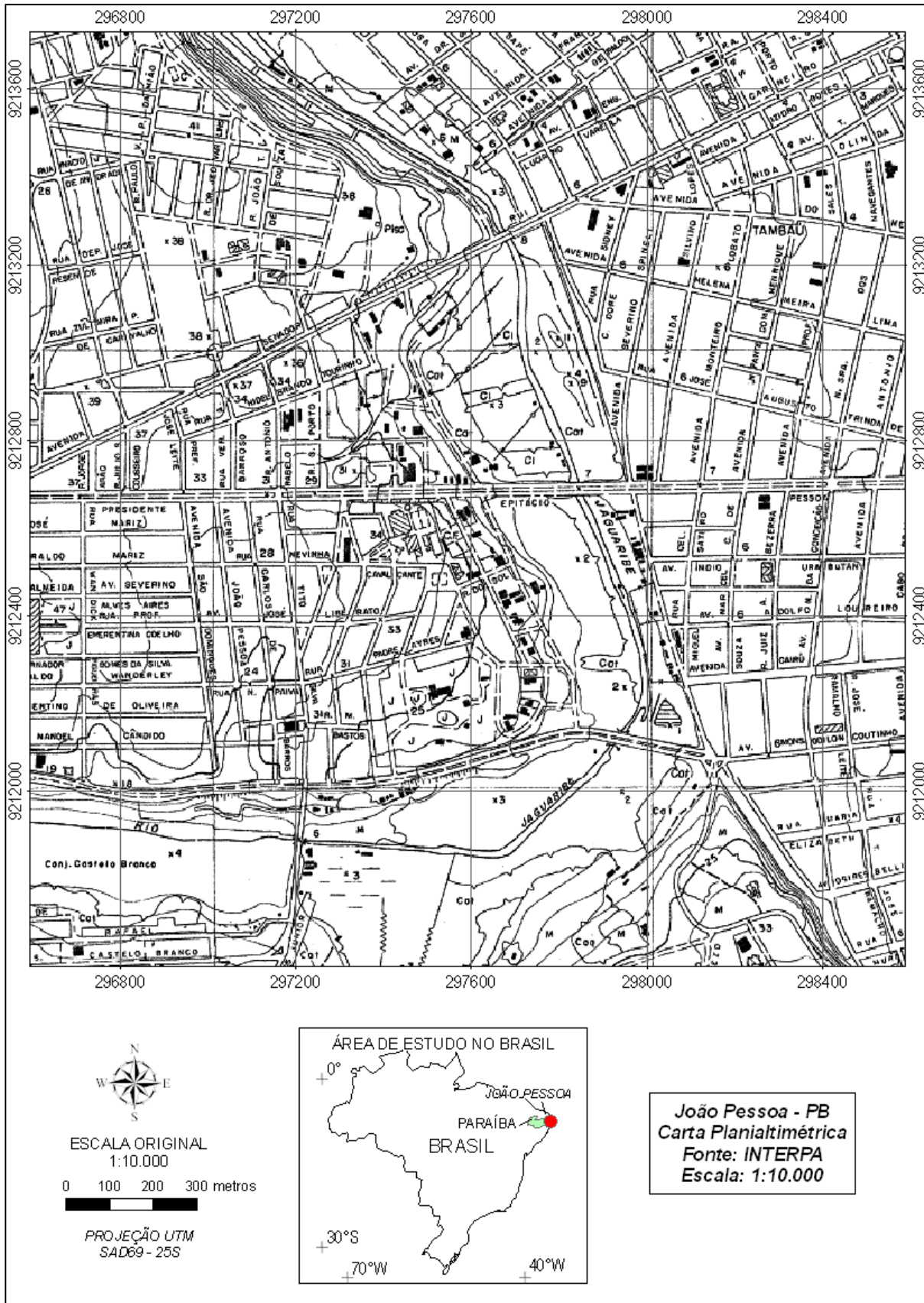


Figura 6.2 Segmento das folhas topográficas de João Pessoa – PB.

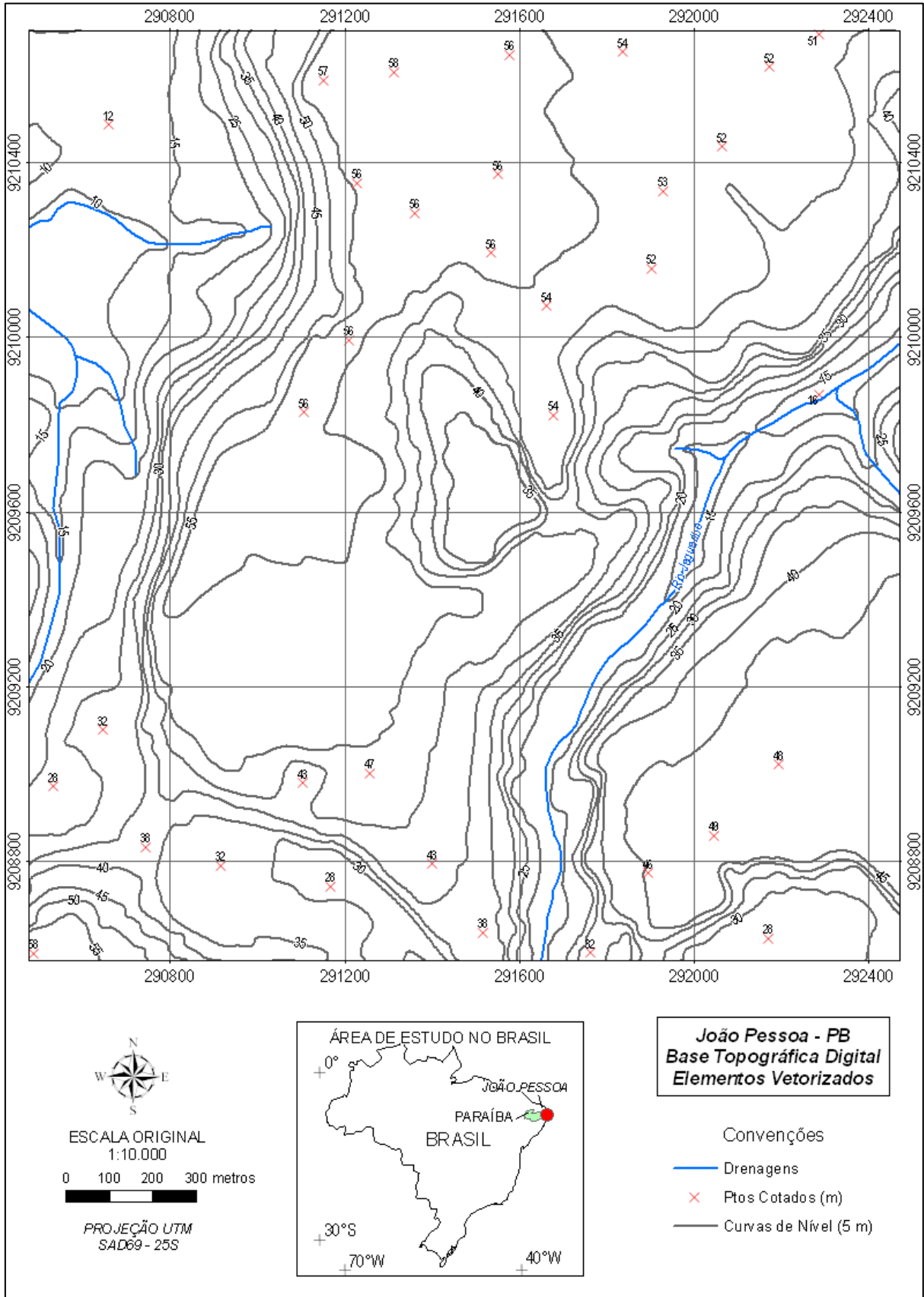


Figura 6.3. Segmento da Base topográfica digital (elementos vetorizados).

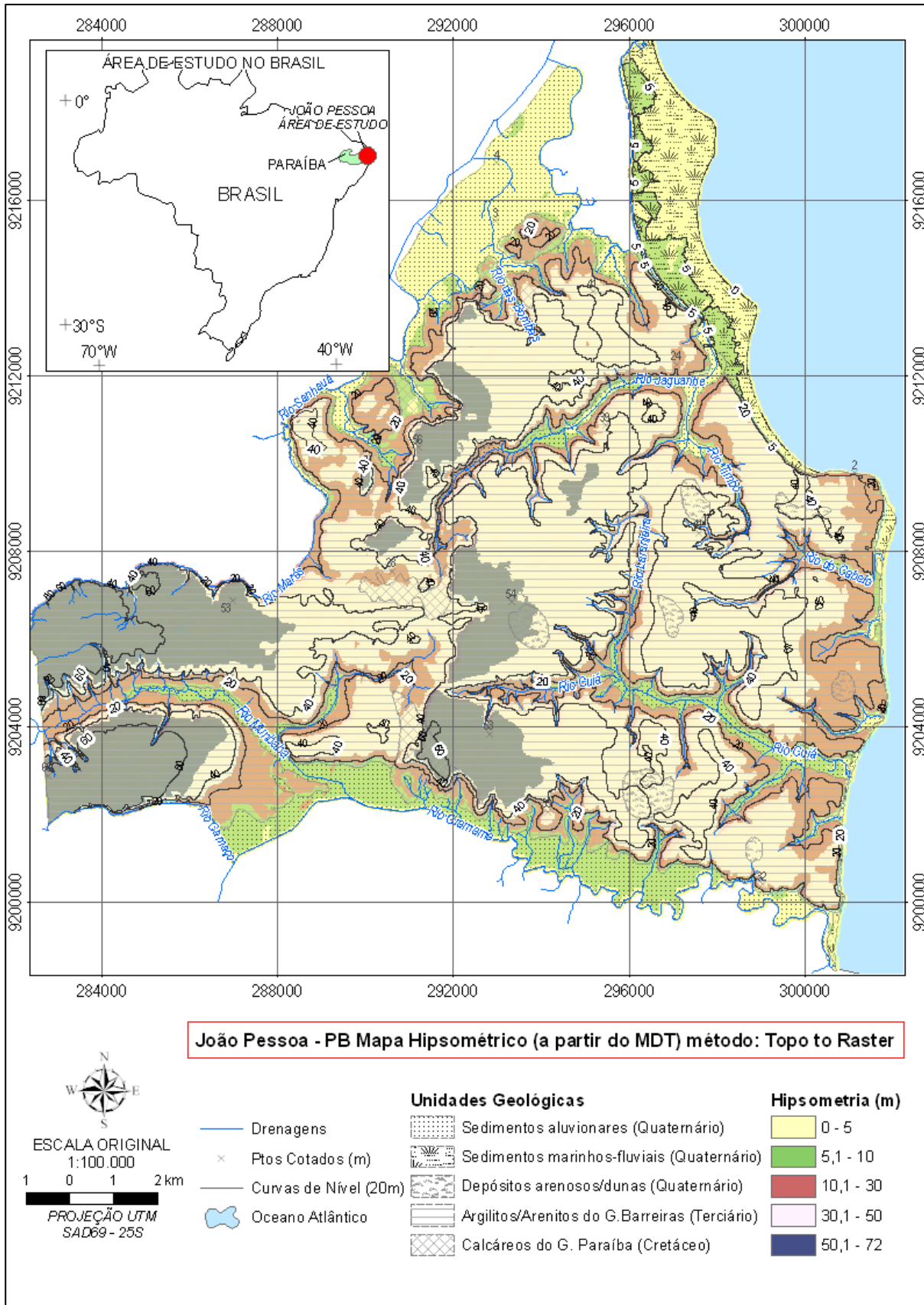


Figura 6.4 Ilustração do Mapa Hipsométrico obtido a partir do MDT no formato *grid*.



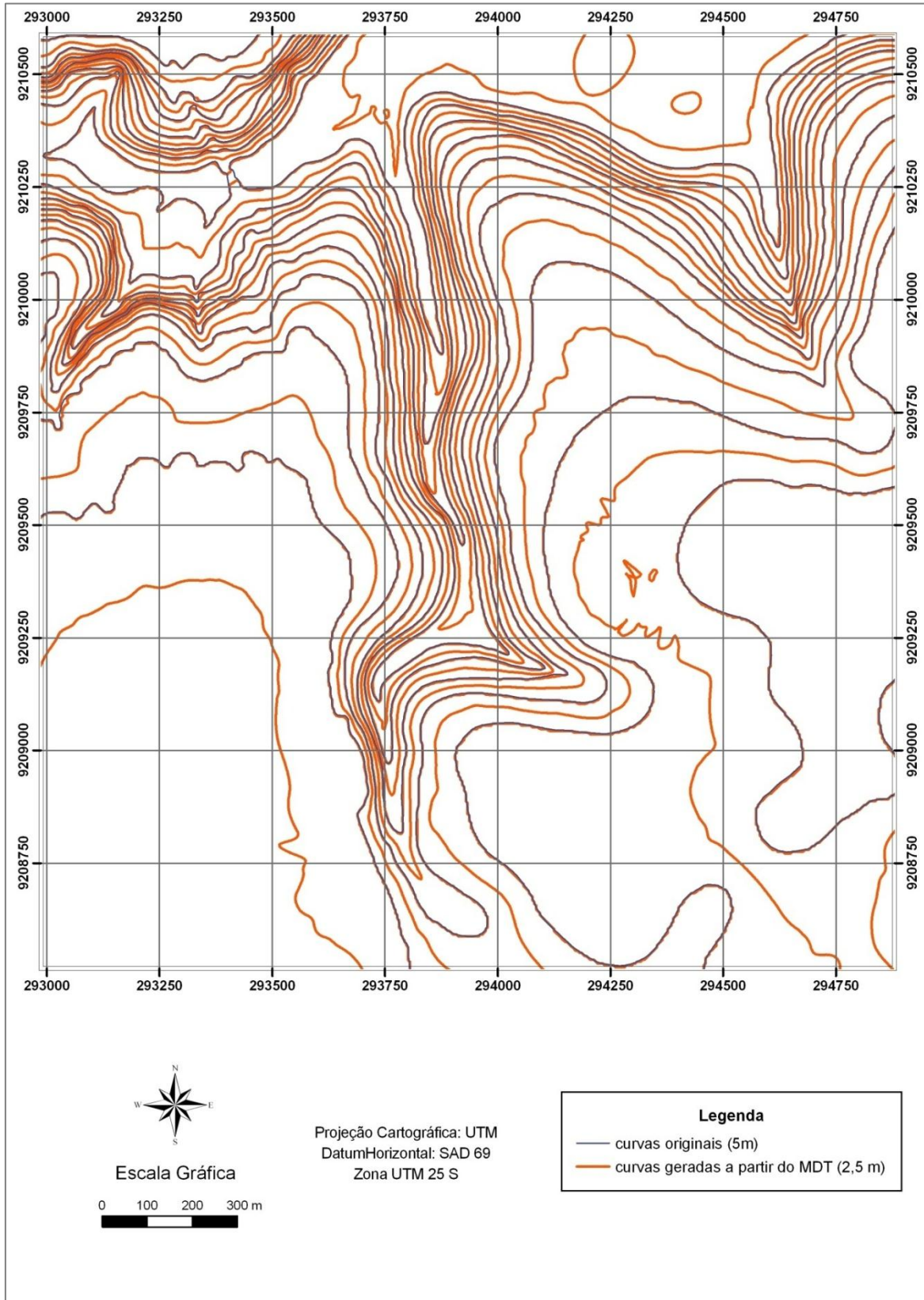


Figura 6.5 Comparação entre as curvas de nível originais e as interpoladas a partir do MDT grid com 4 m de espaçamento.

Optou-se então pelo MDT obtido com topo to raster e malha de 4 m considerado aceitável para a validação da interpolação e estimativa. Foi então gerado o mapa de declividade do município, exibida na Figura 6.6, com intervalos em (%) de [0 – 6]; [6,1 – 12]; [12,1 – 20]; [20,1 – 30]; [> 30].

A Tabela 6.1 exhibe a área correspondente às classes de declividade e sua percentagem em relação ao total. Observa-se a predominância de regiões planas, assim como já mencionado em referências citadas no capítulo de caracterização, e muito pouca ocorrência de maiores declividades, diante da área total do município.

Tabela 6.1 Classes de declividade e áreas.

| <b><i>Declividade(%)</i></b> | <b><i>Área (km<sup>2</sup>)</i></b> | <b><i>Área (%)</i></b> |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| 0 – 6                        | 174,61                              | 78,7                   |
| 6,1 – 12                     | 24,05                               | 10,8                   |
| 12,1 – 20                    | 12,71                               | 5,7                    |
| 20,1 - 30                    | 6,41                                | 2,9                    |
| > 30                         | 4,0                                 | 1,8                    |

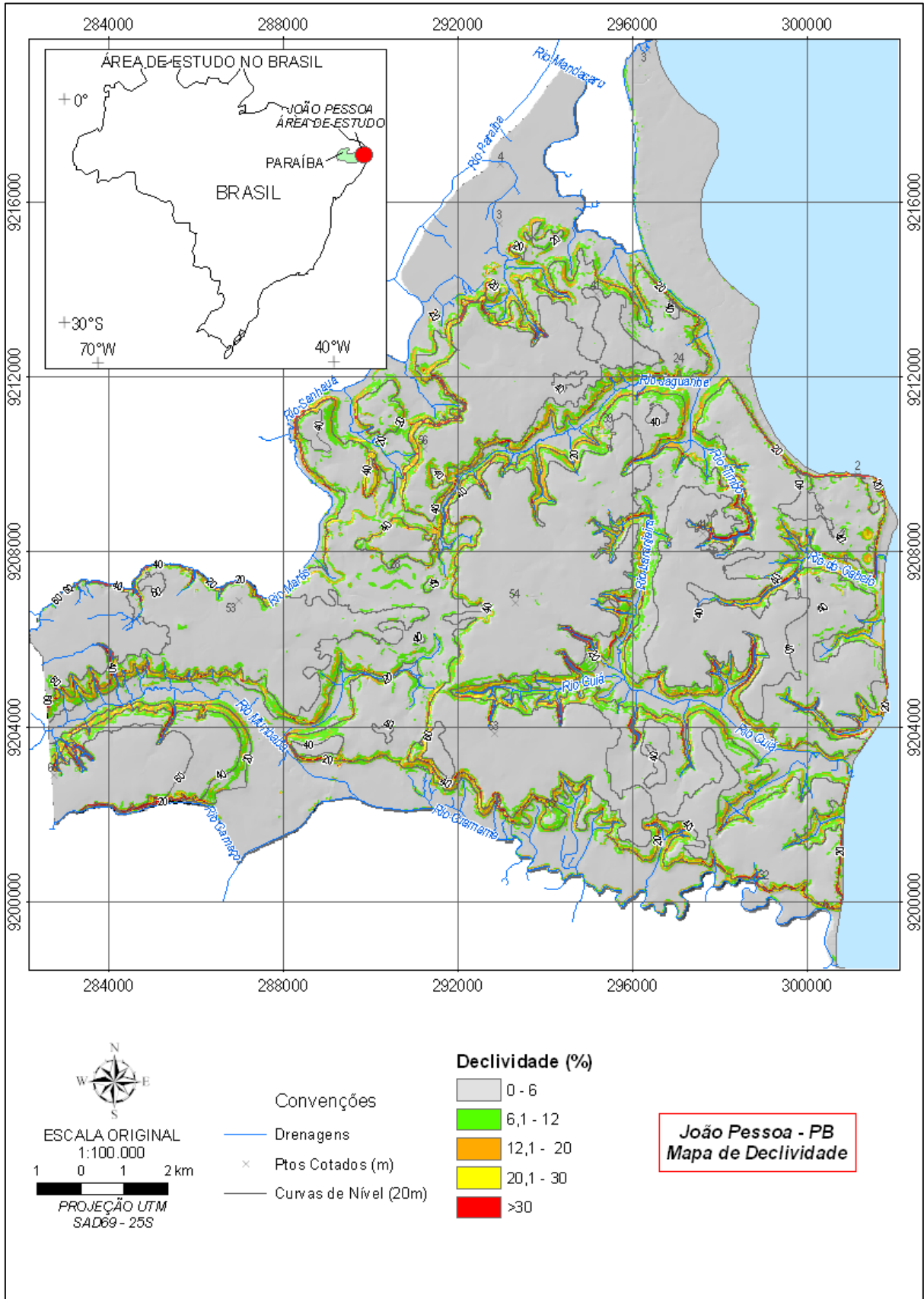


Figura 6.6 Mapa de declividade obtido a partir do MDT.

## 6.2 BOLETINS DE SONDAGENS, LOCAÇÃO E INSERÇÃO DOS FUROS NO BANCO DE DADOS

As Figura 6.7 a 6.9 ilustram os perfis e locações de furos relativos a uma campanha de sondagens realizada pela empresa disponibilizadora dos boletins. Por sua vez, a Figura 6.10 apresenta um esquema com a distribuição das sondagens que foram inseridas no banco de dados, e identificadas as utilizadas nas interpolações e modelagens espaciais.

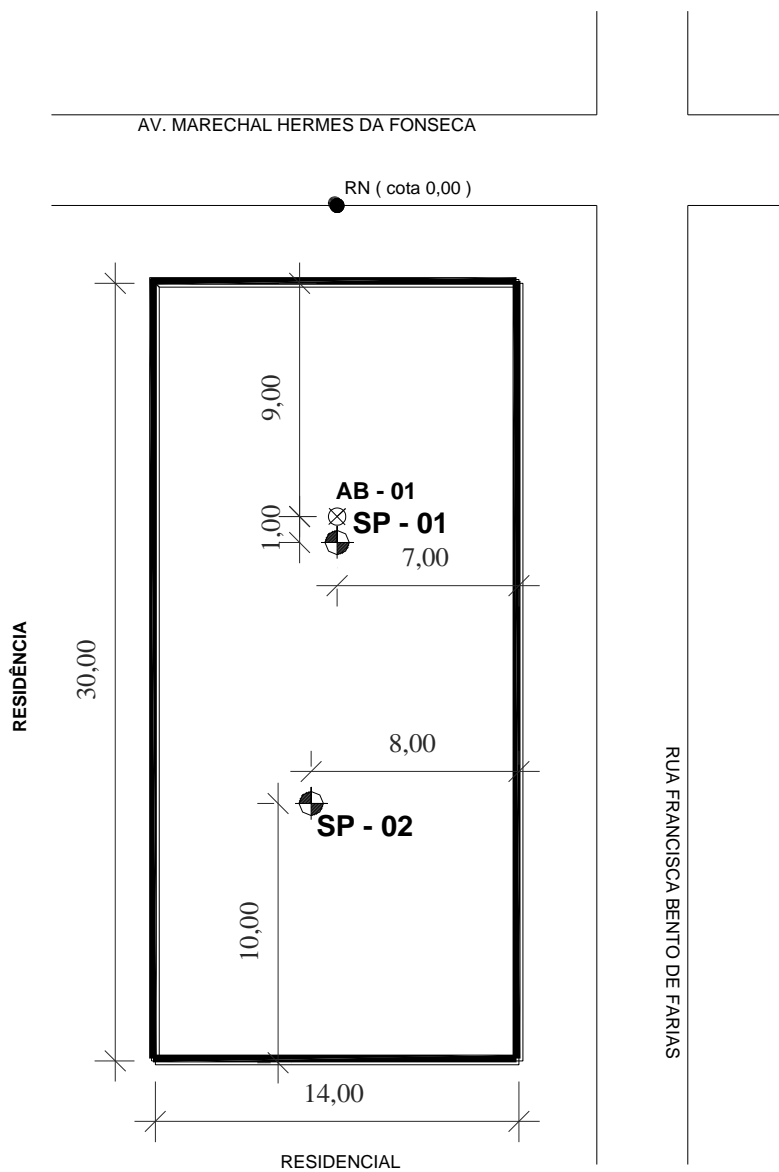


Figura 6.7 Croqui com locação dos furos de sondagem SP1 e SP2 (Concresolo, 2007).

| STANDARD PENETRATION TEST  |   |          |            |                            |       |       | SP - 01              |   |    |    |    |
|--|---|----------|------------|----------------------------|-------|-------|----------------------|---|----|----|----|
| OBRA : RESIDENCIAL MARIA CATÃO   |   |          |            |                            |       |       | RELATÓRIO: 141/2007  |   |    |    |    |
| LOCAL : AV. MAL. HERMES DA FONSECA / R. FCA B. DE FARIAS, JD AMÉRICA, BESSA - JPA/PB |   |          |            |                            |       |       | INÍCIO : 30/07/2007  |   |    |    |    |
| CLIENTE : CONSTRUTORA HEZA LTDA  |   |          |            |                            |       |       | TÉRMINO : 30/07/2007 |   |    |    |    |
| PROF. (m)  | DESCRIÇÃO DO SOLO   | PERFIL   | N.A.       | PENETRAÇÃO (golpes p/15cm) |       |       | S.P.T.               | Nº DE GOLPES PARA PENETRAÇÃO DOS ÚLTIMOS 30 cm. |    |    |    |
|  |   |          |            | 1º                         | 2º    | 3º    |                      | 10  | 20 | 30 | 40 |
| 0,70   | Areia fina, fofa, variegada                                   |          | N.A.       | 2/15                       | 1/15  | 3/15  | 4/30                 |   |    |    |    |
| 1,0  |   |          |            | 4/15                       | 3/15  | 4/15  | 7/30                 |   |    |    |    |
| 2,0  | Areia fina, pouco compacta a mediamente compacta, cinza claro |          | 30/07/2007 | 4/15                       | 4/15  | 4/15  | 8/30                 |   |    |    |    |
| 3,0  |   |          |            | 4/15                       | 5/15  | 5/15  | 10/30                |   |    |    |    |
| 3,80   |   |          |            | 6/15                       | 10/15 | 7/15  | 17/30                |   |    |    |    |
| 4,0  | Areia fina, siltsosa, mediamente compacta, marrom             | == == == |            | 3/15                       | 2/15  | 3/15  | 5/30                 |   |    |    |    |
| 5,0  |   |          |            | 3/15                       | 7/15  | 8/15  | 15/30                |   |    |    |    |
| 6,0  | Areia grossa, pouco compacta a mediamente compacta, variegada |          |            | 12/15                      | 10/15 | 12/15 | 22/30                |   |    |    |    |
| 6,70   |   |          |            | 7/15                       | 7/15  | 10/15 | 17/30                |   |    |    |    |
| 7,0  | Silte arenoso, mediamente compacto a compacto, cinza escuro   | == == == |            | 5/15                       | 5/15  | 5/15  | 10/30                |   |    |    |    |
| 8,0  |   |          |            | 3/15                       | 3/15  | 3/15  | 6/30                 |   |    |    |    |
| 9,0  |   |          |            | 2/15                       | 2/15  | 1/15  | 3/30                 |   |    |    |    |
| 9,50   |   |          |            | 1/15                       | 1/15  | 2/15  | 3/30                 |   |    |    |    |
| 10,0   | Silte argiloso, mole a médio, cinza escuro                    | == == == |            | 7/15                       | 10/15 | 14/15 | 24/30                |   |    |    |    |
| 11,0   |   |          |            | 15/15                      | 15/15 | 21/15 | 36/30                |   |    |    |    |
| 12,0   |   |          |            | 17/15                      | 16/15 | 23/15 | 39/30                |   |    |    |    |
| 13,0   |   |          |            | 17/15                      | 20/15 | 20/15 | 40/30                |   |    |    |    |
| 14,0   | Areia fina, compacta, cinza                                   |          |            | 15/15                      | 15/15 | 24/15 | 39/30                |   |    |    |    |
| 15,0   |   |          |            | 16/15                      | 17/15 | 20/15 | 37/30                |   |    |    |    |
| 16,0   |   |          |            |                            |       |       |                      |   |    |    |    |
| 17,0   |   |          |            |                            |       |       |                      |   |    |    |    |
| 18,0   |   |          |            |                            |       |       |                      |   |    |    |    |
| 18,45  | Limite de Sondagem  |          |            |                            |       |       |                      |   |    |    |    |
| 19,0   |   |          |            |                            |       |       |                      |   |    |    |    |
| 20,0   |   |          |            |                            |       |       |                      |   |    |    |    |


|  |                               |                                       |   |  |  |
|--|-------------------------------|---------------------------------------|---|--|--|
| OBSERVAÇÕES:<br>De 0,00m à 2,00m, furo revestido;<br>De 2,00m à 18,45m, furo executado com circulação de água. |                               |                                       | R.N.= 0,00 = partiu do meio fio da Av. Marechal Hermes da Fonseca, conforme indicado em planta. |  |  |
| NÍVEL DA ÁGUA:<br>1,50 m   |                               | COTA DA BOCA DO FURO:<br>( - ) 0,16 m |   |  |  |
| AMOSTRADOR DO STANDARD PENETRATION TEST<br>ALTURA DE QUEDA DO MARTELO H=75 cm<br>PESO DO MARTELO P=65 kgf      |                               |                                       |            |  |  |
| DATA:<br>02/08/2007  | SONDADOR:<br>Antônio Lourenço | ENGº                                  |   |  |  |

Figura 6.8 Perfil de sondagem SP1 (Concresolo, 2007).

| STANDARD PENETRATION TEST   |   |        |   |                               |                                     |       | SP - 02              |   |    |    |    |
|---|---|--------|---|-------------------------------|-------------------------------------|-------|----------------------|---|----|----|----|
| OBRA : RESIDENCIAL MARIA CATÃO  |   |        |   |                               |                                     |       | RELATORIO: 141/2007  |   |    |    |    |
| LOCAL : AV. MAL. HERMES DA FONSECA / R. FCA B. DE FARIAS, JD AMÉRICA, BESSA - JPA/PB                              |   |        |   |                               |                                     |       | INÍCIO : 31/07/2007  |   |    |    |    |
| CLIENTE : CONSTRUTORA HEZA LTDA   |   |        |   |                               |                                     |       | TÉRMINO : 31/07/2007 |   |    |    |    |
| PROF. (m)   | DESCRIÇÃO DO SOLO   | PERFIL | N.A.  | PENETRAÇÃO<br>(golpes p/15cm) |                                     |       | S.P.T.               | Nº DE GOLPES PARA<br>PENETRAÇÃO DOS<br>ÚLTIMOS 30 cm. |    |    |    |
|   |   |        |   | 1º                            | 2º                                  | 3º    |                      | 10  | 20 | 30 | 40 |
| 0,54  | Aterro arenoso, com metralha, variegado                                     |        |   | 3/15                          | 3/15                                | 2/15  | 5/30                 |   |    |    |    |
| 1,0<br>1,15   | Areia fina, pouco compacta, cinza claro                                     |        |   | 2/15                          | 3/15                                | 3/15  | 6/30                 |   |    |    |    |
| 2,0   | Areia fina, siltosa, pouco compacta a<br>mediamente compacta, marrom escuro |        | N.A.<br>31/07/2007  | 3/15                          | 5/15                                | 4/15  | 9/30                 |   |    |    |    |
| 3,0   |   |        |   | 4/15                          | 5/15                                | 5/15  | 10/30                |   |    |    |    |
| 4,0   | Areia fina, siltosa, mediamente compacta a<br>compacta, variegada           |        |   | 5/15                          | 8/15                                | 14/15 | 22/30                |   |    |    |    |
| 5,0<br>5,50   |   |        |   | 5/15                          | 7/15                                | 8/15  | 15/30                |   |    |    |    |
| 6,0   | Areia grossa, siltosa, compacta, marrom                                     |        |   | 7/15                          | 10/15                               | 14/15 | 24/30                |   |    |    |    |
| 6,80<br>7,0   |   |        |   | 10/15                         | 13/15                               | 17/15 | 30/30                |   |    |    |    |
| 8,0   | Silte arenoso, compacto, cinza escuro                                       |        |   | 9/15                          | 10/15                               | 11/15 | 21/30                |   |    |    |    |
| 9,0   |   |        |   | 6/15                          | 4/15                                | 4/15  | 8/30                 |   |    |    |    |
| 10,0  |   |        |   | 2/15                          | 3/15                                | 2/15  | 5/30                 |   |    |    |    |
| 11,0  | Silte argiloso, muito mole a médio, cinza escuro                            |        |   | 1/15                          | 2/15                                | 1/15  | 3/30                 |   |    |    |    |
| 12,0  |   |        |   | 1/27                          | -                                   | 1/35  | 1/35                 |   |    |    |    |
| 13,0  |   |        |   | 2/15                          | 2/15                                | 2/15  | 4/30                 |   |    |    |    |
| 13,70<br>14,0   |   |        |   | 5/15                          | 12/15                               | 15/15 | 27/30                |   |    |    |    |
| 15,0  |   |        |   | 10/15                         | 15/15                               | 15/15 | 30/30                |   |    |    |    |
| 16,0  | Areia fina, compacta a muito compacta, cinza                                |        |   | 17/15                         | 22/15                               | 22/15 | 42/30                |   |    |    |    |
| 17,0  |   |        |   | 30/10                         | -                                   | -     | 30/10                |   |    |    |    |
| 18,0  |   |        |   | 30/13                         | -                                   | -     | 30/13                |   |    |    |    |
| 19,0<br>19,15   | Limite de Sondagem  |        |   | 30/15                         | -                                   | -     | 30/15                |   |    |    |    |
| OBSERVAÇÕES:<br>De 0,00m à 2,00m, furo revestido;<br>De 2,00m à 19,15m, furo executado com circulação de<br>água. |   |        | R.N.= 0,00 = partiu do meio fio da Av. Marechal Hermes da Fonseca, conforme<br>indicado em planta.        |                               |                                     |       |                      |   |    |    |    |
|   |   |        | NÍVEL DA ÁGUA:<br>1,50 m  |                               | COTA DA BOCA DO FURO:<br>(-) 0,17 m |       |                      |   |    |    |    |
|   |   |        | AMOSTRADOR DO STANDARD PENETRATION TEST<br>ALTURA DE QUEDA DO MARTELO H=75 cm<br>PESO DO MARTELO P=65 kgf |                               |                                     |       |                      |   |    |    |    |
| DATA:<br>02/08/2007   | SONDADOR:<br>Antônio Lourenço   | ENGº   |   |                               |                                     |       |                      |   |    |    |    |

Figura 6.9 Perfil de sondagem SP2 (Concresolo, 2007).



A disposição dos furos corresponde a uma área que se inicia de forma abrangente em toda a planície costeira do município, e pertence à unidade geológica caracterizada pela presença de sedimentos marinhos – fluviais recentes. Constatou-se uma grande concentração de furos na região correspondente aos bairros situados ao longo da planície, com um decréscimo em direção aos locais da cidade mais afastados do litoral. A isso se atribui a conjuntura da expansão urbana de João Pessoa, na qual a maior parte da demanda para execução do ensaio é direcionada à implantação de edifícios residenciais, os quais são construídos, em sua maioria, em terrenos próximos à praia.

Foi possível localizar sondagens em quase todos os setores do município, entretanto, observa-se uma diferença significativa de concentração e ocorrência dos furos na distribuição dos mesmos na área. Em função disso, das 705 sondagens inseridas no banco, somente 529 foram efetivamente utilizadas nas etapas de interpolação e modelagens, uma vez que as 139 restantes encontravam-se com distâncias maiores entre si do que do resto do grupo que apresentou a maior densidade por área.

### **6.2.1 Estruturação das Planilhas do Banco de Dados das Sondagens**

A Figura 6.11 exibe um exemplo da tabela de atributos do arquivo *shape* de pontos gerados. Os pontos representam os furos de sondagem, e a tabela contém campos referentes às informações contidas nos boletins de sondagem que não variam com a profundidade e apresentam valores únicos para cada furo (coord. X, corrd. Y, ID do furo, data, nível d'água, etc.). As linhas nas tabelas representam cada ponto inserido e, por conseguinte, cada furo de sondagem e suas respectivas informações relevantes a pesquisa.

A Figura 6.12 fornece um exemplo de tabela em formato. dbf contendo as informações dos perfis que variam com a profundidade (valores de N, tipo de solo, cor, textura, compacidade, etc.). Pode-se observar o campo comum (ID\_SOND) à tabela do arquivo de pontos (Figura 6.11), necessário ao processo de junção das duas tabelas. Nela já se encontram inclusive os valores extraídos do MDT correspondentes as posições dos furos, que direcionaram a obtenção de todas as informações posteriores e relacionadas a cotas ou profundidade (ex. NA\_cota, NA\_prof, etc).



| FID | Shape* | ID_SOND | NA  | DATA       | H_boca_furo | X        | Y         |
|-----|--------|---------|-----|------------|-------------|----------|-----------|
| 0   | Point  | 1       | 1.9 | 4/19/2006  | 0           | 296184.5 | 9217976.8 |
| 1   | Point  | 2       | 2.2 | 4/20/2006  | 0           | 296180   | 9217957.6 |
| 2   | Point  | 3       | 2.8 | 11/14/2006 | 0           | 296518.3 | 9219197.9 |
| 3   | Point  | 4       | 3   | 11/15/2006 | 0           | 296501.1 | 9219193   |
| 4   | Point  | 5       | 1.6 | 1/9/2006   | -1          | 297273.6 | 9216270.6 |
| 5   | Point  | 6       | 1.7 | 1/9/2006   | -1.1        | 297273.6 | 9216283.9 |
| 6   | Point  | 7       | 1.7 | 1/11/2006  | -1.1        | 297257.6 | 9216270.6 |
| 7   | Point  | 8       | 2.7 | 2/21/2006  | 0           | 298557.1 | 9213017.8 |
| 8   | Point  | 9       | 2.9 | 2/22/2006  | 0           | 298540.2 | 9213012.5 |
| 9   | Point  | 10      | 3   | 2/23/2006  | 0           | 298534.5 | 9212982.5 |
| 10  | Point  | 11      | 0.8 | 9/1/2006   | 0           | 297341.1 | 9217676.6 |
| 11  | Point  | 12      | 1.8 | 8/27/2004  | 0           | 296889.7 | 9216432.9 |
| 12  | Point  | 13      | 3   | 11/24/2006 | 0           | 296639.4 | 9218917.5 |
| 13  | Point  | 14      | 2.6 | 11/28/2006 | 0           | 296598.4 | 9218908   |
| 14  | Point  | 15      | 0.8 | 11/30/2006 | 0           | 296945.1 | 9217885.6 |
| 15  | Point  | 16      | 1.8 | 12/11/2006 | 0           | 297298.9 | 9216900   |
| 16  | Point  | 17      | 2.9 | 12/19/2006 | 0           | 297327.4 | 9216461.6 |
| 17  | Point  | 18      | 2.9 | 1/6/2005   | 0           | 296123.2 | 9218135.7 |
| 18  | Point  | 19      | 1.5 | 1/10/2005  | 0           | 296748.4 | 9216955.5 |
| 19  | Point  | 20      | 1.9 | 1/14/2005  | 0           | 297110.7 | 9215737.3 |
| 20  | Point  | 21      | 2.6 | 2/4/2005   | 5.8         | 296146   | 9216490.1 |
| 21  | Point  | 22      | 2.4 | 3/10/2005  | 0           | 296087.2 | 9215643.3 |
| 22  | Point  | 23      | 0.7 | 4/11/2005  | -2.6        | 297199.1 | 9215223.7 |
| 23  | Point  | 24      | 1.2 | 4/21/2005  | 0           | 296692.9 | 9217139.6 |
| 24  | Point  | 25      | 0.1 | 5/5/2005   | -3.1        | 296995.3 | 9215843.3 |

Record: 1 Show: All Selected Records (0 out of 171 Selected.) Options

Figura 6.11 Tabela de atributos do arquivo shape de pontos referentes aos furos de sondagem.

Após a etapa de geração desses arquivos, é realizada a ligação entre as duas tabelas (comando *join*) ilustrado pela Figura 6.13.

A tabela resultante reúne todos os campos provenientes das originais, repetindo, inclusive, as linhas referentes às informações contidas nos campos que não variam com a profundidade, oriundas da tabela do arquivo *shape* (Figura 6.14).

|  | ID_SOND | PROF | TEXTURA                      | COR         | HSPT |
|--|---------|------|------------------------------|-------------|------|
|  | 1       | 1    | areia fina                   | variegada   | 5    |
|  | 1       | 2    | areia fina                   | variegada   | 9    |
|  | 1       | 3    | areia fina pouco siltosa     | marrom      | 24   |
|  | 1       | 4    | areia grossa siltosa         | marrom      | 14   |
|  | 1       | 5    | areia grossa siltosa         | marrom      | 27   |
|  | 1       | 6    | areia grossa siltosa         | marrom      | 11   |
|  | 1       | 7    | areia fina siltosa           | cinza       | 23   |
|  | 1       | 8    | areia fina siltosa           | cinza       | 34   |
|  | 1       | 9    | areia fina siltosa           | cinza       | 26   |
|  | 1       | 10   | areia fina siltosa           | cinza       | 14   |
|  | 1       | 11   | areia fina siltosa           | cinza       | 7    |
|  | 1       | 12   | areia fina siltosa           | cinza       | 4    |
|  | 1       | 13   | areia fina siltosa           | cinza       | 7    |
|  | 1       | 14   | areia fina                   | cinza       | 16   |
|  | 1       | 15   | areia fina                   | cinza       | 31   |
|  | 1       | 16   | areia fina                   | cinza       | 36   |
|  | 1       | 17   | areia fina                   | cinza       | 62   |
|  | 2       | 1    | areia fina                   | variegada   | 6    |
|  | 2       | 2    | areia fina                   | variegada   | 8    |
|  | 2       | 3    | areia fina                   | variegada   | 16   |
|  | 2       | 4    | areia fina                   | cinza claro | 18   |
|  | 2       | 5    | areia fina siltosa           | marrom      | 17   |
|  | 2       | 6    | areia media a grossa siltosa | marrom      | 15   |
|  | 2       | 7    | areia media a grossa siltosa | marrom      | 6    |
|  | 2       | 8    | areia fina siltosa           | cinza       | 24   |
|  | 2       | 9    | areia fina siltosa           | cinza       | 19   |
|  | 2       | 10   | areia fina siltosa           | cinza       | 16   |
|  | 2       | 11   | areia fina siltosa           | cinza       | 9    |
|  | 2       | 12   | areia fina siltosa           | cinza       | 8    |
|  | 2       | 13   | areia fina siltosa           | cinza       | 6    |
|  | 2       | 14   | areia fina siltosa           | cinza       | 12   |
|  | 2       | 15   | areia fina                   | cinza       | 23   |
|  | 2       | 16   | areia fina                   | cinza       | 32   |

Record: 1 Show: All Selected Records (0 out of 8941 Selected.) Opti

Figura 6.12 Tabela em formato dBase contendo os atributos das sondagens que variam com a profundidade.

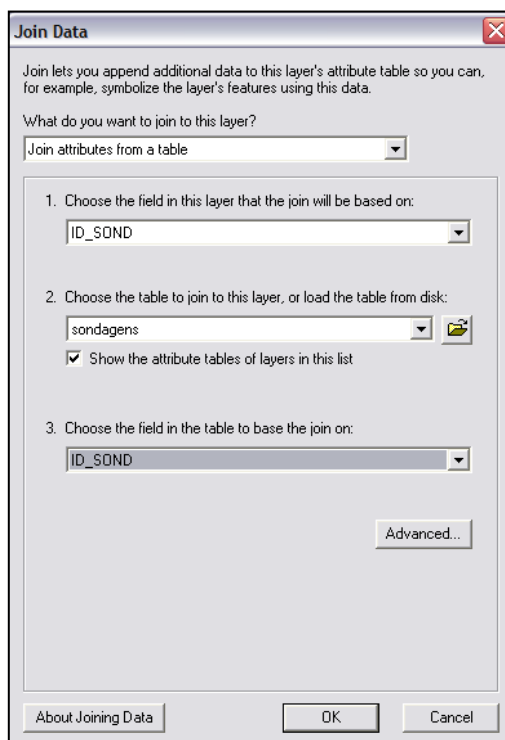


Figura 6.13 Comando *join*, que gerencia a ligação entre tabelas.

| perfis.ID | perfis.PROF | perfis.TEXTURA               | perfis.COR | perfis.NSPT | perfis.Zcorr | sondagens_rel.NA |
|-----------|-------------|------------------------------|------------|-------------|--------------|------------------|
| 1         | 1           | areia fina                   | variegada  | 5           | 1            | 1.9              |
| 1         | 2           | areia fina                   | variegada  | 9           | 2            | 1.9              |
| 1         | 3           | areia fina pouco siltosa     | marrom     | 24          | 3            | 1.9              |
| 1         | 4           | areia grossa siltosa         | marrom     | 14          | 4            | 1.9              |
| 1         | 5           | areia grossa siltosa         | marrom     | 27          | 5            | 1.9              |
| 1         | 6           | areia grossa siltosa         | marrom     | 11          | 6            | 1.9              |
| 1         | 7           | areia fina siltosa           | cinza      | 23          | 7            | 1.9              |
| 1         | 8           | areia fina siltosa           | cinza      | 34          | 8            | 1.9              |
| 1         | 9           | areia fina siltosa           | cinza      | 26          | 9            | 1.9              |
| 1         | 10          | areia fina siltosa           | cinza      | 14          | 10           | 1.9              |
| 1         | 11          | areia fina siltosa           | cinza      | 7           | 11           | 1.9              |
| 1         | 12          | areia fina siltosa           | cinza      | 4           | 12           | 1.9              |
| 1         | 13          | areia fina siltosa           | cinza      | 7           | 13           | 1.9              |
| 1         | 14          | areia fina                   | cinza      | 16          | 14           | 1.9              |
| 1         | 15          | areia fina                   | cinza      | 31          | 15           | 1.9              |
| 1         | 16          | areia fina                   | cinza      | 36          | 16           | 1.9              |
| 1         | 17          | areia fina                   | cinza      | 50          | 17           | 1.9              |
| 2         | 1           | areia fina                   | variegada  | 6           | 1            | 2.2              |
| 2         | 2           | areia fina                   | variegada  | 8           | 2            | 2.2              |
| 2         | 3           | areia fina                   | variegada  | 16          | 3            | 2.2              |
| 2         | 4           | areia fina                   | cinza cla  | 18          | 4            | 2.2              |
| 2         | 5           | areia fina siltosa           | marrom     | 17          | 5            | 2.2              |
| 2         | 6           | areia media a grossa siltosa | marrom     | 15          | 6            | 2.2              |
| 2         | 7           | areia media a grossa siltosa | marrom     | 6           | 7            | 2.2              |
| 2         | 8           | areia fina siltosa           | cinza      | 24          | 8            | 2.2              |
| 2         | 9           | areia fina siltosa           | cinza      | 19          | 9            | 2.2              |
| 2         | 10          | areia fina siltosa           | cinza      | 16          | 10           | 2.2              |
| 2         | 11          | areia fina siltosa           | cinza      | 9           | 11           | 2.2              |
| 2         | 12          | areia fina siltosa           | cinza      | 8           | 12           | 2.2              |
| 2         | 13          | areia fina siltosa           | cinza      | 6           | 13           | 2.2              |
| 2         | 14          | areia fina siltosa           | cinza      | 12          | 14           | 2.2              |
| 2         | 15          | areia fina                   | cinza      | 23          | 15           | 2.2              |
| 2         | 16          | areia fina                   | cinza      | 32          | 16           | 2.2              |
| 2         | 17          | areia fina                   | cinza      | 49          | 17           | 2.2              |
| 3         | 1           | areia fina                   | cinza cla  | 3           | 1            | 2.8              |
| 3         | 2           | areia fina                   | cinza cla  | 3           | 2            | 2.8              |
| 3         | 3           | areia fina                   | cinza cla  | 5           | 3            | 2.8              |
| 3         | 4           | areia fina pouco siltosa     | marrom     | 17          | 4            | 2.8              |
| 3         | 5           | areia fina pouco siltosa     | cinza      | 35          | 5            | 2.8              |

cord: [Navigation icons] 0 [Navigation icons] Show: All Selected Records (0 out of 2676 Selected.) Options ▾

Figura 6.14 Tabela resultante da ligação.

## 6.3 INTERPOLAÇÕES

### 6.3.1 Superfície Freática

Com a separação dos furos trabalhados em função do NA (furos em que o lençol foi alcançado e furos que não alcançaram o lençol), foi encontrada a disposição da Figura 6.15.

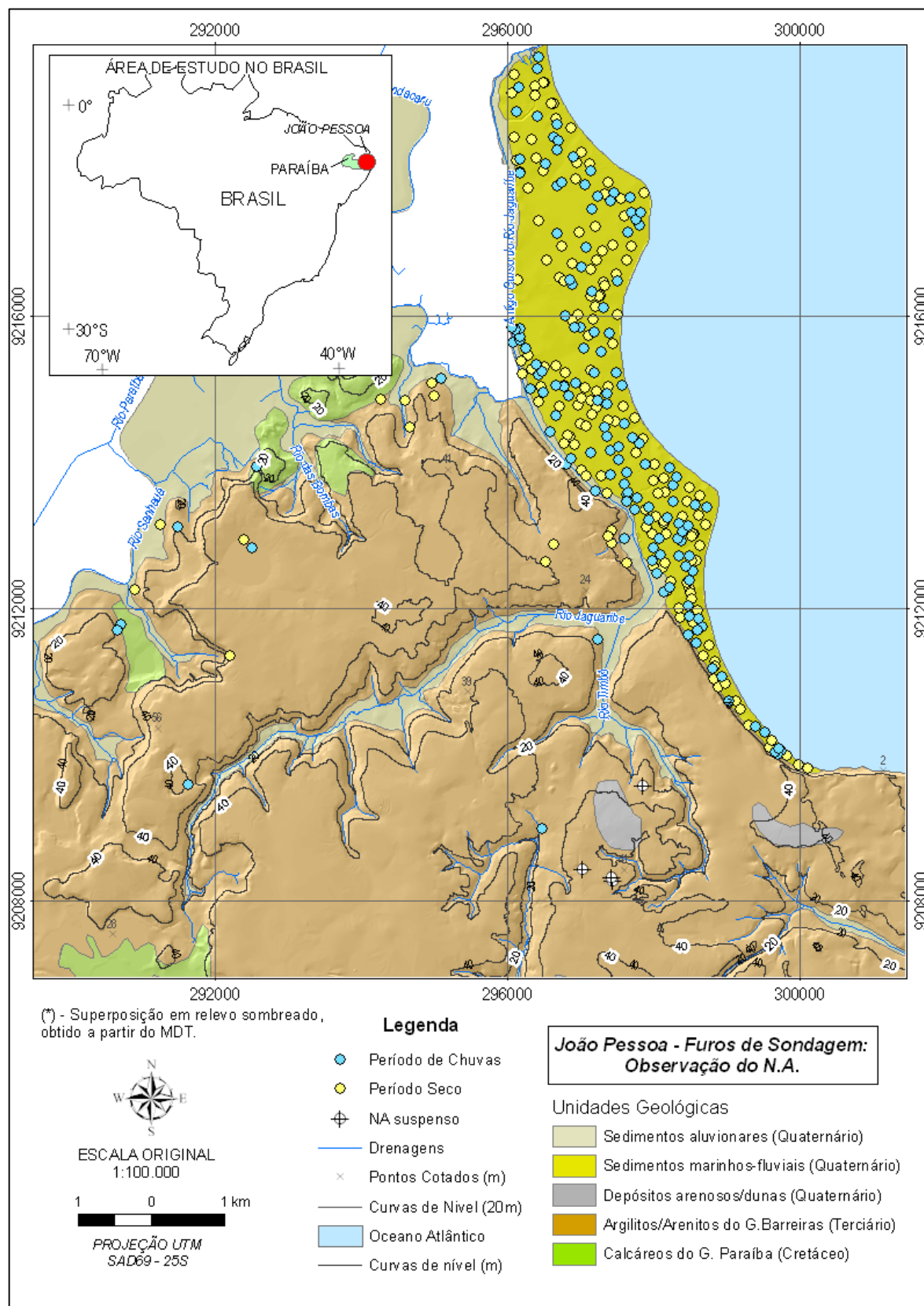


Figura 6.15 Disposição dos furos em que foi alcançado o N.A.

A figura também exibe a disposição, dentro da amostra analisada, dos furos realizados no período considerado chuvoso (março a agosto) e os no período considerado seco (setembro a fevereiro).

Dos 529 furos trabalhados, 299 apresentam informações referentes ao NA, sendo 158 delas realizadas durante o período considerado seco e 141 no período considerado chuvoso.

Além desses, 4 boletins de sondagem apresentavam a observação de que a profundidade de NA encontrada não se referia ao lençol freático, mas a porções de água que caracterizariam um aquífero suspenso, de caráter intermitente, coloquialmente citado como “água empoçada”, ou “empoleirada”, represadas sobre camadas menos permeáveis. Tais furos foram executados na região do Barreiras correspondente ao bairro dos Bancários, com cotas em torno de 40 metros, onde em alguns trechos alcança-se arenito a poucas profundidades. A Figura 6.16 exibe um desses perfis como exemplo de caso.

As sondagens que alcançaram o nível d'água estão quase que totalmente localizadas na Baixada Litorânea, com terrenos apresentando cotas altimétricas entre 0 e 5 m, enquanto que as sondagens nos Tabuleiros sustentados pelo Grupo Barreiras apresentando cotas altimétricas entre 25 e 50 m.

A maioria dos valores de cota do do NA situa-se entre -1 m (lençol abaixo da cota zero, principalmente nos locais mais próximos ao mar) e 5m, indicando a predominância na planície litorânea.

Observa-se que o da estação mais seca apresenta menores valores de cota que o da estação de chuvas. Para as interpolações da superfície freática na área de estudo, foram utilizados só os furos realizados no período seco, por sua maior representatividade amostral, tanto em número de dados como em termos de área, uma vez que abrangeram as partes correspondentes as outras unidades geológicas.

Como os furos com valores de NA correspondentes ao período chuvoso encontram-se todos nesta área, as análises de comparação da variação de nível da superfície freática entre os dois períodos (estações) – seco /chuvoso foram realizadas somente para a planície. Então as interpolações para a análise da variação do lençol em diferentes épocas foram realizadas somente com os furos localizados dentro da unidade geológica de sedimentos recentes, pertencentes à zona costeira.

A Figura 6.17 exibe a localização dos poços utilizados juntamente aos dados da sondagem para o modelo da superfície freática.

A adição dos dados dos poços permitiu um refinamento no modelo da superfície freática, visto que conferiu a este um aumento de profundidade na área do grupo barreiras em que a não observação do NA nas sondagens indicava níveis mais baixos da ocorrência do lençol.

Os parâmetros estatísticos dos dados utilizados para a interpolação do NA encontram-se dispostos no Apêndice A.

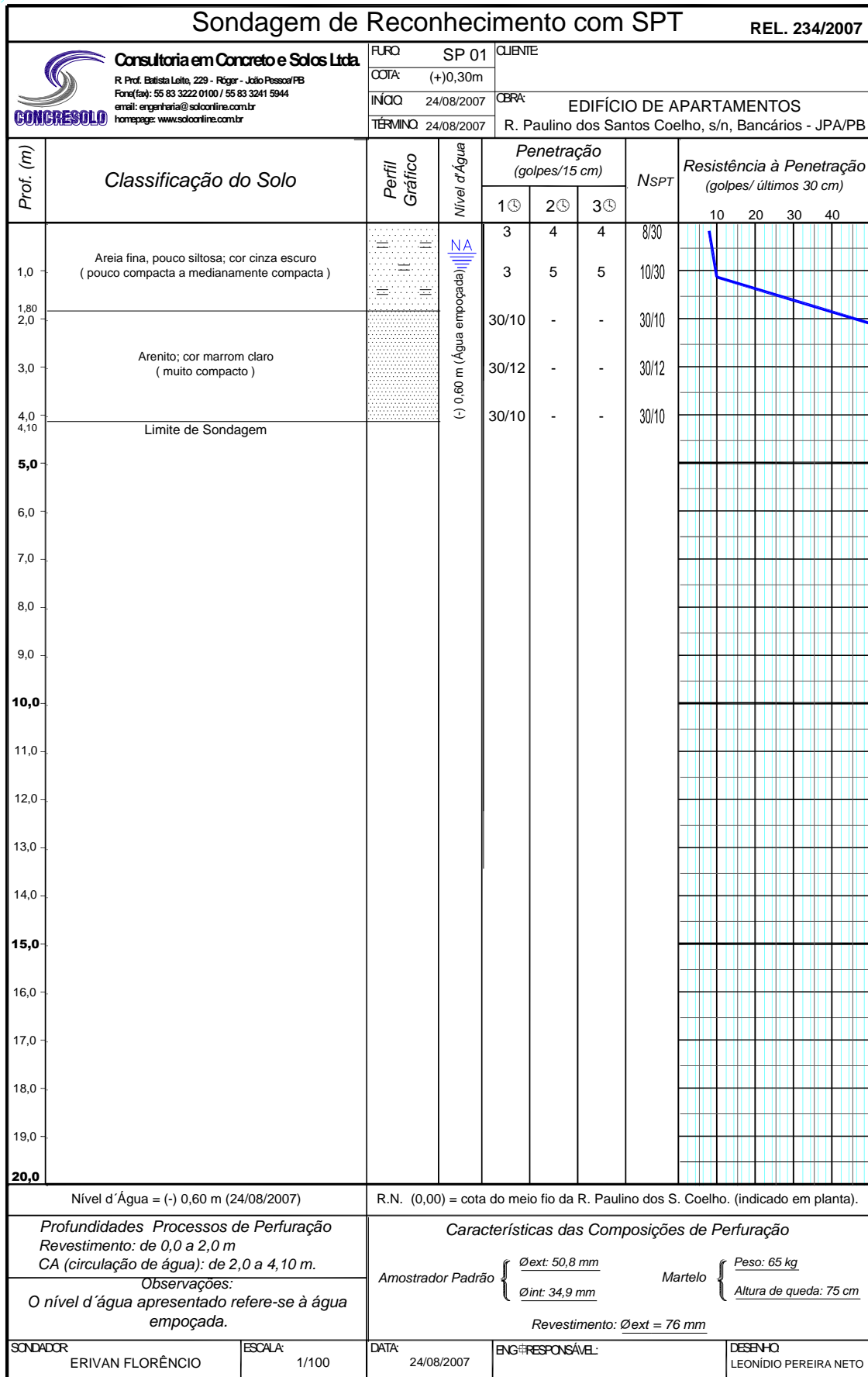


Figura 6.16 Exemplo de perfil de sondagem com NA referente a aquífero suspenso.



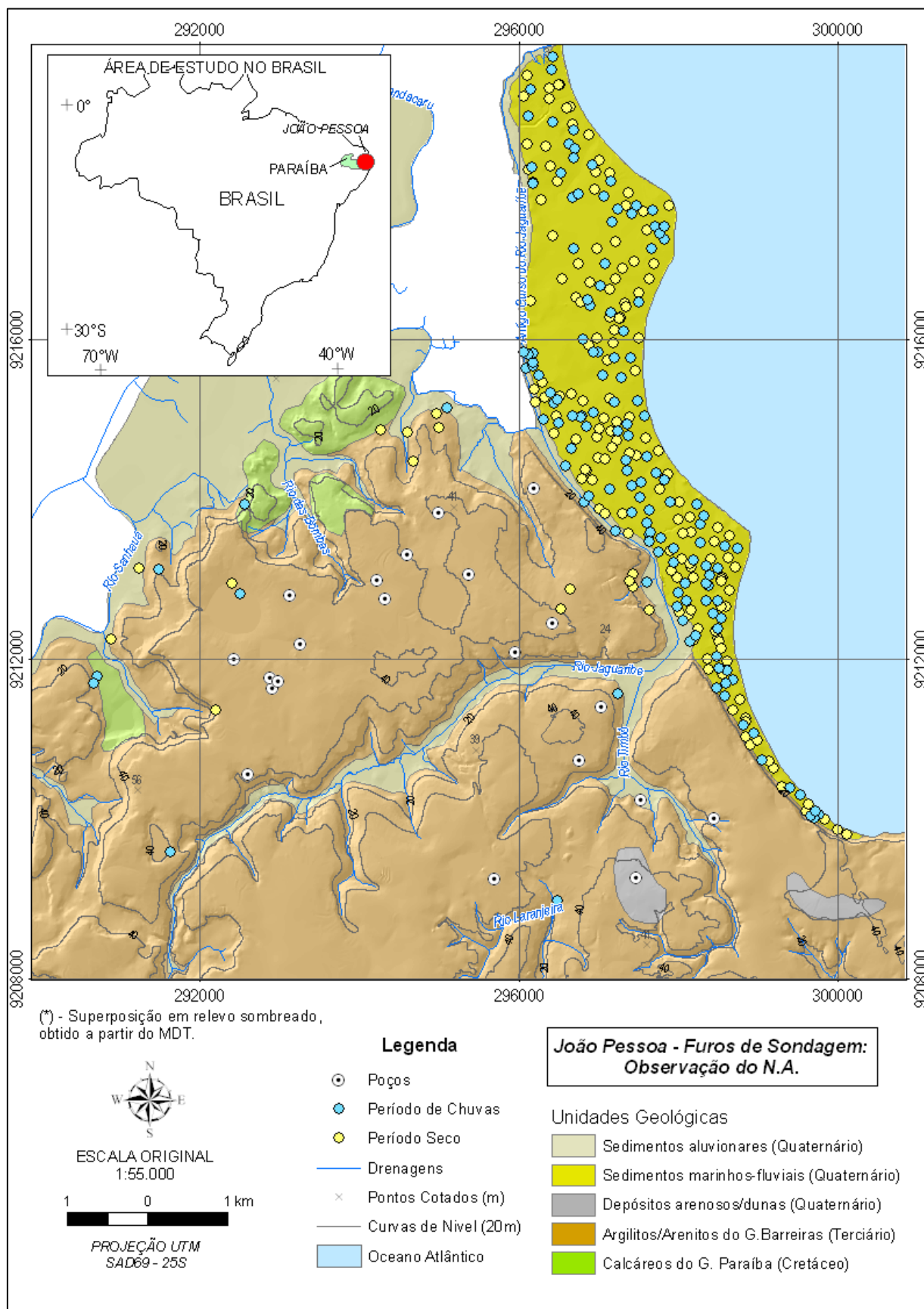


Figura 6.17 Localização dos poços utilizados como dados adicionais.

### **6.3.1.1 Topo To Raster**

A Figura 6.18 exibe o modelo de nível freático obtido para a área de estudo pelo método Topo to Raster, com os furos obtidos no período seco e também dos poços.

A superfície interpolada apresenta uma disposição espacial bastante aderente às diferentes condições de relevo e unidades geológico-geotécnicas presentes na área analisada. Os valores de cota desta superfície tendem a ser nulos a negativos próximo a linha de costa, aumentando gradualmente ao longo da Baixada Litorânea à medida que se avança para o interior do continente, ocupando cotas em torno de 4 a 5 m.

A partir desse limite, acompanhando a elevação do terreno pertinente ao comportamento da falésia e da transição entre os sedimentos marinhos e o Grupo Barreiras, as cotas da superfície freática se elevam até obter níveis de 35 metros. Observa –se também uma boa aderência nos fundos de vale.

Os valores abaixo de zero chegam a alcançar a cota de – 7 metros. Entretanto, a maioria das áreas com cota do lençol abaixo de zero correspondem a valores de até – 2 metros. As áreas que apresentam cotas mais baixas que estas representam situações pontuais, localizadas, sendo: uma na parte oeste dos sedimentos do Barreiras (causada por um poço subterrâneo que apresentou cotas do lençol significativamente mais baixas que as demais, por isso a zona em vermelho no mapa); e outra também no Barreiras, porém situada a direita do Rio Timbó (também causada por um poço subterrâneo que apresentou cota do N.A. relativamente mais baixa).

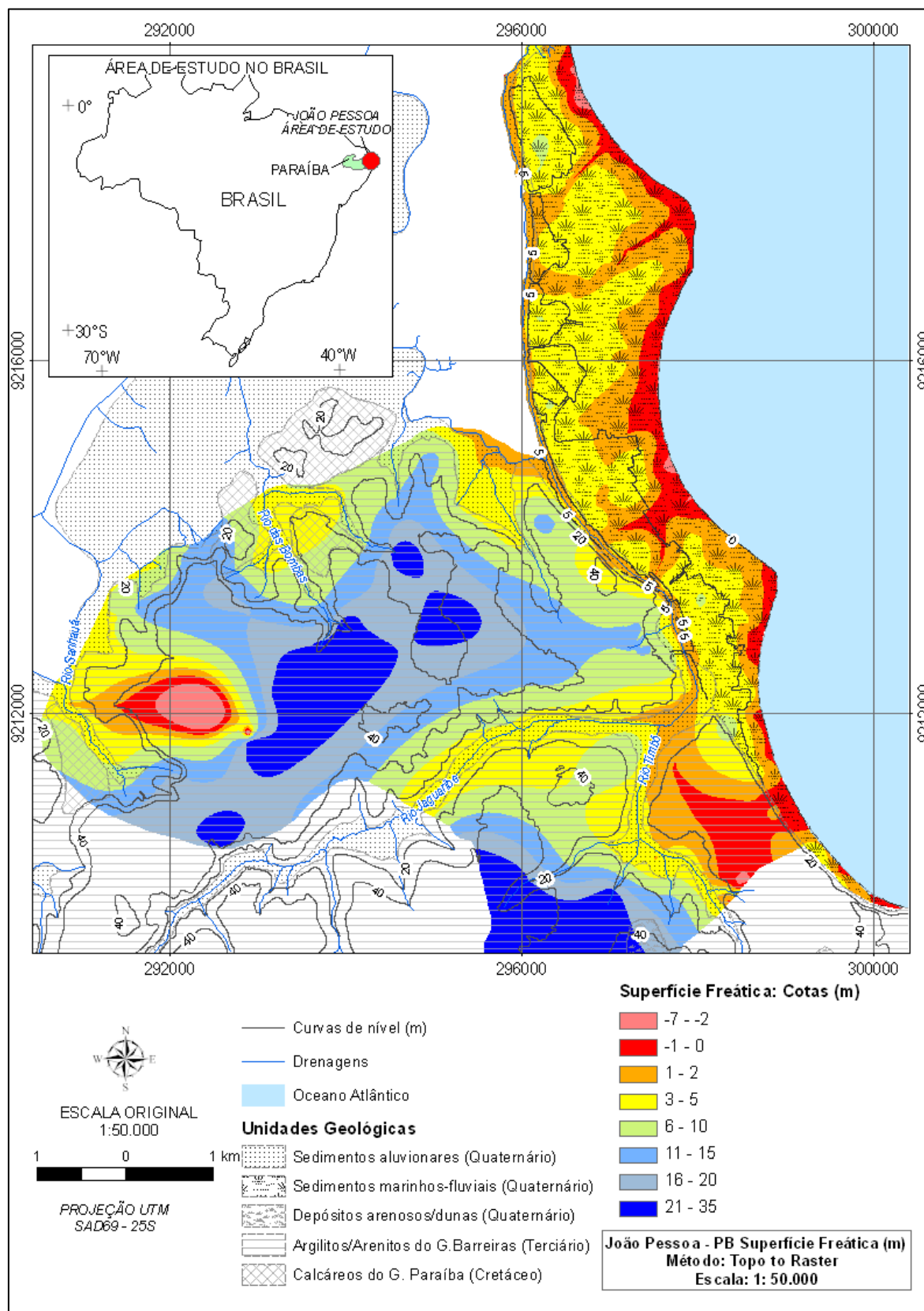


Figura 6.18 Superfície freática para o período seco do ano por meio do Topo to Raster.

### 6.3.1.2 Krigagem ordinária

Para os testes com krigagem ordinária, foi gerado o variograma omnidirecional (direção 0° e abertura de 90°), exibido na Figura 6.19 (saída do ArcGis), para avaliar a possível ocorrência de anisotropias e suas direções. O modelo que apresentou menos discrepâncias no ajuste foi o esférico, e a Tabela 6.2 exibe o passo utilizado e o alcance obtido com o ajuste do variograma.

Tabela 6.2 Passo e alcance do modelo variográfico ajustado para a superfície freática

| <b>Modelo</b> | <b>Passo (h) (m)</b> | <b>Alcance (a) (m)</b> |
|---------------|----------------------|------------------------|
| Esférico      | 300                  | 2.016                  |

A nuvem de pontos delimitada pelos pares selecionados na realização do processo apresentou um modelo de variabilidade caracterizado. Pode-se observar que a zona de influência de correlações mostrou atingir um alcance com mais de 2 km, com transição definida ao alcançar a zona em que a variável já não responde a influência espacial.

Tal valor não se mostra muito diferente dos obtidos em trabalhos similares para esta variável, como os de Sturaro (1988), Fonteles (1997), Mendes (2001), Fontelles *et al* (2006), que também analisaram o comportamento geoestatístico do nível piezométrico/N.A. de sondagens e poços, encontrando o alcance entre 1.200 e 3.500 metros.

Na análise por validação cruzada, as estimativas por krigagem ordinária a partir do variograma obtido se mostraram satisfatórias, como se pode constatar na reta gerada durante a validação, exibida na Figura 6.20.

No trecho da reta em que há uma maior presença de amostras, pode-se dizer que o ajuste foi razoável; entretanto observa-se um distanciamento entre as retas (pobreza de correlação) ao mesmo tempo em que diminui-se o número de pontos.

A Figura 6.21 apresenta então a superfície freática gerada a partir da krigagem ordinária.

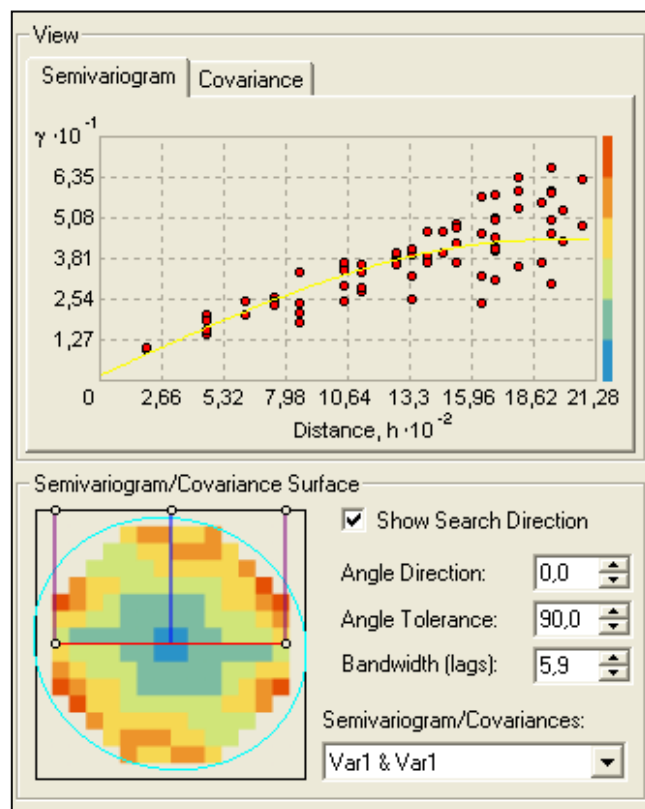


Figura 6.19 Variograma omnidirecional para a variável cota do NA.

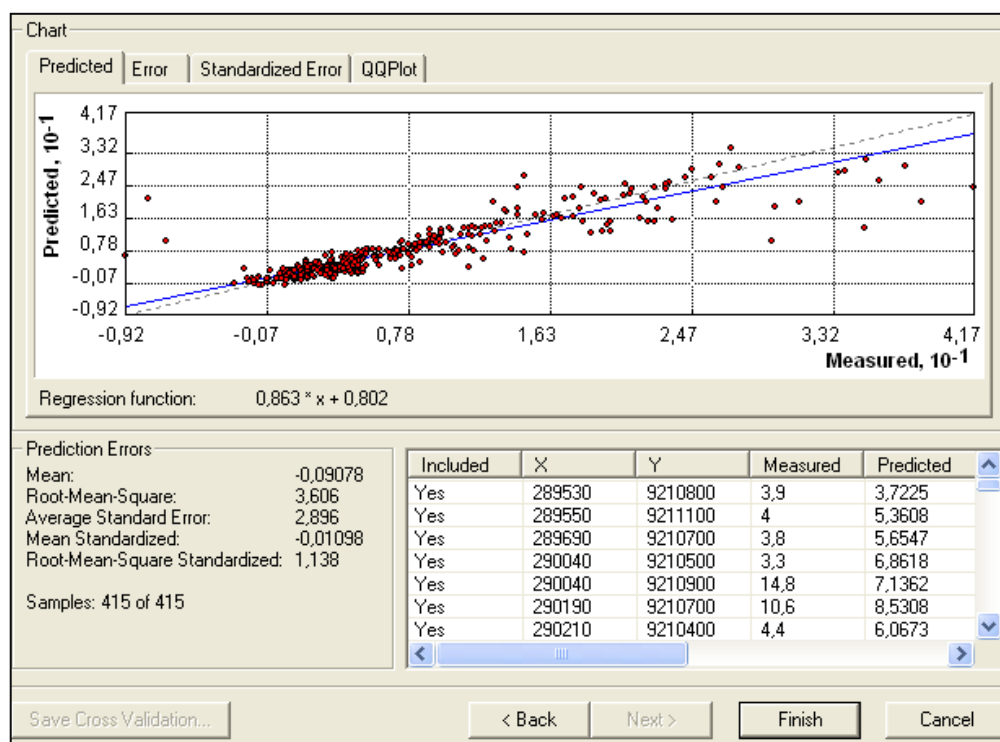


Figura 6.20 Validação cruzada com a krigagem ordinária para a variável N.A..

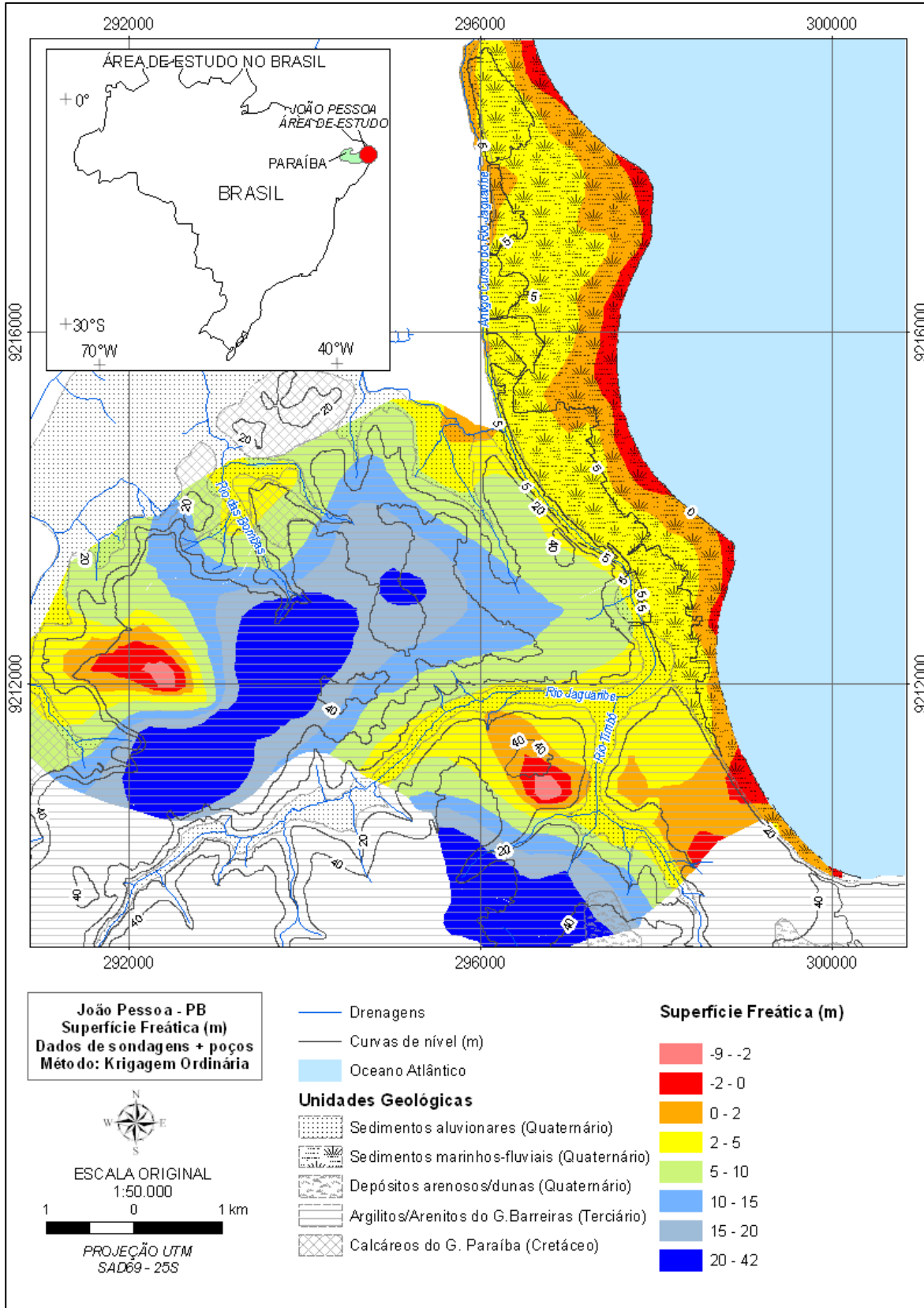


Figura 6.21 Superfície freática para o período seco do ano por meio de krigagem ordinária.

Assim como a superfície interpolada pelo Topo to Raster, a obtida com a krigagem também apresenta uma disposição espacial coerente às diferentes condições de relevo na unidade geológica dos sedimentos recentes; com valores de cota tendendo a ser nulos a negativos em alguns trechos próximos a linha de costa.

Em direção ao continente, ao longo da Baixada Litorânea, as cotas aumentam gradativamente até alcançar valores em torno de 4 m. A partir desse limite, acompanhando a elevação do terreno pertinente ao comportamento da falésia e da transição entre os sedimentos marinhos e o Grupo Barreiras, as cotas da superfície freática se elevam até obter níveis de 40 metros.

Também se observa o formato e influência das redes de drenagem na superfície resultante. Apesar disso, em alguns pontos os valores estimados nos trechos com linhas de drenagem resultaram diferentes dos originais inseridos, aspecto que pode ser melhor observado na linha do Rio Jaguaribe que delimita a transição entre a planície e os tabuleiros (falésia). Nestes pontos, houve um aumento dos valores de cotas em relação aos originais, que inicialmente encontravam-se na classe inferior (0 a 2 m), e, na superfície modelada, incluem-se na faixa de 2 a 5 metros.

O modelo obtido com o Topo to Raster ilustra bem essa diferença. Nele, constata-se a transição de cotas ao se aproximar das drenagens, sem negligenciar os valores originais, que inclusive mantiveram-se na mesma faixa dos valores estimados).

Outra consideração importante a ser levada em conta no processo da krigagem ordinária são os valores estimados para as cotas extremas (mais altas). Com o Topo to Raster, é possível estabelecer limites de valores estimados de acordo com as observações prévias (analisando a profundidade de todas as sondagens em que não foi alcançado nível d'água e também os poços com maiores cotas de NE observado). Para isso, foi delimitada a cota de 35 metros para as estimativas com este método. Já a krigagem ordinária não permitiu esse tipo de delimitação, fornecendo cotas muito mais altas para o lençol onde se sabe que não poderiam ocorrer.

Não obstante, os dois mapas obtidos se mostraram satisfatórios e coerentes com o esperado, sem diferenças gritantes quando comparados. A krigagem se mostra uma ferramenta interessante na observação da regionalização da variável, indicando tendências com transições e também anisotropias.

Optou-se então por utilizar o método Topo to Raster para todas as análises seguintes envolvendo a superfície freática, como a analisada a seguir.

### 6.3.2 MDT MENOS A SUPERFÍCIE FREÁTICA

Uma forma rápida de avaliação de adequabilidade da interpolação da superfície freática é a realização da subtração desta superfície (obtida para o período seco, método Topo to Raster) da superfície do terreno obtida pelo MDT.

O resultado da subtração entre o MDT e a superfície freática demonstra-se particularmente importante por representar o que seria a profundidade do lençol, parâmetro essencial e influenciador na escolha dos tipos de fundação. Foram escolhidas classes de profundidades de forma que se destacassem: valores menores que zero (onde o lençol pode aflorar), valores até 5 metros (buscando algum paralelismo com a curva de nível 5 metros na planície costeira), valores maiores que 12 metros (visto que a maior parte das estacas escavadas e tubulões executados no grupo Barreiras situam-se apoiados a esta profundidade, sendo limitados pela presença do lençol), seguidos por valores maiores que 20 e 30 metros. A Figura 6.22 apresenta o resultado desta operação (MDT – NE; sendo NE o termo utilizado para a superfície obtida com as sondagens e os poços que, indicam o lençol freático como NE = nível estático).

Observa-se que os valores anômalos negativos indicando áreas com o nível d'água acima da superfície do terreno estão associados a áreas de vales de drenagem. A diferença atingiu até o valor negativo de -8, que indica, entretanto, trechos pontuais no mapa.

Aparentemente, o procedimento de subtração da superfície freática evidenciou então um melhor ajuste do modelo aos fundos de vale das drenagens, visto que nestes trechos é natural que a cota do nível d'água realmente apresente-se mais alta que a cota do terreno. Tais características parecem corroborar os resultados obtidos na interpolação.

Entretanto, também foram identificados poucos pontos com resultados anômalos na Baixada Litorânea. Num primeiro momento, pode-se atribuir a alguns deles o fato de representar trechos com poucas densidades de furos de sondagem.

Cabe lembrar que muitas áreas da planície litorânea possuem registros de alagamentos na época de chuva, além de ser muito comum nesta região a necessidade de realização de operações de rebaixamento de lençol freático para execução de escavações e obras de infra-estrutura.



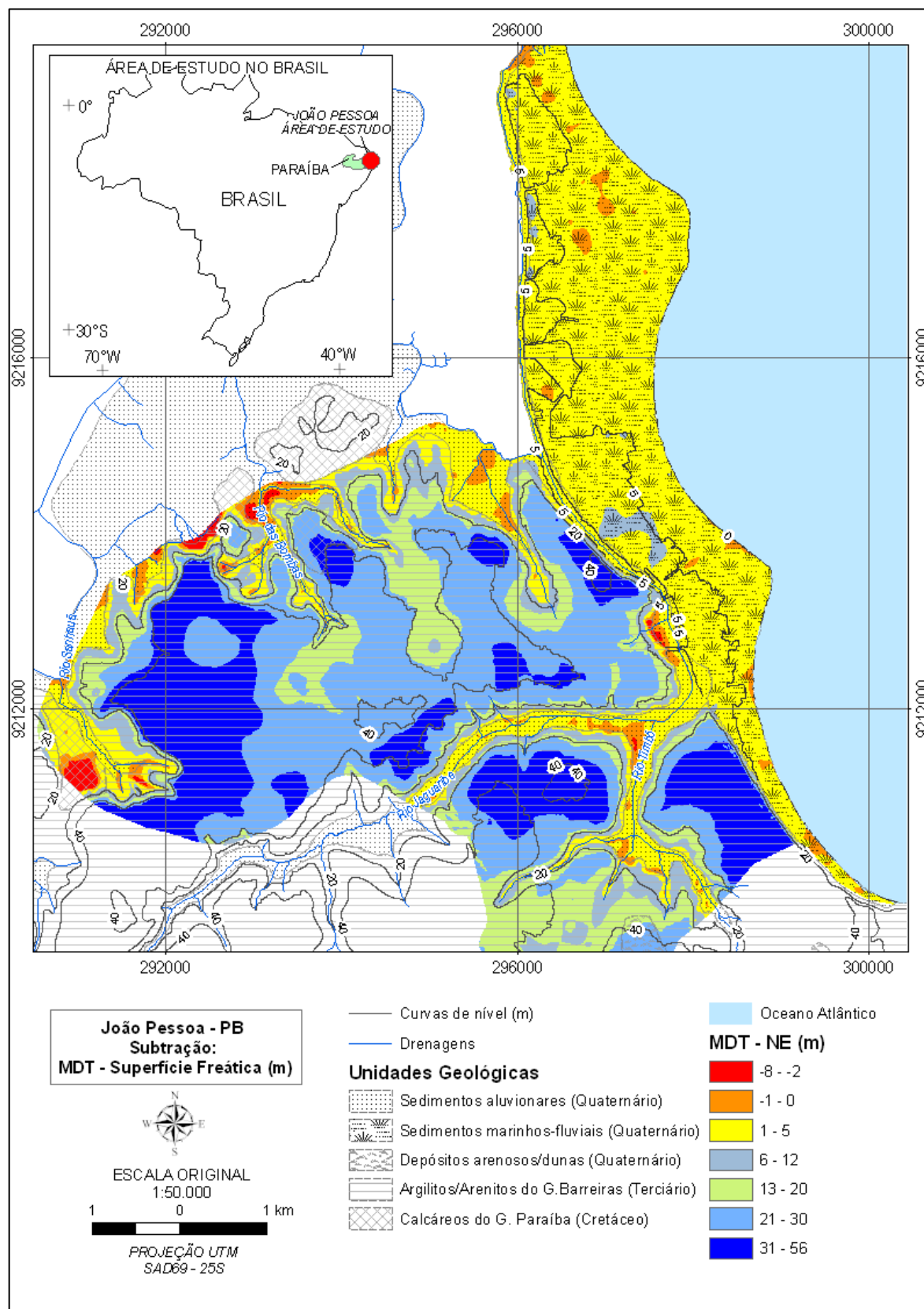


Figura 6.22 Subtração: MDT menos a superfície freática (diferença em metros).

### 6.3.3 Comparação Entre Períodos De Chuvas – Seco

As análises de comparação da variação de nível da superfície freática entre os dois períodos (estações) – seco /chuvoso foram realizadas somente para a planície, pois os furos com valores de NA correspondentes ao período chuvoso encontram-se quase todos nesta área.

Foram geradas superfícies freáticas para o período seco e o chuvoso pelo modelo Topo to Raster, para os valores pertencentes aos furos contidos apenas na zona costeira, e então se seguiu a uma comparação entre as duas situações.

A Figura 6.23 apresenta o resultado da interpolação da superfície freática utilizando a rotina topo to raster e as sondagens realizadas durante a estação de chuvas, enquanto a Figura 6.24 exhibe o modelo obtido para a estação seca.

As superfícies interpoladas apresentam uma disposição espacial bastante compatível às diferentes condições de relevo presentes na área analisada. Pode-se constatar esse efeito com a análise conjunta das curvas de nível expostas. Os valores de cota desta superfície tendem a ser nulos a negativos próximo a linha de costa, aumentando gradualmente ao longo da Baixada Litorânea à medida que se avança para o interior do continente, ocupando cotas em torno de 4 a 5 m. Novamente, percebe –se uma boa aderência aos fundos de vale.

A superfície obtida para a época de chuva aparentemente apresenta valores mais altos de cotas, na qual pode-se observar inclusive uma diminuição significativa das faixas com cotas menores que zero (cor vermelha).

Analisando a diferença entre superfícies (período chuvoso – período seco), observam-se trechos com cotas que oscilariam entre as estações do ano em até de 5 metros de amplitude.

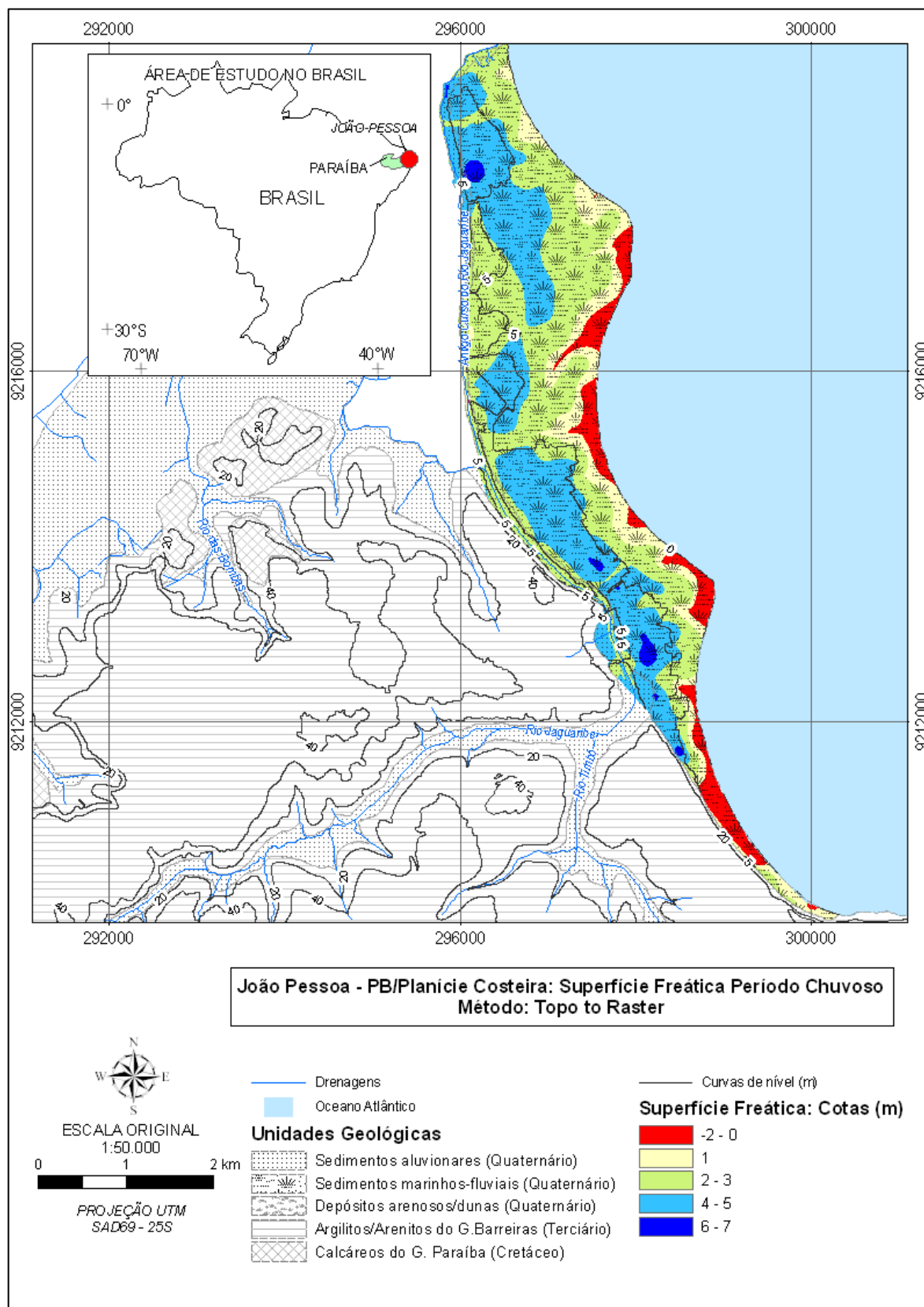


Figura 6.23 Superfície freática para o período chuvoso do ano por meio do Topo to Raster.

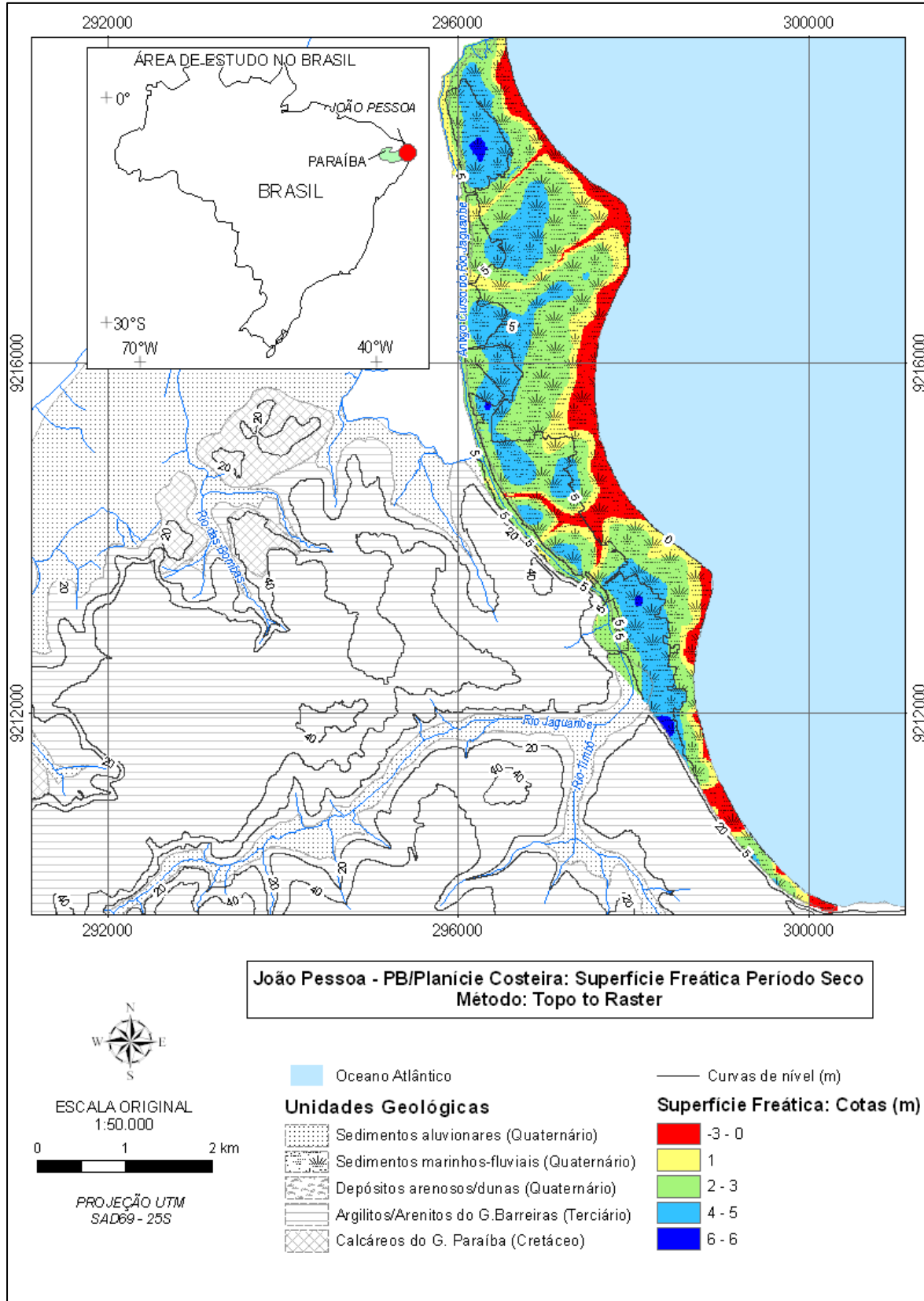


Figura 6.24 Superfície freática para o período seco do ano por meio do Topo to Raster.

Entretanto, deve – se lembrar que foi utilizada uma generalização no processo de modelagem. Os valores de nível d'água correspondem a vários anos de observação, sem levar em conta as diferenças que podem ocorrer com o tempo (anos com maior pluviosidade, outros com menos). Além disso, a consideração pontual do início do período seco apresenta as cotas mais altas devido ao final recente do que foi considerado o período de chuvas. Essas considerações enfatizam então o caráter de modelo aproximado obtido, podendo ocorrer trechos que não sejam perfeitamente representativos (ex. cota no período seco mais alta que no chuvoso).

#### **6.3.4 Índice de Resistência à Penetração ( $N_{SPT}$ )**

A Figura 6.25 exibe os setores utilizados nas interpolações no  $N_{SPT}$ . São eles:

- Setor 1: área contendo os sedimentos recentes da planície costeira, com 10,7 km<sup>2</sup> e 276 furos de sondagens;
- Setor 2: área nos sedimentos do Barreiras situada ao norte do curso de drenagem do Rio Jaguaribe, com 13,8 km<sup>2</sup> e 181 sondagens;
- Setor 3: área também situada nos sedimentos do Barreiras, só que contida ao sul dos afluentes do Rio Timbó, com 3,2 km<sup>2</sup> e 72 furos.

No total, foram utilizadas 529 sondagens nas atividades de interpolação e estimativas dos valores do  $N_{SPT}$ .

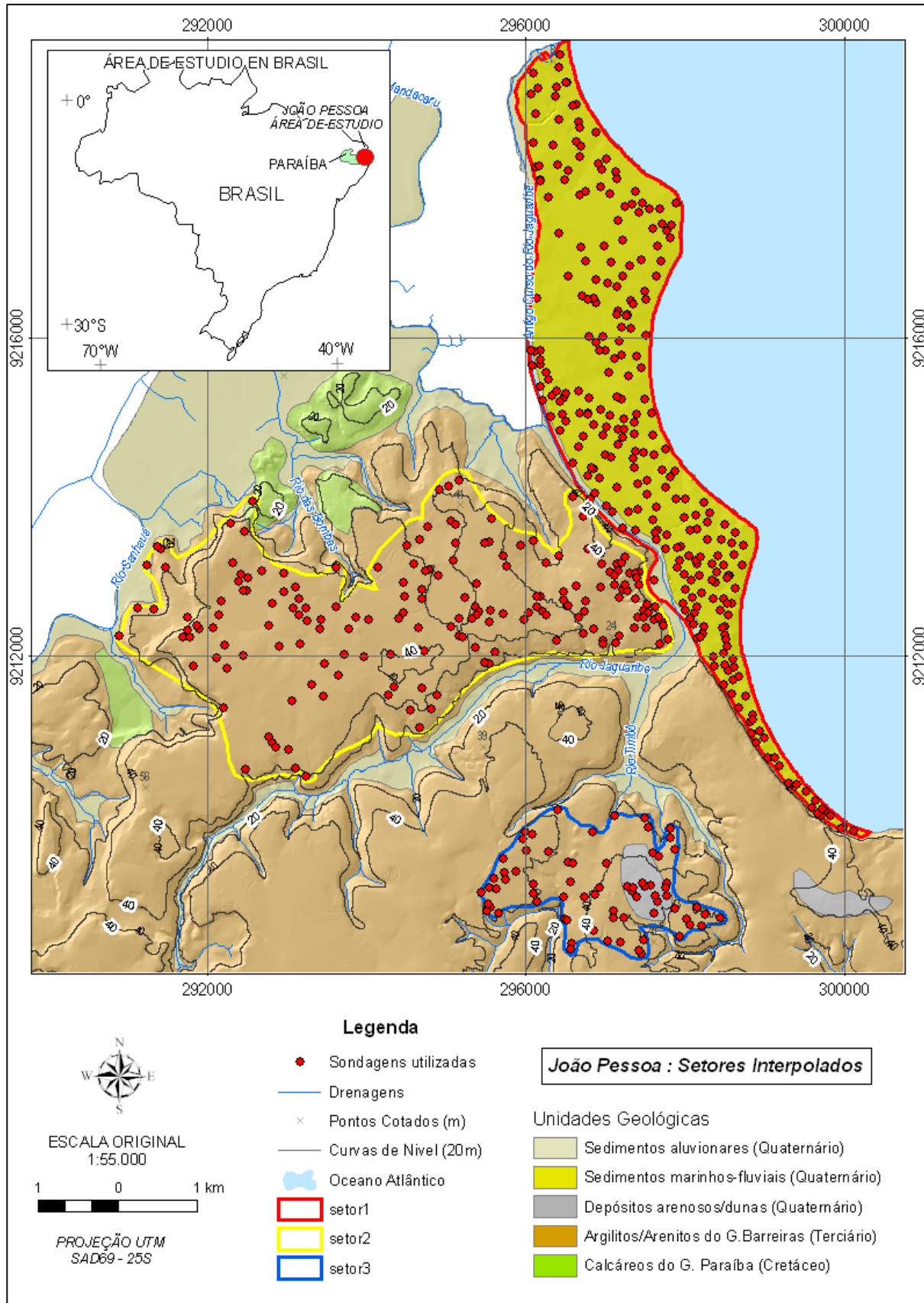


Figura 6.25 Setores utilizados nas interpolações do  $N_{SPT}$ .

A seguir são apresentados os resultados e análises referentes ao comportamento do índice de resistência à penetração nos diferentes setores e profundidades mais importantes. Também são exibidos os mapas obtidos com as estimativas de ocorrência do  $N_{SPT}$  por meio dos métodos de Krigagem Ordinária e Topo to Raster, assim como as considerações mais relevantes sobre os produtos de cada um deles.

### 6.3.5 SETOR 1

A Figura 6.26 exibe os histogramas de ocorrência do índice a estas três profundidades. Os parâmetros estatísticos dos dados encontram-se dispostos no Apêndice A.

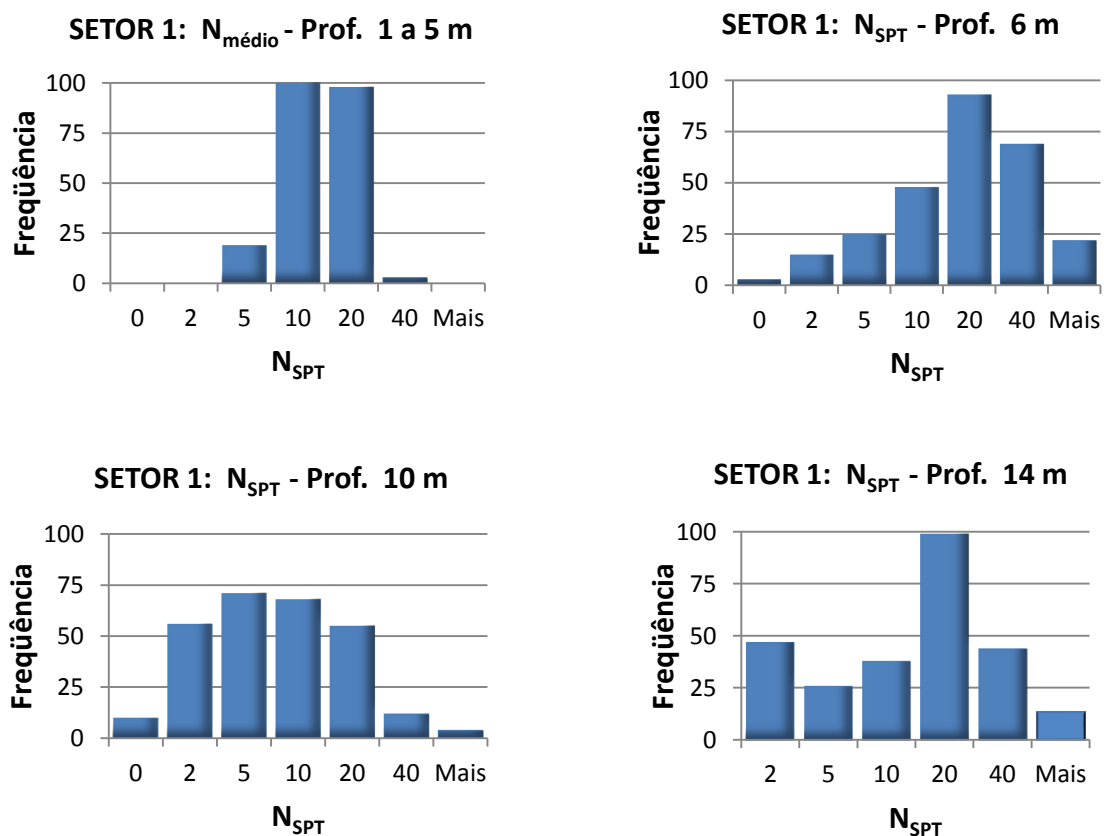


Figura 6.26  $N_{SPT}$  nos diferentes níveis de profundidade no setor 1.

Na camada superficial que vai de 1 a 5 metros predominam valores de  $N_{SPT}$  médio entre 5 e 20 golpes, enquanto a 6 metros, os valores analisados apresentam faixas dos intervalos mais freqüentes significativamente altos para um nível não muito profundo, com o índice predominando entre 10 a 40 golpes. Ainda contrariando o comportamento esperado, a 10 metros de profundidade os valores de resistência caem de maneira, caracterizando uma camada mais fraca, com maioria de valores do  $N_{SPT}$  entre 0 e 5, e apresentando poucos pontos com o índice maior que 10 golpes. O acréscimo de resistência com a profundidade aparece então com o histograma do índice no nível de 14 metros, no qual observa-se a maioria de golpes maiores que 20.

### 6.3.5.1 Parâmetros Geoestatísticos

Para as modelagens variográficas do  $N_{SPT}$ , nas quatro situações, foi avaliado o variograma omnidirecional (direção  $0^\circ$  e abertura de  $90^\circ$ ), na busca de interpretação sobre possível anisotropia. Os variogramas foram processados com passo (h) de 50 metros (nesse caso evidencia-se a maior densidade de sondagens nessa unidade, com espaçamentos variando entre 50 até cerca de 300 metros, daí o melhor valor obtido para h). A Tabela 6. 3 exibe os parâmetros básicos obtidos com o ajuste dos variogramas, e as Figuras 6.27 a 6.30 mostram os gráficos obtidos.

O modelo esférico, em todos os casos, apresentou estruturação e relativamente um bom ajuste para a variável  $N_{spt}$ , quanto às transições entre zona de alcance e patamar, podendo-se constatar, inclusive, a correspondência dos valores de variância a priori com os ajustados para a obtenção dos patamares.

Tabela 6.3 Passo e alcance do modelo variográfico ajustado para as interpolações do Setor 1.

| <i>Profundidade</i> | <i>Modelo</i> | <i>Passo (m)</i> | <i>Alcance (m)</i> |
|---------------------|---------------|------------------|--------------------|
| 1 a 5 m             | Esférico      | 50               | 108                |
| 6 m                 | Esférico      | 50               | 130                |
| 10 m                | Esférico      | 50               | 110                |
| 14 m                | Esférico      | 50               | 90                 |



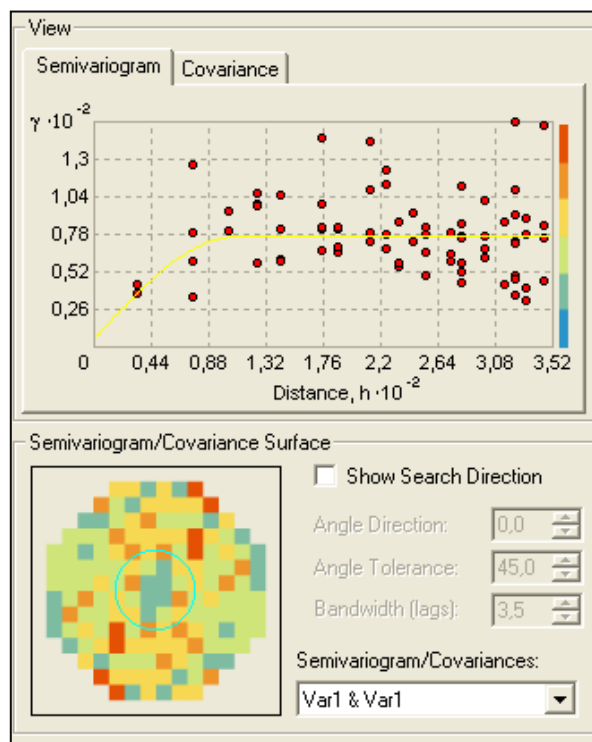


Figura 6.27 Variograma omnidirecional para o  $N_{SPT}$  médio entre as profundidades de 1 e 5m.

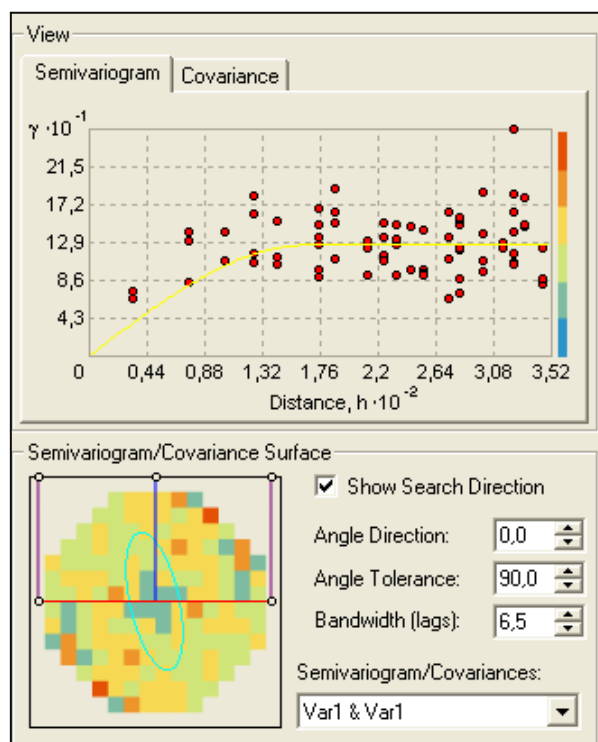


Figura 6.28 Variograma omnidirecional para o  $N_{SPT}$  a profundidade de 6 m.

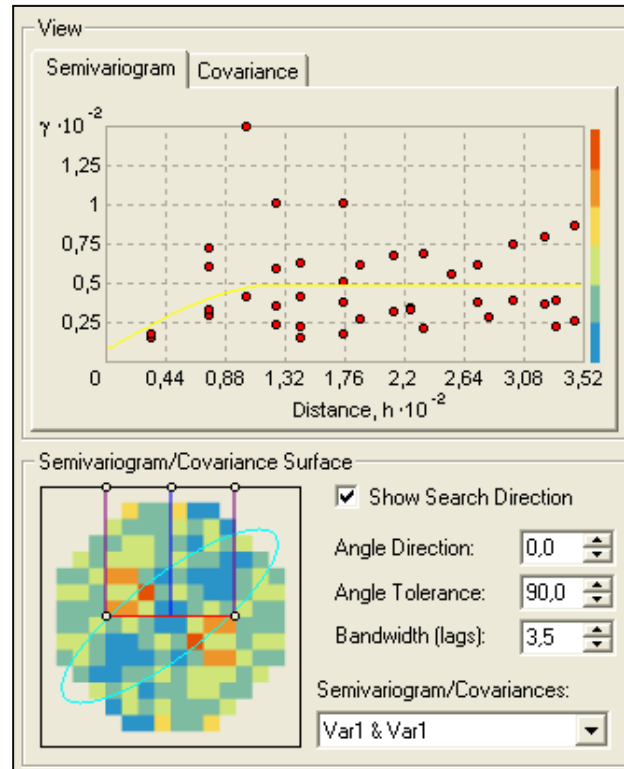


Figura 6.29 Variograma omnidirecional para o  $N_{SPT}$  a profundidade de 10 m.

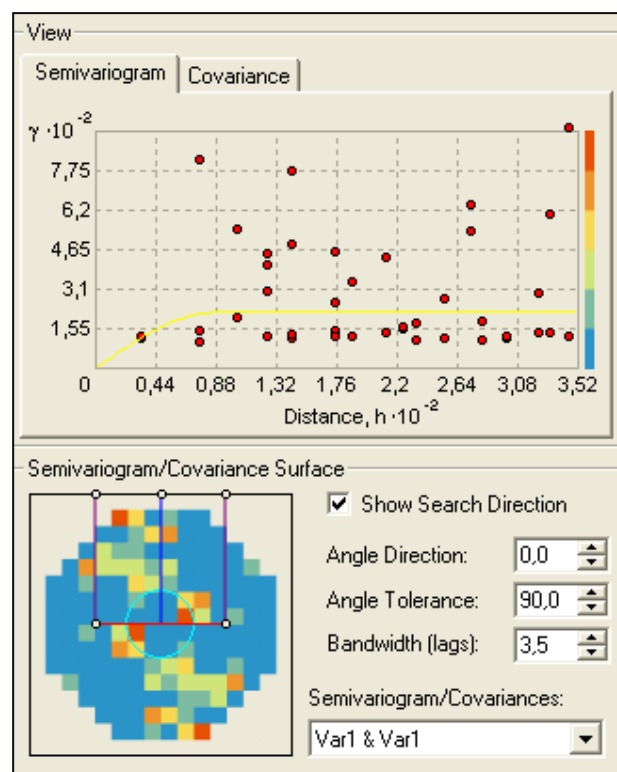


Figura 6.30 Variograma omnidirecional para o  $N_{SPT}$  a profundidade de 14 m.

Para a profundidade de 6m, a ocorrência de anisotropia foi sugerida de maneira sutil (na direção SW - NE), que pode ser observada nos resultados das estimativas nos mapas de ocorrência e distribuição do índice (exibidos posteriormente). A 10 metros, a anisotropia sugerida assume uma direção contrária (NW – SE), assim como para 14 metros.

Para os valores médios do índice da camada de 1 a 5 metros, o alcance (raio de influência em que uma amostra ainda apresenta correlação espacial com a outra) foi de 108 metros. Às profundidades de 6, 10 e 14 metros, obtiveram-se os alcances de 130, 110 e 90 metros, respectivamente. Esses valores mostram-se menores que os encontrados em outros trabalhos do gênero, mas isso se deve a escolha do passo (h) de apenas 50 metros, o que permitiu enfatizar e avaliar melhor o aspecto local do método, limitando também o número de vizinhos utilizados nas estimativas.

#### **6.3.5.2 Profundidade: 1 a 5 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster**

As Figuras 6.31 a 6.32 exibem os mapas obtidos para o  $N_{SPT}$  médio entre as profundidades de 1 a 5 metros, pelos dois métodos. A Tabela 6.4 descreve as características gerais encontradas nos perfis utilizados para essa camada (entre 1 e 5 metros de profundidade).

Comparando os valores médios de cada metro, observa-se um aumento do índice com a profundidade, o que seria um comportamento esperado para essa variável. A predominância de areias também é compatível para esse nível em uma unidade geológica costeira com sedimentos marinhos, já que a maioria das sondagens foi realizada nas linhas mais próximas a costa.

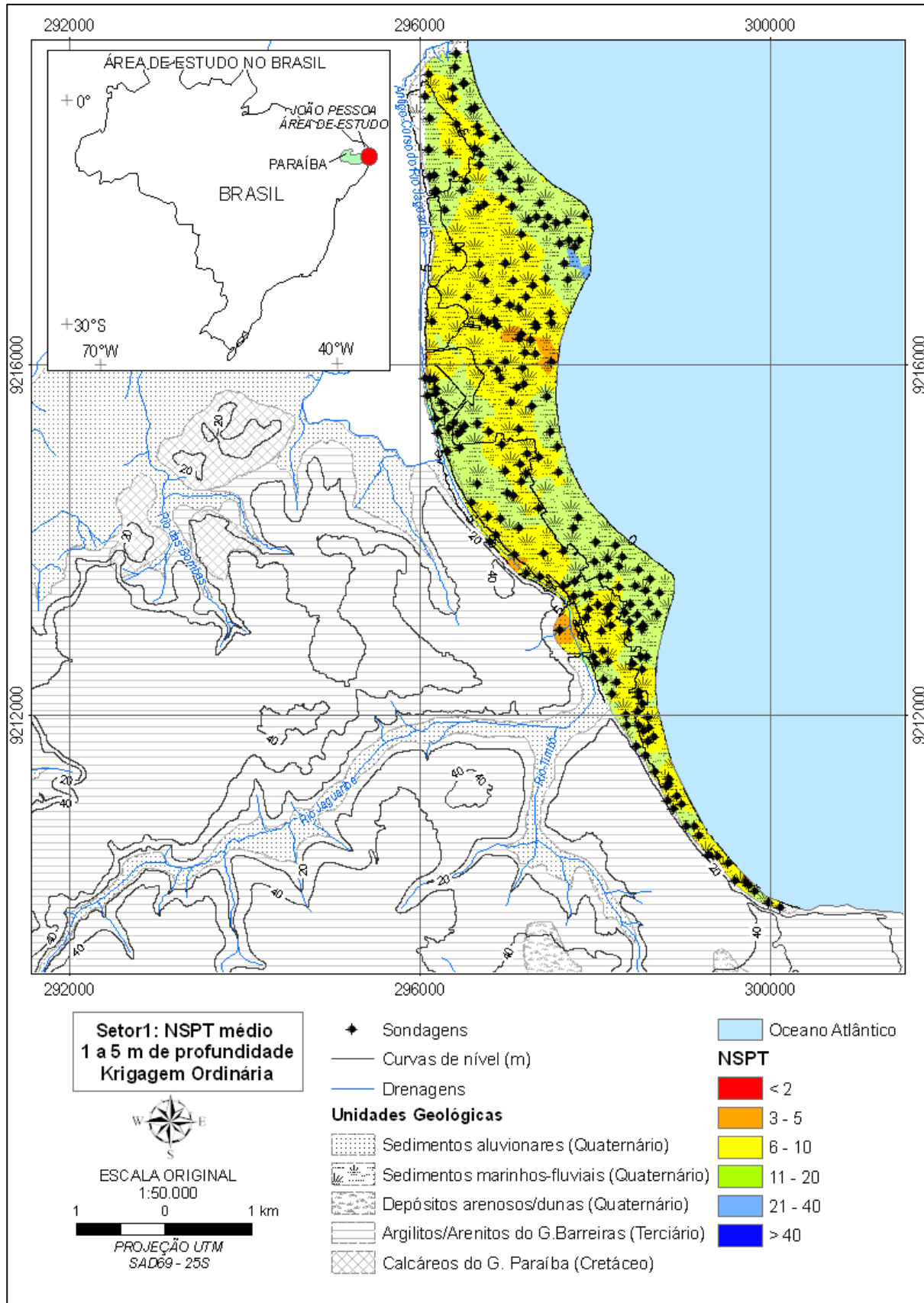


Figura 6.31 Interpolação do valor médio do  $N_{SPT}$  entre 1 e 5 m de profundidade no setor 1 (Krigagem ordinária).

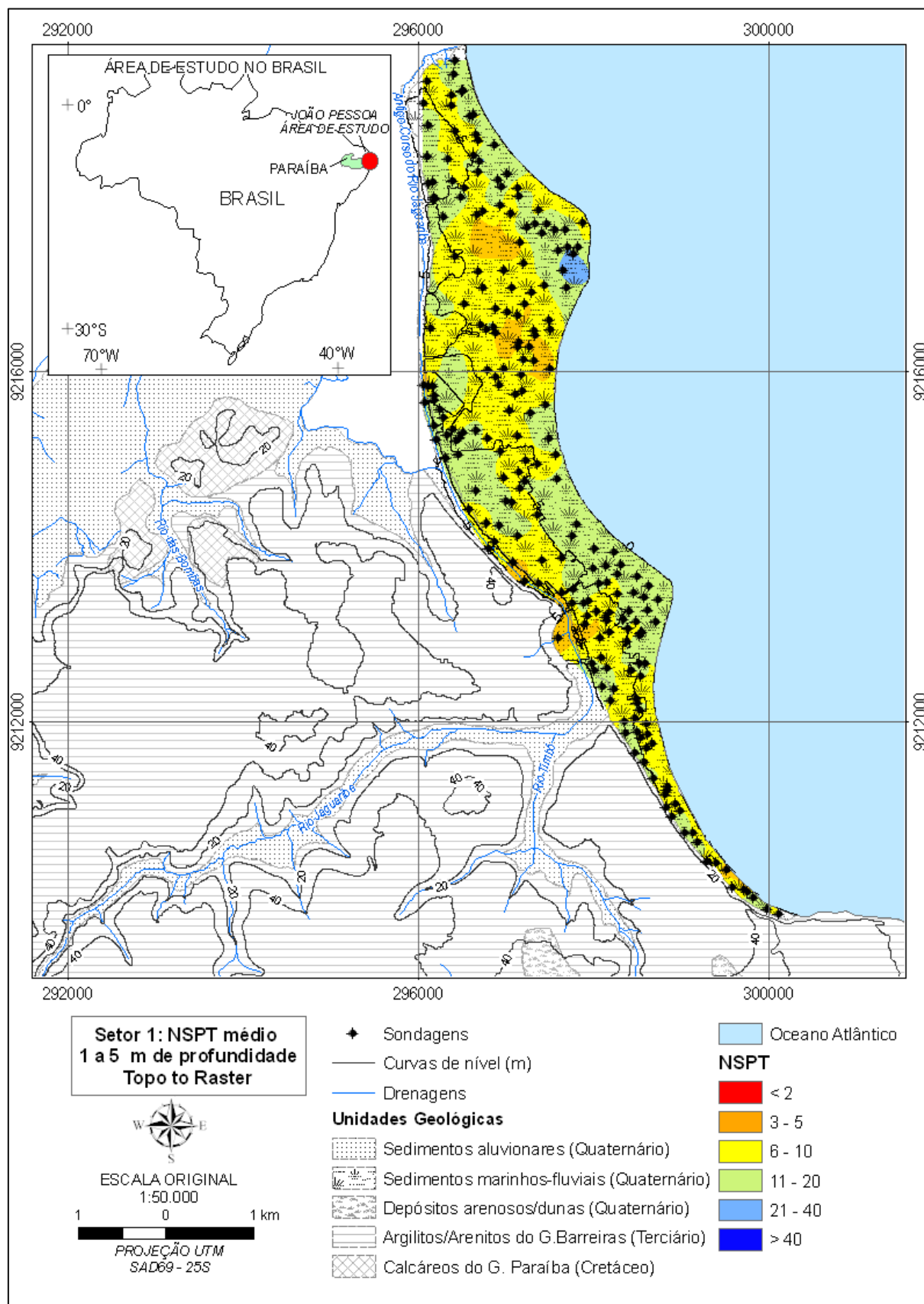


Figura 6.32 Interpolação dos valores do valor médio do  $N_{SPT}$  entre 1 e 5 m de profundidade no setor 1 (Topo to Raster).

Tabela 6.4 Camada 1 – 5 m: Setor 1.

| Profundidade/metro | Textura   | N <sub>SPT</sub> mín | N <sub>SPT</sub> máx | N <sub>SPT</sub> médio |
|--------------------|---|----------------------|----------------------|------------------------|
| 2                  | Areia; areia fina, areia fina a média pouco siltosa, areia média a grossa   | 1                    | 28                   | 6,8                    |
| 3                  | Areia; areia fina, areia fina a média pouco siltosa, areia média a grossa   | 1                    | 39                   | 9                      |
| 4                  | Areia fina, areia fina, areia fina a média pouco siltosa, areia fina siltosa com marisco e pedregulho   | 0                    | 47                   | 10,3                   |
| 5                  | Areia fina, areia fina, areia fina a média pouco siltosa, areia fina siltosa com marisco, areia média a grossa pouco siltosa com pedregulho e marisco | 0                    | 49                   | 14,7                   |

Como os valores médios para cada metro dessa camada ficaram entre 6 e 15 golpes, o resultado foi um mapa com ausência de classes com valores extremos (com exceção da pequena área indicando mais de 20 golpes no modelo obtido pelo topo do raster), como áreas em vermelho (menos de 2 golpes) e laranja (entre 2 e 5 golpes), e os tons de azul ( $N_{SPT} > 20$  golpes). Diante disso, o mapa com as estimativas do índice médio no bulbo de tensões apresenta a predominância de áreas amarelas (entre 5 e 10 golpes) e verdes (entre 10 e 20 golpes), resultado que se encaixa perfeitamente no critério para utilização da fórmula de tensão admissível.

Com ambos os métodos, os mapas demonstraram-se bastante parecidos, com classes iguais e anisotropia não muito bem definida. Entretanto, a krigagem ordinária aparentemente reduziu as áreas com valores mais baixos e também mais altos presentes nos dados, mostrando um caráter suavizador do método.

### **6.3.5.3 Profundidade: 6 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster**

As Figura 6.33 e Figura 6.34 exibem os mapas obtidos para a profundidade de 6 metros, pelos dois métodos.

A esta profundidade, predomina a ocorrência de solos arenosos, com a textura variando de areia fina a média ou grossa, siltosa ou argilosa, com poucas menções a argilas siltosas ou arenosas.

Como anteriormente indicado pelo histograma, observa-se uma predominância de valores de  $N_{SPT}$  na faixa de 10 a 20 golpes, demonstrando uma compacidade/rigidez considerável a tão pouca profundidade. Observa-se a descrição da presença de mariscos nas areias siltosas de granulometria fina e também de pedregulhos nas areias médias a grossas, o que realmente pode conferir esse valor significativo do índice de resistência.

Neste nível, a região correspondente aos sedimentos recentes apresenta trechos ainda mais compactos/rijos, com faixas de valores de  $N_{SPT}$  alcançando 20 a 40 golpes. Tal comportamento comprova e justifica a utilização das estacas de compactação, uma vez que representa uma cota de apoio aceitável a esse tipo de fundação diante de valores tão altos do índice de resistência à penetração.

As poucas ocorrências de solo muito mole/fofo a 6 metros de profundidade correspondem às amostras descritas na Figura 6.35 em que pode-se verificar a menção de um ponto com argila orgânica com turfa, situado na base da falésia no trecho muito próximo ao Rio Jaguaribe, quando este já se encontra em sentido sul - norte (vide mapa obtido com o Topo to Raster).

Tal ponto pertence à sondagem com ID 96, e apresenta um perfil com esta argila mole/muito mole a partir de 3 metros de profundidade que persiste até a profundidade de 13 metros, depois da qual se observa um aumento brusco de resistência à penetração ( $N_{SPT}$  com 40 golpes).

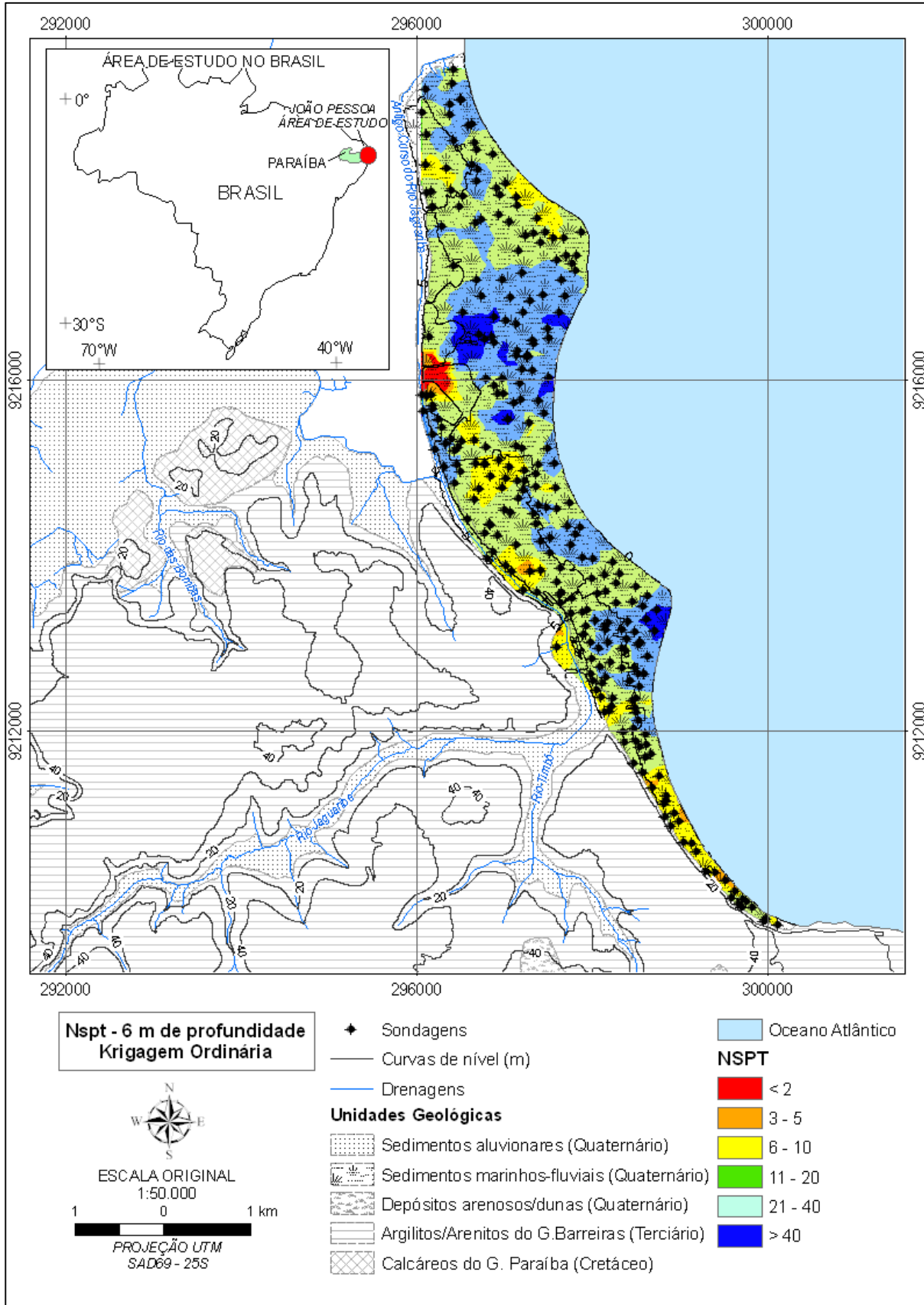


Figura 6.33 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 6 m de profundidade no setor 1 (Krigagem ordinária).



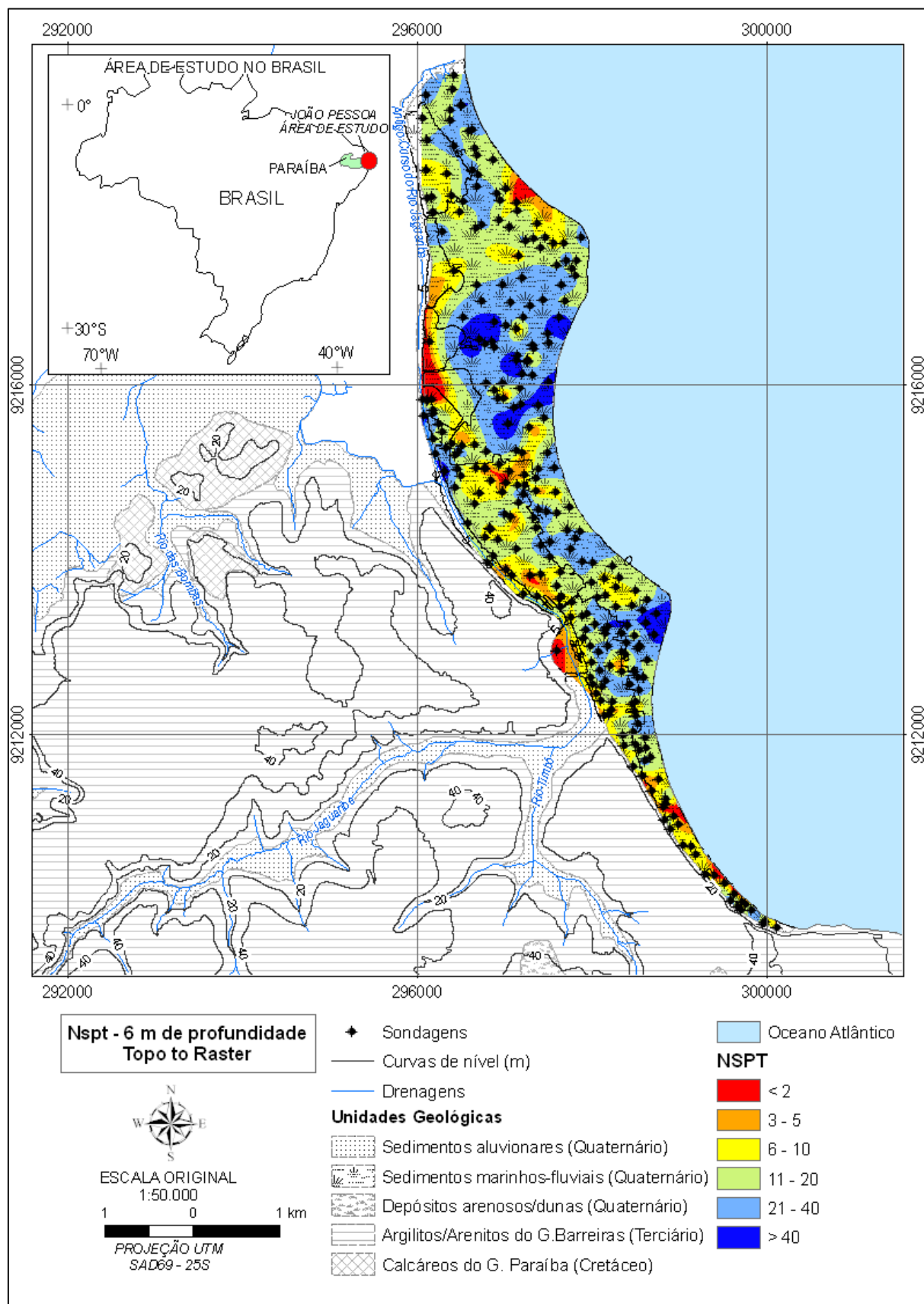


Figura 6.34 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 6 m de profundidade no setor 1(Topo to Raster).

| perfis_ID_ | perfis_TEX  | perfis_COR    | perfis_HSP |
|------------|---|---------------|------------|
| 6          | areia fina pouco siltosa                          | marrom        | 2          |
| 7          | areia fina pouco siltosa                          | marrom        | 2          |
| 25         | areia fina siltosa                                | marrom        | 1          |
| 40         | areia fina pouco siltosa                          | marrom        | 2          |
| 81         | areia fina siltosa                                | marrom        | 2          |
| 84         | areia fina a media siltosa                        | variegada     | 1          |
| 96         | argila organica com turfa                         | preta         | 1          |
| 384        | areia media a grossa pouco siltosa com pedregulho | marrom        | 0          |
| 385        | areia fina siltosa                                | cinza         | 2          |
| 386        | areia fina siltosa                                | cinza         | 2          |
| 402        | areia grossa pouco siltosa                        | marrom escuro | 2          |
| 437        | areia fina pouco siltosa                          | marrom        | 2          |
| 443        | areia media a grossa pouco siltosa com pedregulho | marrom escuro | 1          |
| 446        | areia fina pouco siltosa                          | marrom escuro | 1          |
| 455        | areia fina pouco siltosa                          | marrom escuro | 2          |
| 494        | areia media a grossa pouco siltosa com pedregulho | marrom escuro | 0          |

Figura 6.35 Quadro com amostras obtidas nos ensaios com  $N_{SPT} \leq 2$  a 6 metros de profundidade no Setor 1.

Cabe lembrar que esta sondagem situa-se a cerca de 1 km de distância do trecho estudado por Conceição (1977), o qual se localiza a 5 m da margem do Rio Jaguaribe justamente no encontro com a unidade geológica dos sedimentos marinhos recentes após deixar o Barreiras. O autor também encontrou um perfil com argila muito mole a partir da profundidade de 2 metros até 12; a qual resultou sendo pré-adensada após ensaios e análises de laboratório e in situ. Tais características indicam uma tendência de comportamento esperada ao longo do trecho de drenagem, com solos menos resistentes nas camadas mais superficiais.

Não obstante, essas observações sobre pré-adensamento neste trecho despertam interesse em direcionar estudos posteriores e mais detalhados tais como os de Massad (1999 e 1985), que, a partir de análises das argilas quaternárias da Baixada Santista, avaliou mecanismos de sobreadensamento e como estes interferem nas propriedades geotécnicas das argilas marinhas.

Em ambos os mapas, observa-se um aumento de resistência em no sentido SW - NE, o que pode remeter a anisotropia sugerida na análise variográfica. Apresenta-se uma certa concordância com as curvas de nível, o que indica que o trecho situado em cotas mais baixas (visto que a profundidade de 6 metros corresponde, na verdade, a diferentes cotas altimétricas no setor analisado) encontra-se mais compactado, como esperado.

Novamente, os dois mapas demonstram coerência com o esperado; sendo que o obtido com o Topo to Raster demonstra um pouco mais de fidelidade na representação de todas as classes, como se o primeiro houvesse suavizado um pouco mais os valores extremos.

Para tentar evitar esse efeito, foram realizados inúmeros testes com a variação de vizinhança, tanto na forma como no ângulo da elipse que abrange as amostras utilizadas nas estimativas, assim como o uso de superfícies de tendência para cada caso. Essas medidas ajudaram na obtenção de mais faixas representativas de cada classe de valores, entretanto não o suficiente para evidenciá-las como foi conseguido ao utilizar o topo to raster.

#### **6.3.5.4 Profundidade: 10 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster**

As Figuras 6.36 e 6.37 exibem os mapas obtidos para a profundidade de 10 metros, pelos dois métodos.

Nesta profundidade, já não se observa uma correspondência com as formas da topografia (curvas de nível), demonstrando o efeito do confinamento do solo. Apesar de não totalmente definida, pode-se constatar um leve efeito da anisotropia na direção NW – SE, como presumido pelo variograma. Novamente, o mapa obtido com o Topo to Raster demonstra mais fidelidade na representação de todas as classes, enquanto o modelo da krigagem ordinária mais uma vez suavizou os valores extremos.

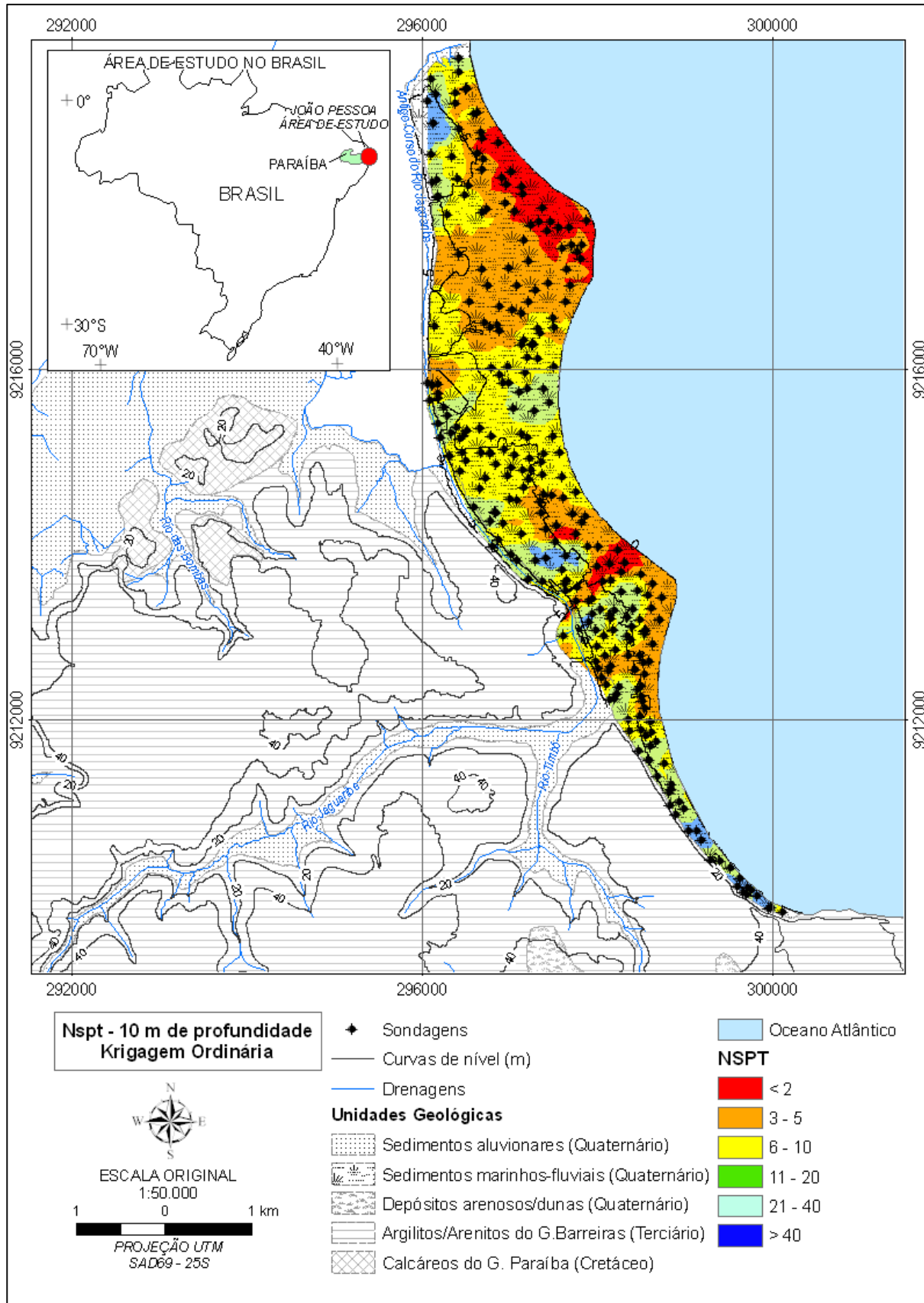


Figura 6.36 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 10 m de profundidade no setor 1 (Krigagem Ordinária)

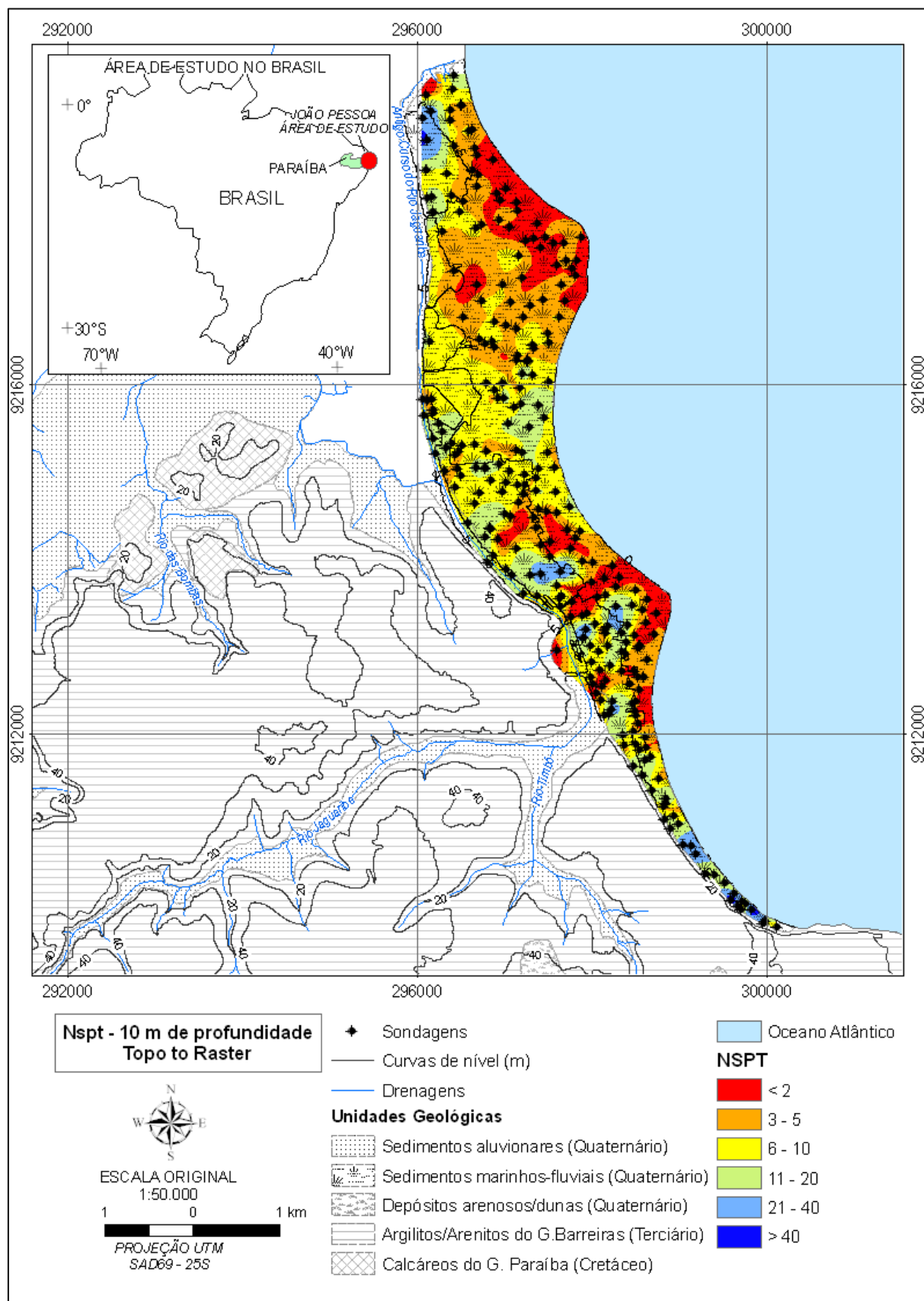


Figura 6.37 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 10 m de profundidade no setor 1(Topo to Raster

Contrariamente ao mapa obtido para profundidade de 6 metros, nesta camada predomina a ocorrência de solos de baixa resistência, com valores de  $N_{SPT}$  menores que 5 golpes, e também com outra faixa de solos com valores até 10 golpes. Classes com o índice ultrapassando este valor mostram-se escassas, tal como foi mostrado no histograma.

Continua o padrão de maior observação de solos arenosos, com a textura variando de areia fina a média ou grossa, siltosa ou argilosa, silte argiloso ou arenoso, ambos com muito marisco (estes aparecendo nas faixas bem próximas ao mar em que os valores do índice de resistência são menores que 5 – vide áreas em vermelho/laranja na figura com o modelo do Topo to Raster - adentrando a planície somente no centro-sul da unidade geológica).

Ainda observa-se a presença de argila orgânica com turfa e marisco no mesmo furo mencionado na profundidade de 6 metros, e ainda nas áreas em vermelho ( $N_{SPT} < 2$ ) próximas a esta.

As poucas ocorrências de solo muito compacto a 10 metros de profundidade correspondem à área ao sul da unidade, um trecho estreito já muito próximo a falésia que apresentou texturas com a observação de laterita, nas amostras de areia siltosa/argilosa (uma amostra inclusive apenas contendo a descrição: “laterita”).

Devido a esse conjunto de características mencionadas, fica evidenciada a presença dessa camada menos resistente no perfil geotécnico que representa os solos da Planície Costeira. Tal camada deve ser levada em conta em projetos da Engenharia de Fundações que abordem edificações cujas cargas proporcionem propagação de tensões até esses níveis, ou ultrapassando os mesmos.

#### **6.3.5.5 Profundidade: 14 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster**

As Figuras 6.38 a 6.39 exibem os mapas obtidos para a profundidade de 14 metros, pelos dois métodos. Ainda observa-se uma certa predominância de valores de  $N_{spt}$  na faixa de 10 a 20 golpes, entretanto pronuncia-se a ocorrência de solos mais moles/fofos ( $N_{spt} < 5$  golpes) em alguns trechos mais próximos da linha de costa.

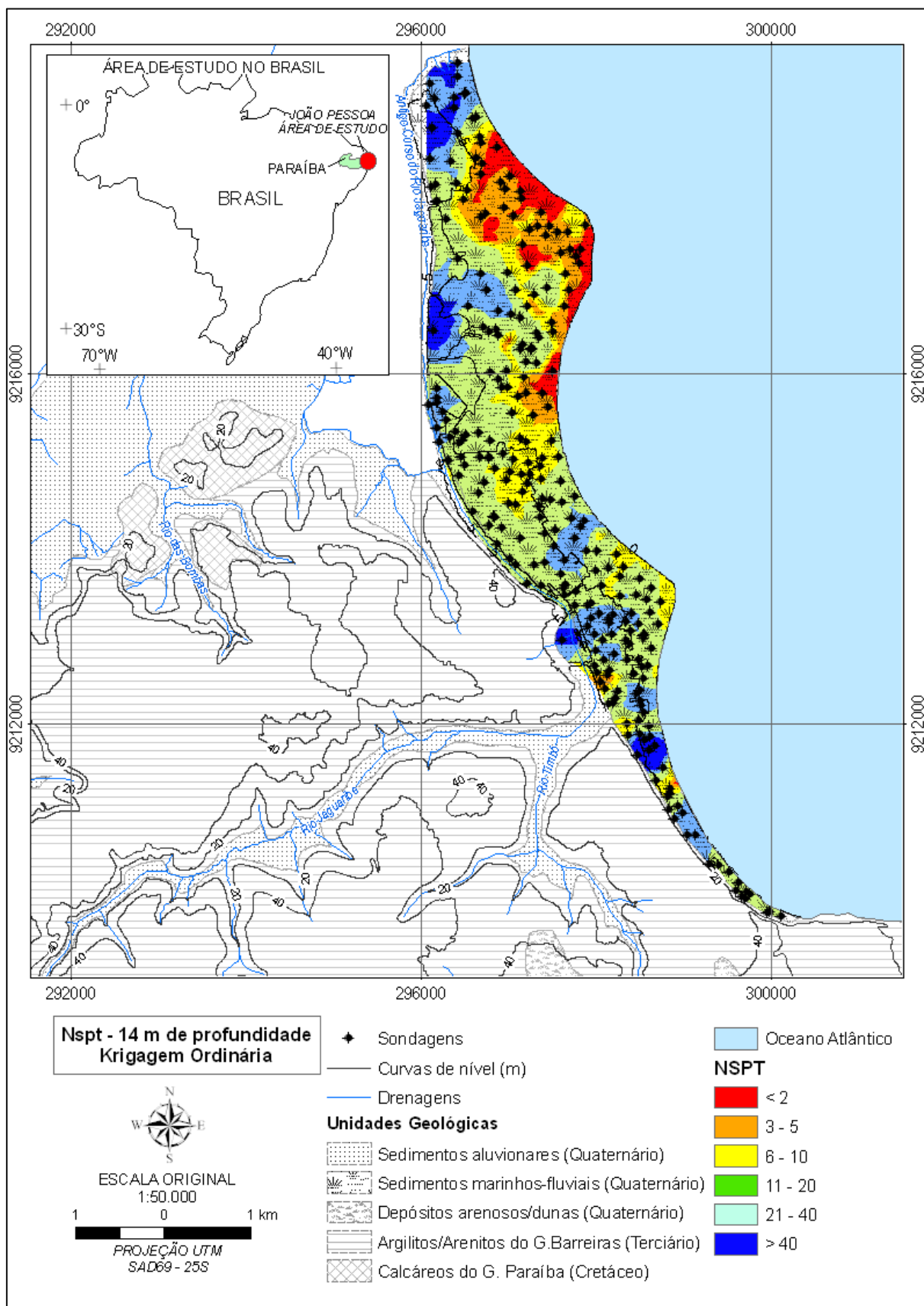


Figura 6.38 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 14 m de profundidade no setor 1 (Krigagem Ordinária).

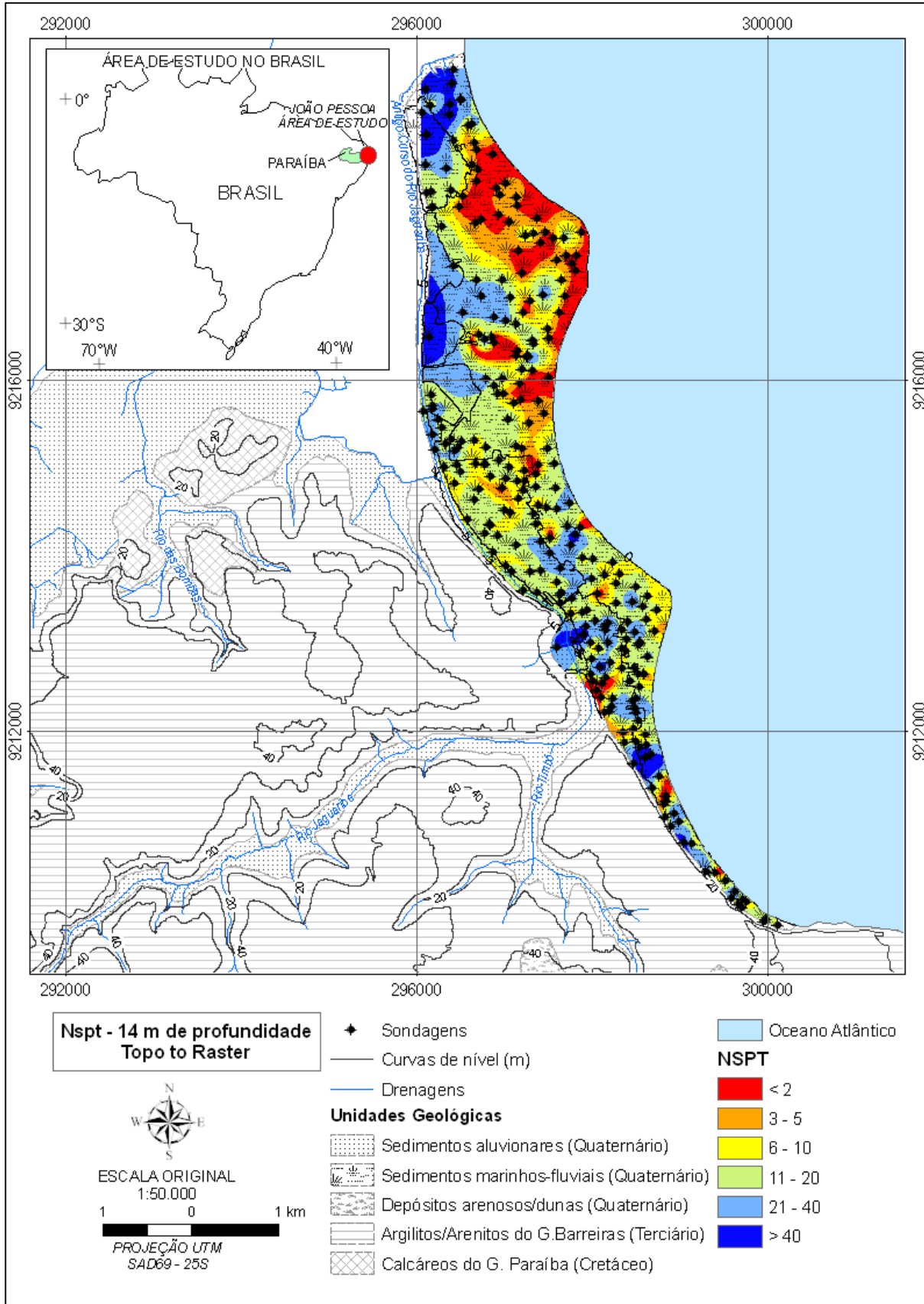


Figura 6.39 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 14 m de profundidade no setor 1 (Topo to Raster)



As zonas com valores de  $N_{spt}$  maiores que 10 permitem e corroboram a utilização de estacas do tipo Franki a esta profundidade e neste setor da cidade, devendo-se estudar, com mais detalhes, a ocorrência dos trechos da camada menos resistente.

Percebe-se um aumento de resistência no sentido que vem do oceano em direção a falésia, indicando uma tendência anisotrópica. Predominam neste nível a textura de areia fina siltosa argilosa, silte arenoso, argila siltosa pouco arenosa, e ainda argila orgânica muito mole ( $N_{spt} \leq 2$ ), no trecho em que o Rio Jaguaribe encontra a base da falésia (vide Figura 6.39). A Figura 6.40 exhibe a textura das amostras dessa faixa de valores.

| perfis_ID_ | perfis_TEX                                 | perfis_COR   | perfis_IISP |
|------------|--|--------------|-------------|
| 445        | areia fina siltosa                         | branca       | 2           |
| 489        | areia fina siltosa                         | marrom       | 0           |
| 35         | areia fina siltosa com marisco             | cinza        | 2           |
| 387        | areia fina siltosa com muito marisco       | cinza        | 1           |
| 12         | areia fina siltosa pouco argilosa          | cinza        | 2           |
| 26         | areia fina siltosa pouco argilosa          | cinza        | 2           |
| 44         | areia fina siltosa pouco argilosa          | marrom       | 2           |
| 447        | areia fina siltosa pouco argilosa          | cinza claro  | 2           |
| 433        | areia media a grossa pouco siltosa com ped | cinza        | 1           |
| 438        | areia siltosa                              | marrom       | 0           |
| 368        | areia siltosa com marisco                  | cinza        | 1           |
| 412        | areia siltosa com muito marisco            | cinza        | 2           |
| 393        | argila orgânica                            | cinza escuro | 2           |
| 413        | argila orgânica                            | cinza escuro | 1           |
| 69         | argila organica com turfa                  | preta        | 0           |
| 82         | argila organica com turfa                  | preta        | 1           |
| 399        | argila orgânica com turfa                  | cinza escuro | 2           |
| 457        | argila orgânica com turfa                  | cinza escuro | 0           |
| 365        | argila siltosa                             | cinza        | 1           |
| 410        | silte arenoso pouco argiloso com marisco   | cinza        | 2           |
| 418        | silte arenoso com marisco                  | cinza escuro | 1           |
| 36         | silte arenoso pouco argiloso               | cinza        | 1           |
| 417        | silte arenoso pouco argiloso               | cinza claro  | 2           |
| 396        | silte arenoso pouco argiloso com marisco   | cinza        | 2           |
| 371        | silte argiloso pouco arenoso               | cinza        | 2           |
| 403        | silte argiloso pouco arenoso com marisco   | cinza claro  | 1           |
| 405        | silte argiloso pouco arenoso com marisco   | cinza        | 2           |
| 389        | silte pouco arenoso                        | cinza        | 1           |
| 391        | silte pouco arenoso                        | cinza        | 2           |

Figura 6.40 Quadro com amostras obtidas nos ensaios com  $N_{spt} \leq 2$  a 14 metros de profundidade no Setor 1.

A Krigagem Ordinária, apesar de demonstrar coerência com a representação da anisotropia e regionalização, deixa de evidenciar as áreas com solos menos resistentes ao norte desse setor (valores menores que 2 golpes); informação importante que influencia tanto os cálculos de tensão admissível pra fundações diretas como nas parcelas de atrito lateral que contribuem para a capacidade de carga de sistemas de fundações profundas. A presença dessas zonas de valores limita a utilização da profundidade de 14 metros como cota de apoio para as estacas de fundação, o que já indica que, na zona norte do setor 1, deve-se ultrapassar esse nível nas etapas de projetos, ao menos em edificações de grande porte que exijam maiores capacidades de suporte.

### 6.3.6 SETOR 2

A Figura 6.41 ilustra os histogramas de frequência dos valores do índice no setor 2. Os parâmetros estatísticos dos mesmos encontram-se no Apêndice A.

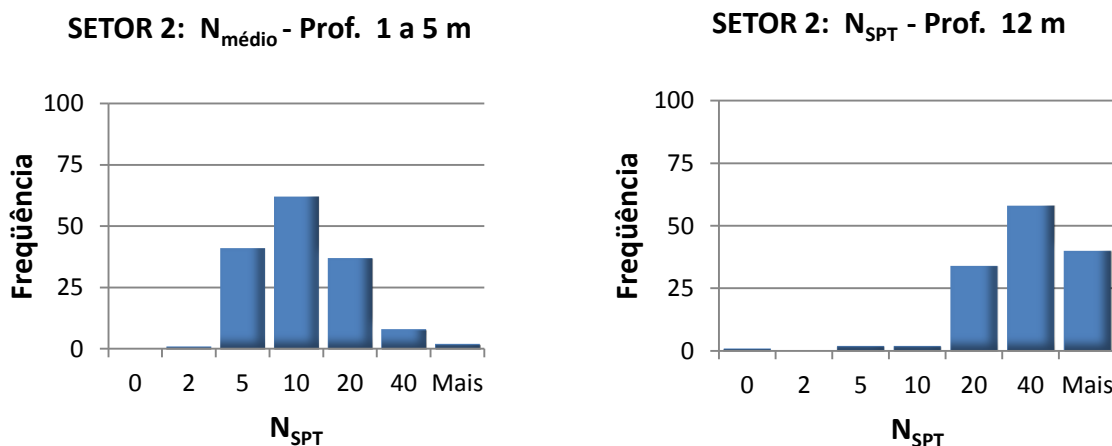


Figura 6.41 Histogramas do  $N_{\text{SPT}}$  no setor 2.

O  $N_{\text{SPT}}$  médio obtido para a camada situada entre 1 e 5 metros de profundidade resultou com a faixa de valores mais predominantes sendo a que alcança até 10 golpes, seguida pela faixa com golpes até 20. Demonstrando o comportamento esperado, percebe-se um acréscimo de resistência com a profundidade, aparece então com o histograma do índice no nível de 12 metros, no qual os intervalos mais comuns são os que compreendem valores entre 20 até um pouco mais de 50 golpes.

### 6.3.6.1 Parâmetros Geoestatísticos

A Tabela 6.5 exibe os parâmetros básicos obtidos com o ajuste dos variogramas, e as Figuras 6.42 e 6.43 mostram os gráficos obtidos. Nas duas situações (camada superficial entre 1 e 5 metros e profundidade de 12 metros), optou-se por avaliar o ajuste do variograma omnidirecional (direção 0° e abertura de 90°).

Em ambas as situações do Setor 2 não foi possível obter um modelo de variabilidade bem definido, mesmo após diversas tentativas com variados tamanhos de passo, número e forma dos setores de vizinhança e inclusive superfícies de tendência. Tais dificuldades já foram mencionadas em trabalhos com este mesmo tipo de variável (Mendes, 2001; Peres, 1998), nos quais é encontrada uma forte componente aleatória em análises variográficas com  $N_{SPT}$ .

Ainda assim, já se observa a diferença significativa entre os parâmetros das unidades geotécnicas pertencentes aos setores 1 e 2. No Setor 2, o passo que gerou menos discrepâncias para a camada superficial foi o de dimensão de 400 metros (oito vezes maior que o obtido para os variogramas do Setor 1), e o alcance resultou em 716 metros. A 12 metros de profundidade, o passo ajustado foi de 350 metros e alcance de 2338. Esses aspectos são fortemente influenciados pelo afastamento das amostras utilizadas, que realmente varia muito entre os dois primeiros setores.

Uma vez observada a pobreza na caracterização de um variograma bem definido, também não foi possível obter indicativos sobre a anisotropia do índice neste setor contido nos sedimentos do Barreiras.

Tabela 6.5 Passo e alcance dos variogramas obtidos para o Setor 2

| <b>Profundidade</b> | <b>Modelo</b> | <b>Passo (m)</b> | <b>Alcance (m)</b> |
|---------------------|---------------|------------------|--------------------|
| 1 a 5 m             | Esférico      | 400              | 716                |
| 12 m                | Esférico      | 350              | 2338               |

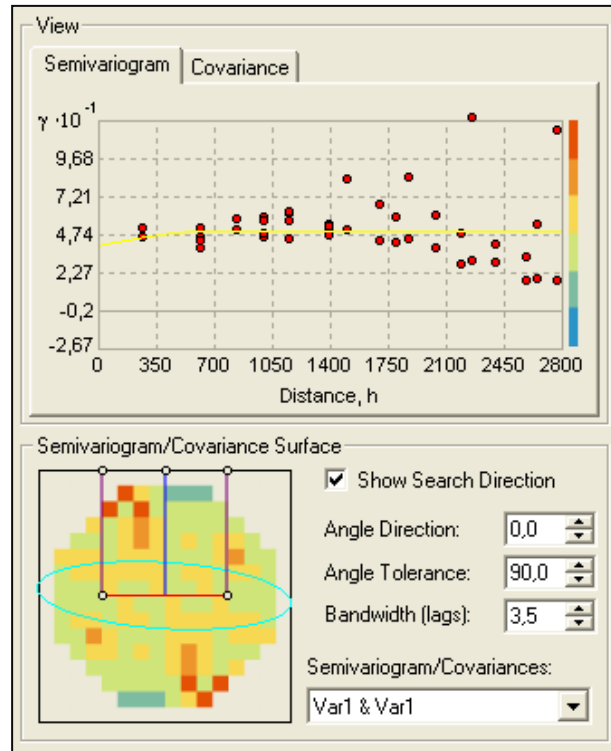


Figura 6.42 Variograma omnidirecional para o  $N_{SPT}$  médio entre as profundidades de 1 e 5m no Setor 2.

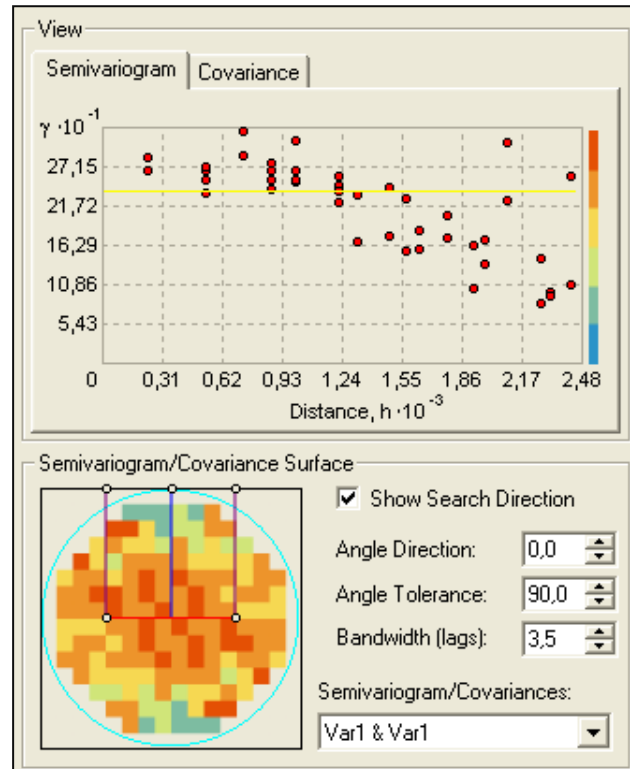


Figura 6.43 Variograma omnidirecional para o  $N_{SPT}$  médio 12 m no Setor 2.

### 6.3.6.2 Profundidade: 1 a 5 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster

As Figuras 6.44 e 6.45 mostram os mapas estimados do índice de resistência à penetração correspondente ao  $N_{SPT}$  médio entre 1 e 5 metros de profundidade para o Setor 2 pelos métodos da Krigagem Ordinária e Topo to Raster.

A Tabela 6.6 descreve as características gerais encontradas nos perfis utilizados para essa camada (entre 1 e 5 metros de profundidade).

Tabela 6.6 Camada 1 – 5 m: Setor 2.

| Profundidade/metro | Textura  | $N_{SPT}$ mín | $N_{SPT}$ máx | $N_{SPT}$ médio |
|--------------------|--|---------------|---------------|-----------------|
| 2                  | Areia fina pouco siltosa, argila arenosa pouco siltosa, silte arenoso, silte argiloso, argila orgânica, presença de arenito, laterita e pedregulhos em poucos pontos | 0             | 40            | 7,4             |
| 3                  | Areia fina siltosa, areia fina argilosa, silte arenoso, silte argiloso, argila orgânica, arenito, presença de arenito, laterita e pedregulho em poucos pontos        | 0             | 60            | 11,8            |
| 4                  | Areia fina argilosa ou siltosa, silte arenoso ou argiloso, argila orgânica, argila arenosa, observações com laterita, arenito e pedregulho                           | 0             | 57            | 9,2             |
| 5                  | Areia fina siltosa ou argilosa, argila arenosa e siltosa, argila orgânica, predominância de silte arenoso e argiloso, pontos com arenito, laterita e pedregulho      | 1             | 53            | 10,5            |

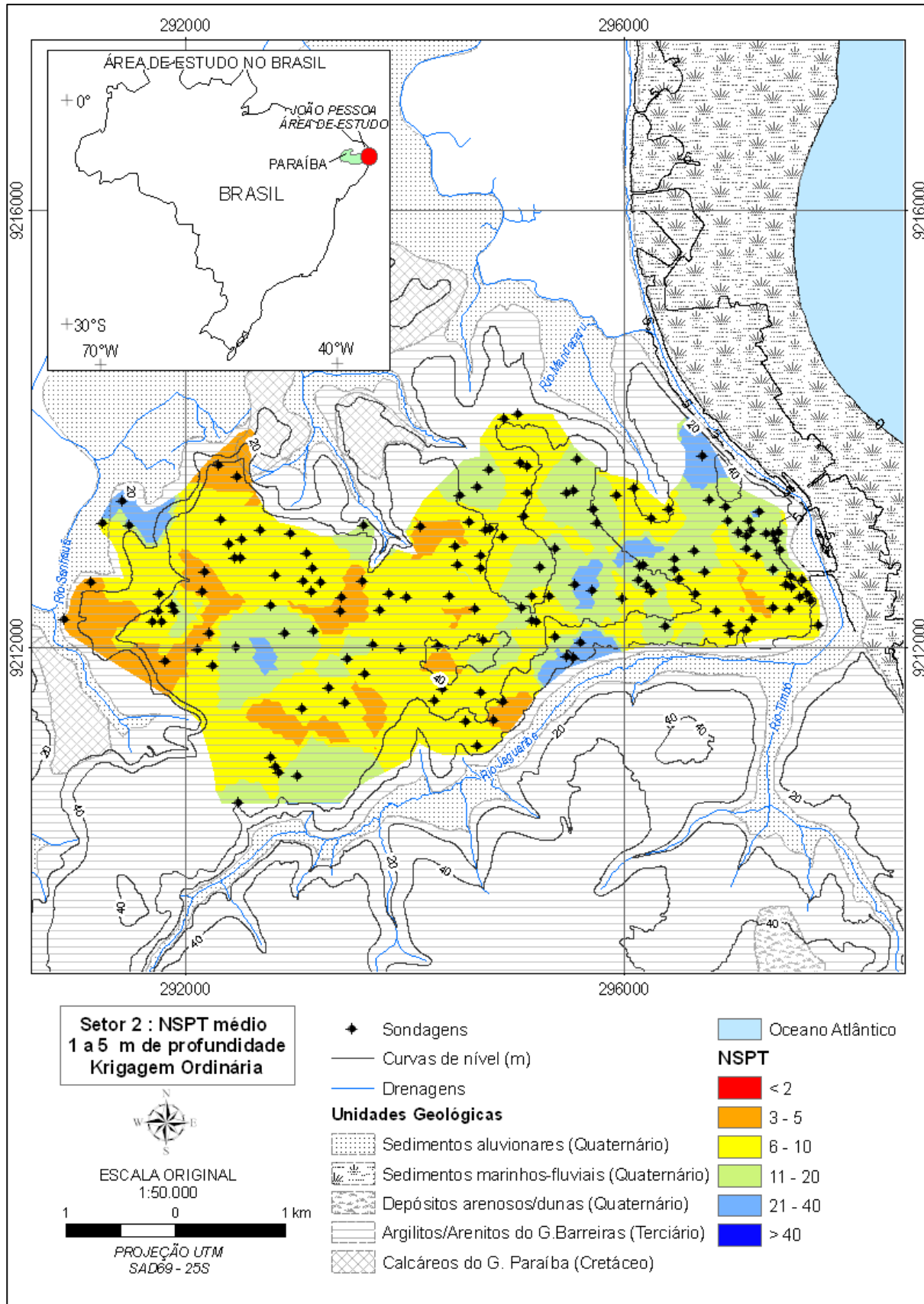


Figura 6.44 Interpolação dos valores do valor médio do  $N_{SPT}$  entre 1 e 5 m de profundidade no setor 2 (Krigagem Ordinária).

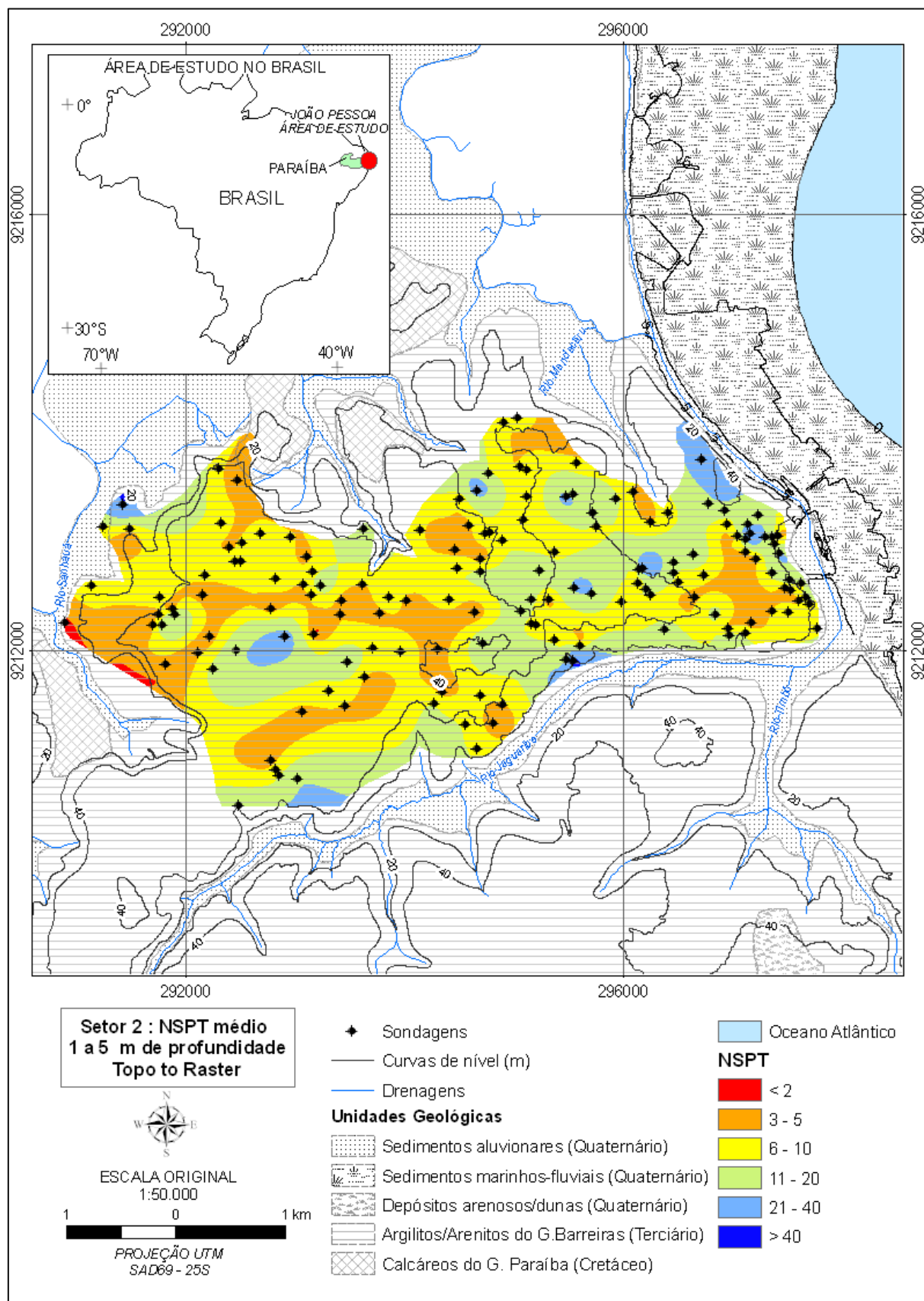


Figura 6.45 Interpolação dos valores do valor médio do  $N_{SPT}$  entre 1 e 5 m de profundidade no setor 2 (Topo to Raster).

Quanto à textura, já se observa a ausência de solos puramente arenosos e de maior granulometria (com exceção dos pedregulhos), enquanto se constata a predominância de características mais coesivas e principalmente de siltes arenosos e argilosos. Confirmam-se os aspectos texturais esperados para a unidade geológica do Grupo Barreiras, e a presença de argila orgânica em ponto próximo à linha de drenagem (leito do Rio Sanhauá), no extremo oeste do setor analisado.

Diferente do Setor 1, comparando-se os valores médios de cada metro, observa-se uma constância do índice com a profundidade, sugerindo pouca variação de resistência nesses primeiros metros.

Apesar disso, observa-se uma grande amplitude de valores para cada metro (tal como esperado devido à extensão do setor analisado), nos quais se encontram mínimos de 0 a 1 golpes até máximos com cerca de 60 golpes.

Destaca-se também o aspecto mais resistente da camada superficial dos sedimentos marinhos, visto que nestes mapas obtidos para o Setor 2 já aparecem mais trechos com faixas de valores do índice entre 2 e 5 golpes, que indicam consistências moles e compacidades fofas. Todavia, o mapa com as estimativas do índice médio no bulbo de tensões apresenta a ocorrência considerável de áreas amarelas (entre 5 e 10 golpes) e verdes (entre 10 e 20 golpes), novamente um resultado que se adequa ao critério para utilização da fórmula de tensão admissível.

Para os dois métodos, os mapas demonstraram-se bastante parecidos, com classes semelhantes e anisotropia não muito bem definida, entretanto o obtido com o Topo to Raster apresentou estas classes de forma um pouco mais coerente com a localização dos pontos originais, o que não invalida o método geoestatístico.

#### **6.3.6.3 Profundidade: 12 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster**

As Figuras 6.46 e 6.47 exibem os mapas obtidos para a profundidade de 12 metros, pelos dois métodos.

Os altos valores de  $N_{SPT}$  correspondem ao que foi indicado pelo histograma de freqüências a essa profundidade, em que predominam os índices maiores que 20 golpes. As texturas descritas nas amostras correspondem a areia siltosa/argilosa, argila arenosa/



siltosa, silte arenoso e predominância de silte argiloso; todas com presença de arenito, ou laterita, ou pedregulhos, ou associados.

As identificações de áreas com as faixas de valores mostraram-se semelhantes em ambos os métodos, no sentido de que não se observam discrepâncias gritantes ao se avaliar a distribuição das classes resultantes.

Entretanto, avaliando-se individualmente os valores das amostras utilizadas, percebe-se mais uma vez que a krigagem ordinária resulta um pouco menos fiel aos valores originais, produzindo estimativas diferentes nos locais em que haviam valores reais.

A magnitude dos valores de índice encontrados neste setor a esta profundidade, associados à ausência de lençol freático promovem condições favoráveis a vários tipos de opções por fundações profundas, tanto com estacas como por tubulões.

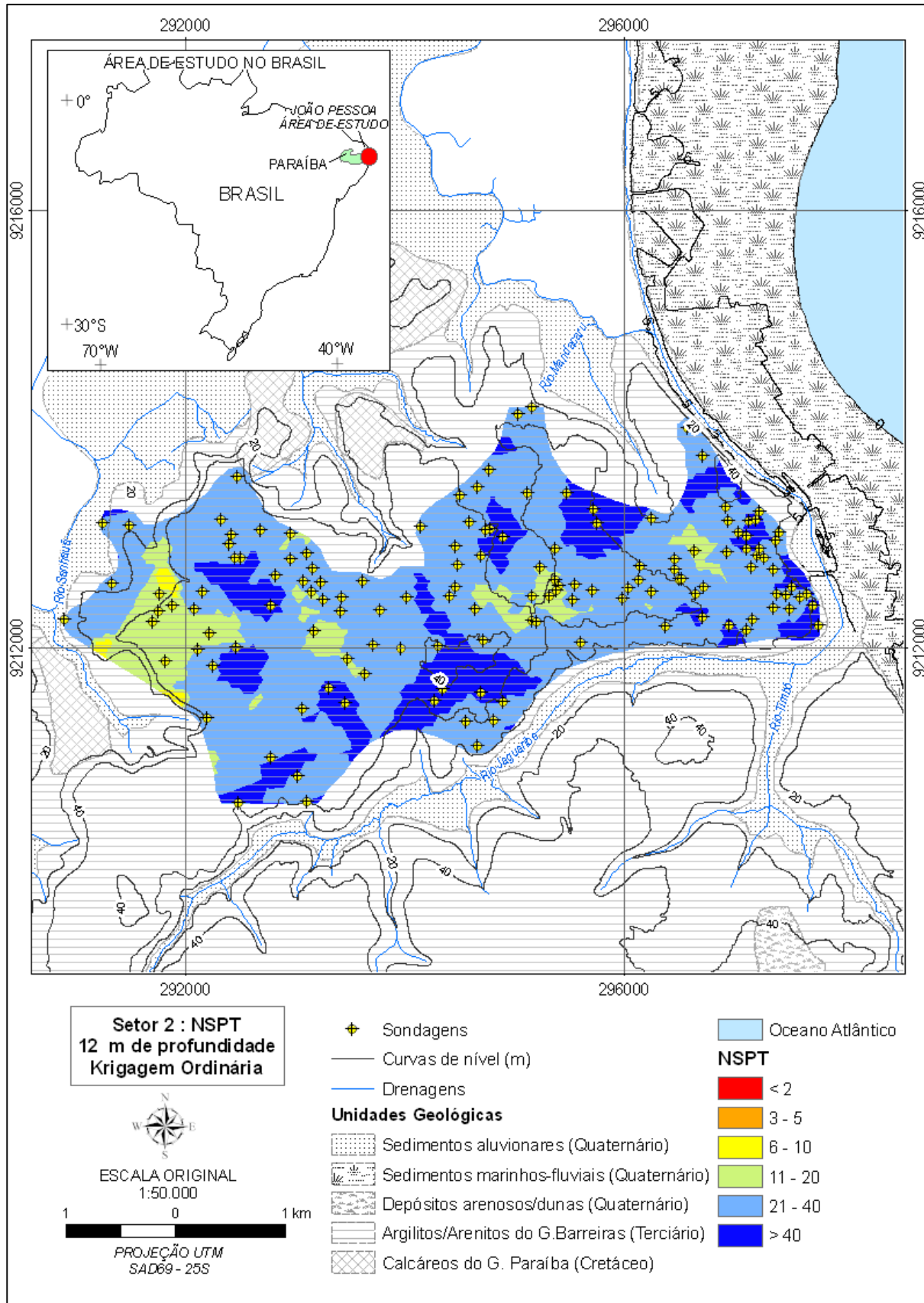


Figura 6.46 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 12 m de profundidade no setor 2 (Krigagem ordinária).

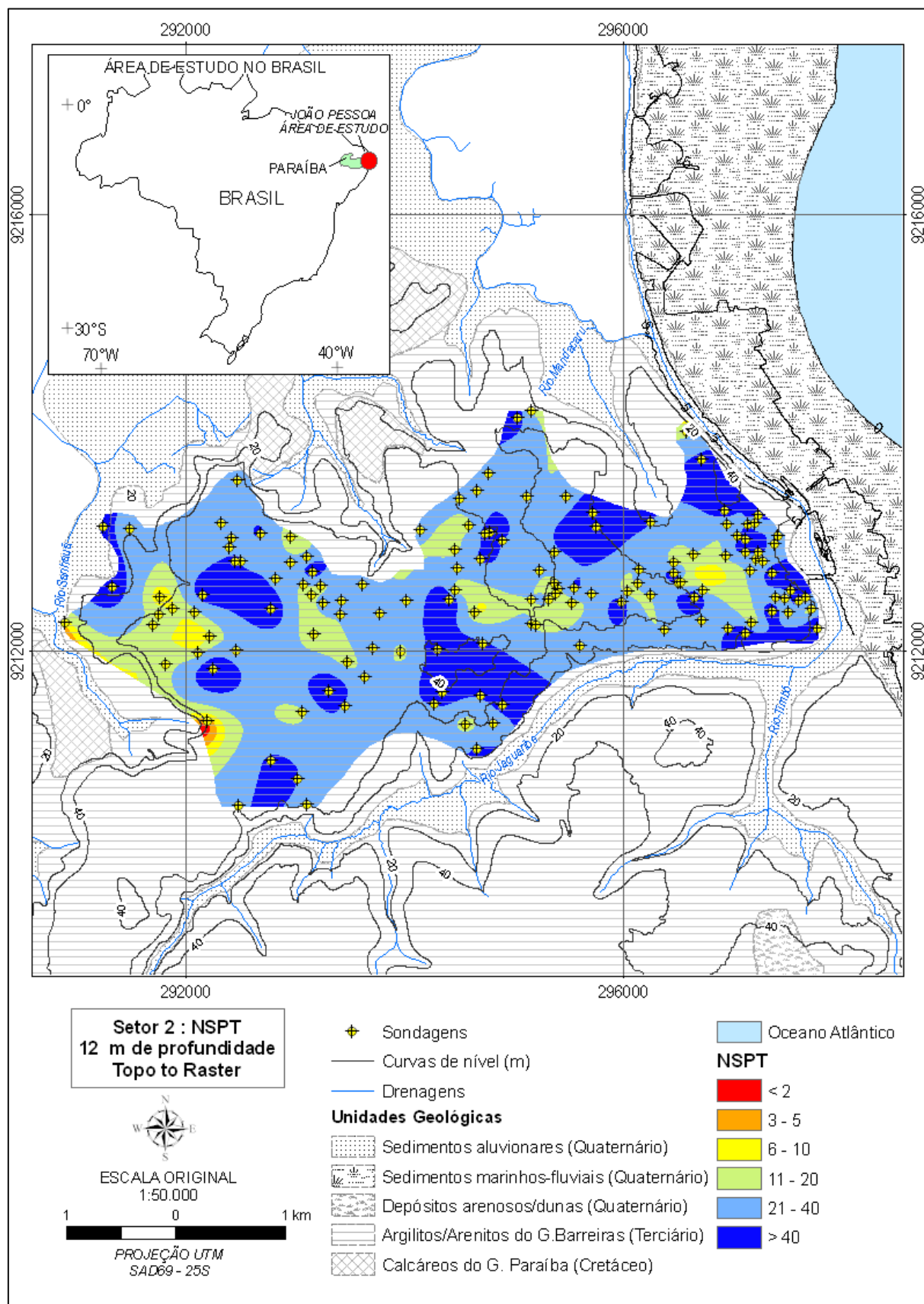


Figura 6.47 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 12 m de profundidade no setor 2 (Topo to Raster).

### 6.3.7 SETOR 3

A Figura 6.48 exibe os histogramas com frequência do índice nas camadas analisadas do Setor 3. Os parâmetros estatísticos do mesmo são apresentados no Apêndice A.

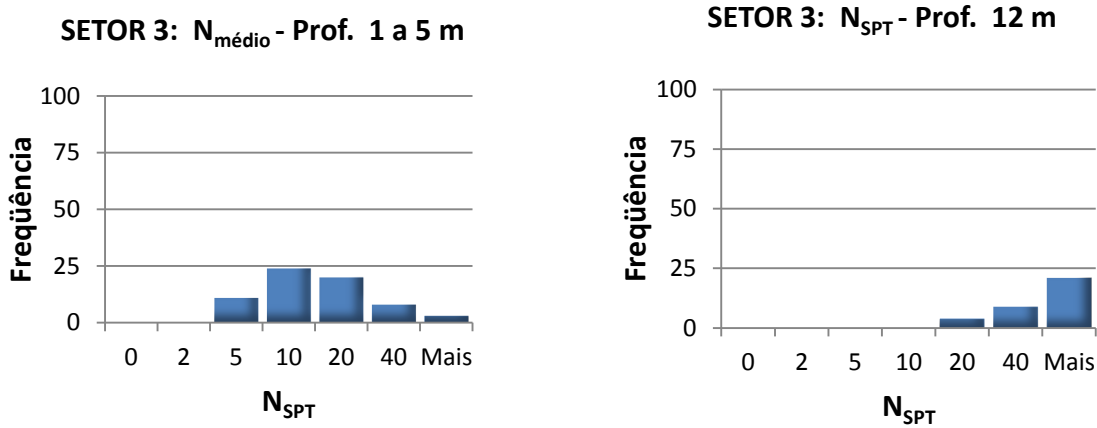


Figura 6.48 Histogramas do  $N_{\text{SPT}}$  no Setor 3.

Constata-se a um aumento de valores do índice ao comparar os dois níveis. Até 5 metros de profundidade, predominam valores até 10 golpes, com o  $N_{\text{SPT}}$  ainda atingindo mais frequentemente até 20 golpes, o que corrobora a possibilidade de prática de fundações superficiais neste trecho.

O índice cresce com o alcance de níveis mais profundos, mostrando que realmente os sedimentos do Barreiras apresentam um comportamento esperado em termos de resistência (aumento com a profundidade) nessa área de estudo.

Já para 12 metros de profundidade, é freqüente a ocorrência de mais de 30 golpes até mais de 50, também demonstrando essa profundidade como cota de apoio propícia aos tipos de estacas realizadas no local.

### 6.3.7.1 Parâmetros Geoestatísticos

Assim como nos casos anteriores, foi ajustado o variograma omnidirecional (direção 0° e abertura de 90°), de modelo esférico. A Tabela 6.7 mostra os parâmetros básicos dos variogramas ajustados.

Tabela 6.7 Passo e alcance dos variogramas ajustados para o Setor 3.

| <b>Profundidade</b> | <b>Modelo</b> | <b>Passo (m)</b> | <b>Alcance (m)</b> |
|---------------------|---------------|------------------|--------------------|
| 1 a 5 m             | Esférico      | 30               | 208                |
| 12 m                | Esférico      | 25               | 155                |

Entre 1 e 5 metros, para a camada com valores médios do índice, o passo de 30 metros permitiu modelar um variograma com 208 metros de alcance. A 12 metros, o variograma também esférico foi o melhor ajustado para o passo de 25 metros e alcance de 155. As Figuras 6.49 e 6.50 exibem os modelos variográficos obtidos.

Para a camada entre 1 e 5 metros, não foi possível obter uma direção bem definida de anisotropia, apesar do modelo indicar de forma sutil a referida NE – SW, enquanto que a 12 metros sugeriu-se a direção oposta (NW – SE).

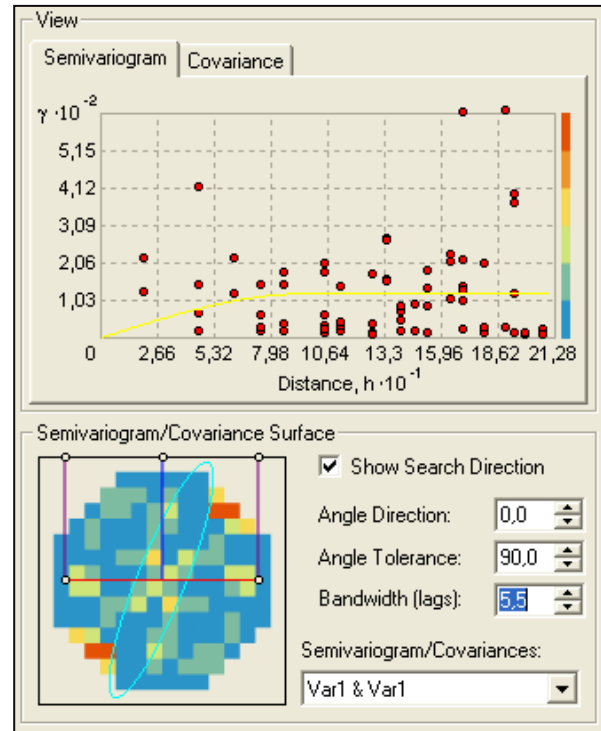


Figura 6.49 Variograma omnidirecional para o  $N_{SPT}$  médio entre as profundidades de 1 e 5m no setor 3.

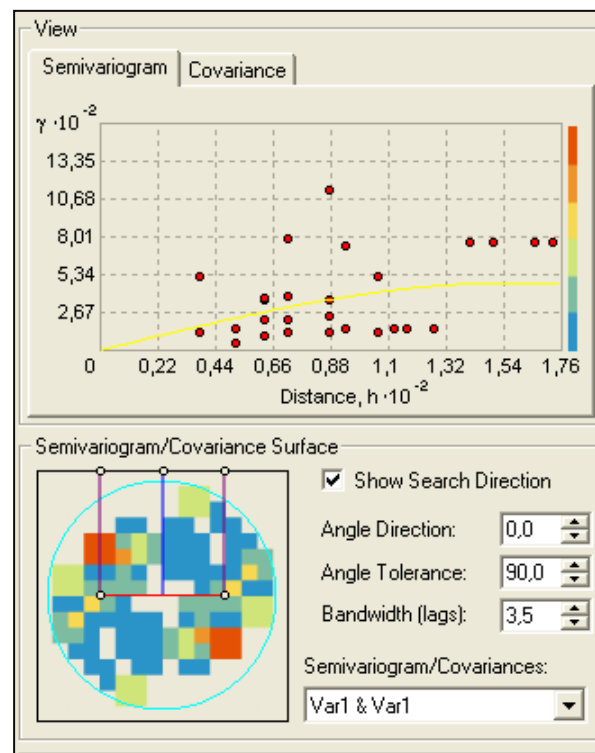


Figura 6.50 Variograma omnidirecional para  $N_{SPT}$  a 12 metros de profundidade no setor 3.

### 6.3.7.2 Profundidade: 1 a 5 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster

As Figuras 6.51 e 6.52 exibem os mapas obtidos para o  $N_{SPT}$  médio entre as profundidades de 1 a 5 metros, pelos dois métodos.

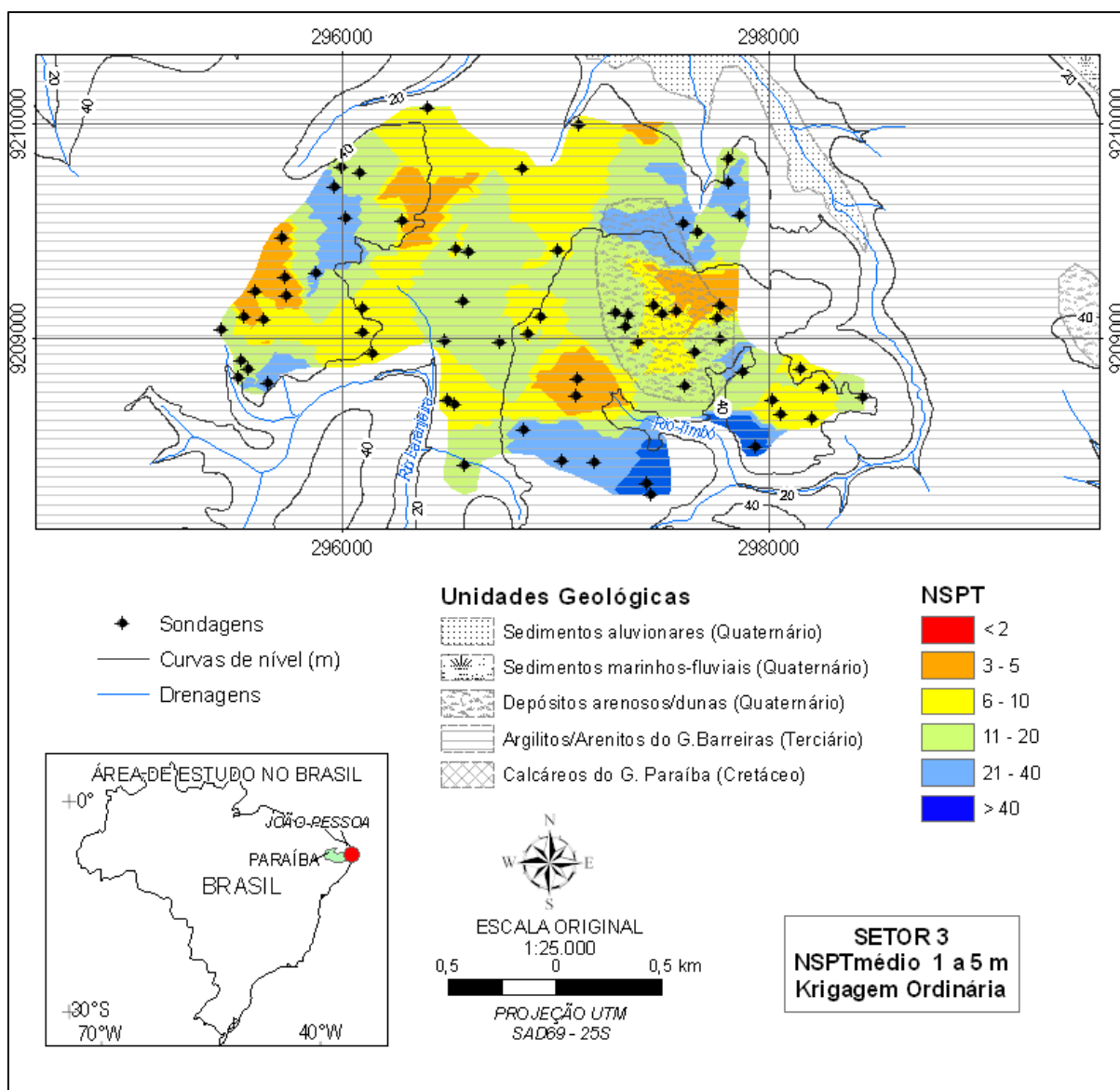


Figura 6.51 Interpolação do valor médio do  $N_{SPT}$  entre 1 e 5 m de profundidade no setor 3 (Krigagem ordinária).

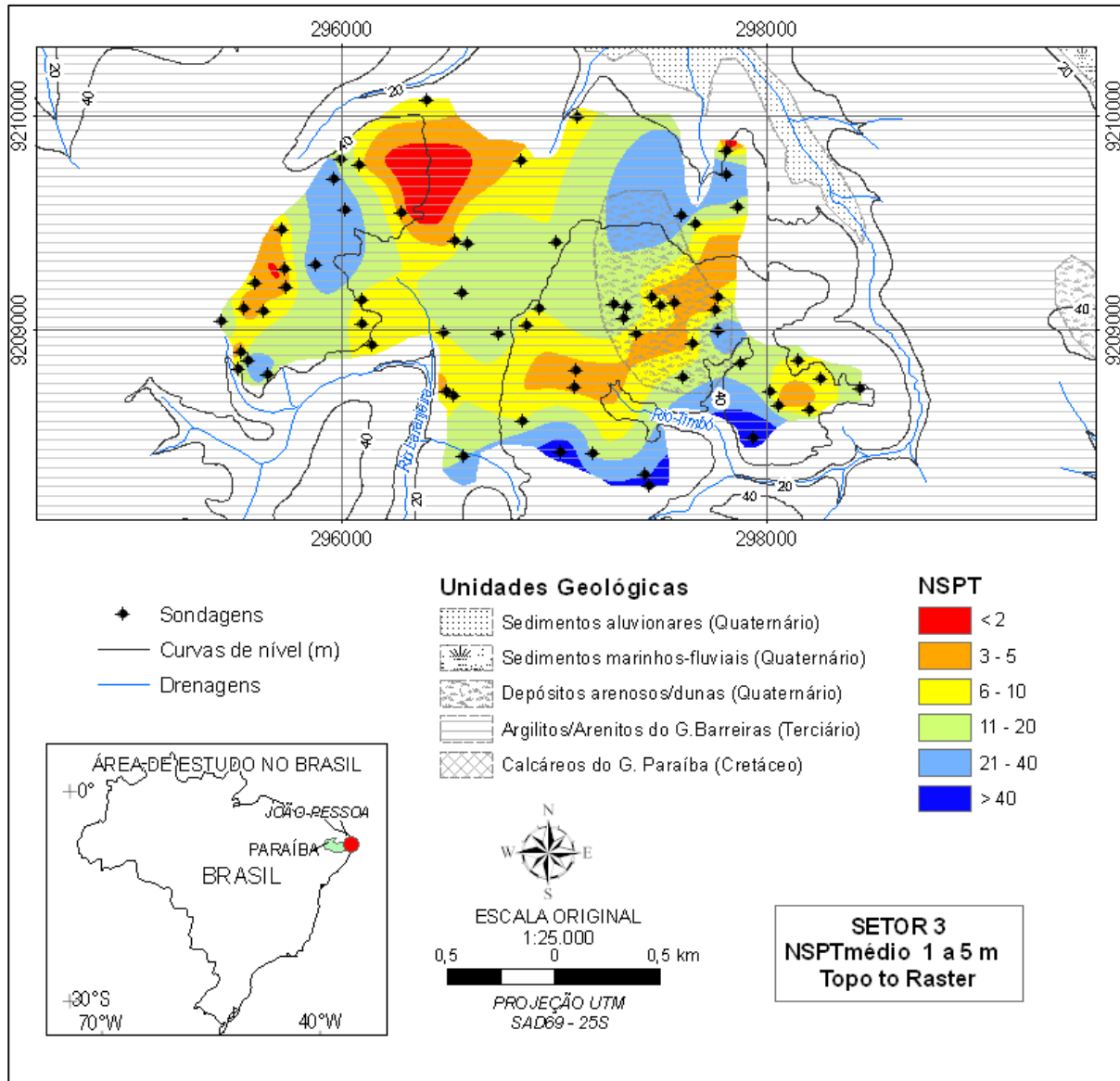


Figura 6.52 Interpolação dos valores do valor médio do  $N_{SPT}$  entre 1 e 5 m de profundidade no setor 1(Topo to Raster).

A Tabela 6.8 descreve as características gerais encontradas nos perfis utilizados para essa camada (entre 1 e 5 metros de profundidade).

Novamente, observa-se um aumento do valor médio do índice com a profundidade, o que seria um comportamento esperado para essa variável. Já aparecem picos com valores de  $N_{SPT}$  muito altos, correspondente aos trechos com ocorrência de arenito puramente e também laterita. Ao contrário da unidade dos sedimentos marinhos, já se observa um alta frequência de amostras com argila (arenosa), que por sua vez se mostra compatível para esse nível nesta unidade geológica.



Tabela 6.8 Camada 1 – 5 m: Setor 3.

| Profundidade/metro | Textura   | N <sub>SPT</sub> mín | N <sub>SPT</sub> máx | N <sub>SPT</sub> médio |
|--------------------|---|----------------------|----------------------|------------------------|
| 2                  | Areia fina, areia fina a média siltosa, silte arenoso, silte argiloso, argila arenosa, silte argiloso com laterita, arenito           | 1                    | 60                   | 11                     |
| 3                  | Areia fina, areia fina a média siltosa, silte arenoso, silte argiloso, argila arenosa, silte argiloso com laterita,                   | 2                    | 90                   | 11,8                   |
| 4                  | Areia fina, areia fina a média siltosa, silte arenoso, silte argiloso, argila arenosa, silte argiloso com laterita, arenito, laterita | 2                    | 90                   | 14,3                   |
| 5                  | Areia fina, areia fina a média siltosa, silte arenoso, silte argiloso, argila arenosa, silte argiloso com laterita, arenito, laterita | 1                    | 90                   | 20                     |

Como no Setor 1, a maioria dos valores médios para cada metro dessa camada ficaram entre a faixa de 5 a 20 golpes, a qual é mais indicada para a utilização da fórmula empírica para tensão admissível. As estimativas do índice médio no bulbo de tensões apresenta a predominância de áreas amarelas (entre 5 e 10 golpes) e verdes (entre 10 e 20 golpes).

Entretanto, neste setor já aparecem valores extremos como áreas em vermelho (menos de 2 golpes) e laranja (entre 2 e 5 golpes), e os tons de azul ( $N_{SPT} > 20$  golpes), este últimos em porções significantes. Apesar disso, deve-se atentar que as áreas estimadas com baixos valores ocorrem em trechos com ausência ou pouca presença de furos/amostras, o que deve ser levado em consideração e melhor detalhado em futuros estudos.

Novamente, com ambos os métodos, os mapas demonstraram-se bastante parecidos, com classes iguais e anisotropia não muito bem definida. Entretanto, neste caso a krigagem ordinária aparentemente interpolou melhor entre as áreas sem pontos, uma vez que o topo do raster se mostrou tendenciosa estimando valores extremos nestas zonas não amostradas.

### 6.3.7.3 Profundidade: 12 m - $N_{SPT}$ : krigagem ordinária x topo to raster

As Figuras 6.53 e 6.54 exibem os mapas obtidos para a profundidade de 12 metros, pelos dois métodos.

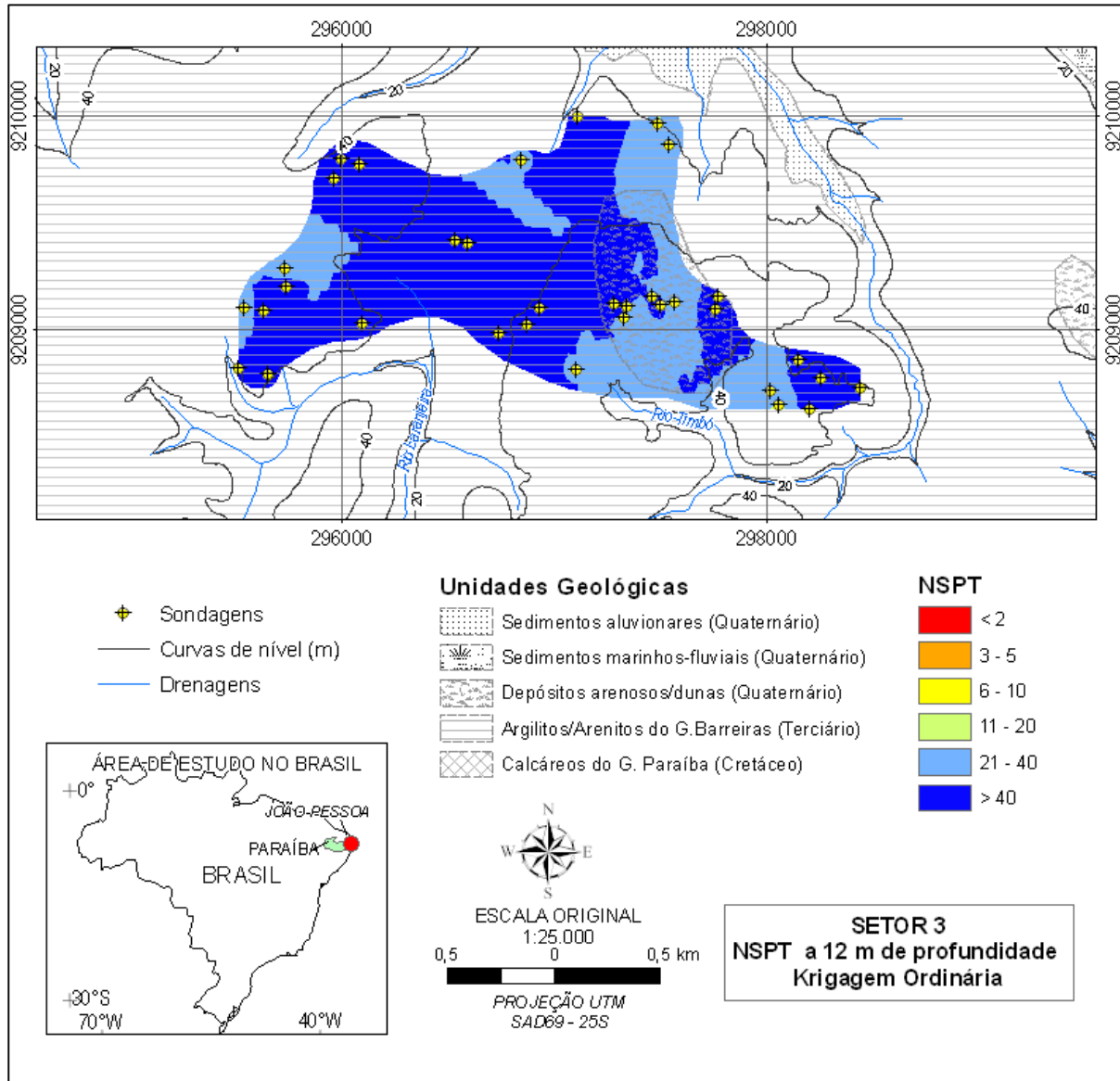


Figura 6.53 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 12 m de profundidade no setor 3 (Krigagem ordinária).

Os altos valores de  $N_{SPT}$  correspondem ao que foi indicado pelo histograma de freqüências a essa profundidade, em que predominam os índices maiores que 20 golpes. Como texturas, encontram-se descritas amostras de areia siltosa/argilosa com pedregulho;

argila arenosa; areia argilosa e ainda silte argiloso pouco arenoso, todos com laterita e pedregulho.

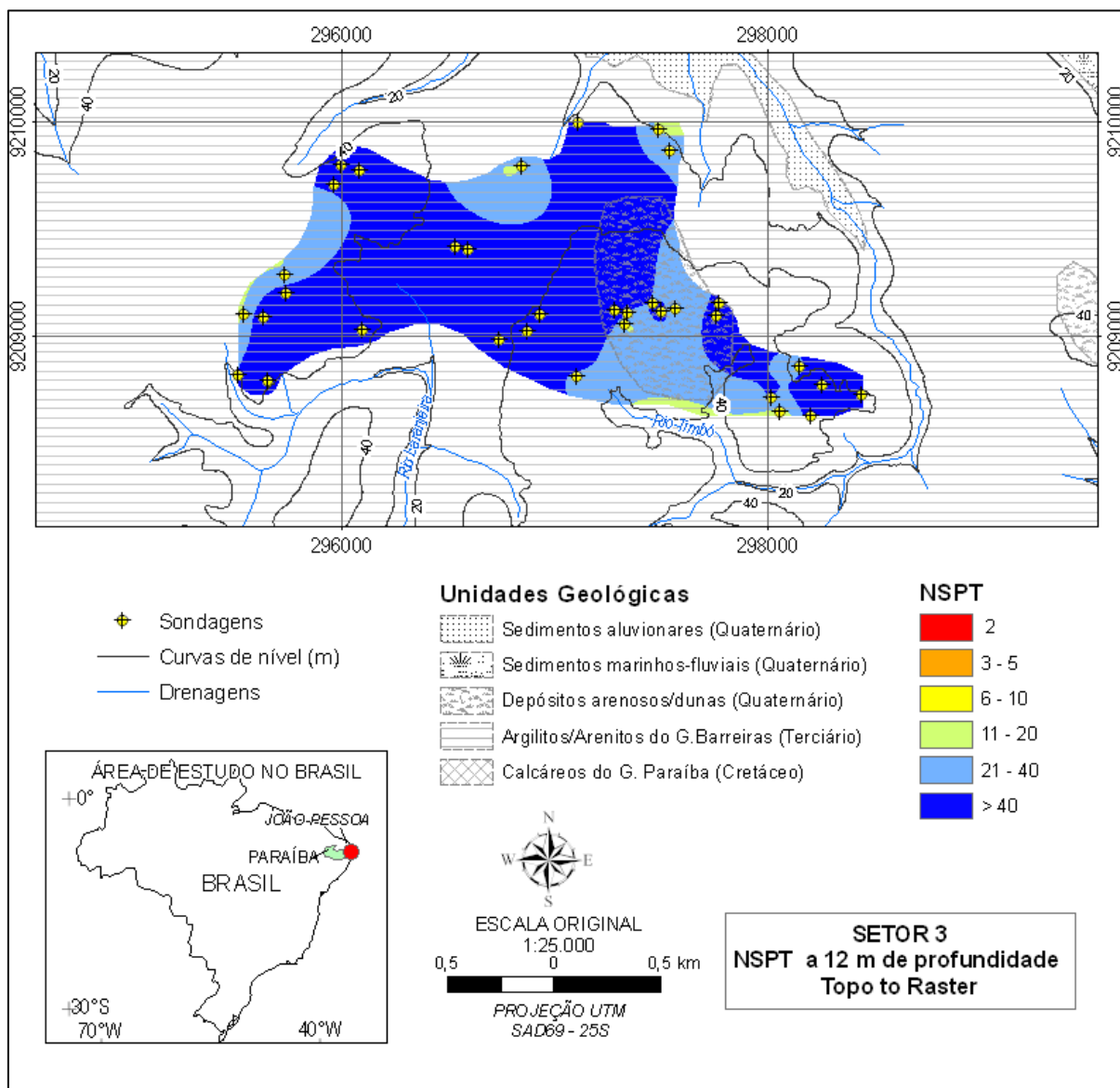


Figura 6.54 Interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  a 12 m de profundidade no setor 3 (Topo to Raster).

Neste caso, percebe-se que a krigagem ordinária não representou bem os valores do índice nas extremidades do setor, que correspondiam à classe com  $N_{SPT}$  variando entre 11 e 20. Apesar disso, as interpolações a essa profundidade nesse setor foram a que menos demonstraram diferenças entre os dois métodos, talvez pela homogeneidade de valores envolvidos e menor quantidade de sondagens utilizadas, uma vez que ao selecionar a

vizinhança do estimador krigagem, quanto mais amostras adjacentes, mais fatores influenciam na obtenção da estimativa, o que pode justamente causar a suavização vista nos resultados anteriores.

Ainda neste setor, observa-se a ocorrência de duas unidades geológicas: a maior área com os sedimentos do grupo barreiras, e uma zona com depósitos arenosos/dunas do quaternário. Entretanto, não foi constatada nenhuma diferença de comportamento entre as amostras (texturas) e valores do índice de resistência entre as duas unidades. A Figura 6.55 exibe o contexto em questão, em que pode-se observar, devido à ocupação urbana, a ausência de diferenças significativas entre as duas áreas (sedimentos do barreiras e depósitos arenosos/dunas).

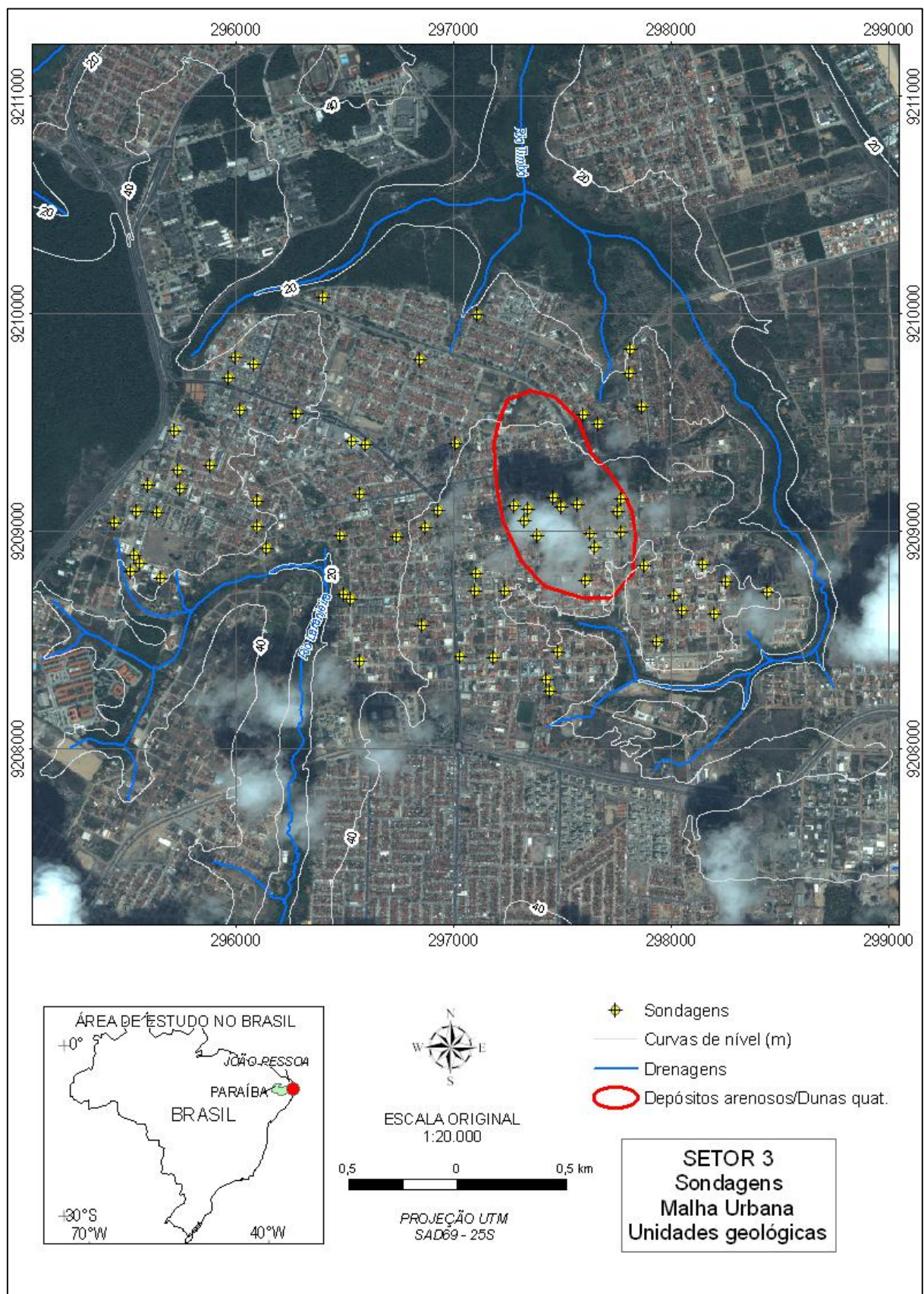


Figura 6.55 Contexto urbano e geologia no Setor 3.

### 6.3.8 Impenetrável à Percussão; $N_{SPT} > 50$

As Figuras 6.56 a 6.58 exibem as superfícies obtidas com a interpolação da profundidade do impenetrável a percussão ( $N_{SPT} > 50$ ) com o método Topo to Raster.

Para o Setor 1, observa-se um certo paralelismo da profundidade interpolada com as curvas de nível, como esperado para a variável analisada e também devido ao método dispor de aspectos que contribuem com uma influência da morfologia.

Entretanto, a quantidade de sondagens que alcançaram golpes maiores que 50 é visivelmente menor que a de furos que não relataram o alcance de tal limite. Conseqüentemente, a superfície interpolada exibiu trechos fiéis aos pontos originais utilizados, mas as estimativas em partes que não continham amostras não se adequaram as sondagens em que não foi alcançado o impenetrável. Ou seja, observou-se que, em muitos casos, as sondagens sem golpes maiores que 50 ultrapassavam em profundidade a superfície interpolada. A situação inversa também ocorreu (sondagens com limite de profundidade menores que o impenetrável estimado), mas para casos desse tipo não se pode concluir que as estimativas estejam erradas de fato, uma vez que não se alcançaram profundidades suficientes para a comparação.

No Setor 2, pode-se fazer uma análise comparativa com o mapa gerado para os valores de  $N_{SPT}$  a profundidade de 12 metros. Neste último, os trechos que apresentam valores mais elevados de golpes ( $> 40$ , cor azul escuro), apresentam poucas vezes alguma correspondência com a superfície do impenetrável. Trata-se dos casos em que a profundidade obtida para golpes maiores que 50 se encontra em torno de 12 metros.

Apesar disso, ocorre o mesmo problema constatado no Setor 1, que é a diferença de pontos utilizados na modelagem do impenetrável em relação a todos os pontos do setor. Esse aspecto também resultou em falta de representatividade, ao se verificar as sondagens não utilizadas no impenetrável, que na realidade alcançaram profundidades maiores que a estimada nos pontos em que se encontram.

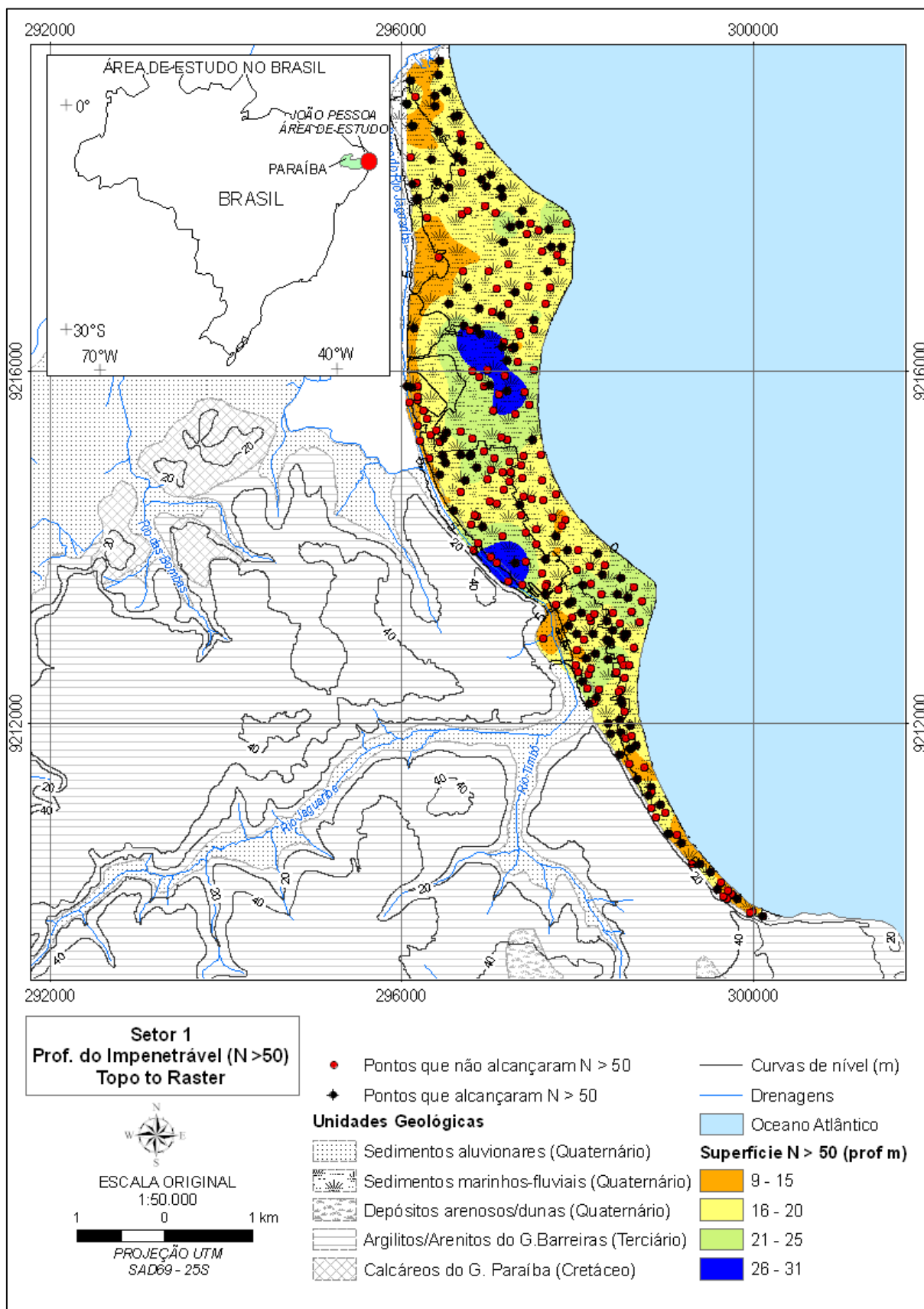


Figura 6.56 Profundidade do impenetrável à percussão ( $N_{SPT} > 50$ ) para o Setor 1.

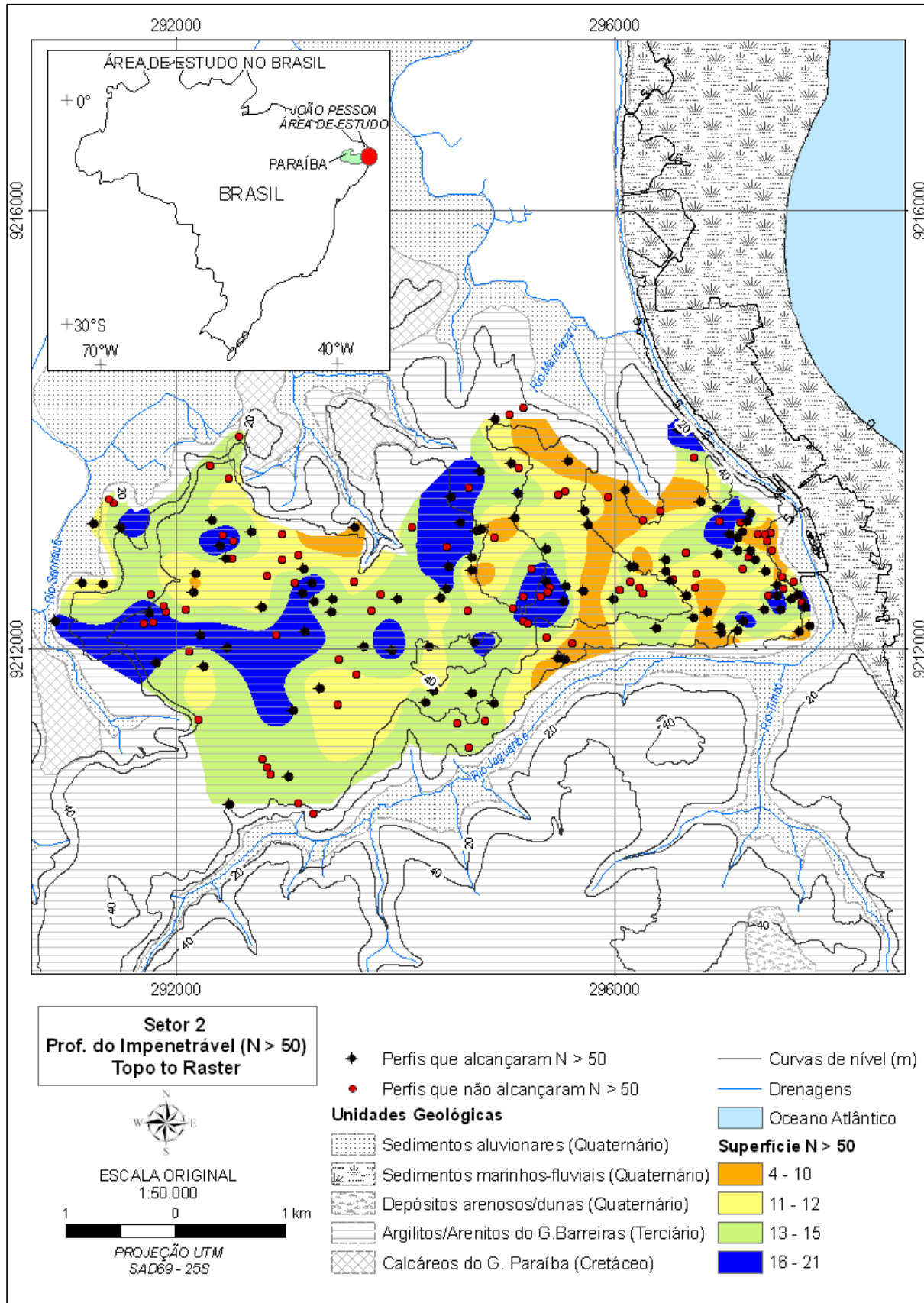


Figura 6.57 Profundidade do impenetrável à percussão ( $N_{SPT} > 50$ ) para o Setor 2.



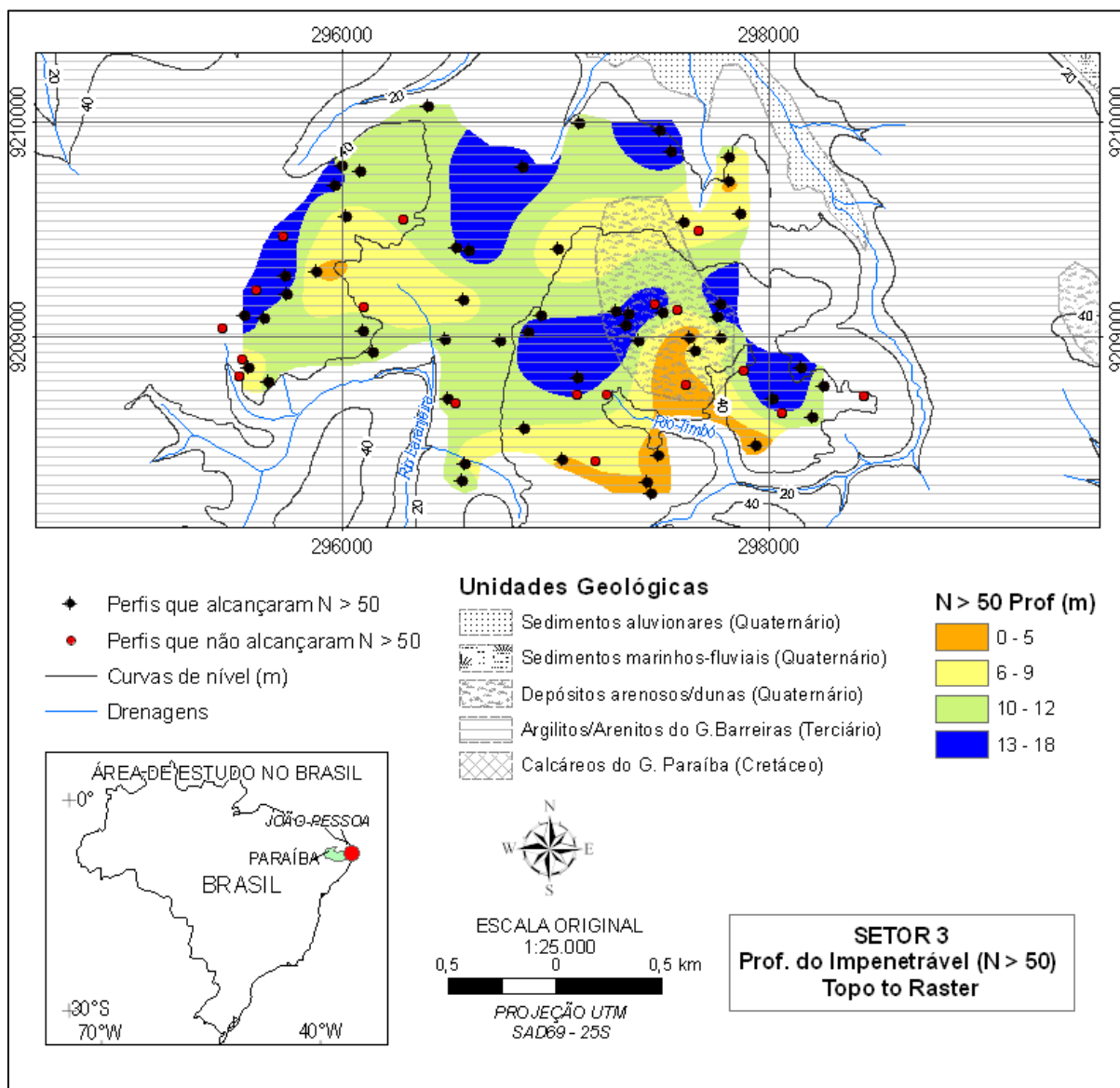


Figura 6.58 Profundidade do impenetrável à percussão ( $N_{SPT} > 50$ ) para o Setor 3.

O Setor 3 apresenta um quadro diferente dos anteriores. De antemão já se pode observar que a maioria das sondagens (55 furos) alcançou o impenetrável considerado no critério aqui estudado, enquanto que as que não alcançaram (18) se encontram bem distribuídas na área, com pontos isolados que não participaram na geração do modelo. Este setor é o que resultou com menores profundidades para a superfície com  $N_{SPT} > 50$ , influenciado pela forte presença de laterita, pedregulhos e o alcance do arenito a poucas profundidades (entre 2 e 10 metros).

Constata-se então que a superfície do impenetrável obtida alcança na sua maioria profundidades entre 6 a 9 metros e também 10 a 12, o que confirma o mapa gerado para os

valores do  $N_{SPT}$  neste setor para a profundidade de 12 metros. Neste, fica clara a predominância de alta resistência a penetração, em que a parte centro-oeste do setor apresenta grande coerência com a superfície do impenetrável (trechos com  $N_{SPT}$  menores que 40 encaixam-se com os que o impenetrável foi estimado para mais profundo que 12 metros). Não obstante, a parte leste do setor não promoveu semelhante correspondência. Pode-se atribuir ao fato de que justamente neste trecho verifica-se a presença de mais furos que não alcançaram  $N_{SPT} > 50$ , situados entre as sondagens utilizadas na geração do modelo.

#### **6.4 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS**

As Figuras 6.59 a 6.61 mostram as sondagens que não participaram dos processos de estimativa e que foram utilizadas na validação (comparação dos dados reais, obtidos em campo, com os estimados) dos mapas obtidos. Os testes de validação foram realizados com os mapas obtidos pelo Topo to Raster, uma vez que após as observações preliminares, esse método se mostrou um pouco mais satisfatório.

As Tabelas 6.9 a 6.15 exibem os valores obtidos com o processo de comparação. Foi calculado o RMS para cada camada de cada setor, com o intuito de se avaliar o erro obtido. Obviamente que o RMS é mais indicado para casos com mais densidade de pontos, mas foi utilizado também aqui com um caráter mais ilustrativo.

Analisando-se as diferenças individuais, percebe-se que as sondagens situadas nas regiões centrais dos setores apresentaram menos discrepâncias com os valores estimados. Também mostraram esse comportamento as sondagens em pontos que se encontram em trechos com maior densidade de amostras utilizadas nas interpolações.

Os pontos com piores resultados encontram-se justamente nos extremos dos setores ou em seções com poucas amostras e quantidade de sondagens. Ainda assim, alguns dos erros correspondem a estimativas que conseguiram encaixar-se nos intervalos estimados.

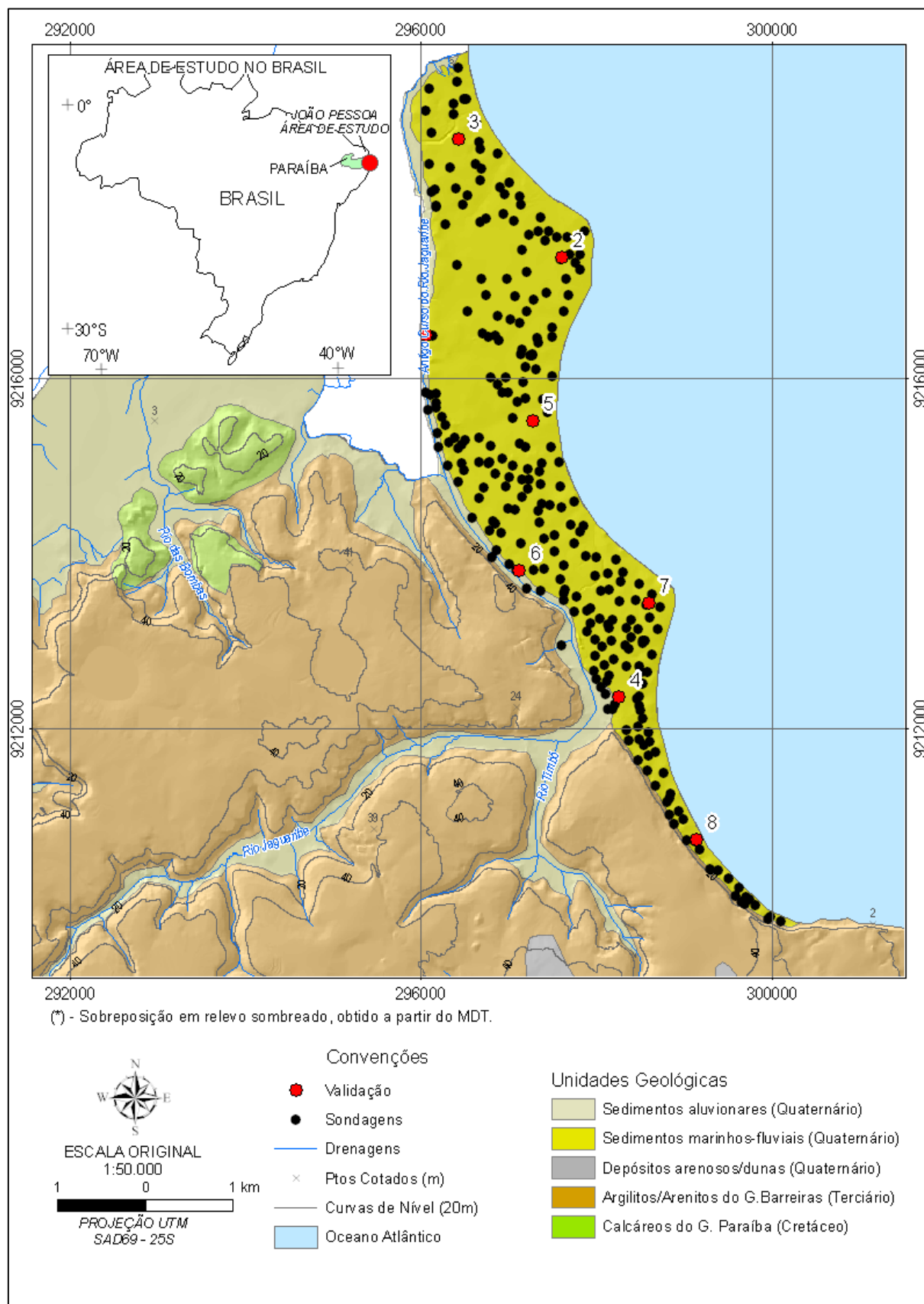


Figura 6.59 Sondagens utilizadas na validação das estimativas do Setor 1.

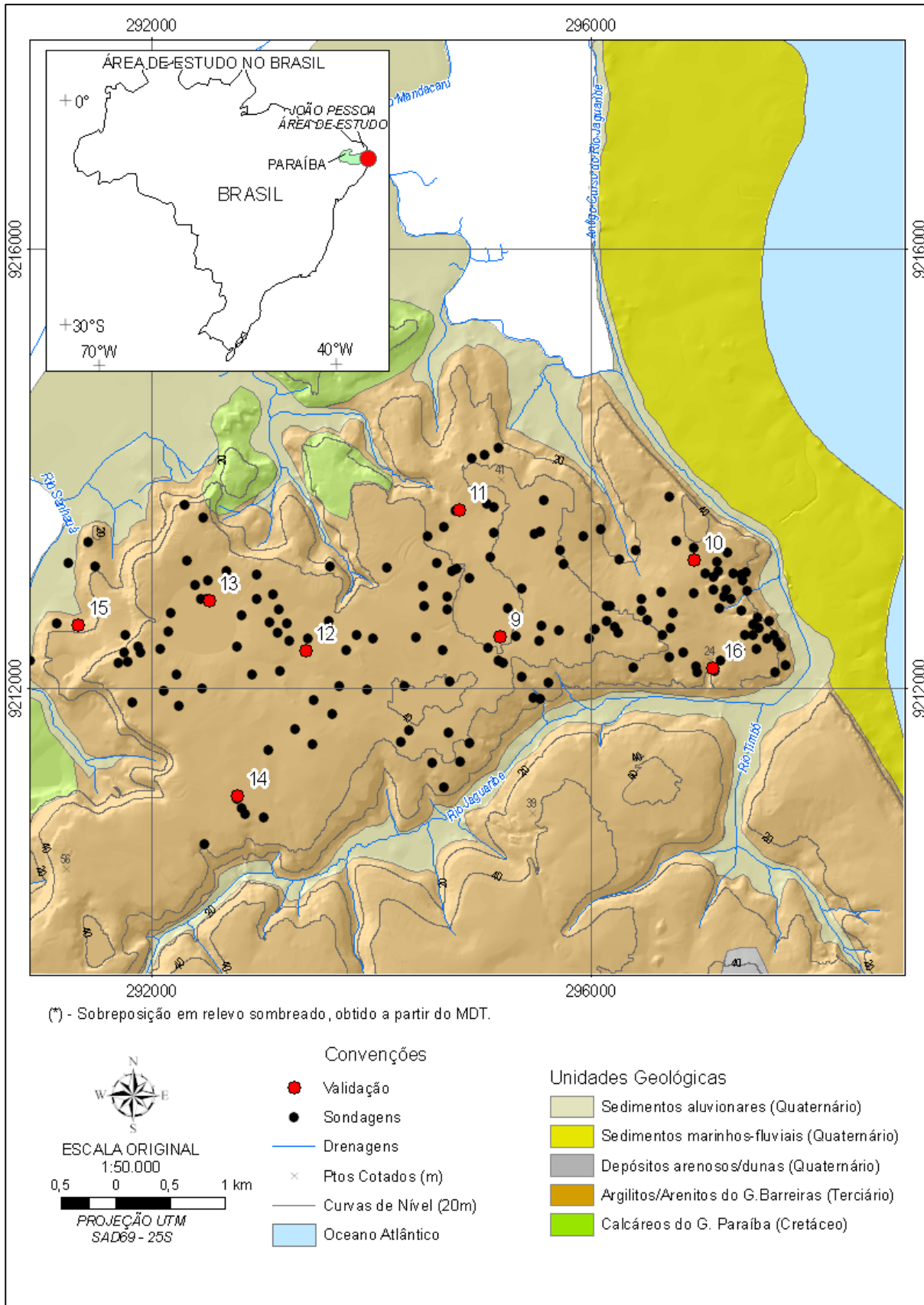


Figura 6.60 Sondagens utilizadas na validação das estimativas do Setor2.

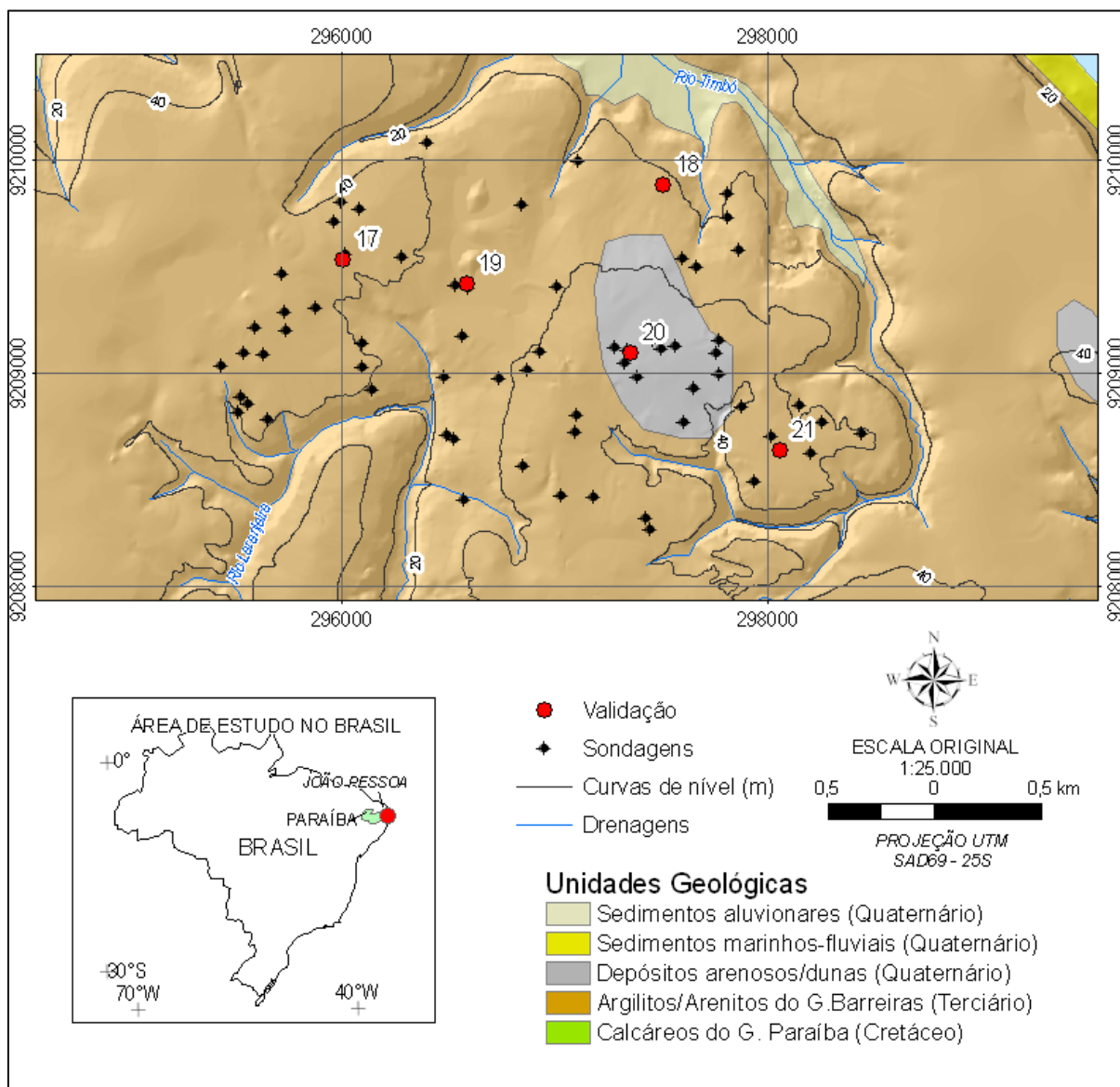


Figura 6.61 Sondagens utilizadas na validação das estimativas do Setor 3.

Observa-se que o RMS tende a aumentar com a profundidade (de 1, 53 a 5,4 golpes), pois as estimativas feitas a maiores profundidades contaram com menos pontos originais que as superiores, uma vez que nem todas as perfurações persistem igualmente a todos os metros. Sendo assim, os modelos obtidos para estes níveis acabam sendo processados com menos amostras/valores originais, o que geraria resultados menos detalhados ou refinados.

A profundidade de 12 metros do Setor 3 apresentou a validação mais precária; muito provavelmente pelo motivo já mencionado de que a esta profundidade, já não se

encontravam muitos das sondagens realizadas no setor, observação corroborada pelas poucas profundidades em que foi alcançado o impenetrável nesta área.

Tabela 6.9 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do  $N_{SPT}$  médio entre 1 e 5 metros (RMS = 1,53)

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1            | 10                               | 9,5                                  | 0,5                                |
| 2            | 19                               | 16,1                                 | 2,9                                |
| 3            | 8,3                              | 6,8                                  | 1,5                                |
| 4            | 9,5                              | 9,6                                  | 0,1                                |
| 5            | 9,7                              | 11,2                                 | 1,5                                |
| 6            | 4,3                              | 4,5                                  | 0,2                                |
| 7            | 14,7                             | 12,4                                 | 2,3                                |
| 8            | 7,2                              | 6,7                                  | 0,5                                |

Tabela 6.10 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do  $N_{SPT}$  a 6 metros (RMS = 3,2)

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1            | 7                                | 2,0                                  | 5                                  |
| 2            | 18                               | 16,1                                 | 1,9                                |
| 3            | 25                               | 25,7                                 | 0,7                                |
| 4            | 18                               | 12,7                                 | 5,3                                |
| 5            | 11                               | 6,5                                  | 4,5                                |
| 6            | 7                                | 8,3                                  | 1,3                                |
| 7            | 37                               | 36,3                                 | 0,7                                |
| 8            | 6                                | 7,7                                  | 1,7                                |

Tabela 6.11 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do  $N_{SPT}$  a 10 metros (RMS = 4,8)

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1            | 4                                | 10,6                                 | 6,6                                |
| 2            | 1                                | 1,2                                  | 0,2                                |
| 3            | 5                                | 4,7                                  | 0,3                                |
| 4            | 26                               | 18,5                                 | 7,5                                |
| 5            | 19                               | 16,0                                 | 3                                  |
| 6            | 13                               | 20,1                                 | 7                                  |
| 7            | 2                                | 2,4                                  | 0,4                                |
| 8            | 26                               | 31,4                                 | 5,4                                |

Tabela 6.12 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 1 para o valor do  $N_{SPT}$  a 14 metros (RMS = 5,4)

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1            | 56                               | 68,3                                 | 12,3                               |
| 2            | 3                                | 2,9                                  | 0,1                                |
| 3            | 10                               | 14,0                                 | 4                                  |
| 4            | 24                               | 21,0                                 | 3                                  |
| 5            | 5                                | 3,3                                  | 1,7                                |
| 6            | 8                                | 15,4                                 | 7,4                                |
| 7            | 13                               | 12,0                                 | 1                                  |
| 8            | 12                               | 12,3                                 | 0,3                                |

Tabela 6.13 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 2 para o valor do  $N_{SPT}$  médio entre 1 e 5 metros (RMS = 3,1)

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 9            | 11                               | 12,0                                 | 1                                  |
| 10           | 4                                | 7,0                                  | 3                                  |
| 11           | 2                                | 10,0                                 | 8                                  |
| 12           | 4                                | 5,0                                  | 1                                  |
| 13           | 6                                | 7,0                                  | 1                                  |
| 14           | 4                                | 4,0                                  | 0                                  |
| 15           | 5                                | 6,2                                  | 1,2                                |
| 16           | 7                                | 7,8                                  | 8                                  |

Tabela 6.14 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 2 para o valor do  $N_{SPT}$  a 12 metros (RMS = 4,2)

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 9            | 22                               | 20,0                                 | 2                                  |
| 10           | 33                               | 31,8                                 | 2                                  |
| 11           | 28                               | 35,0                                 | 7                                  |
| 12           | 23                               | 23,0                                 | 0                                  |
| 13           | 36                               | 36,0                                 | 0                                  |
| 14           | 50                               | 42,0                                 | 8                                  |
| 15           | 50                               | 52,0                                 | 2                                  |
| 16           | 60                               | 55,2                                 | 4,8                                |



Tabela 6.15 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 3 para o valor do  $N_{SPT}$  médio entre 1 e 5 metros (RMS = 5,3)

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 17           | 17                               | 26,2                                 | 9,2                                |
| 18           | 10                               | 22,0                                 | 12                                 |
| 19           | 14                               | 15,2                                 | 1,2                                |
| 20           | 16                               | 17,1                                 | 1,1                                |
| 21           | 6                                | 5,5                                  | 0,5                                |

Tabela 6.16 Comparação entre estimativas e valores reais no Setor 3 para o valor do  $N_{SPT}$  a 12 metros

| <b>Ponto</b> | <b><math>N_{SPT}</math> real</b> | <b><math>N_{SPT}</math> estimado</b> | <b><math>\Delta N_{SPT}</math></b> |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 19           | 43                               | 55,9                                 | 12,9                               |
| 20           | 50                               | 32,0                                 | 18                                 |
| 21           | 29                               | 12,5                                 | 16,5                               |

## 6.5 MAPAS PARA USO DE FUNDAÇÕES

### 6.5.1 Tensão admissível para Fundações Diretas / Superficiais

As Figuras 6.60 a 6.62 exibem os mapas com tensão admissível para os três setores. O mapa obtido para o Setor 1 ( Figura 6.62) apresenta faixas de valores de MPa coerentes aos esperados com a utilização da formulação empírica, uma vez que foi originado a partir dos índices contidos no intervalo que é o mais indicado para a aplicação da correlação ( $N_{SPT}$  médio do bulbo de tensões entre 5 e 25).

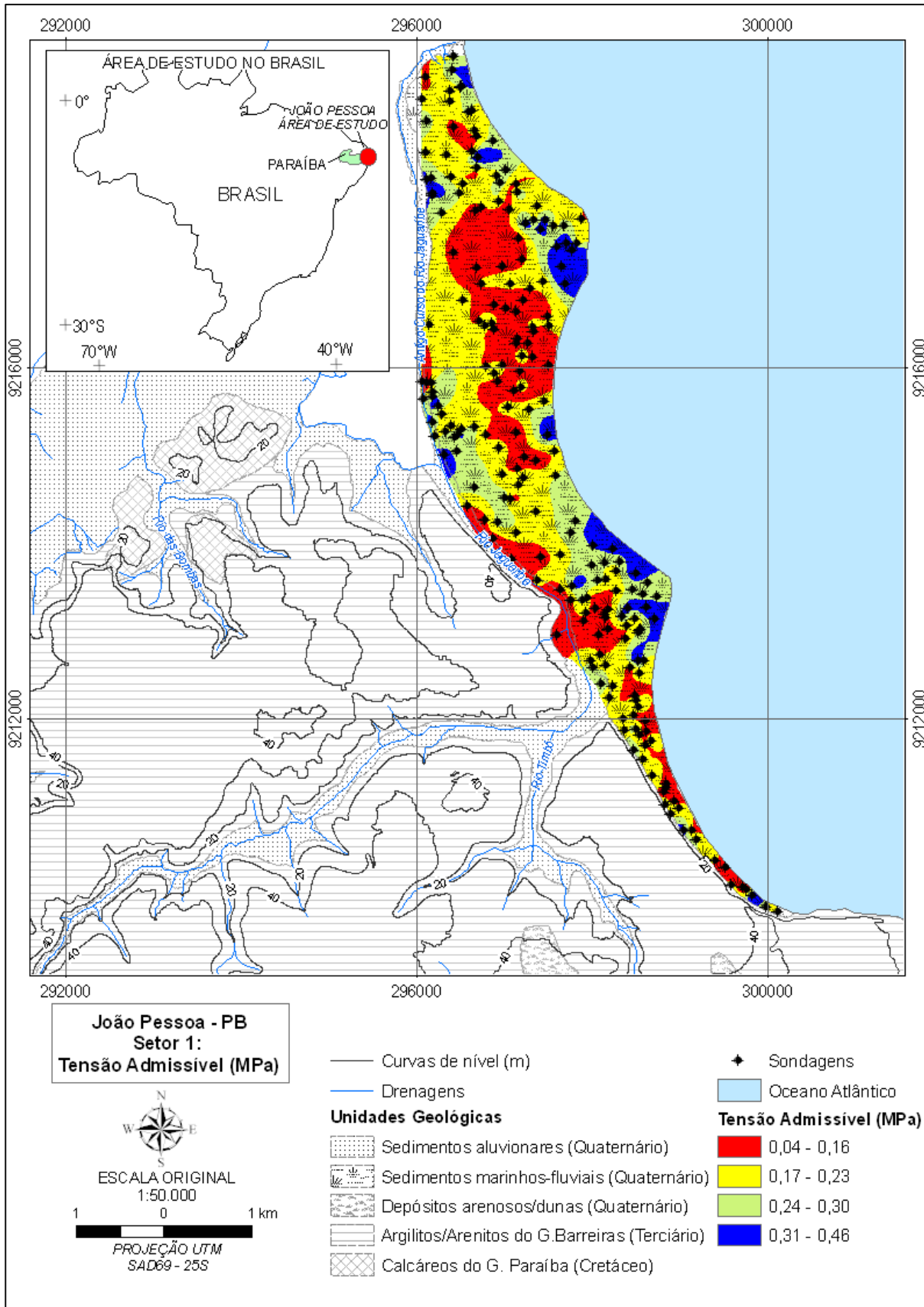


Figura 6.62 Tensão Admissível no Setor 1 em MPa.

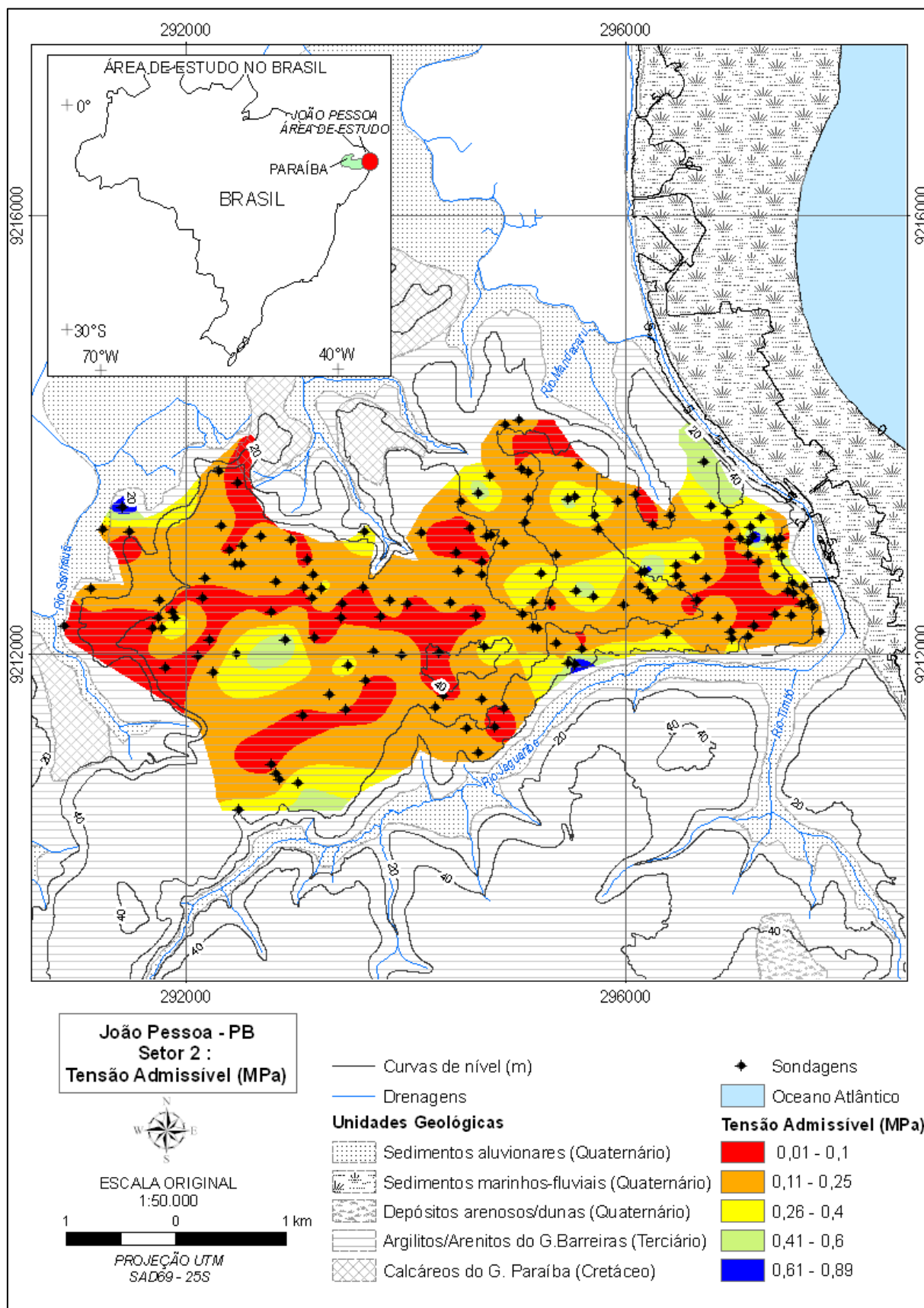


Figura 6.63 Tensão Admissível no Setor 2 em MPa.

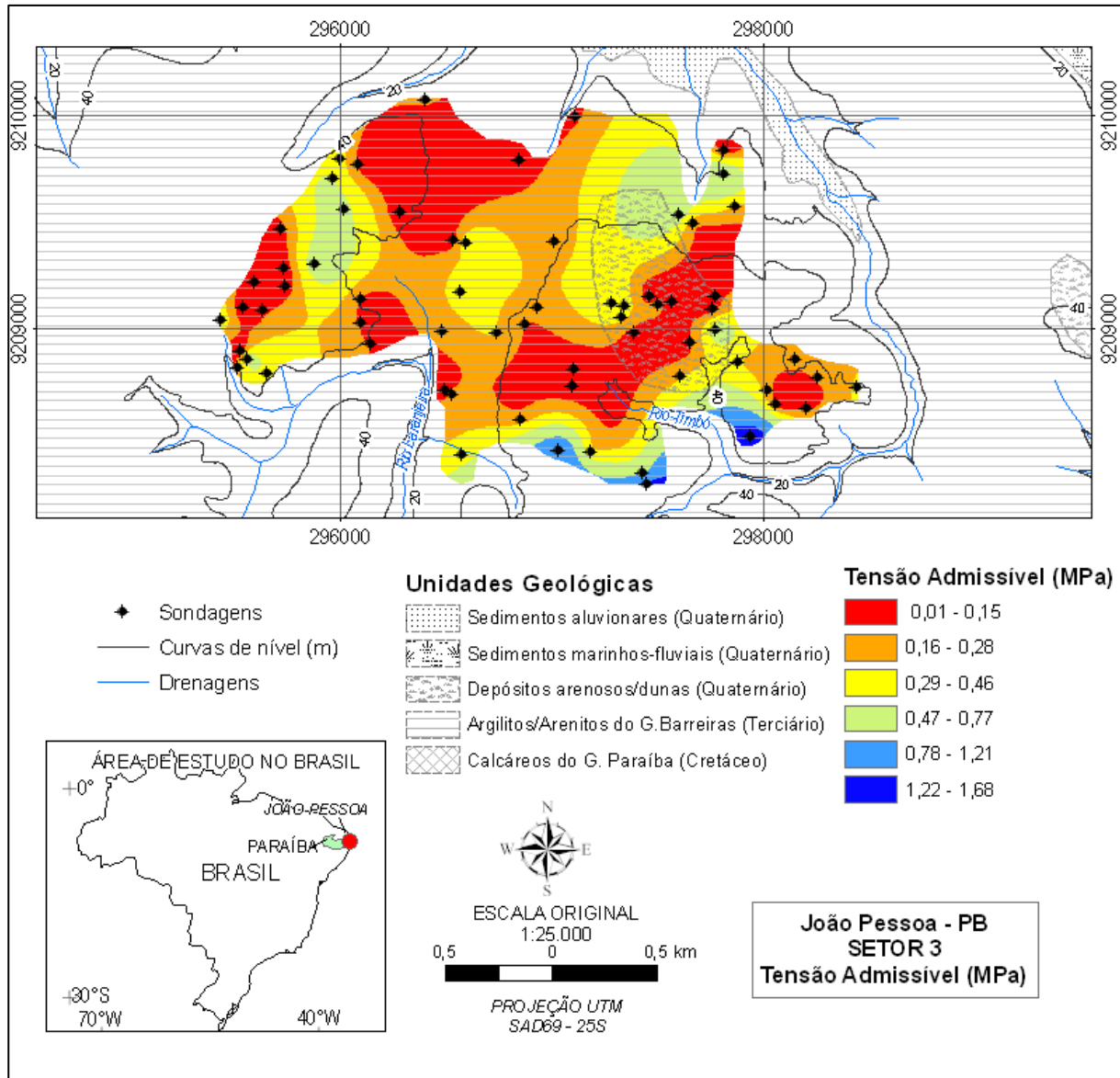


Figura 6.64 Tensão Admissível no Setor 3 em MPa.

As faixas com tensão admissível a partir de 0,25 MPa já se mostrariam aplicáveis ao auxílio em cálculo de projetos de fundações, de acordo com as características e porte das determinadas obras. Os trechos com tensões admissíveis alcançando 0,5 MPa sugerem ótimas condições de capacidade de carga mesmo para edificações de grande porte, visto que correspondem ao valor de 50 tf/m<sup>2</sup>, taxas utilizadas na prática local em edifícios de até 30 pavimentos.

Pode-se observar a grande ocorrência de trechos com tensão admissível inferiores a 0,24 MPa. Apesar de menores que as mencionadas anteriormente, essa faixa de valores se

adequa muito bem à aplicação de soluções alternativas de projeto como as estacas de compactação, que já foram largamente utilizadas neste setor de estudo.

A escolha por esta técnica é favorecida pela presença de solo mais resistente já a cerca de 5 metros de profundidade, que permite o emprego da melhoria nesta cota de apoio, associada às características predominantemente arenosas das camadas situadas acima. O solo resultante (melhorado) recebe então um acréscimo de resistência que permite o alcance de tensões admissíveis maiores que as anteriores ao processo de melhoria. Por isso, mesmo as áreas que não apresentaram altos valores de tensão admissível indicam o contexto adequado a esta solução devido as menores compacidade iniciais.

O mapa de tensões obtido para o Setor 2 apresenta condições menos satisfatórias que as observadas no Setor 1, visto que boa parte da área apresenta baixos valores para este parâmetro, principalmente se forem considerados os casos de edificações de maior porte. Tal observação corrobora a prática local neste trecho, visto que aparte das menores edificações ou térreas, é comum a utilização de estacas que alcancem maiores profundidades para a capacidade de carga do sistema.

O Setor 3 resultou com um mapa coerente com o perfil de ocupação dessa área dentro do município. Até recentemente, esta parte da cidade contava com a ocupação predominantemente de construções residenciais ou obras de pequeno porte, como pequenos prédios com poucos pavimentos. Para tais finalidades, a presença das faixas em laranja e amarelo se adequam satisfatoriamente (tensão admissível entre 0,16 e 0,46 MPa).

Entretanto, ultimamente vem crescendo nesta área a construção de prédios que necessitam de capacidades de suporte maiores que as obtidas superficialmente, o que influencia a utilização de estacas, principalmente escavadas com trado mecânico, geralmente situadas com cotas de apoio a 12 metros de profundidade.

Levando-se em conta que, no Setor 1, as estacas de compactação utilizadas com apoio em 6 metros de profundidade são utilizadas como subsídio à execução de fundações diretas, atuando como um reforço do solo, o mapa gerado para esta profundidade será exposto nesta seção e exibido na Figura 6.65 .

Constata-se que uma parcela significativa do Setor 1 resulta favorável a utilização das estacas de compactação apoiadas a 6 metros, o que corrobora a prática e experiência local. As áreas favoráveis correspondem a trechos que apresentaram  $N_{SPT} > 20$ , e com o isolamento desta zona, pode-se evidenciar que há uma queda de resistência no sentido leste-oeste, pois as curvas de nível mais altas do setor (5 m) situam – se justamente na

parte não incluída da área isolada. Ou seja, sugere-se um aumento de resistência com a profundidade, neste nível (pois a 6 metros abaixo do terreno, correspondem cotas altimétricas diferentes e paralelas à topografia).

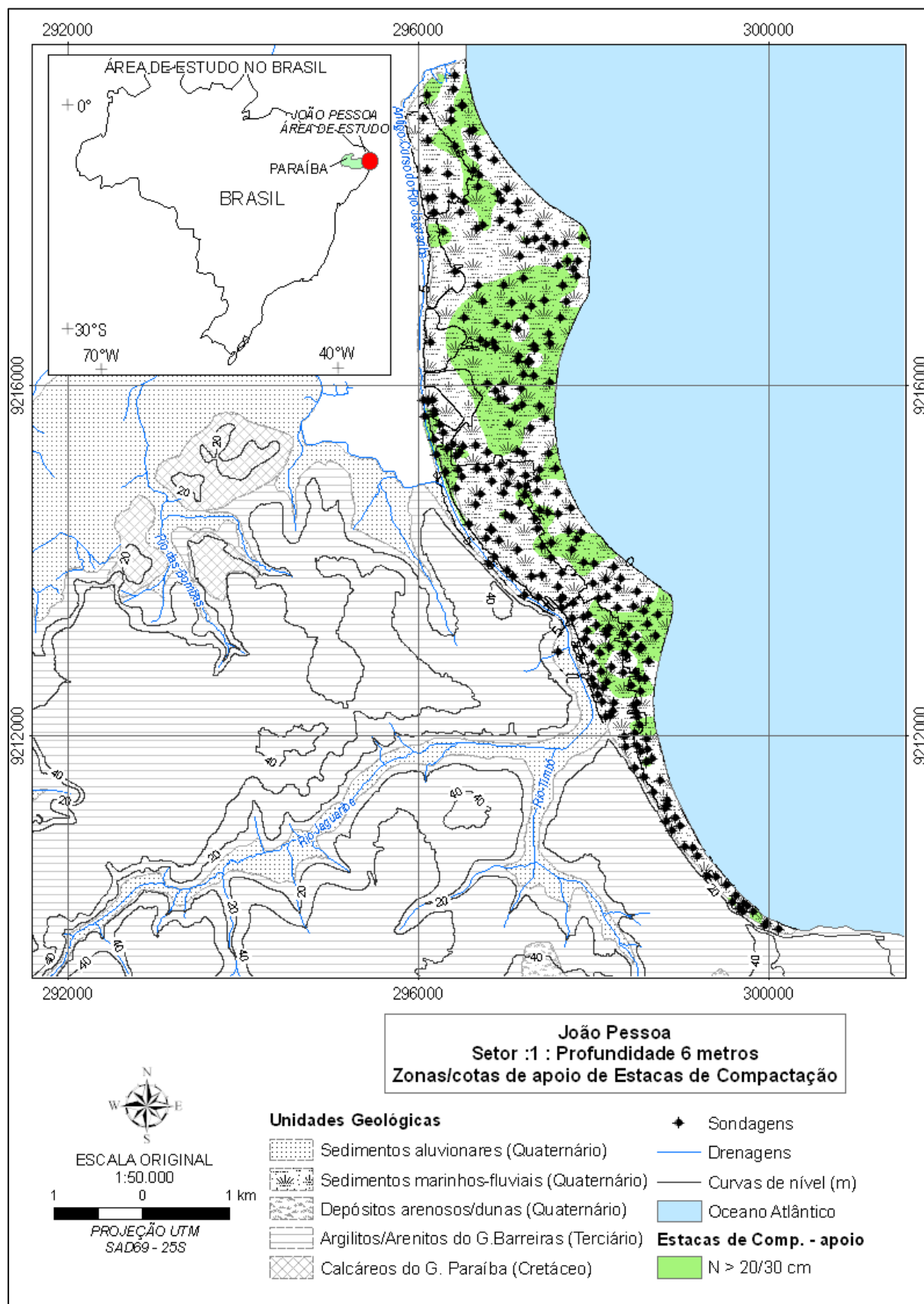


Figura 6.65 Setor 1: Mapa com áreas propícias ao apoio de estacas de compactação (profundidade – 6 metros).

### 6.5.2 Fundações Profundas

As Figuras 6.66 a 6.68 exibem os mapas obtidos com as sugestões de cotas de apoio para diferentes tipos de estacas nos três setores, nas principais profundidades (geralmente mais utilizadas em suas respectivas áreas para fundações profundas).

No Setor 1, a 14 metros de profundidade observa uma inversão na anisotropia, em termos de resistência, pois agora se constata que o índice decai no sentido oeste – leste ; contrário o observado na camada anterior. Neste caso, os trechos com valores mais altos do  $N_{SPT}$  encontram-se nas áreas correspondentes as curvas de nível mais altas, indicando que o índice cai, a profundidade de 14 metros, com a diminuição de cota altimétrica.

Este setor apresenta a limitação da presença do lençol freático a pequenas profundidades, o que limita a execução de estacas que não dependam do nível d'água em seus processos construtivos, tais como as de ponta fechada (franki, compactação) ou pré-moldadas e metálicas e ainda as do tipo hélice contínua.

O Setor 2 já apresenta a situação contrária: a 12 metros de profundidade, ainda não se observa a presença do lençol e esse contexto já permite, além dos tipos de estacas mencionados no Setor 1, a execução de tubulões à céu aberto e estacas escavadas com trado mecânico (tipo broca), em que é necessária a integridade do furo após a escavação e antes do período de concretagem.

O terceiro setor já não apresenta a totalidade da área considerada para as análises superficiais; uma vez que para a locação de fundações profundas a 12 metros abaixo do terreno, foi levado em conta a posição do impenetrável estimado (visto que o mesmo se apresentou em profundidades baixas, na maioria da área, o que impediria que os processos executivos das estacas atravessassem camadas tão resistentes).

Nos três setores, as profundidades analisadas mostraram que os valores de resistência se adequam muito bem ao indicado como referência para as limitações em função do  $N_{SPT}$ . Essa verificação confirma as opções mais realizadas na prática geotécnica local.



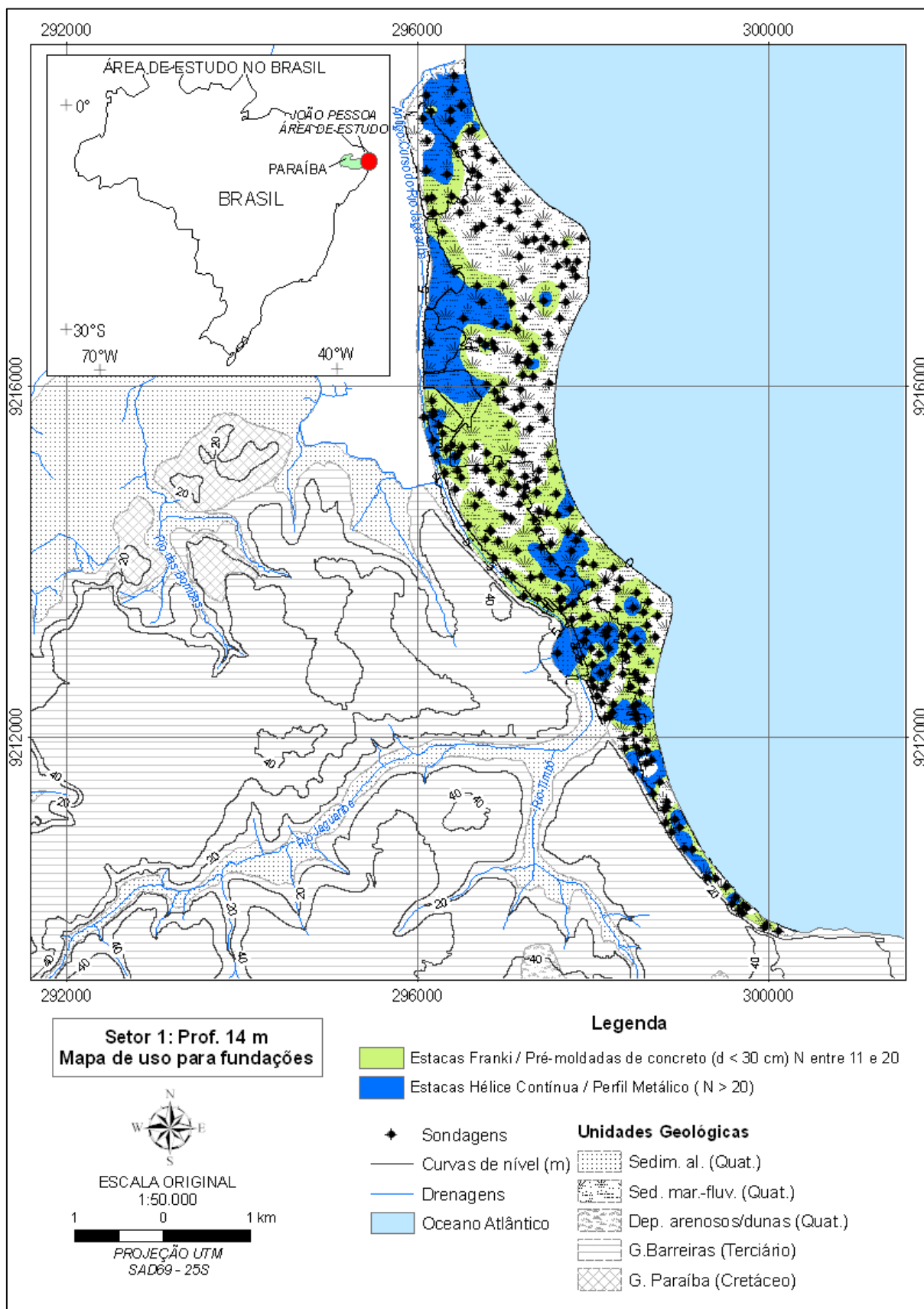


Figura 6.66 Mapa de uso para fundações – 14 metros (Setor 1).

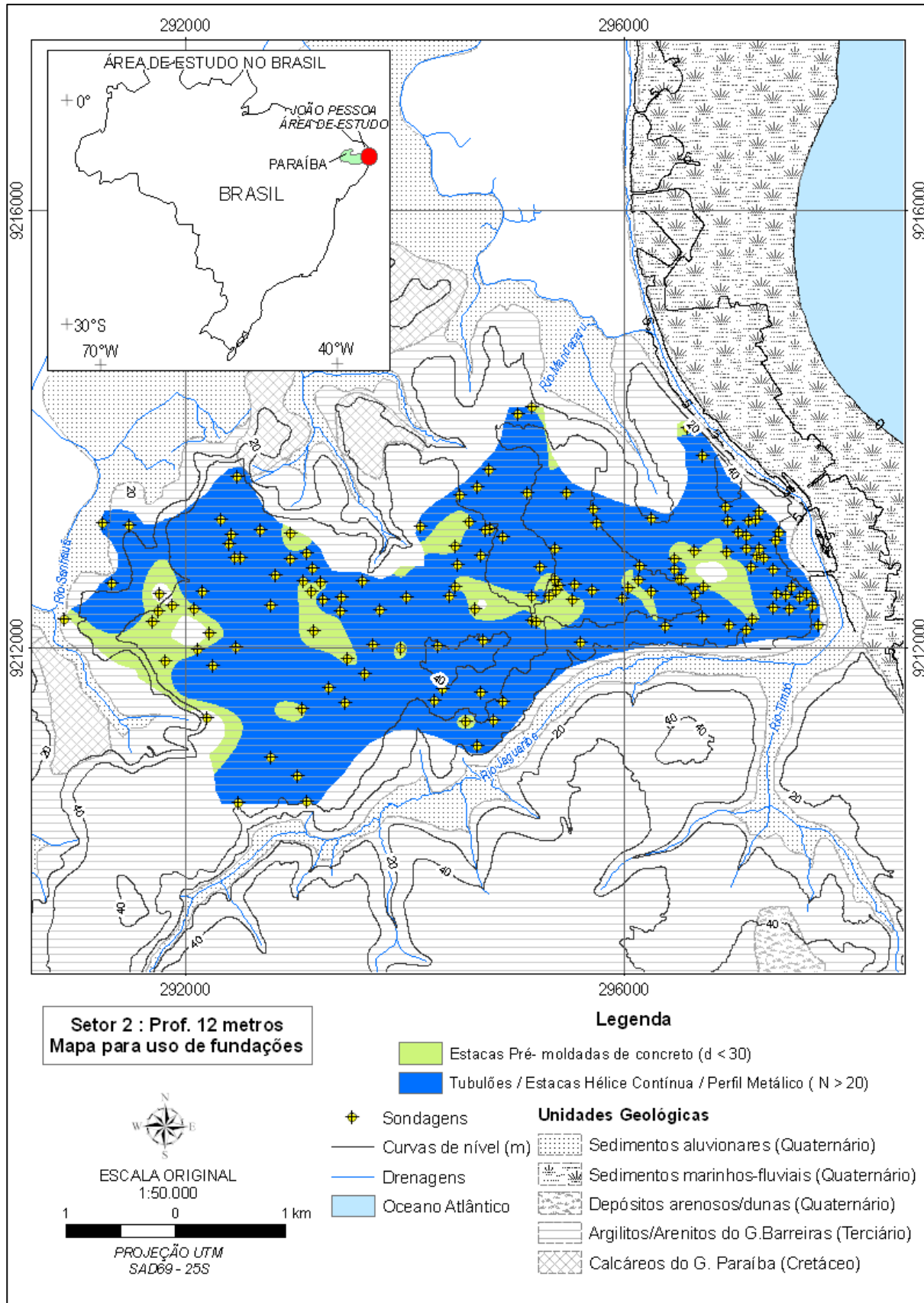


Figura 6.67 Mapa de uso para fundações – 12 metros (Setor 2)

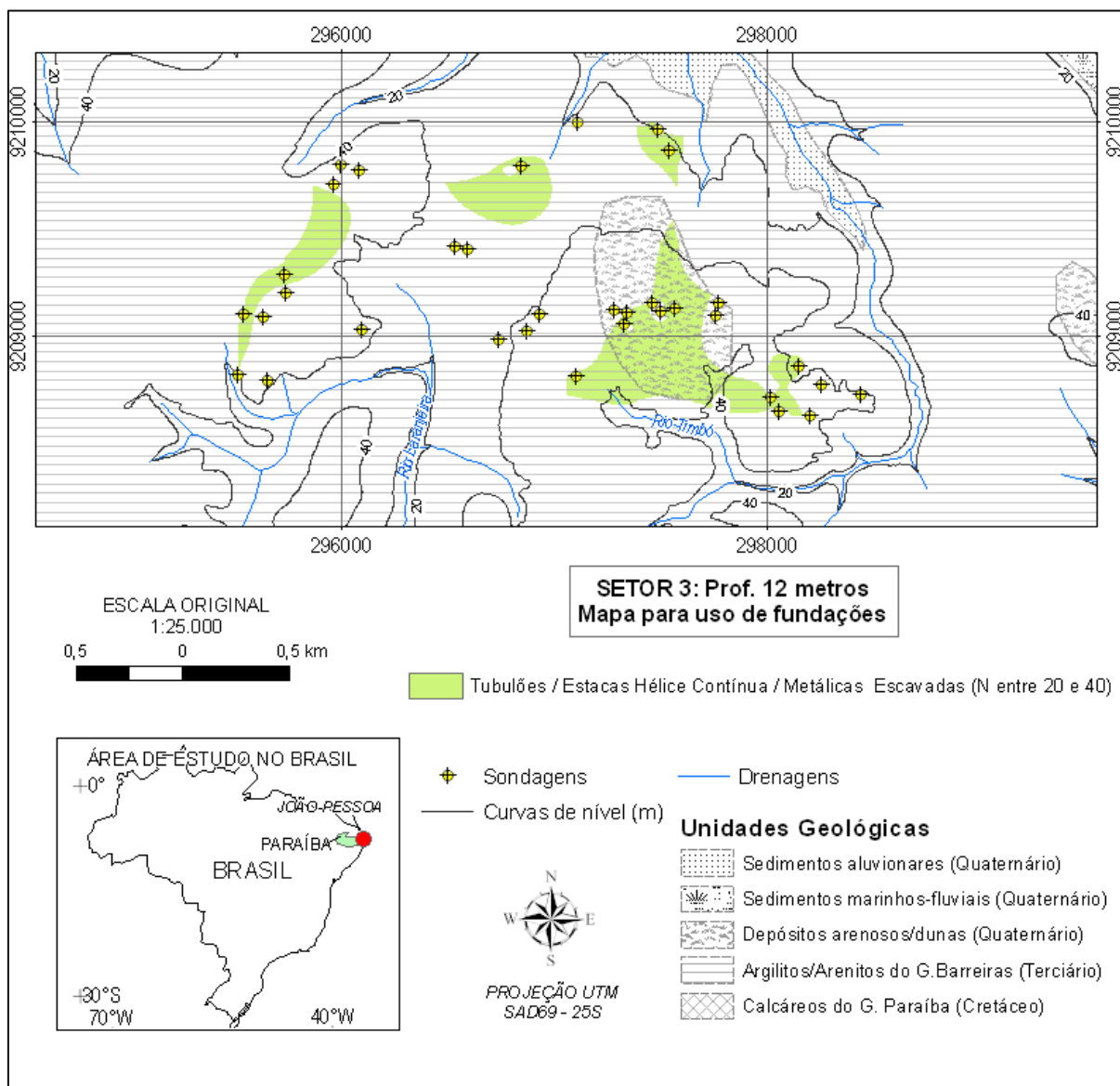


Figura 6.68 Mapa de uso para fundações – 12 metros (Setor 3)

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho tratou o desenvolvimento de um banco de dados (relacional) geológico – geotécnicos com informações provenientes de sondagens à percussão com ensaios SPT do município de João Pessoa – Paraíba. Foram descritas as etapas correspondentes à preparação e estruturação do banco de dados, desde o levantamento, vetorização e inserção dos dados constituintes (da base topográfica digital até os boletins de sondagem), até o gerenciamento, operações e análises espaciais das informações armazenadas.

Essas atividades envolveram, principalmente, a geração do MDT e o emprego de 529 furos de sondagem inseridas digitalmente. Foi permitida a avaliação do processo como um todo, incluindo todos os estágios operacionais e analíticos, o que promoveu à prática e familiarização com a ferramenta utilizada (software ArcGis 9.1), assim como dos formatos dos dados envolvidos, de maneira mais eficiente para o desenvolvimento da pesquisa.

O software ArcGis 9.1 se mostrou um subsídio imprescindível a realização de todas as etapas envolvidas, desde a geração da base de dados até a estruturação do banco em si, complementadas com tratamento em análises espaciais das informações. A sua interface favoreceu de maneira prática tanto as operações de georreferenciamento, ajuste e vetorização dos elementos do banco, como as de relacionamento, junção e integração de tabelas, seleção de dados e modelagens e interpolações das informações.

Para a obtenção do MDT, foram testados o modelo TIN e também a rotina *Topo to Raster*. Esta última se demonstrou mais adequada, tanto pela análise do RMS mínimo, como pelo fato de ser um método que leva em conta aspectos da morfologia e hidrologia, produzindo uma superfície resultante mais fiel às características do terreno, com suavização

de fundos de vale e outras transições que resultam mais bruscas e até grosseiras quando analisadas em outros métodos.

A interpolação da superfície freática foi direcionada pela comparação entre dois métodos: o *Topo to Raster* e também a krigagem ordinária. O primeiro obteve resultados mais satisfatórios, permitindo a modelagem do lençol levando em conta a rede de drenagem, aspecto importante no comportamento da variável NA e negligenciado pela maioria dos outros algoritmos.

As possibilidades de operações e interações entre os produtos obtidos com as modelagens por meio das extensões de análise espacial do SIG (subtrações de arquivos raster como a operação realizada entre as superfícies freáticas obtidas para diferentes épocas do ano e comparação dessas superfícies em relação ao MDT) se mostraram estimulantes devido à praticidade de execução e fácil visualização dos produtos de modo a favorecer a interpretação dos resultados.

O processo de realização dos cálculos geoestatísticos pela extensão *Geoestatistical Analyst* apresentou-se extremamente prático por tratar as variáveis numa sequência de operações concisa e integrada (escolha do método/tipo de krigagem → ajuste do variograma → seleção de pontos da vizinhança → interpolação → validação cruzada (e outras medidas de avaliação de erro) → relatório com parâmetros), sem a necessidade de recorrer a softwares adicionais para a conclusão de todas as etapas de modelagens geoestatísticas, permitindo flexibilidade de opções de vários critérios, parâmetros e métodos na realização das estimativas.

Cabe lembrar que utilização do ArcGis nas análises geoestatísticas se mostrou satisfatória devido ao caráter mais prático da pesquisa, em que não se objetivava realizar um trabalho de geoestatística em si, com aprofundamentos no método, porém sem desprezar os parâmetros básicos do processo de modo a não equivocar resultados.

Para as análises de comportamento espacial do índice de resistência à penetração, foram separados três setores de estudo de acordo com a diferença de concentração das sondagens. Com a separação, obtiveram-se: um setor contido nos sedimentos marinhos recentes da planície costeira do município, e dois contidos nos sedimentos terciários do Grupo Barreiras. A divisão permitiu avaliar separadamente as características de comportamento geotécnico de cada área, em função das informações extraídas dos boletins de sondagem, para cada setor estudado.

Para a escolha da melhor ferramenta matemática nas interpolações do SPT, foram avaliados também os métodos Topo to Raster e Krigagem Ordinária; o primeiro por contemplar as características já mencionadas de consideração da morfologia e hidrologia (sendo o SPT uma variável geotécnica, supõe-se que entre esses dois fatores). O segundo, por ser largamente utilizado em pesquisas envolvendo dados de sondagem a percussão com o ensaio SPT.

O comportamento do índice com a profundidade no setor correspondente à planície costeira com sedimentos recentes se mostrou peculiar, no sentido de que o mesmo apresentou camadas de alta resistência a baixas profundidades (6 metros), seguidas por uma queda nos valores do  $N_{SPT}$  (a 10 metros), para depois voltar a crescer com a profundidade (a 14 metros), mesmo assim não em toda a área, o que resulta em um contexto interessante que pode ser objeto de estudo em pesquisas posteriores.

Já nos dois setores contidos no Grupo Barreiras, o índice de resistência apresentou um comportamento esperado, com o aumento de acordo com o avanço na profundidade.

Com ambos os métodos (Topo to Raster e Krigagem Ordinária), os mapas demonstraram-se bastante parecidos. Entretanto, a krigagem ordinária aparentemente reduziu as áreas com valores mais baixos e também mais altos presentes nos dados, mostrando um caráter suavizador do método, porém de maneira pouco acentuada. Sendo um dos objetivos do trabalho a caracterização geotécnica da área de estudo, era importante que trechos ou áreas com comportamento extremo (áreas menos resistentes, com solos moles / fofos, ou trechos com picos do índice, representando muitos golpes para cada 30 cm) não fossem negligenciados na representação dos produtos cartográficos finais.

Sendo assim, no geral os resultados obtidos com o Topo to Raster se mostraram mais satisfatórios, porém não discrepantes com os da krigagem ordinária. A krigagem foi de contribuição importante para a avaliação da variabilidade in situ do  $N_{SPT}$ , assim como nos processos de busca por reconhecer anisotropias. Pode-se dizer então que os dois métodos trabalharam em complemento um com o outro, sendo o Topo to Raster o escolhido para a realização das etapas seguintes de modelagens: a estimativa de profundidade do impenetrável à percussão (considerado aqui como  $N_{SPT} > 50$  golpes) e geração de mapas para uso sugerido de fundações.

Foram realizadas etapas de campo, no município de João Pessoa, por meio de reuniões com profissionais do meio geotécnico local que englobaram muitos aspectos – desde caracterização da área (predominância de determinados tipos de solo em respectivas áreas, espessura de certas camadas, etc), comportamento e variação do  $N_{SPT}$ ,

profundidade em que é alcançado o calcário, até características e detalhes dos tipos de obras e fundações do município.

As estimativas para a profundidade do impenetrável à percussão não se mostraram satisfatórias para o setor contido na planície costeira e um dos pertencentes ao Grupo Barreiras, pois as sondagens que alcançaram golpes maiores que 50 foram poucas em relação aos furos que não relataram o alcance de tal limite. Conseqüentemente, a superfície interpolada exibiu trechos fiéis aos pontos originais utilizados, mas as estimativas em partes que não continham amostras não se adequaram as sondagens em que não foi alcançado o impenetrável. Ou seja, observou-se que, em muitos casos, as sondagens sem golpes maiores que 50 ultrapassavam em profundidade a superfície interpolada. A situação inversa também ocorreu (sondagens com limite de profundidade menores que o impenetrável estimado), mas para casos desse tipo não se pode concluir que as estimativas estejam erradas de fato, uma vez que não se alcançaram profundidades suficientes para a comparação.

Apesar disso, no Setor 3, a maioria das sondagens alcançou o impenetrável considerado no critério aqui estudado, enquanto que as que não alcançaram (18) se encontram bem distribuídas na área, com pontos isolados que não participaram na geração do modelo. Como resultado foram encontradas menores profundidades para a superfície com  $N_{SPT} > 50$ , influenciado pela forte presença de laterita, pedregulhos e o alcance do arenito a poucas profundidades (entre 2 e 10 metros).

As etapas de campo em João Pessoa corresponderam à primeira parte do processo de validação dos modelos, uma vez que os mesmos foram expostos e discutidos com a verificação e confirmação. A próxima parte do processo de validação consistiu na utilização dos furos de sondagem que não foram inseridos no banco de dados digital (porém indexados para facilitar a localização). Os valores de  $N_{SPT}$  contidos nesses furos foram comparadas com os valores estimados pelos modelos de interpolação.

No geral, as estimativas se mostraram satisfatórias, com pequenos erros, principalmente nos pontos que se encontram em trechos com maior densidade de amostras utilizadas nas interpolações. Os pontos com piores resultados encontram-se justamente nos extremos dos setores ou em seções com poucas amostras e quantidade de sondagens. Ainda assim, alguns dos erros correspondem a estimativas que conseguiram encaixar-se nos intervalos estimados.

Para a obtenção dos resultados finais (mapas com aptidão aos tipos de fundação), foram realizadas análises integradas desses mapas de resistência aos da superfície freática,

visto que a profundidade do nível d'água representa um fator limitante ao se tratar de alguns tipos de fundações.

Os mapas obtidos se mostraram coerentes com as utilizações de fundações de acordo com as práticas locais, o que corroborou a validação do banco de dados como ferramenta e subsídio útil às atividades de planejamento e gestão urbanas do município.

É imprescindível enfatizar, entretanto, o caráter regional e inicial do estudo aqui realizado, o qual não pode nem deve substituir a realização de sondagens com o SPT, nem indicar de antemão, com caráter definitivo, qual determinado tipo de fundação pode ser utilizado em detrimento de outro. A escolha de uma solução geotécnica depende do estudo detalhado de todas as camadas de solo envolvidas no problema, com o máximo de parâmetros possível e auxílio de trabalhos de campo.

Os produtos aqui expostos servem como um passo inicial à caracterização geotécnica do município, visto que esse pode servir como ponto de partida para diversos outros tipos de estudo que permitam avaliações mais detalhadas e também diversificadas, devido à natureza das informações manipuladas com a ferramenta (texturas, cores, resistência, nível d'água, etc).

A implementação desse banco de dados abre um precedente importante para o meio técnico e científico local, uma vez que reuniu um número considerável de informações que agora se encontram em um formato trabalhável e concentrado, de maneira muito mais prática se comparada à situação inicial do acervo de sondagens que até então não havia sido avaliado nem estudado, por mais de 30 anos.

As possibilidades de aplicação desta ferramenta oferecem uma gama de alternativas ainda a serem mensuradas, diante dos diversos tipos de abordagens geotécnicas possíveis, como correlações de parâmetros com os valores do índice de resistência à penetração, variação de comportamento ao longo do tempo (visto que o material corresponde a mais de 30 anos de período), etc.

O potencial desse banco de dados contempla ainda a oportunidade de sua manutenção e acréscimo com mais informações de novos furos ou também provenientes de outros tipos de investigação geotécnica, uma vez que sua interface permite fácil manipulação.

Desta forma considera-se que as Hipóteses de Trabalho e objetivos propostos na pesquisa foram alcançados.



## 8. REFERÊNCIAS

- ABGE (1999). Manual de Sondagens. Boletim n.3. 4 ed. São Paulo, 1999. 75p.
- ABNT (1996). Projeto e execução de fundações. NBR 6122, Rio de Janeiro, 33 p.
- ABNT (2001). Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos. NBR 6484, Rio de Janeiro, 8p.
- ALVES, W P. (2004). Fundamentos de Bancos de Dados. São Paulo: Editora Érica, 2004. 382p.
- ALVES, A. M. L.; LOPES, F. R.; ARAGÃO, C. J. G. (2000). Proposta de Método de Fundações Superficiais em Solos Granulares Melhorados por Estacas de Compactação. In: IV SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA. Anais São Paulo: ABEF/ABMS. v.2, p. 102-112.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. D1586. 2008. West Conshohocken, PA, United States. 9p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers. D4633. 2010. West Conshohocken, PA, United States. 7p.
- ANTENUCCI, J C et al. Geographic Information Systems. (1991). New York e London: Chapman & Hall, 1991. 301p.
- AOKI, N. VELLOSO, D. A. (1975). Na Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. In: V PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. Buenos Aires, v.1. p.367 – 376.
- AOKI, N; CINTRA, J.C.A. 2000. The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS WAVES THEORY TO PILES 6, v.1, p. 457 – 460, Sao Paulo.
- ARAÚJO, M. E. (1993). Estudo Geomorfológico do Extremo Sul do Litoral da Paraíba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 142p.

- AUGUSTO FILHO, O.; RIDENTE JR, J.L; ALVES, C. F. C. (1999). Compartimentação geotécnica da área urbana do município de São José do Rio Preto (SP) com base na generalização espacial de dados de sondagens a percussão. In: 9º.CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE. São Pedro – SP. CD – ROM.
- AUGUSTO FILHO, O. (2005a). Implementação de banco de dados geotécnicos como ferramenta adicional nas ações de gestão urbana da URBEL. Relatório Técnico. 14p.
- AUGUSTO FILHO, O. (2005b). Sistema de avaliação de riscos geológico-geotécnicos e ambientais em SIG: aplicação no Oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA) entre São Simão e Ribeirão Preto (SP). Projeto de Pesquisa FAPESP. 5p.
- AUGUSTO FILHO, O. (2008). Sistema de avaliação de riscos geológico-geotécnicos e ambientais em SIG: aplicação no Oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA) entre São Simão e Ribeirão Preto (SP). Relatório Científico Final FAPESP. 135p.
- AVSAR, S. M.; OZTURK, A. C.; BOUAZZA, A. (2002). Comparison Of Kriging And Point Cumulative Semivariogram Techniques To Make Spatial Description For A Given Mining Deposit. In: Engineering Geology for Developing Countries – Proceedings of the 9th International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa. J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors. CD – ROM.
- BAILLOT, R.T. & RIBEIRO JÚNIOR, A. (1999). Sondagem a percussão: Comparação entre processos disponíveis para ensaios SPT. Solos e Rochas. v.22, n.3, p.167-178.
- BARROS, M. A. (1998). Sistemas de Informações Geográficas in Curso de Especialização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas. Módulo 7; ABEAS – Associação Brasileira de Educação Agrária; DEG/CCT/UFPB, Campina Grande – PB, 1998.
- BASTOS, G. (2005). Estruturação de Banco de Dados a Partir do Mapeamento Geotécnico Aplicado à Região de Ribeirão Preto (SP). Tese. Departamento de Geotecnia – EESC – USP. São Carlos. 306 p.
- BASTOS, G. ZUQUETTE, L. V. (2002). Critical Review of Databases for Engineering Geological Mapping. In: Engineering Geology for Developing Countries – Proceedings of the 9th International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa. J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors. CD – ROM.

- BASTOS, G. ZUQUETTE, L. V. (2005). Armazenamento, consulta e visualização das informações produzidas no mapeamento geotécnico. 5º. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA. Belo Horizonte. V. 1. p. 67-72.
- BELINCANTA, A. (1998). Avaliação dos Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT. São Carlos. 141p. 2V. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BELINCANTA, A. & CINTRA, J.C.A. (1998). Fatores intervenientes em variantes do método ABNT para a execução do SPT. Solos e Rochas, v.21, n.3, p.119-133.
- BORGES, U. N. (2004). Mapeamento das Áreas de Conflito com a Legislação e de Riscos Decorrentes da Instalação de Postos de Combustíveis na Cidade de João Pessoa – PB Utilizando Sistema de Informação Geográfica e Sensoriamento Remoto. Monografia de Graduação. UFPB, CCEN, Departamento de Geociências- Curso de Geografia. João Pessoa. 145p.
- BORGES, K.; DAVIS, C. (2005). Modelagem de Dados Geográficos. In: Bancos de Dados Geográficos. CASANOVA, M.; CÂMARA, G.; DAVIS, C.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. L. Eds. Cap. 2 p 1 - 85.
- BRASIL Lei n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe Sobre o Parcelamento do Solo Urbano e Dá Outras Providências. Brasília – DF. 1979. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L6766.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6766.htm)
- BRODIE, R S. Integrating GIS and RDBMS Technologies During Construction of a Regional Groundwater Model. In: Environment Modeling & Software. n.14, p.119-128. 1998.
- BROOKER, P.I. (1979). Kriging. Engineering & Mining Journal, v.180, n.9. p.148-153.
- BROOKER, P.I. (1991). A Geostatistical Primer. Singapore. World Scientific.
- BURGESS, T. M.; Webster, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I The semi-variogram and punctual Kriging. Journal of Soil Science, 31 (2): 315-331, 1980a.
- BURGESS, T. M.; Webster, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II Block Kriging. Journal of Soil Science, 31 (2): 333-341, 1980b.

- BURROUGH, P A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. 4a Edição. Oxford, England: Oxford University Press, 1990. 194p.
- BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Clarendon Press, 1987. 193p.
- CÂMARA, G. Anatomia de um SIG. Fator GIS, a Revista do Geoprocessamento, n.4, 1994, p.11-15, jan/fev/mar.
- CAMARGO, E. D. G. (1997). Desenvolvimento, Implementação e Teste de Procedimentos Geostatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING). Tese. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ministério da Ciência e Tecnologia. São José dos Campos. 106p.
- CAMPOS, Nilson; STUDART, Ticiania (Eds). Gestão de Águas: princípios e práticas. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- CARVALHO, F. A. F.; CARVALHO, M. G. F. (1985). Vegetação. In: Atlas Geográfico do Estado da Paraíba. João Pessoa, Grafset. Governo do Estado da Paraíba / Secretaria de Educação / Universidade Federal da Paraíba. 44p.
- CARVALHO, M. S.; PINA, M. F.; SANTOS, S. M. Conceitos Básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia Aplicados à Saúde. Brasília: Organização Panamericana da Saúde, Ministério da Saúde, 2000, 122p
- CAVALEIRO, V M P. Condicionantes Geotécnicos à Expansão do Núcleo Urbano da Covilhã. v.1. Tese (Doutorado). Covilhã, Portugal: Universidade da Beira Interior – Departamento de Engenharia Civil, 2001. 356 p.
- CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. (1998). Informática. In: Geologia de Engenharia. ABGE. CNPq – FAPESP. Cap. 11. p. 163-196.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C; FERNÁNDEZ, T; HAMDOUNI, R. EL. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. IN: Bull Eng Geol Environ. (2006) 65:341 - 411.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. (2010). Fundações por Estacas : Projeto Geotécnico. 1 ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2010. 96 p.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. (2003). Tensão Admissível em Fundações Diretas. 1 ed. São Carlos, Rima, 2003. 135 p.

- COLMAN-SAD, S P, ASH, J S, NOLAN, L W. GEOLEGEND: A Database System for Mangins Geological Map Units in a Geographic Information System. IN: Computers & Geociences. V. 23, n.7, p. 715-724. 1997.
- CONCEIÇÃO, A. C. (1977). Estudo da Resistência e Consolidação de uma Argila Mole da Cidade de João Pessoa. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.
- CONCIANI, W; BEZERRA, R. L; MEDEIROS, J. L. G. (1999). Características de Deformação de uma Areia de Praia Obtidas por Pressiômetro. Solos e Rochas, v.22, n.3, p. 207-214
- CONCRESOLO – Consultoria em Concreto e Solos Ltda. Acervo. 2007.
- COUTINHO, Maria Glícia da Nóbrega. (1967). Geologia dos Municípios de João Pessoa, Cabedelo e Gramame –PB. Relatório de Graduação da Escola de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE.
- COUTINHO, R Q, MONTEIRO, C F B e OLIVEIRA, A T J. Banco de Dados das Argilas Orgânicas Moles/Médias do Recife-Versão 3.0. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA – INFOGEO. INFOGEO96, Volume I, 1996, São Paulo - SP. Anais do INFOGEO. São Paulo: ABMS, Núcleo Regional São Paulo, agosto, 1996. p. 105 –116.
- CULSHAW, M. G.; NORTHMORE, K. G. (2002). An Engineering Geological Map for Site Investigation Planning and Construction Type Identification. In: Engineering Geology for Developing Countries – Proceedings of the 9th International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa. J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors. CD – ROM.
- CULSHAW, M. G.; HALLAM, J. R.; ROSEBAUN, M. S.; BELL, F. G. (2002). The Importance of Data in Stablishing Geotechnical Risk. In: Engineering Geology for Developing Countries – Proceedings of the 9th International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa. J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors. CD – ROM.
- DAS, B. M. (2002). Principles of Geotechnical Engineering. 5th ed. Brooks/Cole. 589.
- DATE, C J. (2004). Uma Introdução a Sistemas de Bancos de Dados. 8a Edição. São Paulo: Campus, 2001, 900 p.

- DAVID, M. (1977). Geostatistical Ore Reserve Estimation. Developments in Geomathematics 2. Amsterdam. Elsevier Science Publishers. p.
- DÉCOURT, L. (1989). The Standard Penetration Test – State of the Art Report. In: Proc. XII ICSMFE. Rio de Janeiro. p.4. p. 2405 – 2416.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. (1978). Capacidade de Carga de Estacas a Partir de Valores SPT. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. Rio de Janeiro. v. 1. p.45 - 54.
- DINIZ, N C. Automação da Cartografia Geotécnica: Uma Ferramenta de Estudos e Projetos Para Avaliação Ambiental. Tese (Doutorado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998, 297 p.
- ELLISON, R. A.; McMILLAN, A. A.; LOTT, G. K. (2002). Ground characterization of the urban environment: a guide to best practice. NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUCNCIL. BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. Research Report RR/02/05.
- ELMASRI, R and NAVATHE, S B. (2000). Fundamentals of Database Systems. 3a. Edição. São Paulo: Books International, 2000. 1036 p.
- FERREIRA, M L C. Proposta Metodológica para o Desenvolvimento de uma Banco de Dados Geotécnico. Tese (Doutorado). São Carlos, São Paulo: EESC-USP, 1988, 348p.
- FERNÁNDEZ, T; IRIGARAY, C; HAMDOUNI, R. EL.; CHACÓN, J. (2006). Correlation between natural slope angle and rock mass strength rating in the Betic Cordillera, Granada, Spain. IN: Bull Eng Geol Environ. (2008) 67:153 - 164.
- FOLLE, D. 2002. O estudo geoestatístico de sondagens SPT para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, RS-BR, 219p.
- FOLLE, D. ; Costa, J.F.C.L. e Koppe, J.C. 2001. Geração de mapas de SPT: uma abordagem geoestatística. INFOGEO – Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia – CD-Rom, Curitiba-PR, setembro.
- FOLLE, D.; Costa, J.F.C.L. e Koppe, J.C. 2002. Variabilidade de propriedades geotécnicas: um procedimento para sua quantificação. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. Anais do XII COBRAMSEG.

- FOLLE, D.; Costa, J.F.C.L.; Koppe, J.C. e Raspa, G. 2006a. Metodologias de quantificação de heterogeneidades do solo para uso na engenharia geotécnica. *Revista Solos e Rochas*, São Paulo, Setembro-Dezembro, 29(3), p.297-310.
- FOLLE, D.; Costa, J.F.C.L.; Raspa, G.; Koppe, J.C. e Goulart, M. 2006b. Krigagem universal e funções aleatórias de ordem k na geração de mapas de resistência de solo, ângulo de atrito e tensão admissível. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2006, Curitiba. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Curitiba :
- FONTELES, H. R. N. (2003). Caracterização Geotécnica do Subsolo da Porção Nordeste do Município de Fortaleza (CE) com Base em Geoestatística. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 135p.
- FONTELES, H. R. N.; YAMAMOTO, J. K.; ROCHA, M. M.; GANDOLFI, N. (2006). Geoestatística Aplicada à Modelagem do Lençol Freático a Partir de Dados do Nível Estático: O Caso da Porção Nordeste de Fortaleza (CE). *Solos e Rochas*, São Paulo, Setembro – Dezembro, 29(3), p.331 – 340.
- FURRIER, M. (2007). Caracterização Geomorfológica e do Meio Físico da Folha João Pessoa – 1:100.000. Tese (Doutorado). Programa de Pós – Graduação em Geografia Física, Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. 213 p.
- GATRELL, A C. Concepts of Space and Geographical Data. IN: MAGUIRE, D.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. *Geographical Information Systems – Principles and Applications*. V. I. 2nd. Edição. New York, United States of America: Longman Scientific & Technical, 1994, p. 119-134.
- GENEVOIS, B. (1992). Efeito da Variabilidade Espacial dos Parâmetros do Solo na Capacidade de Carga de Uma Fundação Superficial. *Solos e Rochas*, v. 15, n.1, p. 43-56. CD - ROM.
- GENEVOIS, B.; OLIVEIRA, G. M. P. (2005). Aplicação de Geoestatística. In: GUSMÃO, A.D. et al. eds. *Geotecnia no Nordeste*. Recife, Editora Universitária da UFPE, 543p. p. 532-543.
- GUEDES, L. S. (2002). Monitoramento Geoambiental do Estuário do Rio Paraíba do Norte - PB por meio da Cartografia Digital e de Produtos de Sensoriamento Remoto. Dissertação de Mestrado. UFRN, 100p.

- GUSMÃO FILHO, J. A. (1982). Prática de fundações nas capitais nordestinas. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Anais. Recife - Olinda, v.7, p.189-206.
- HOWIE, J.A; DANIEL, C.R; JACKSON, R.S; WALKER, B. Comparison of energy measurement methods in the standard penetration test. Reported prepared for the U.S Bureau of Reclamation, Geotechnical Research Group, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2003.
- HUIJBREGTS, C. J. (1975). Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J. C.; McCullagh, M. J. ed. Display and analysis of spatial data. New York, John Wiley, 1975. p. 38-53.
- HUTCHINSON, M.F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Australia.
- HUTCHINSON, M.F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106: 211-232.
- HUTCHINSON, D.J. ; HARRAP, R. ; BALL, D. ; DIEDERICHS, M. ; KJELLAND, N. (2004). Development of geotechnical sensor network analysis capabilities for slope stability monitoring, within a GIS based decision support system. In : INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 9, Rio de Janeiro, 2004. v1. p.759-765.
- ISAAKS, E. H; SRIVASTAVA, R. M. (1989). *Applied Geostatistics*. Oxford University Press. 1989. 561 p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Banco de dados sobre movimentos de massa catastróficos em Petrópolis em 1940 e 1990. 1991 São Paulo.
- JANSSEN, R. *Multiobjective decision support for environmental management*, Kluwer Academic Publishers, 1992. 237p.
- JESUS, A.C.; MIRANDA, S.B.; DIAS, L.S.O.; BRITO JÚNIOR, J.A. e Burgos, P.C. 2005. Contribuição para o zoneamento das áreas com características geotécnicas semelhantes da Cidade de Salvador visando aplicação em mapeamento de risco. IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - Salvador- BA, 10p.



- KIM, Y-IL, PYEON, M – W and EO, Y -D. Development of Hypermap Database for ITS and GIS. IN: Computers Environment and Urban Systems. N. 24, p. 45-60. 2000.
- KITANIDIS, P. K.; VOMVORIS, E. G. A geostatistical approach to the inverse problem in groundwater modelling (steady state) and one dimensional simulations. Water Resources Research, 19 (3): 677-690, 1983.
- KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African, 52 (6): 119-139, 1951.
- LAJAUNIE, C. A geostatistical approach to air pollution modelling. In: Geostatistics for Natural Resources Characterization, ed. A. G. Journel e A. Marechal, 1984. p. 877-891.
- LANA, M. S.; GRIPP, A. H.; GRIPP, M. F. (2001). Fundamentos de Modelos Geoestatísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes em Rochas. Solos e Rochas, v. 24, n. 3, p. 221-222. CD - ROM.
- LANDIM, P. M. B. (1988). Introdução à Geoestatística. Laboratório de Geomatématica – Publicação Didática n.3. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro – UNESP. 33p.
- LANDIM, P. M. B. L. (2000). Introdução aos Métodos de Estimacão Espacial para Confecção de Mapas. Texto Didático 02. Departamento de Geologia Aplicada – IGCE; UNESP, Campus de Rio Claro.
- LANDIM, P.M.B. (2003). Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: Editora UNESP, 2 ed. ver. Ampl., 254p.
- LAXTON, J L and BECKEN, K. The design and Implementation of a Spatial Database for the Production of Geological Maps. IN: Computer & Geosciences. V. 22, N. 7, p.723-733. 1996.
- LEMOS, Niedja de Almeida Brito. Bacia Hidrográfica Urbanizada e Degradação ambiental: o Alto Vale do Rio Jaguaribe-João Pessoa (PB). Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2004.
- LIMA, R. H. C. (1997). Configuracão Geológico – Geotécnica da Região de Americana – SP, Utilizando Sondagens à Percussão de Simples Reconhecimento. Dissertação de

Mestrado. Curso de Pós - Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro - UNESP. 115p.

LISBOA FILHO, J L; IOCHPE, C. (1996). Introdução a Sistemas de Informações Geográficas com Ênfase em Banco de Dados. IN: Jornada de Atualização em Informática, XVI Congresso da SBC. Recife: Sociedade Brasileira de Computação, agosto 1996.

LOLLO, J. A. (1999). Cartas de consistência e compacidade de solos para a área urbana de Ilha Solteira (SP). In: 9º.CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE. São Pedro – SP. CD – ROM.

LUKIANCHUKI, J. A; OLIVEIRA, L. P. R; ESQUIVEL, E. R. (2011). Development of an Instrumented Subassembly for Energy Measurements in SPT Tests. In: XV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, Atenas. XV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011.

LUKIANCHUKI, J. A; ESQUIVEL, E. R.,BERNARDES, G. P. (2011). Interpretation of force and acceleration signals during hammer impact in SPT tests. In: XIV Pan- AM CGS Geotechnical Conference, 2011, Toronto. XIV Pan- AM CGS Geotechnical Conference, 2011.

MABESOONE, J. M.; ALHEIROS, M.M. (1988). Origem da bacia sedimentar costeira Pernambuco-Paraíba. REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIÊNCIAS. São Paulo 18(4): 476-482.

MARINHO, E. G. A. (2002). Geomorfologia da Área de proteção Ambiental da Barra do Rio Mamanguape e Adjacências, no Estado da Paraíba: Subsídios ao Zoneamento Geoambiental. Dissertação de Mestrado. João Pessoa. 189p. Mestrado em meio Ambiente PRODEMA- Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Sub Progra ma Universidade Federal da Paraíba/ Universidade Estadual da Paraíba.

MASSAD, F. (1985). Progressos Recentes dos Estudos Sobre as Argilas Quaternárias da Baixada Santista. ABMS. 1985. 20p.

MASSAD, F. (1999). Baixada Santista: Implicações da História Geológica no Projeto de Fundações. Conferência Pacheco Silva. ABMS. 1999. 24p.

- MELO, A, S, T.; ALVES, E. L. (2001). Os Aglomerados Subnormais dos vales do Jaguaribe e do Timbó: Análise geo-ambiental e qualidade do meio ambiente. Projeto de Pesquisa: Vale do Jaguaribe. Centro Universitário de João Pessoa – UNIPÊ. 132 p.
- MARINONI, O.; TIEDEMANN, J. (1998). Application of geostatistical methods for optimization of geological models. In: 8th INTERNATIONAL IAEG CONGRESS. Balkema, Rotterdam. vol. I. p. 235-242.
- MARTINS, V. P. (2006). Análise Ambiental E Legal Do Processo De Ocupação E Estruturação Urbana Da Cidade De João Pessoa / PB, Numa Visão Sistêmica. Dissertação (Mestrado). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2006. 146p.
- MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its applications. Paris, Lês Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleu, 1971. 211p.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. Economic Geology, 58 (8): 1246-1266, Dec. 1963.
- MEIRA, A D. Desenvolvimento de um Sistema de Informações Geotécnicas - GEOGIS e sua Aplicação ao Distrito de Cachoeira do Campo (Ouro Preto). Dissertação (Mestrado). Viçosa, Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa – UFV, 1996. 124 p.
- MEIRA, A D e CALIJU RI, M L. Desenvolvimento de um Sistema de Informação Visando a Automação do Processo de Mapeamento Geotécnico. IN: SIMPÓSIO DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA – INFOGEO, INFOGEO96, 1996, São Paulo, Anais do INFOGEO, V. I. São Paulo: ABMS/NRSP, 1996. p. 89-96.
- MENDES, R. M. M. (2001). Mapeamento Geotécnico da Área Central Urbana de São José do Rio Preto (SP) na Escala 1:10.000 como Subsídio ao Planejamento Urbano. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós – Graduação em Engenharia Urbana / Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia / Universidade Federal de São Carlos. 245p.
- MENDES, R. M.; LORANDI, R. (2002). Engineering Geology Mapping of the Urban Center Area of São José do Rio Preto (Brazil ) as an Aid to Urban Planning. In: Engineering Geology for Developing Countries – Proceedings of the 9th International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa. J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors. CD – ROM.

- MILITITSKY, J.; SCHNAID, F. (1995). Uso do SPT em Fundações – Possibilidades e Limitações, Avaliação Crítica. In: XXVII JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL. Tucuman, Argentina. Vol 6, p.125 – 138.
- MIQUELETTO, M. E DYMINSKI, A.S. 2004. Mapeamento do NSPT do subsolo da região central de Curitiba usando modelo neural de dois estágios, IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – Geosul 2004, ABMSNRPR/ SC, Curitiba/PR.
- MOREIRA, E. C. 1993. Uma Análise da Automatização do Processo de Mapeamento Geotécnico. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos- EESC-USP, 1993. 124 p.
- MORETTI, E. Documentação de Banco de Dados Geográficos. Disponível em: <http://www.fatorgis.com.br>. 1998. 5 p.
- NATHANAIL, C P e ROSENBAUM, M S. Spatial Management of Geotechnical data for Site Selection. IN: Engineering Geology, N.50, p. 347-356, 1998.
- NATHANAIL, C. P.; FERGUSON, C. C.; TUCKER, P. (1998a). The use of Bayesian statistics and prior information to design sampling strategies. In: 8th INTERNATIONAL IAEG CONGRESS. Balkema, Rotterdam. vol. I. p. 369-376.
- NATHANAIL, C. P.; FERGUSON, BROWN, M. J.; HOOKER, P.J. (1998b). A geostatistical approach to spatial risk assessment of lead in urban soils to assist planners. In: 8th INTERNATIONAL IAEG CONGRESS. Balkema, Rotterdam. vol. IV. p. 2433-2437.
- NÓBREGA, T. M. Q. (2002). A Problemática da Drenagem em Áreas Urbanas Planas: o Caso da Planície Costeira da Cidade de João Pessoa. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós – Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 131p.
- ODEBRECHT, E; SCHNAID, F; ROCHA, M.M; BERNARDES, G.P. Energy efficiency for Standard Penetration Test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE (2005), 1252 – 1263.
- OLEA, R. A. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Kansas, Kansas Geological Survey, 1975. 137p. (Series on Spatial Analysis, 2).
- OLEA, R. A. Measuring spatial dependence with semivariograms, Kansas, Kansas Geological Survey, 1977. 29p. (Series on Spatial Analysis 3).

- PACHECO, M.; LIMA, L. S. A. (1996). Um Critério Estatístico para Interpretação de Ensaio Geotécnicos. Solos e Rochas, v. 19, n.3, p. 177-188. CD - ROM.
- PALACIOS, I. V. (2010). Cimentaciones de Edificios em Condiciones Estáticas y Dinámicas: Casos de Estudio al W de la Ciudad de Granada. Tesis Doctoral. Área de Ingeniería Del Terreno, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada.
- PAREDES, E.A. Sistema de Informação geográfica. São Paulo: Érica, 1994, 700p.
- PERES, J. P. (1998). Geoestatística aplicada ao Mapeamento do Índice de Resistência à Penetração do Ensaio Padronizado do Solo (SPT). Dissertação de Mestrado. Curso de Pós - Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro - UNESP. 184p.
- PINHEIRO, J, ESPESCHIT, A M L. Solução GIS com CAD Microstation, 234 Programação MDL e Oracle. IN: CONGRESSO DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA - INFOGEO, INFOGEO94, 1994, São Paulo. Anais do Congresso de Informática em Geotecnia, v. 1. São Paulo: ABMS, Núcleo Regional de São Paulo (NRSP), março, 1994. p. 102-111.
- QUARESMA, A. R.; DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A. R.; ALMEIDA, M. S. S.; DANZIGER, F. (1998). Investigações Geotécnicas. In: HACHICH, W. et al. eds. Fundações - Teoria e Prática. Cap. 3. p.119-162.
- RENGERS, N.; HACK, R.; HUISMAN, M.; SLOB, S.; ZIGTERMAN, W. (2002). Information Technology Applied to Engineering Geology. In: Engineering Geology for Developing Countries – Proceedings of the 9th International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa. J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors. CD – ROM.
- RENDU, J.M.M. (1979). Normal and lognormal estimation. Math. Geol.,v.11, n.4, p.407- 422.
- RIBEIRO, R. C. H. (2000). Confiabilidade e Probabilidade em Geotecnia de Fundações Superficiais. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 110p.
- ROCHA, C. H. B. Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar. Juiz de Fora, MG: Ed. do Autor, 2000, 220p.

- RIBEIRO Jr., P.J. 1995. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de propriedades físicas do solo. Dissertação de mestrado, Agronomia, Universidade de São Paulo, USP, Brasil, 99p.
- RIVOIRARD, J. (1987). Teacher's aide: Two keys parameters when choosing the kriging neighbourhood. *Math. Geol.*, v.19, n.8, p.851-856.
- RUIZ, M.; FORNÉS, A.; RAMON, J.; ALORDA, J. (2002). GIS Tools for Landscape Impact Assessment. In: DESIGN AND DECISION SUPPORT SYSTEMS IN URBAN PLANNING. Proceedings of the 6th International Conference. p.200-209.
- SALAMUNI, E e STELLFELD, M C. Banco de Dados Geológicos Georreferenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como Base de Sistema de Informação Geográfica (SIG). *Boletim Paranaense de Geociências*. Curitiba – PR, N. 49, p. 21-31. 2001
- SCHMERTMANN, J. H. (1970) – Static cone to compute static settlement over sand – *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, v.96, n.SM.3, pg. 1011-1043.
- SCHNAID, F. (2000). Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. Oficina de textos. 189p.
- SCHUSTER, A.R.; BASTOS, C.A.B.; FOLLE, D. E RIBEIRO, K. 2007. Abordagens estatísticas do subsolo de Rio Grande/RS a partir de um sistema de informações geográficas de sondagens do SPT e CPT dinâmico. GEO-RS, Congresso Regional de Geotecnia, Ijuí/RS.
- SCRADEANU, D.; MARUNTEANU, C. (1998). Geostatistical evaluation of geological barriers for waste disposal in Cernavoda site. In: 8th INTERNATIONAL IAEG CONGRESS. Balkema, Rotterdam. vol. IV. p. 2445-2450.
- SETZER, V W.; SILVA, F. S. C. (2005). Bancos de Dados. 1 Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2005. 392 p.
- SILBERSCHATZ, A; KORTH, H F; SUDARSHAN, S. (1999). Sistemas de Banco de Dados. Tradução da 5ª. edição. Elsevier, 2006.
- SILVA, L. P. (2002). Análise Espacial de Riscos Ambientais na Bacia do Rio Cuiá Através de Técnicas de Geoprocessamento. Monografia de Graduação. Departamento de Geociências, CCEN, UFPB. João Pessoa, 57p.

- SILVA, A. C. S.; FILHO, L. A. P.; SILVA, T. C. (2002). Avaliação e Espacialização das Características dos Poços do Município de João Pessoa – Paraíba. In: SILVA, T. C. et al. eds Bacia do Rio Gramame: Hidrologia e Aspectos Ambientais para a Gestão dos seus Recursos Hídricos. João Pessoa, Editora Universitária – UFPB. Cap.2, p. 13-33.
- SKEMPTON, A. W. (1951). The bearing capacity of clays, proceedings, Building Research Congress, p. 180-189.
- SKEMPTON, A. W. (1986). Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. In: Géotechnique, 36, 3, 425 – 447.
- SOARES, V. B. (2005). A Prática de Fundações na Paraíba. In: GUSMÃO, A.D et al. eds. Geotecnia no Nordeste. Recife, Editora Universitária da UFPE, 543p. p. 265-281.
- SOARES, V.B. (2000). Histórico das fundações do Condomínio Residencial Torino, com vinte pavimentos, em João Pessoa/PB. SEFE IV – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. São Paulo (2000). Anais.
- SOUZA, N C D D. Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Aguaí: Com Base na Compartimentação por Formas de Relevo e Perfis Típicos de Alteração. V. 1. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1992. 270p.
- SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. (1998). Métodos de Investigação. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A.(1998). Geologia de Engenharia. ABGE. CNPq – FAPESP. Cap. 11. p. 163-196.
- SOUZA, C R G et al.. A Cartografia Geotécnica no Sistema Integrador de Informações Geoambientais para Zonas Costeiras de São Paulo (Projeto SIIGAL). IN:SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA,IV, 2001, Brasília – DF. Anais do 4o Congresso Brasileiro de Cartografia Geotécnica, em CD-Room. Brasília: ABGE, 2001. 14 p.
- STAIR, R.M. Princípios de Sistemas de Informação: uma abordagem gerencial. Rio de Janeiro, LTC Editora, 1998, 453p.
- STURARO, J. R. (1994). Mapeamento Geoestatístico de Propriedades Geológico – Geotécnicas Obtidas de Sondagens de Simples Reconhecimento. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 183p.

- STURARO, J. R.; LANDIM, P. M. B. (1996). Mapeamento Geoestatístico de Ensaios de Penetração Padronizada (SPT). Solos e Rochas, v. 19, n.1, p. 3-14. CD - ROM.
- STURARO, J. R.; LANDIM, P. M. B.; RIEDEL, P. S. (2000). O Emprego da Técnica Geoestatística da Krigagem Indicativa em Geotecnia Ambiental. Solos e Rochas, v. 23, n. 3, p. 157-164. CD - ROM.
- TALAMINI NETO, E T e CELESTINO, T B. Utilização de SIG e Geoestatística no Mapeamento Geotécnico do Subsolo de Curitiba: Aplicação ao Planejamento de Uso do Espaço Subterrâneo. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA – INFOGEO, INFOGEO2001, 2001, Curitiba – PR. Anais do INFOGEO em CDRom, Curitiba: ABMS, 2001. 10 p.
- TARVAINEM, T.; PAUKOLA, T. 1998. Use of Geochemical Databases to Delineate Risk Areas for Contaminated Groundwater. In: Journal of Geochemical Exploration. N 64, p.177-184. 1998.
- TEIXEIRA, A. H. (1996). Projeto e execução de fundações. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 3º. São Paulo, v.1, p.33-50.
- TEIXEIRA, A.L.A.; Christofolletti, A. Sistemas de informação geográfica – Dicionário ilustrado. Editora Hucitec Ltda. São Paulo. 1997. 244p.
- TEIXEIRA, A.H.; GODOY, N.S. (1996). Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: HACHICH, W. et al, ed. Fundações, teoria e prática. São Paulo, PINI. Cap. 7, p.227-264.
- TEIXEIRA, C. Z. (2003). Um estudo de viabilidade para fundações rasas de construções de pequeno porte na região de Belo Horizonte usando ferramentas de SIG. GEOPROCESSAMENTO 2003 – VI Curso de Especialização. Departamento de Cartografia – Instituto de Geociências – UFMG. 72 P.
- TUMA, L. S. R. (2004). Mapeamento Geotécnico da Grande João Pessoa – PB. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo. 2004. 211p.
- VALENTE, A. L. S. (2000). Proposta metodológica de um banco de dados geotécnico para uso em Sistema de Informações Geográficas (SIG) e sua aplicação no município de Porto Alegre, RS. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 1. p. 87 -95. Nov. 2000.



- VIEIRA, C. F. C.; PEREIRA, A. M. S.; DIAS, V. M.; CERQUEIRA NETO, J. X.; SILVA, F. R.; FERREIRA, L. A. G. (2005). Caracterização geológico – geotécnica das encostas urbanas do município de Salvador. IV COBRAE. Salvador. CD-ROM.
- WALSBY, J.; MARCHAND, A.; DACK, S. (1998). Information and GIS. Co – operating to manage contaminated land. Proceedings. BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. ENVIRONMENT AGENCY. P. 11.
- XAVIER, S.R. 1999. Estudo Geoestatístico do Subsolo da Usina Nuclear de Angra 2, RJ. Dissertação de mestrado , PUC-RJ, 204p.
- YAMAMOTO, J.K. (1994). Curso de geoestatística aplicada. Extensão universitária. São Paulo, apostila 82p.
- YAMAMOTO, J.K. (1998). A review of numerical methods for the interpolation for geological data. An. Acad. Bras. Ciên. v.70 n.1. p.91-116.
- YAMAMOTO, J.K. (2001). Avaliação e Classificação de Reservas Minerais. São Paulo. EDUSP.
- YUAÇA, F. Tutorial GIS para prefeituras. 2003. 40 p.
- YUAÇA, F.; BITTENCOURT, J.; MEREGE, P.; SCHMIDLIN, D. Introdução ao Geoprocessamento. In GIS BRASIL 97 – Curitiba – Paraná, 1997.



## APÊNDICE A



Tabela A.1: Parâmetros estatísticos da variável NA (cota em metros) utilizados na interpolação do lençol freático (período seco + poços subterrâneos + pontos extraídos da drenagem)

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 415  |
| Valor Mínimo | -9,2 |
| Valor Máximo | 41,7 |
| Média        | 6,9  |
| Desvio       | 7,8  |

Tabela A.2: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  médio entre 1 e 5 metros de profundidade no Setor 1

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 220  |
| Valor Mínimo | 2,3  |
| Valor Máximo | 22   |
| Média        | 10,2 |
| Desvio       | 4,0  |

Tabela A.3: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  a 6 metros de profundidade no Setor 1

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 275  |
| Valor Mínimo | 0    |
| Valor Máximo | 69   |
| Média        | 18,0 |
| Desvio       | 12,9 |

Tabela A.4: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  a 10 metros de profundidade no Setor 1

|              |     |
|--------------|-----|
| <i>Total</i> | 276 |
| Valor Mínimo | 0   |
| Valor Máximo | 60  |
| Média        | 7,9 |
| Desvio       | 8,1 |

Tabela A.5: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  a 14 metros de profundidade no Setor 1

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 269  |
| Valor Mínimo | 0    |
| Valor Máximo | 180  |
| Média        | 15,1 |
| Desvio       | 16,3 |

Tabela A.6: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  médio entre 1 a 5 metros de profundidade no Setor 2

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 151  |
| Valor Mínimo | 1,3  |
| Valor Máximo | 46,3 |
| Média        | 9,7  |
| Desvio       | 7,2  |

Tabela A.7: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  a 12 metros de profundidade no Setor 2

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 137  |
| Valor Mínimo | 0    |
| Valor Máximo | 90   |
| Média        | 31,7 |
| Desvio       | 16,3 |

Tabela A.8: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  médio entre 1 a 5 metros de profundidade no Setor 3

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 66   |
| Valor Mínimo | 2,3  |
| Valor Máximo | 75,8 |
| Média        | 14,3 |
| Desvio       | 14   |

Tabela A.9: Parâmetros estatísticos da variável  $N_{SPT}$  a 12 metros de profundidade no Setor 3

|              |      |
|--------------|------|
| <i>Total</i> | 34   |
| Valor Mínimo | 12   |
| Valor Máximo | 90   |
| Média        | 47,3 |
| Desvio       | 20,2 |