

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – Mestrado

AUGUSTO MONTOR DE FREITAS LUIZ

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE DADOS DO ENSAIO A PERCUSSÃO SPT E
CORRELAÇÕES COM O RELEVO PARA A CIDADE DE MARINGÁ-PR**

MARINGÁ
2016

AUGUSTO MONTOR DE FREITAS LUIZ

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE DADOS DO ENSAIO A PERCUSSÃO SPT E
CORRELAÇÕES COM O RELEVO PARA A CIDADE DE MARINGÁ-PR**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof.^a Dra. Nelcí Helena Maia Gutierrez

MARINGÁ
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

L953a Luiz, Augusto Montor de Freitas
Análise geoestatística de dados do ensaio a percussão SPT e correlações com o relevo para a cidade de Maringá-PR / Augusto Montor de Freitas Luiz. - - Maringá, 2016.
113 f. il., figs., tabs., mapas, grafs.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Nelci Helena Maia Gutierrez.

Dissertação (mestrado)- Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

1. Análise espacial. 2. Geoestatística. 3. Sistemas de Informações Geográficas (SIG). 4. Espaço urbano - Maringá, Paraná (Estado). I. Gutierrez, Nelci Helena Maia, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Engenharia Civil. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 21. ed. 624.151098162

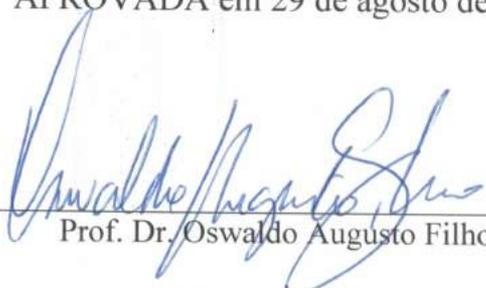
MGC-001733

AUGUSTO MONTOR DE FREITAS LUIZ

ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE DADOS DE SONDAGENS DE
SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT E CORRELAÇÕES
COM O RELEVO EM MARINGÁ-PR.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual
de Maringá, como parte das exigências do Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na
área de concentração Estruturas, para obtenção do
título de Mestre.

APROVADA em 29 de agosto de 2016.



Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

Membro USP



Prof. Dr. Cláudia Regina Gregio D Arce Filetti

Membro UEM



Prof. Dr. Nelci Helena Maia Gutierrez

Orientadora UEM

À minha família, amigos e professores que a todo momento foram fonte de incentivo e motivação.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Edson Freitas Luiz e minha mãe Neide Ozorio Montor Luiz por serem os maiores motivadores do desenvolvimento e crescimento de minha carreira profissional, e por todo apoio prestado, com muito esforço, em todas as minhas necessidades.

À minha irmã e amigos que me acalmaram nos momentos turbulentos e torceram pelo meu sucesso.

À Professora Dra. Nelcí H. M. Gutierrez por toda orientação prestada, seja de cunho pessoal, profissional e/ou nos assuntos pertinentes ao desenvolvimento do estudo.

Aos meus bons mestres professores que em algum momento e de alguma forma despertaram meu interesse pela docência.

À Calijuri Fundações pela confiança depositada e pela cooperação na disponibilização de dados para que fosse possível o desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Estadual de Maringá, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV) por fornecerem subsídios materiais para a realização deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de Mestrado.

O segredo da saúde da mente e do corpo está em não lamentar o passado, não se afligir com o futuro e em não antecipar preocupações, mas está em viver o momento presente com sabedoria e seriedade.

Buddha

RESUMO

O ensaio de simples reconhecimento com SPT, amplamente executado no Brasil, fornece dados de referência para projetos geotécnicos. Em função de sua execução, os dados obtidos são pontuais e na maioria das vezes estão dispersos, ou seja, não existe a preocupação em se reunir e analisar tais informações de forma conjunta para uma dada região. Além da grande dispersão destes dados, em função da sua natureza anisotrópica, a estatística clássica não consegue abordar a variabilidade espacial dos dados. Desta forma, a aplicação de métodos que utilizam análise espacial, em especial a geoestatística, se tornam essenciais no mapeamento de variáveis geotécnicas. Assim, o presente estudo se propõe a reunir, organizar e analisar dados provenientes de sondagens de simples reconhecimento com SPT, realizados no município de Maringá-Brasil, aplicando a técnica geoestatística de krigagem ordinária para o mapeamento do índice N do ensaio SPT com a profundidade, da superfície freática e do impenetrável ao SPT, a fim de identificar correlações com a geomorfologia da região em estudo, distinguindo-as em regiões de alta, média e baixa vertente. Para tal, 107 furos de sondagens foram selecionados e tratados, utilizando o módulo de análise geoestatística do software ArcGis. Constata-se que existe uma relação entre as espessuras das camadas do subsolo e a posição e forma da vertente, refletindo na profundidade de ocorrência do topo rochoso e, consequentemente, na resistência das camadas associadas ao índice N do ensaio SPT.

Palavras-chave: Análise espacial. N_{SPT} , SIG.

ABSTRACT

Standard Penetration Test (SPT) is widely applied in Brazil to determine geotechnical properties of soils. Due its performance, this test provides isolated data on a specific area that are rarely analyzed together. In addition to the great dispersion, classical statistics cannot properly describe the spatial variability of the data due to anisotropy. Therefore, the application of spatial analysis techniques, in particular, geostatistics, become essential in mapping geotechnical variables. Thus, this paper aims to collect, organize and analyze SPT data, carried out in Maringá-Brazil, using ordinary kriging as geostatistical method for mapping N value, water table and depth to bedrock in order to identify correlations between local geomorphology. To achieve the goal, 107 holes were selected and their data were analyzed using the ArcGIS Geostatistical Analyst extension. The results showed that there are correlations between the thickness of soil layers and its shape and position on slope, reflection on the depth to bedrock as well on the soil resistance related to N_{stp} -value.

Key words: Spatial analysis. N_{SPT} – value, GIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Boletim típico de sondagem	12
Figura 2.2 - Localização da Formação Serra Geral: a) no estado do Paraná; b) em destaque para a cidade de Maringá.....	13
Figura 2.3 - Latossolo Vermelho distroférico: a) observado em trincheira; b) observado ao microscópico óptico com luz polarizada.....	15
Figura 2.4 – Nitossolo Vermelho distroférico: a) observado em trincheira; b) observado ao microscópico óptico com luz polarizada	16
Figura 2.5 – Reconhecimento dos solos na região de Maringá com destaque para os Latossolos e Nitossolos	18
Figura 2.6 – a) Localização dos perfis no município de Maringá, b) perfil geo-pedológico 1 norte-sul, c) perfil geo-pedológico 2 leste-oeste	20
Figura 2.7 – Distribuição dos furos de sondagem na área de estudo.....	21
Figura 2.8 – Esquema da disposição do manto de intemperismo em diferentes climas.....	24
Figura 2.9 – Dinâmica da vertente considerada como sistema aberto.....	25
Figura 2.10 – Relações cronoposicionais em uma vertente.....	26
Figura 2.11 – Evolução de uma seção morfológica evidenciando as diferentes sequências cronodeposicionais	27
Figura 2.12 – Curva normal típica.....	33
Figura 2.13 – Histograma (a) e gráfico Q-Q plot (b) para uma amostra “a”.....	34
Figura 2.14 – Histograma (a) e gráfico Q-Q plot (b) para uma amostra “b”	34
Figura 2.15 – Forma da curva da distribuição normal.....	35
Figura 2.16 – Forma da curva da distribuição normal de acordo com o coeficiente de curtose	37
Figura 2.17 - Ilustração do conceito de variável regionalizada.....	41
Figura 2.18 - Estimativa do valor esperado de uma variável aleatória.....	43
Figura 2.19 - Variograma experimental hipotético	46
Figura 2.20 - Modelo padrão de um variograma teórico.....	47
Figura 2.21 - Modelos de ajuste ao variograma	48
Figura 3.1 - Localização do município de Maringá.....	50
Figura 3.2 – Locação dos furos de sondagem na região central do município	52
Figura 3.3 - Planilha com informações invariáveis para cada furo	53
Figura 3.4 - Esquema ilustrativo da junção pelo comando join	53

Figura 3.5 - Esquema dos produtos elaborados	54
Figura 3.6 - Histograma para a variável N na profundidade de 4 metros sem a aplicação de transformação	56
Figura 3.7 - Histograma para a variável N na profundidade de 4 metros com aplicação da transformação logarítmica	56
Figura 3.8 - Gráfico Normal Q-Q plot a variável N na profundidade de 4 metros com aplicação da transformação logarítmica	57
Figura 3.9 - Análise da superfície de tendência para modelagem do efeito global	57
Figura 3.10 - Variograma experimental da variável N	58
Figura 3.11 - Destaque da ferramenta Geostatistical Analyst no ArcGis.....	59
Figura 4.1 – Mapa hipsométrico do município de Maringá	61
Figura 4.2– Mapa de declividade do município de Maringá.....	62
Figura 4.3 – Histograma para o impenetrável ao SPT na seção norte.....	63
Figura 4.4 - Histograma para o impenetrável ao SPT na seção sul	64
Figura 4.5 – Gráfico Q-Q Plot para a seção norte	64
Figura 4.6 – Gráfico Q-Q Plot para a seção sul.....	64
Figura 4.7 – Variogramas experimentais nas direções: a) 0° e b) 90° para a seção norte.....	65
Figura 4.8 - Variogramas experimentais nas direções: a) 0° e b) 90° para a seção sul.....	66
Figura 4.9 - Profundidade do impenetrável ao SPT para uma microrregião mais ao norte do município de Maringá.....	67
Figura 4.10 - Profundidade do impenetrável ao SPT para uma microrregião mais ao sul do município de Maringá.....	68
Figura 4.11 - Histograma da variável N para as profundidades de 4 e 8 metros.....	69
Figura 4.12 - Histograma da variável N para as profundidades de 12, 16 e 25 metros.....	70
Figura 4.13 - Interpolação da variável N na profundidade de 4 metros	72
Figura 4.14 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 4 metros	73
Figura 4.15 – Interpolação da variável N na profundidade de 8 metros	74
Figura 4.16 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 8 metros	75
Figura 4.17 – Interpolação da variável N na profundidade de 12 metros	76
Figura 4.18 – Mapa de declividade e amostras na profundidade de 12 metros.....	77
Figura 4.19 – Interpolação da variável N na profundidade de 16 metros	78
Figura 4.20 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 16 metros	79
Figura 4.21 – Interpolação da variável N na profundidade de 25 metros	80
Figura 4.22 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 25 metros	81

Figura 4.23 - Histograma da variável profundidade do nível d'água	81
Figura 4.24 – Mapa da superfície freática	83
Figura 4.25 - Localização dos furos de sondagem no mapa hipsométrico e de declividade....	83
Figura 4.26 - Alinhamento dos perfil norte-sul e leste-oeste	84
Figura 4.27 – Perfil norte-sul evidenciando as camadas de solo evoluído, de alteração e topo rochoso	85
Figura 4.28 - Perfil leste-oeste evidenciando as camadas de solo evoluído, de alteração e topo rochoso	86
Figura 4.29 – Valor medido x valor predito a) impenetrável ao SPT na seção norte; b) impenetrável ao SPT na seção sul	87
Figura 4.30 - Valor medido x valor predito para a variável N: a) 4 metros; b) 8 metros.....	88
Figura 4.31 - Valor medido x valor predito para a variável N: c) 12 metros; d) 16 metros.....	88
Figura 4.32 - Valor medido x valor predito para a variável N: e) 25 metros	87
Figura 4.33 - Valor medido x valor predito para a superfície freática	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Número de sondagens (n), recomendado pela NBR 8036.....	8
Tabela 2.2 – Limite de N para a execução de alguns tipos de fundações	9
Tabela 2.3 - Valores típicos das características e parâmetros de comportamento dos solos na cidade de Maringá, para locais de alta a média vertente	17
Tabela 2.4 - Valores típicos das características dos solos constituintes do subsolo da cidade de Maringá, para locais de baixa vertente	18
Tabela 3.1 – Resumo das etapas e atividades executadas	49
Tabela 4.1 – Classes de declividade e suas áreas	62
Tabela 4.2 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT.....	65
Tabela 4.3– Parâmetros geoestatísticos para a superfície impenetrável ao SPT.....	66
Tabela 4.4 – Parâmetros geoestatísticos utilizados na interpolação do valor N.....	71
Tabela 4.5 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 4 metros	72
Tabela 4.6 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 8 metros	74
Tabela 4.7 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 12 metros	76
Tabela 4.8 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 16 metros	78
Tabela 4.9 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 25 metros	80
Tabela 4.10 – Parâmetros estatísticos da profundidade do nível d’água.....	82
Tabela 4.11 – Parâmetros geoestatísticos utilizados na interpolação do valor N.....	82

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1	ENSAIO DE PENETRAÇÃO PADRÃO – SPT	5
2.1.1	O SPT NO BRASIL E NO MUNDO	5
2.1.2	A PRÁTICA BRASILEIRA NA EXECUÇÃO DO SPT	6
2.1.3	O ÍNDICE N E SUA IMPORTÂNCIA NA GEOTECNIA.....	8
2.1.4	CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA DO SOLO ATRAVÉS DO ENSAIO SPT	10
2.2	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	12
2.2.1	GEOLOGIA DA REGIÃO	12
2.2.2	OS SOLOS DE MARINGÁ.....	14
2.2.3	BANCO DE DADOS	21
2.3	FATORES DE FORMAÇÃO DOS SOLOS.....	22
2.3.1	PRINCÍPIOS DA GEOMORFOLOGIA	23
2.3.2	INTEMPERISMO E DINÂMICA DAS VERTENTES.....	23
2.4	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	28
2.5	PRINCÍPIOS DA ESTATÍSTICA CLÁSSICA.....	30
2.5.1	MÉDIA ARITMÉTICA SIMPLES	30
2.5.2	MEDIANA.....	31
2.5.3	VARIÂNCIA E DESVIO PADRÃO	31
2.5.4	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	31
2.5.5	COVARIÂNCIA.....	32
2.5.6	DISTRIBUIÇÃO NORMAL OU DE GAUSS.....	32
2.5.7	COEFICIENTES DE ASSIMETRIA	35
2.5.7.1	COEFICIENTE DE SKEWNESS (OBLIQUIDADE).....	35
2.5.7.1	COEFICIENTE DE CURTOSE	36
2.6	PRINCÍPIOS DA ESTATÍSTICA ESPACIAL	37
2.6.1	OS MODELOS ESTATÍSTICOS NAS CIÊNCIAS DA TERRA	37
2.6.1	MODELOS DETERMINÍSTICOS DE INFERÊNCIA ESPACIAL.....	38

2.6.2	MODELOS NÃO-DETERMINÍSTICOS (PROBABILÍSTICOS)	39
2.7	CONCEITOS DA GEOESTATÍSTICA	40
2.7.1	VARIÁVEL REGIONALIZADA, VARIÁVEL ALEATÓRIA E FUNÇÃO ALEATÓRIA	40
2.7.2	TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA	42
2.7.3	MEDIDAS DE CONTINUIDADE ESPACIAL	44
2.7.3.1	VARIOGRAMA	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	A ÁREA DE ESTUDO	49
3.2	AQUISIÇÃO E SELEÇÃO DOS DADOS	50
3.2.1	SELEÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS BOLETINS DE SONDAJEM	50
3.2.2	PRODUTOS GERADOS PELO SIG	53
3.3	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA E PERFILAGEM	54
3.3.1	MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO PELO MÉTODO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA	54
3.3.1.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	55
3.3.1.2	ANÁLISE/MODELAGEM DA ESTRUTURA DA CORRELAÇÃO ESPACIAL E INTERPOLAÇÃO DA SUPERFÍCIE	58
3.3.2	SUPERFÍCIE FREÁTICA	59
3.3.3	PERFILAGEM	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	MODELO DIGITAL DO TERRENO E MAPAS DERIVADOS	61
4.2	INTERPOLAÇÕES POR KRIGAGEM ORDINÁRIA	63
4.2.1	IMPENETRÁVEL AO SPT	63
4.2.2	ÍNDICE N DO ENSAIO SPT	69
4.2.3	SUPERFÍCIE FREÁTICA	81
4.2.3	PERFILAGEM	84
4.3	ANÁLISE DE ERROS	878
5	CONCLUSÃO	871
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE A – VARIOGRAMAS PARA AS VARIÁVEIS N DO ENSAIO SPT E SUPERFÍCIE FREÁTICA	878

1 INTRODUÇÃO

O sucesso das obras geotécnicas depende fundamentalmente de um conhecimento abrangente das características e propriedades dos materiais constituintes do subsolo. Quando da impossibilidade da execução de ensaios laboratoriais, os ensaios de campo permitem uma definição satisfatória da estratigrafia do subsolo e uma estimativa mais realista das propriedades geotécnicas dos materiais envolvidos, indispensáveis na elaboração de projetos geotécnicos.

Usualmente, os dados obtidos em ensaios de prospecção do subsolo para uma mesma região, encontram-se, quando disponíveis, de forma dispersa, ou seja, não existe uma preocupação em reuni-los para apresentá-los à comunidade em geral que, porventura, carece de conhecimento a respeito dos solos sobre os quais irão apoiar as suas edificações.

A investigação do subsolo por meio de sondagens de simples reconhecimento com SPT (Standard Penetration Test), é uma prática utilizada pela engenharia geotécnica em grande parte do mundo e, especialmente no Brasil, para a elaboração de projetos de fundações. Foi desenvolvida visando a determinação da estratigrafia e classificação dos solos, a posição do nível d'água e a medida do índice de resistência à penetração dinâmica (N).

De acordo com Fletcher (1965), os primeiros relatos sobre a retirada de amostras de solo através do processo de cravação dinâmica ocorreram por volta do ano 1902, contudo não havia registro nem conferência quanto ao controle de cravação do tubo amostrador no solo. Antes disso, a investigação geológica era realizada através de escavação de poços de diâmetros consideráveis ou mediante perfuração com circulação de água.

Atualmente, o ensaio SPT consiste na cravação de um amostrador padrão até completar 45 cm de penetração no solo, sob a ação de um martelo de 65 kg caindo de uma altura de 75 cm, anotando-se o número de golpes para cada segmento de 15 cm. O parâmetro obtido neste ensaio é denominado índice de resistência à penetração "N", que corresponde ao número de golpes necessários à cravação dos últimos 30 cm do amostrador padrão no solo (NBR 6484, 2001).

O ensaio SPT possibilita, também, a retirada de amostras deformadas do subsolo, quando da cravação do amostrador de metro a metro, permitindo o contato direto com o solo através da análise tátil-visual das amostras, consolidando assim um método expedito de reconhecimento do subsolo.

A estimativa de parâmetros de resistência e compressibilidade de solos com base no N do SPT, bem como a caracterização expedita do subsolo são fundamentais para a determinação

da capacidade de carga dos solos, justificando a importância do índice N como ferramenta na concepção de um projeto de fundação.

Recentemente, o SPT passou a ser visto como um instrumento para a aquisição de dados básicos na elaboração de mapas ou cartas geotécnicas que, por sua vez, podem auxiliar no zoneamento urbano, evidenciando, por exemplo, áreas próprias ou impróprias para a ocupação humana, além de fornecer informações complementares numa fase preliminar de elaboração de projetos geotécnicos.

Em função da tendência de um solo oriundo de uma mesma rocha se comportar de maneira distinta, porém com algumas semelhanças, alia-se o estudo da Geotecnia ao da Estatística para compreender como estas relações se desenvolvem, a fim de identificar comportamentos ou propriedades semelhantes para o solo de uma região.

Dentro deste conceito, o mapeamento geotécnico permite visualizar, em escala regional, semelhanças e diferenças nas propriedades consideradas, ponderando também a variabilidade espacial dos dados por meio de uma ferramenta mais refinada da Estatística: a Geoestatística.

Na cidade de Maringá-PR, os solos constituintes do subsolo originaram-se da decomposição da rocha basáltica localizada na bacia do Paraná pelo processo de vulcanismo fissural ocorrido ao longo dos anos. Apesar de apresentarem determinada variabilidade intrínseca aos materiais naturais, observa-se um padrão no comportamento e nas propriedades de solos oriundos de uma mesma rocha mãe em função da geomorfologia e pedologia.

O presente estudo faz uso de dados provenientes de sondagens de simples reconhecimento com ensaios de penetração padrão (SPT) executados no município de Maringá-PR para criar um banco de dados em ambiente SIG, a fim de organizar, de forma sistematizada, tais informações para posterior obtenção de produtos cartográficos.

A escolha do SIG foi feita em função da licença de utilização que o Departamento de Engenharia Civil dispõe e, também, pela facilidade de manuseio que o software apresenta. Além disso, o módulo *Geostatistical Analyst*, incorporado ao ArcGis, permite a realização de todas as rotinas necessárias para a interpolação por krigagem ordinária.

Dentre as informações disponíveis nos relatórios de sondagens, optou-se por trabalhar com o índice N para cada profundidade, profundidade de ocorrência da rocha (impenetrável ao SPT) e profundidade de ocorrência do lençol freático.

1.1 OBJETIVO GERAL

Tendo em vista a disponibilidade de dados e de feições, propriedades e comportamentos característicos acerca do subsolo maringaense, o objetivo geral deste estudo foi reunir uma série de dados obtidos em sondagens de simples reconhecimento com SPT e elaborar um mapeamento geotécnico do subsolo a partir dos índices de resistência à penetração N, das profundidades de ocorrência dos níveis de alteração e pedogênese, bem como um mapeamento da superfície freática, aplicando-se análise espacial dos dados, mais especificamente a geoestatística pelo método da krigagem ordinária.

Além disso, propõe-se verificar possíveis relações desses dados com a topografia (áreas de topo, alta, média e baixa vertente), bem como com a forma destas vertentes, destacando-se os tipos pedológicos: Latossolo e Nitossolo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por meio da análise das sondagens disponíveis na região de estudo, pretende-se atingir o objetivo geral cumprindo-se os seguintes objetivos específicos:

- a) obter uma metodologia sistematizada para a criação de um banco de dados;
- b) caracterizar a variabilidade espacial dos dados verificando a aplicabilidade dos métodos geoestatísticos, a fim de realizar estimativas em locais não amostrados;
- c) gerar mapas da estimativa da profundidade de ocorrência do impenetrável ao SPT, da profundidade do lençol freático e dos valores do índice N em profundidades de interesse;
- d) avaliar as interpolações obtidas, bem como as incertezas envolvidas no processo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em quatro grandes itens, além desta introdução, que estão estruturadas conforme o que segue:

- a) o item 2, referente à revisão bibliográfica, apresenta os conceitos fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, além da caracterização da área de estudo;
- b) o item 3, referente à metodologia adotada, expõe as escolhas feitas ao longo do estudo, bem como discretiza as etapas necessárias para se atingir os objetivos propostos;

- c) o item 4 apresenta os produtos obtidos durante a etapa de análise e interpolação dos dados, além de discutir os resultados obtidos;
- d) o item 5 encerra esta dissertação apresentando as conclusões do estudo baseadas nos resultados obtidos e no referencial bibliográfico levantado nas etapas anteriores. Neste item, também, são citadas algumas das dificuldades encontradas e apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica realizada durante a pesquisa foi organizada em cinco grandes blocos que cobrem os principais temas abrangidos pelo estudo: Ensaio de penetração padrão - SPT, Fatores de formação dos solos, Banco de dados e SIG, Princípios da Estatística e Conceitos da Geoestatística.

2.1 ENSAIO DE PENETRAÇÃO PADRÃO – SPT

2.1.1 O SPT no Brasil e no mundo

O interesse do homem em conhecer o material sobre o qual ele alicerça as suas estruturas não é recente. Grandes estruturas foram erguidas sem nenhum registro sólido de que elas resistiriam ao longo do tempo, algumas delas se transformaram em ruínas, já outras, curiosamente, são motivo de orgulho para os povos que as construíram.

Com a Engenharia Geotécnica o caminho não se deu de forma diferenciada. Por muito tempo as decisões foram tomadas baseadas tão somente em experiências passadas sem nenhuma recomendação ou comprovação científica. A necessidade de se garantir segurança impulsionou, a estas e outras obras, estudos científicos buscando explicações para alguns fenômenos e, também, a garantia de se reproduzir uma determinada atividade baseando-se não somente nas experiências anteriores, mas também em comprovações teóricas. (BRAJA, 2010).

Dentro deste contexto, coloca-se o reconhecimento e identificação do subsolo como sendo uma atividade que, por algum tempo, foi realizada sem uma sistematização bem definida, não permitindo a sua reprodutibilidade em qualquer lugar por qualquer pessoa. Isso porque não havia padronização da metodologia a ser seguida.

Segundo Belincanta (1998), anteriormente ao ano 1902 o reconhecimento do subsolo era feito através da abertura de valas de diâmetros consideráveis ou da retirada de amostras através da perfuração com circulação de água, sendo importante ressaltar que durante esse processo de circulação não havia a preocupação em se determinar diretamente a resistência do solo. Aos poucos, a retirada de amostras foi sendo aprimorada com o surgimento dos processos de cravação dinâmica de tubos no solo, garantindo uma melhor conservação das mesmas. Porém, não havia um consenso sobre as medidas em geral como, por exemplo, dimensões do tubo amostrador, peso do martelo, altura de queda e contagem do número de golpes. Desta forma, não era possível utilizar este procedimento como ensaio confiável.

Uma das publicações que mais influenciaram na evolução do ensaio SPT foi escrita por Terzaghi, Peck e Mesri (1948), sendo a sua metodologia descrita através da utilização de tubos de revestimento de 63,5mm de diâmetro, hastes de 25,4mm e amostrador tipo Raymond de 51mm e 35mm de diâmetro externo e interno, respectivamente.

A adoção de valores padrão para os equipamentos e procedimentos seguidos durante a execução do ensaio SPT é de fundamental importância, pois segundo Hvorslev (1949, *apud* BELINCANTA, 1998) e posteriormente comprovado por este último autor, são fatores que influenciam na eficiência do ensaio. Caso contrário, fornecerão valores mascarados para o número de golpes necessários para cravar o amostrador no solo e, também, diferentes limites para a classificação quanto à compacidade dos solos arenosos e consistência dos solos argilosos.

Esta diversidade de métodos executivos do SPT gerou desconfiança no meio científico, a ponto de ser questionada a eficiência e até mesmo a confiabilidade do método para estimar a capacidade de carga dos solos entre outros parâmetros. (BELINCANTA, 1998).

O consenso sobre a padronização deste procedimento levou alguns anos até ser atingido em 1975, quando um grupo europeu decidiu pela normatização de quatro ensaios, dentre eles o Standard Penetration Test (SPT).

Segundo Belincanta (1998), no Brasil, as sondagens com SPT tiveram início dentro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), por volta de 1938 quando o pesquisador Odair Grillo, após contato com idealizadores do método, retornou ao Brasil cheio de motivação para disseminar o SPT como indicador da medida de resistência dos solos. Adotou-se o tubo com 51 mm de diâmetro externo bem como um martelo de 60 kg caindo de uma altura de 75 cm. O número de golpes necessários para a cravação do amostrador por 30 cm no solo ficou conhecido como N. Para a execução deste procedimento inicialmente se tomou como base a norma americana ASTM D1586-67, posteriormente sendo substituída pela norma brasileira NBR 6484/80, sendo o amostrador cravado por 45 cm através de golpes de martelo.

2.1.2 A prática brasileira na execução do SPT

Atualmente, a norma brasileira que regulamenta a execução do ensaio SPT é a NBR 6484/2001 – Sondagens de simples reconhecimento com SPT: Método de Ensaio, que aborda os assuntos relacionados à locação dos furos, aparelhagem padronizada, bem como sua descrição, procedimento de execução padrão e confecção de relatórios.

Segundo a norma supracitada, a aparelhagem é constituída por tubos de revestimento de aço com diâmetro nominal interno de 63,5mm podendo ser emendadas com luvas, hastes de

aço com diâmetro nominal interno de 25 mm e amostrador do tipo Raymond com diâmetro externo de $50,8\text{mm} \pm 2\text{ mm}$ e interno de $34,9\text{mm} \pm 2\text{ mm}$. O martelo pode ser vazado ou maciço (de forma prismática ou cilíndrica) sendo o mesmo acoplado a um coxim de madeira dura de modo que a massa do conjunto totalize 65 kg, sendo o seu acionamento realizado manualmente por meio de corda flexível, de sisal, e com auxílio de uma roldana fixa.

Segundo Belincanta (1998), além da metodologia recomendada pela norma, existem no Brasil ainda outras duas formas distintas de se executar o SPT, a saber:

- a) Idem ao método recomendado pela norma, porém o acionamento do martelo se dá através de um cabo de aço manual, auxiliado por uma roldana fixa;
- b) Sondagem executada com avanço da perfuração feita através da cravação do amostrador no solo de forma sucessiva.

No norte do Paraná é comum a execução, além da forma exposta pela NBR 6484/2001, de sondagem em conformidade à citada no item b, sendo esta realizada sem a utilização de trado helicoidal ou lavagem por circulação de água. O amostrador é cravado até a cota de ensaio, permitindo o avanço da perfuração, e então retirado para dar início ao ensaio SPT através da cravação dos 45 cm no solo. (BELINCANTA, 1998).

Contudo, o método mais usual é a sondagem de simples reconhecimento com perfuração por circulação de água. Neste método executa-se normalmente o SPT, de metro a metro, sendo a perfuração realizada com trado helicoidal até o nível d'água ou até a existência de solo de elevada resistência e, abaixo disto, a perfuração é realizada por meio de circulação de água que é um sistema constituído basicamente por uma bomba motorizada, uma composição de hastes com diâmetro interno de 25 mm e um trépano de lavagem. A água é injetada nos tubos até o trépano de lavagem de forma a desagregar as partículas de solo e, conseqüentemente, trazendo as mesmas à superfície, onde são coletadas em uma bacia de descarga. (BELINCANTA; PEIXOTO; MIGUEL, 2010).

O procedimento descrito anteriormente permite o avanço da perfuração até o topo de rocha. A partir daí, caso se deseje um mapeamento mais abrangente, deve-se introduzir o sistema de sondagem rotativa.

A escolha do número de furos a ser investigado é função da área em planta da edificação que será futuramente construída no terreno, de acordo com a NBR 8036/83 (Tabela 2.1). Conforme recomendado por Hachich *et al.*(1998), no caso de edificações, procura-se dispor as sondagens em posições próximas aos limites de projeção das mesmas e nos pontos de maior concentração de carga, tomando o cuidado para que estes pontos estejam espaçados de 15 a 30 metros quando possível.

Tabela 2.1 – Número de sondagens (n), recomendado pela NBR 8036

Área do edifício (A), projetada em planta, em m ²	Número de sondagens (n)	Número mínimo de sondagens
≤200	2	2
200 a 1200	A/200	3
1200 a 2400	6+(A-1200)/400	7
>2400	Nota (1)	9

Nota (1) - o número de sondagens deve ser estabelecido em função das condições específicas da obra.

Fonte: Belincanta (1998)

2.1.3 O índice N e sua importância na Geotecnia

O SPT atualmente se consiste no ensaio mais buscado quando se almeja obter parâmetros para a elaboração de projetos de fundações e outras obras geotécnicas. Isso porque o índice N nos possibilita estimar qual a capacidade de carga de um determinado tipo de solo.

O valor do N é utilizado diretamente como, por exemplo, no auxílio para se optar entre uma gama de tipos de fundações existentes atualmente. Para Hachich *et al.*:

As ferramentas convencionais – baldes, trados, “clamshells” – não são capazes de escavar rochas duras e tem dificuldade em escavar até mesmo camadas de solo com SPT>50. [...] (HACHICH *et al.*, 1991, p. 352).

Como podemos perceber o valor de N é um limitante em se tratando da escolha de fundações, uma vez que, solos muito “duros” oferecem demasiada resistência à escavação seja ela manual ou mecânica. Por outro lado, solos “moles” ou com baixo valor de N não são indicados para receber cargas elevadas sendo necessário aumentar a profundidade de assentamento das fundações ou até mesmo verificar outras soluções.

A Tabela 2.2, elaborada em conformidade com a recomendação de Aoki e Cintra (2003; 2010), estabelece, em termos práticos, para cada tipo de estaca ou tubulão, os limites máximos para a penetrabilidade no terreno (cravabilidade ou escavabilidade), desde que não haja recursos executivos adicionais para garantir a penetração exigida. Desta forma, para cada elemento estrutural de fundação, em um estudo de variabilidade espacial do N, haverá uma superfície resistente ou impenetrável correspondente (FONTELES, 2003).

A Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE, 1999) recomenda que a partir de N igual ou superior a 50 o material seja considerado como

“impenetrável” ao SPT. Contudo, rotineiramente, dentro da Geotecnia, assume-se índice N superior a 60 como indicativo de material típico de topo rochoso.

Tabela 2.2 – Limite de N para a execução de alguns tipos de fundações

Elemento estrutural	Limite N para o equipamento de execução	Observação
Estaca pré-moldada de concreto $\phi < 30\text{cm}$	$15 < N \leq 25$	Cuidado com tensão de compressão ou tração excessiva na cravação
Estaca pré-moldada de concreto $\phi \geq 30\text{cm}$	$25 < N \leq 35$	
Estaca de perfil metálico	$25 < N \leq 55$	Pode ocorrer desvio na cravação
Estaca tubada (oca, ponta fechada)	$20 < N \leq 40$	Cuidado com a pressão artesianas
Estaca Strauss	$10 < N \leq 25$	Nível d'água é limitante
Estaca Franki em solos arenosos	$8 < N \leq 15$	Cuidado com a transição de camadas moles
Estaca Franki em solos argilosos	$20 < N \leq 40$	Cuidado com a execução em argila mole
Estaca escavada com lama	$30 < N \leq 80$	Cuidado com a limpeza do fundo da cava, abastecimento de concreto e bota-fora
Tubulão sob ar comprimido	$20 < N \leq 60$	Cuidado com o mal do mergulhador
Tubulão a céu aberto	$20 < N \leq 60$	Nível d'água é limitante
Estaca hélice contínua	$20 < N \leq 45$	Abastecimento de concreto, bota-fora
Estaca ômega	$20 < N \leq 40$	Abastecimento de concreto, solo mole
Estaca raiz	$N \geq 60$	Peculiaridades executivas, solo mole, penetra em rocha sã

Fonte: Aoki e Cintra (2003; 2010)

Rotineiramente, o ensaio SPT vem sendo, também, utilizado para se estimar outros parâmetros geotécnicos que são resultantes de ensaios laboratoriais mais complexos. Diversos autores publicaram estudos buscando compatibilizar o N com outras propriedades do solo, sendo as publicações com maior destaque citadas por Hachich *et al* (1998) e elucidadas a seguir:

- Estudo de Meyerhof – publicado no *Jornal de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ASCE)*, em 1956, estabelecendo relação entre a capacidade de carga e recalque de fundações diretas por estacas e resistências estáticas.
- Estudo de De Mello – apresentado na Quarta Conferência Pan-Americana de Mecânica dos Solos, em 1971, correlacionando, para fundações rasas sobre argila, pressão admissível ou de ruptura determinadas em provas de carga diretas com SPT.
- Reinterpretação de Décourt (1989) dos estudos de De Mello (1967, 1971) sobre o trabalho de Gibbs e Holtz (1957) – estabelecendo correlações entre o N e o ângulo de atrito interno ϕ de areias.
- Décourt (1989) também sugere outras correlações em seus trabalhos como, por exemplo, a resistência não drenada de argilas saturadas *versus* N e o módulo de elasticidade do solo *versus* N.

Soares (2005) destaca ainda, outros estudos envolvendo tal parâmetro:

- 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 levando em consideração os solos do perfil e valores do índice N (obtidos por correlações com ensaio CPT).
- Teixeira (1996) demonstrou fórmulas para estimar a tensão admissível de solos argilosos e arenosos em função do índice N.
- Teixeira & Godoy (1996) propuseram correlação para a estimativa do módulo de deformabilidade quando da indisponibilidade da execução de ensaios laboratoriais ou provas de cargas.

Estas correlações aliadas à simplicidade de execução do SPT fizeram do mesmo, um ensaio altamente reproduzido e estudado em todo o mundo. Entretanto, a execução deste procedimento não se limita apenas à obtenção de valores, uma vez que o ensaio também permite o contato direto com os solos amostrados através da retirada de amostras deformadas de metro a metro.

2.1.4 Classificação expedita do solo através do ensaio SPT

Logo após a contagem dos golpes necessários para quantificar o índice N tem início a retirada de amostras de solo que ficaram retidas no amostrador. Em geral, são retiradas amostras de metro a metro, que coincidem com a profundidade onde o SPT foi executado. Assim, logo

após a anotação do valor numérico do número de golpes referentes a cada parcela de 15 cm de penetração do amostrador no solo, o operador do ensaio retira o barrilete amostrador para então obter as amostras.

Estas amostras devem ser acondicionadas em recipientes com tampa que preservem ao máximo as características naturais do solo retirado como, por exemplo, umidade, cor e textura para serem, posteriormente, analisadas por pessoal técnico.

Segundo Belincanta, Peixoto e Miguel (2010) a identificação do solo se inicia com a ordenação das amostras de acordo com a sua profundidade de ocorrência. Logo em seguida, procede-se a identificação propriamente dita mediante a análise da granulometria (textura), onde os solos são divididos, necessariamente, em solos grossos (areias e pedregulhos) ou solos finos (siltes e argilas). Esta etapa é marcada pela observação a olho nu das partículas que constituem o solo, sendo possível distinguir entre grãos com tamanho superior a um décimo de milímetro. Estes materiais podem, também, ser diferenciados mediante análise tátil onde a plasticidade sensível aos dedos tem grande importância. Os siltes e argilas são mais macios e moldáveis, já as areias oferecem textura áspera e apresentam pouca ou nenhuma plasticidade.

Como os solos naturais são formados por processos físicos e químicos é comum encontrar diferentes materiais resultantes misturados. Assim sendo, a NBR 6484/2001 recomenda que sejam utilizadas no máximo três frações de solo na nomenclatura de determinada camada, por exemplo, argila silto-arenosa. Com relação à cor presente nas amostras, a norma recomenda que sejam utilizadas somente as duas cores predominantes e, quando houver mais cores presentes, deverá ser utilizado o termo “variegado”.

A elaboração do perfil geológico-geotécnico do solo se faz possível a partir das análises descritas anteriormente. Devido ao fato desta etapa ser baseada em critérios subjetivos orientados pela NBR 6484/2001, quanto maior for a experiência do responsável por esta classificação, melhor será a confiabilidade na classificação das amostras e, por conseguinte do mapeamento do subsolo. A Figura 2.1 exibe um perfil típico em um boletim de sondagem.

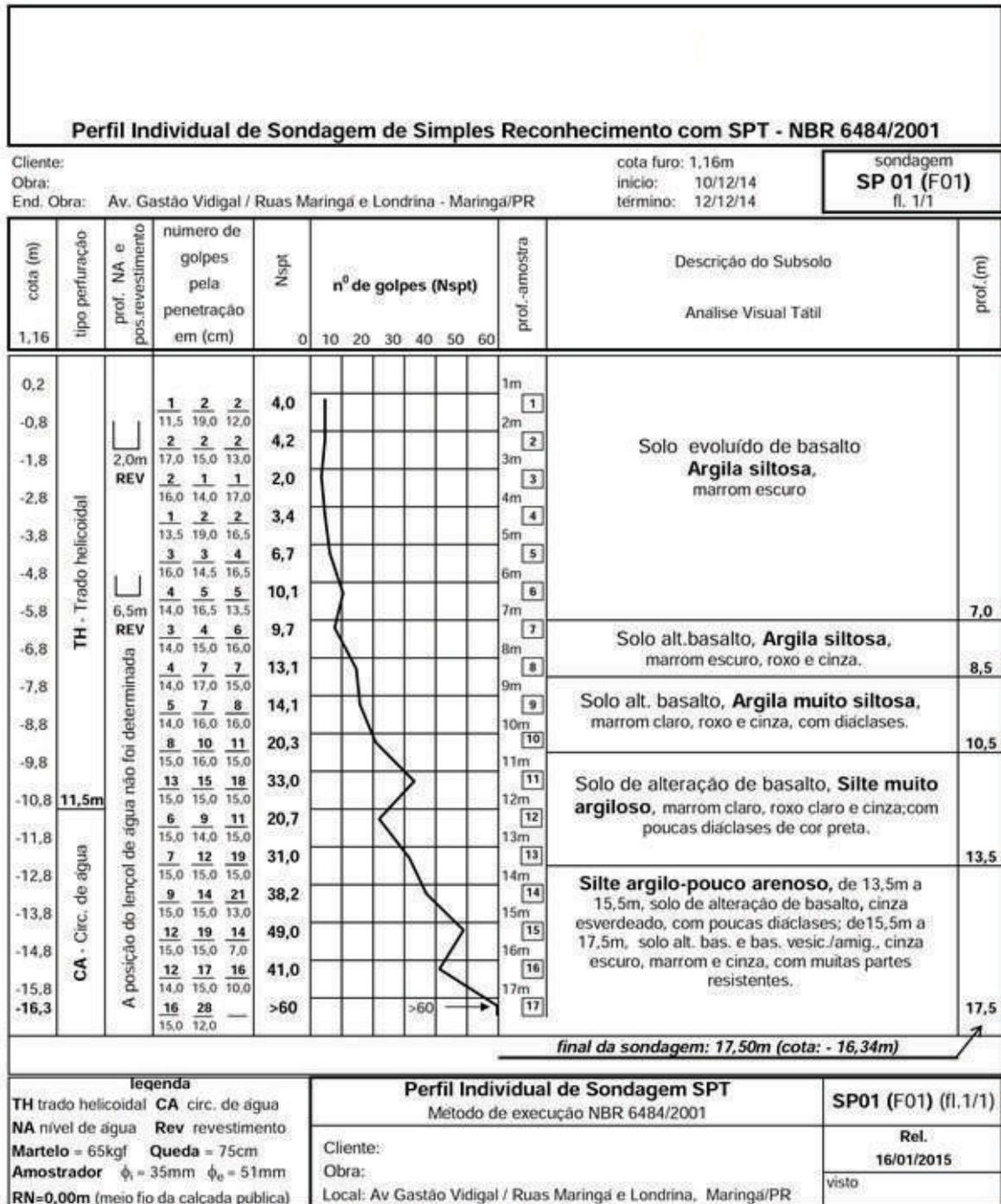


Figura 2.1 - Boletim típico de sondagem

2.2 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

2.2.1 Geologia da região

A cidade de Maringá está implantada sobre a Formação Serra Geral (Figuras 2.2a e 2.2b), formada por sucessivos derrames vulcânicos ocorridos ao longo dos anos. Estes eventos

vulcânicos foram responsáveis pela formação da rocha basáltica sobre a qual está assentada a Bacia do Paraná e que, em geral, apresentam espessuras variáveis de acordo com o número de derrames, posição dentro da vertente, grau de intemperismo entre outros fatores.

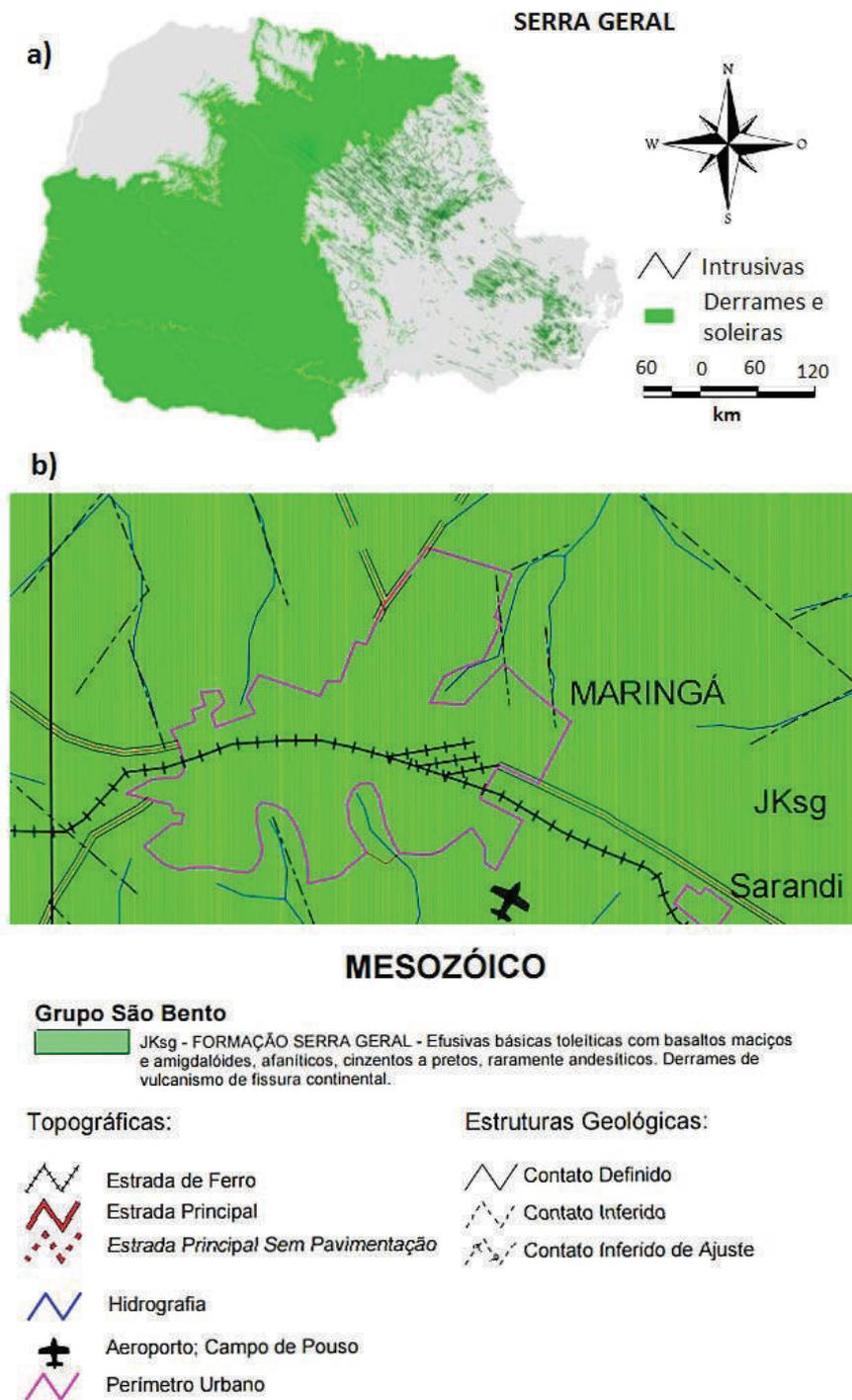


Figura 2.2 – Localização da Formação Serra Geral: a) no estado do Paraná; b) em destaque para a cidade de Maringá

Fonte: adaptada de Mineropar (2013)

A rocha basáltica presente na região de Maringá, originária de vulcanismo fissural, é responsável pela cobertura de praticamente todo o terceiro planalto paranaense. Os derrames vulcânicos que aí advieram são caracterizados por terem ocorrido de forma horizontal, tal fator é determinante para a atual configuração de colinas suaves onduladas com solos profundos e com elevados teores de nutrientes (JUNIOR *et al.*, 2010).

Gutierrez, Nóbrega e Luiz (2015) ressaltam que as rochas formadas por esse vulcanismo têm como particularidade importante a variação da estrutura. Como os derrames apresentam espessuras variáveis, de alguns metros a uma centena de metros, alternam-se níveis maciços e vesiculares/amigdaloidais também de espessuras variadas. A porção maciça tem resistência mecânica mais elevada e é mais resistente ao intemperismo químico (alteração) do que aquelas vesiculares e/ou amigdaloidais.

Os níveis maciços mais espessos e menos fraturados tendem a sobressair na paisagem, seja na forma de rupturas de declividade acentuadas na vertente, seja como patamares, degraus, topos isolados (morrotes) e afloramentos de blocos de rocha e/ou lajeados associados. Assim, é frequente nessas áreas de basalto a morfologia do relevo apresentar reflexos da estrutura dos derrames. A ocorrência de diferentes níveis topográficos formando patamares, extensos ou restritos, é comum nessas áreas (GUTIERREZ; NÓBREGA; LUIZ, 2015).

Por outro lado, o intemperismo químico gera mantos de alteração sobre essas rochas que podem mascarar na superfície a variação da estrutura, criando vertentes de formas convexas ou convexo-retilíneas. O intemperismo ocorrido na região, acelerado por condições climáticas tropicais e subtropicais, produzem mudanças graduais e profundas no basalto originando camadas de solo com níveis de alteração diferenciados.

2.2.2 Os Solos de Maringá

Segundo Nakashima e Nóbrega (2003), nas regiões de topo (alta e média vertente) predomina o Latossolo Vermelho de textura argilosa. À medida que se caminha para as regiões de vale (baixa vertente) começam a ser evidenciados os Nitossolos Vermelhos.

Os Latossolos são solos altamente intemperizados e apresentam em sua composição argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio, silício entre outros minerais. Os Latossolos Vermelhos são um tipo de Latossolo onde a quantidade de óxidos de ferro é predominante, justificando a sua acentuada coloração vermelha. Segundo a EMBRAPA (2013) estes solos ocorrem predominantemente em regiões de relevo plano e suave ondulado, como é o caso da região de Maringá.

O Latossolo Vermelho distroférico apresenta estrutura microgranular conferindo-lhe alta porosidade, sendo designado como material de estrutura maciça porosa.

Gutierrez (2005) observa que esse material é homogêneo ao longo do seu volume (vertical) em termos de cor (vermelho escuro) e textura (argilosa a muito argilosa), quando muito evoluído como pode ser visto na Figura 2.3a. Ao microscópio óptico, as análises micromorfológicas mostram (Figura 2.3b) que o material é predominantemente constituído por microagregados de argila (M), de formas arredondadas a subarredondadas, com porosidade estrutural altamente comunicante (V) e com presença de grãos do esqueleto (fração areia) constituídos por minerais escuros (ilmenita, magnetita) e quartzo (Q).

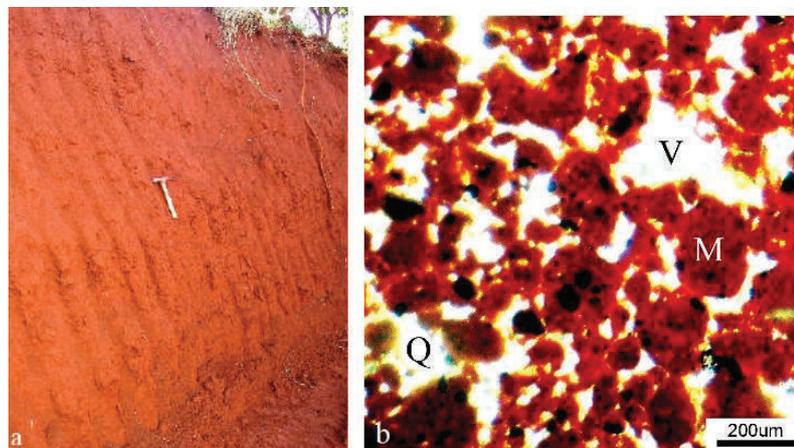


Figura 2.3 – Latossolo Vermelho distroférico: a) observado em trincheira; b) observado ao microscópio óptico com luz polarizada

Fonte: Gutierrez (2005)

Os Nitossolos são definidos pela EMBRAPA (2013) como sendo um material mineral, não hidromórfico, com textura argilosa ou muito argilosa (teores de argila superiores a 350g/kg de solo) de ocorrência em regiões onde o relevo varia de suave ondulado a forte ondulado. Os Nitossolos Vermelhos apresentam maior suscetibilidade aos processos erosivos quando em áreas mais declivosas ou em fundos de vales.

Na Figura 2.4a observam-se os arranjos poliédricos característicos dos Nitossolos. Os blocos poliédricos são delimitados por rede de fissuras de maior abertura (fendas ou rachaduras) que se conectam entre si. A mesma constatação pode ser feita na escala micro onde se observam (Figura 2.4b) blocos poliédricos milimétricos, cuja rede de fissuras é constituída por microfissuras com fraca conectividade (porosidade textural) (GUTIERREZ, 2005).

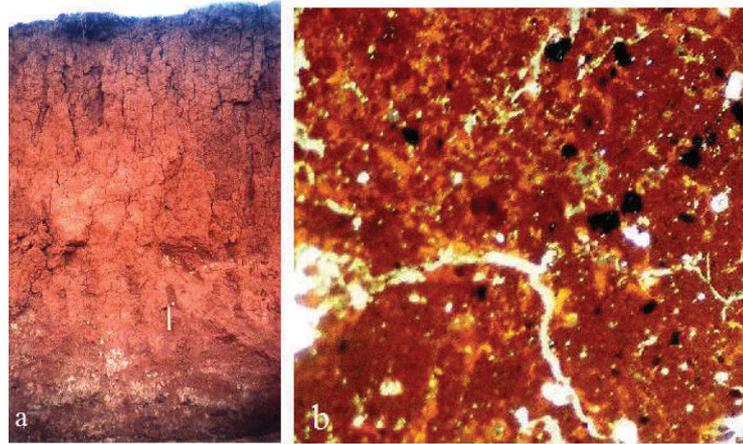


Figura 2.4 – Nitossolo Vermelho distroférico: a) observado em trincheira; b) observado ao microscópico óptico com luz polarizada

Fonte: Gutierrez (2005)

Gutierrez e Belincanta (2004) realizaram um estudo do subsolo maringaense, em locais de alta e média vertente, onde constataram a existência de dois conjuntos bem individualizados em termos de cor, características e comportamento:

- a) Um conjunto superior constituído de argila siltosa porosa de cor marrom avermelhada, com espessura variável, chegando a apresentar espessuras de até 12 metros. Este conjunto corresponde a material pedologicamente evoluído – Latossolo Vermelho distroférico;
- b) Um conjunto inferior constituído de argila siltosa e silte argilo-arenoso de cores predominantemente roxo e cinza amarelado, com a presença de diáclases de cor preta ou amarela. Este conjunto corresponde ao nível de alteração do basalto – o Saprolito.

Segundo observações realizadas pelos mesmos autores, estes dois pacotes podem se estender, na região central de Maringá, até a profundidade de 31 metros onde encontra o manto basáltico formador do topo rochoso. Ainda segundo observações realizadas em sondagens de simples reconhecimento com SPT, o nível de água se posiciona quase sempre na camada de alteração de rocha.

A Tabela 2.3 mostra as faixas de variação dos principais parâmetros geotécnicos dos horizontes B_w (Latossolo Vermelho Distroférico) e C (Saprolito) para locais de alta e média vertente.

Tabela 2.3 - Valores típicos das características e parâmetros de comportamento dos solos na cidade de Maringá, para locais de alta a média vertente

Discriminação	Latossolo Vermelho	Saprolito
	Distroférico (Horizonte B _w)	(Horizonte C) ⁽¹⁾
Peso esp. solo (kN/m ³)	12,5 – 16,5	15,5 - 18,0
Peso esp. sólidos (kN/m ³)	29,7– 30,7	28,0 - 30,5
Umidade natural (%)	29 – 35	43 – 55
Grau de saturação (%)	37 – 70	60 – 100
Índice de vazios	1,50 - 2,30	1,25 – 2,00
Porosidade (%)	60 – 70	55 - 67
Fração argila (%)	52 – 78	48 - 60
Fração silte (%)	15 – 38	26 - 32
Fração areia (%)	5 – 10	13 - 17
Limite de liquidez (%)	53 – 61	60 – 95
Limite de plasticidade (%)	39 – 45	41 – 66
Índice de plasticidade (%)	14 – 22	19 – 40
Atividade coloidal (%)	0,20 – 0,35	0,34 – 0,75
Peso esp. seco máx. (EN) (kN/m ³)	14,0 – 15,5	12,5 – 13,5
Umidade ótima (EN) (%)	28 – 34	37 – 42
CBR (EN) (%)	7 – 25	5 - 16
Expansão (%)	0,1 – 0,3	0,4 – 4,2
Tensão pré-adensamento (kPa)	(N _{SPT})/(0,020 a 0,035) ⁽²⁾	
Índice de compressão natural	0,500 - 0,750	0,700 - 1,100
Ângulo de atrito interno (efetivo) (°)	27 – 32	22 – 26
Intercepto de coesão (kPa)	10 – 30	30-100
Envoltória característica (efetiva)	10 + σ'tg30°	30 + σ'tg24°
Coef. de permeabilidade (cm/s)	10 ⁻³	--

Notas: ⁽¹⁾ Estes dados referem-se aos solos do Campus sede da UEM, não contemplam os solos próximos da região do topo rochoso ou abaixo do nível de água natural; ⁽²⁾ N_{SPT} - índice de resistência à penetração no ensaio SPT.

Fonte: Gutierrez e Belincanta (2004)

Observa-se que a camada de solo pedologicamente evoluído, Latossolo Vermelho Distroférico, se apresenta com índice de vazios variando de 1,50 a 2,30, o que lhe confere uma porosidade de até 70%. Em função também de seu teor de umidade, que é da ordem de 32%, e de seu grau de saturação inferior a 70%, este solo, sob carregamento, geralmente é metaestável (GUTIERREZ, 2005), apresentando-se com tendência ao colapso quando do aumento do teor de umidade. Assim, as fundações diretas ou mesmo profundas, assentes neste tipo de solo evoluído, normalmente não tem apresentado bom desempenho.

Os Nitossolos, por apresentarem uma estrutura distinta, em blocos poliédricos, mais contínua, onde prevalece a porosidade intra-agregados (porosidade textural), sob carregamento, são menos susceptíveis à ocorrência do colapso. No entanto, para uso em camadas de aterro, compactadas, pela microestrutura apresentada e plasticidade não são indicados devido à tendência de apresentar expansão. (GUTIERREZ; NÓBREGA; LUIZ, 2015)

Na Tabela 2.4 são apresentadas as faixas de variações dos valores típicos das características dos solos constituintes dos horizontes B_{nítico} e B_w (Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico) e C (Saprolito) obtidos para locais de baixa vertente da cidade de Maringá. A Figura 2.5 ilustra parte do levantamento realizado pela EMBRAPA (2007) acerca do reconhecimento dos solos do estado do Paraná.

Tabela 2.4 - Valores típicos das características dos solos constituintes do subsolo da cidade de Maringá, para locais de baixa vertente

Discriminação	Nitossolo Vermelho Eutroférico		Saprolito
	Horizonte B _{nítico}	Horizonte B _w	(Horizonte C) ⁽¹⁾
Peso esp. solo	15,0 - 16,0	13,5 - 15,0	-
Peso esp. sólidos	29,8 - 30,3	30,1 - 30,2	29,7 - 30,2
Umidade natural	38 - 40	38 - 40	40 - 58
Grau de saturação	68 - 73	57 - 64	-
Índice de vazios	1,60 - 1,80	1,80 - 2,00	-
Porosidade	62 - 64	65 - 67	-
Fração argila	79 - 80	62 - 76	28 - 34
Fração silte	15 - 16	18 - 27	42 - 48
Fração areia	5 - 6	6 - 11	22 - 30
Limite de liquidez	79 - 84	72 - 76	63 - 65
Limite de plasticidade	43 - 49	47 - 49	46 - 49
Índice de plasticidade	29 - 40	23 - 29	16 - 18
Atividade coloidal	0,36 - 0,51	0,30 - 0,47	0,47 - 0,65

Notas: ⁽¹⁾ Estes dados referem-se aos solos localizados na região periférica do município e não contemplam os solos próximos da região do topo rochoso ou abaixo do nível de água.

Fonte: Gutierrez (2005); Gutierrez, Nóbrega e Luiz (2015)

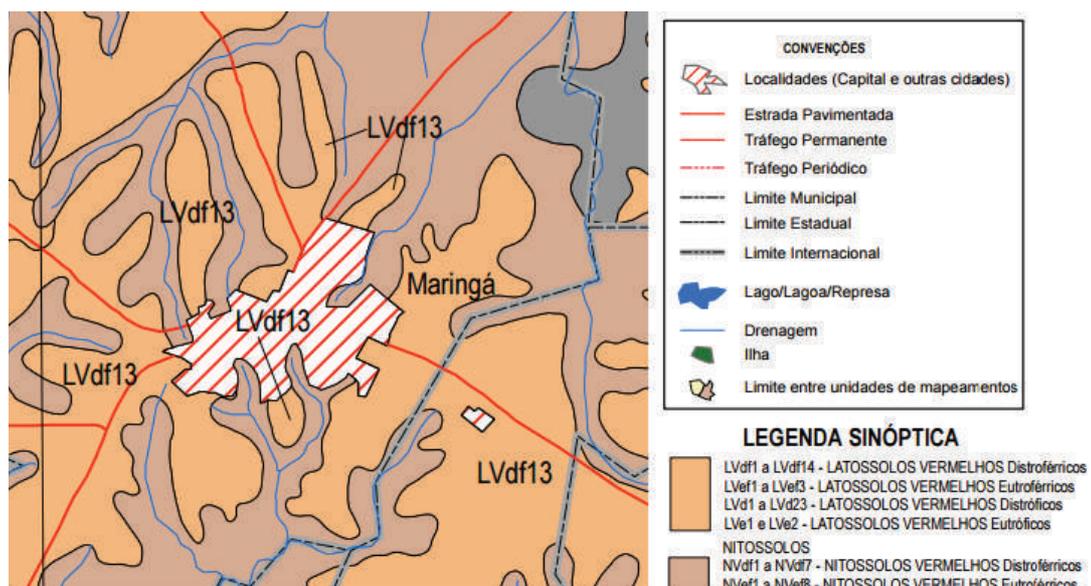


Figura 2.5 – Reconhecimento dos solos na região de Maringá com destaque para os Latossolos e Nitossolos

Fonte: EMBRAPA (2007)

Os Nitossolos estão predominantemente localizados nas proximidades da rede de drenagem, acompanhando seu contorno. Os Latossolos, por sua vez, ocorrem nas porções intermediárias, coincidentes com regiões de média a alta vertente.

A seguir estão elencadas as principais observações realizadas por estes mesmos autores a respeito do perfil geo-pedológico norte-sul:

- a) Ao longo do topo do interflúvio onde está instalada a maior parte da área urbana os dados obtidos em sondagens de simples reconhecimento com SPT indicaram a ocorrência de um manto de alteração que pode chegar até cerca de 30 m de espessura ou mais.
- b) A camada superficial é constituída por solo pedologicamente evoluído (Latosolo Vermelho Distroférico), de textura argilosa, que atinge até 12m de profundidade, tendo abaixo um saprolito argilo-siltoso e/ou silto-argiloso (furos 1 e 2 – Figura 2.6b).
- c) Os índices de resistência à penetração N têm variado de 1 a 4 na região superior da camada de solo evoluído e de 4 a 8 na região inferior desta camada, portanto com a consistência variando de muito mole a média. O solo de alteração de basalto (saprolito) tem-se apresentado com N do SPT variável (de 8 a valores superiores a 30), portanto com consistência variando de média a dura.
- d) Nos setores de baixa vertente ou em posições mais elevadas onde as rupturas de declividade são acentuadas, o manto de alteração sofre uma redução significativa de espessura e o Latossolo dá lugar ao Nitossolo Vermelho Eutroférico típico e/ou Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico (furos 3, 4 e 5 – Figura 2.6b), também argiloso, mas menos espesso que o primeiro.

Com relação ao perfil geo-pedológico 2, Gutierrez, Nóbrega e Luiz (2015) observaram que:

- a) Na região mais central da cidade, entre as Avenidas Paraná e Pedro Taques (trecho da construção do Falso Túnel), as sondagens de simples reconhecimento com SPT evidenciam um manto de solo mais espesso, onde predomina o Latossolo Vermelho Distroférico. A camada de solo evoluído apresenta espessuras em torno de 14 m, como observado nos perfis prospectados, mais especificamente entre as Avenidas Duque de Caxias e Pedro Taques. Isso tem sido constatado quando das escavações para a construção das garagens dos subsolos (três ou quatro) dos edifícios altos na região denominada “Novo Centro” da cidade. A camada subjacente, solo de alteração de basalto (saprolito), atinge profundidades em torno de 30 m ou mais.

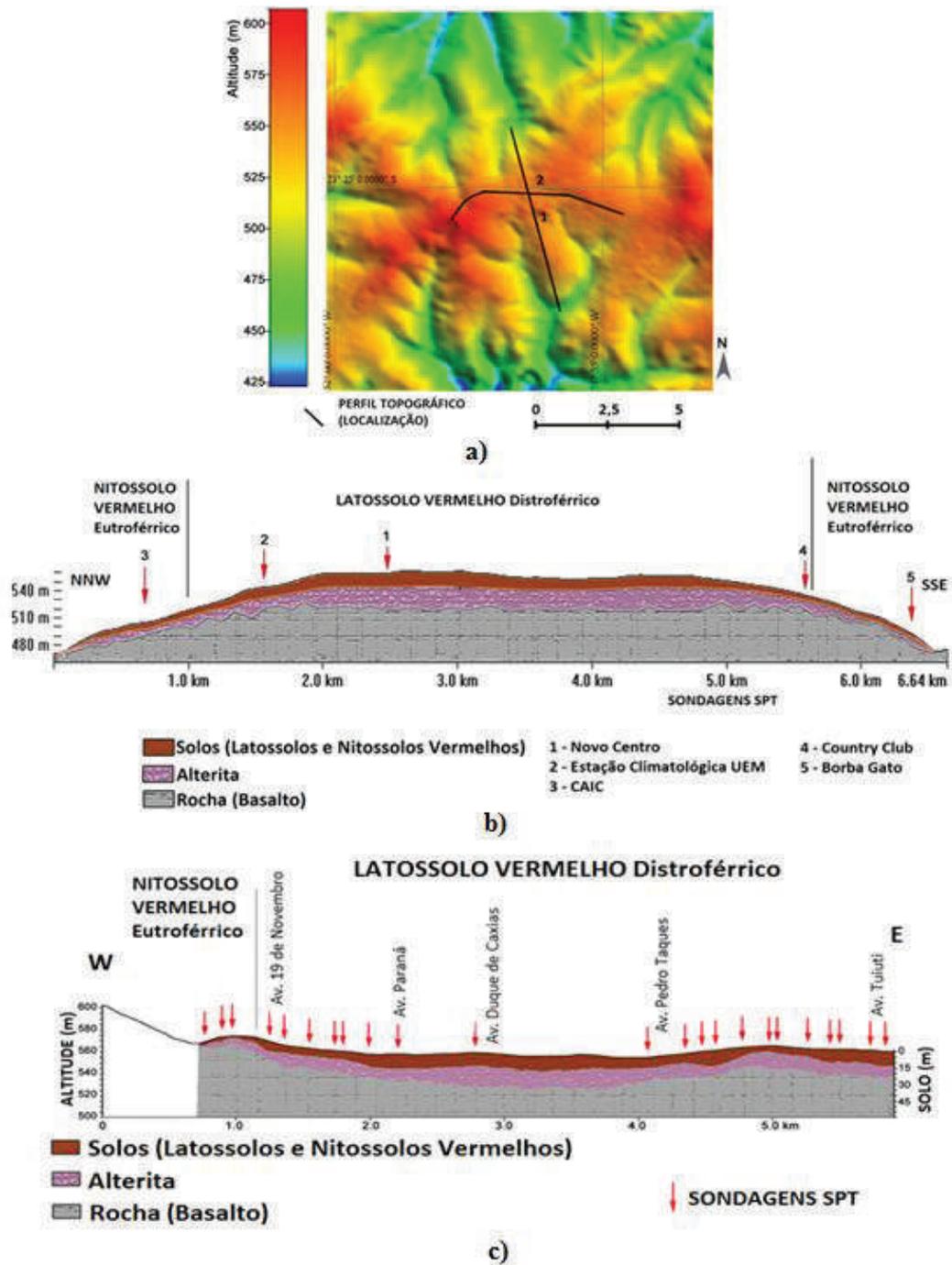


Figura 2.6 – a) Localização dos perfis no município de Maringá, b) perfil geo-pedológico 1 norte-sul, c) perfil geo-pedológico 2 leste-oeste

Fonte: Gutierrez, Nóbrega e Luiz (2015)

- b) Nos trechos onde aparecem pequenos altos topográficos no topo do interflúvio, como aqueles à oeste da Av. 19 de Dezembro (Figura 2.6c), observa-se uma redução na espessura do manto de alteração, com camadas delgadas de solo evoluído, onde predomina o Nitossolo Vermelho Eutroférico.

2.2.3 Banco de dados

Na Figura 2.7 é possível verificar a distribuição dos furos de sondagem dentro da área de estudo que coincide com a área mais central do município.

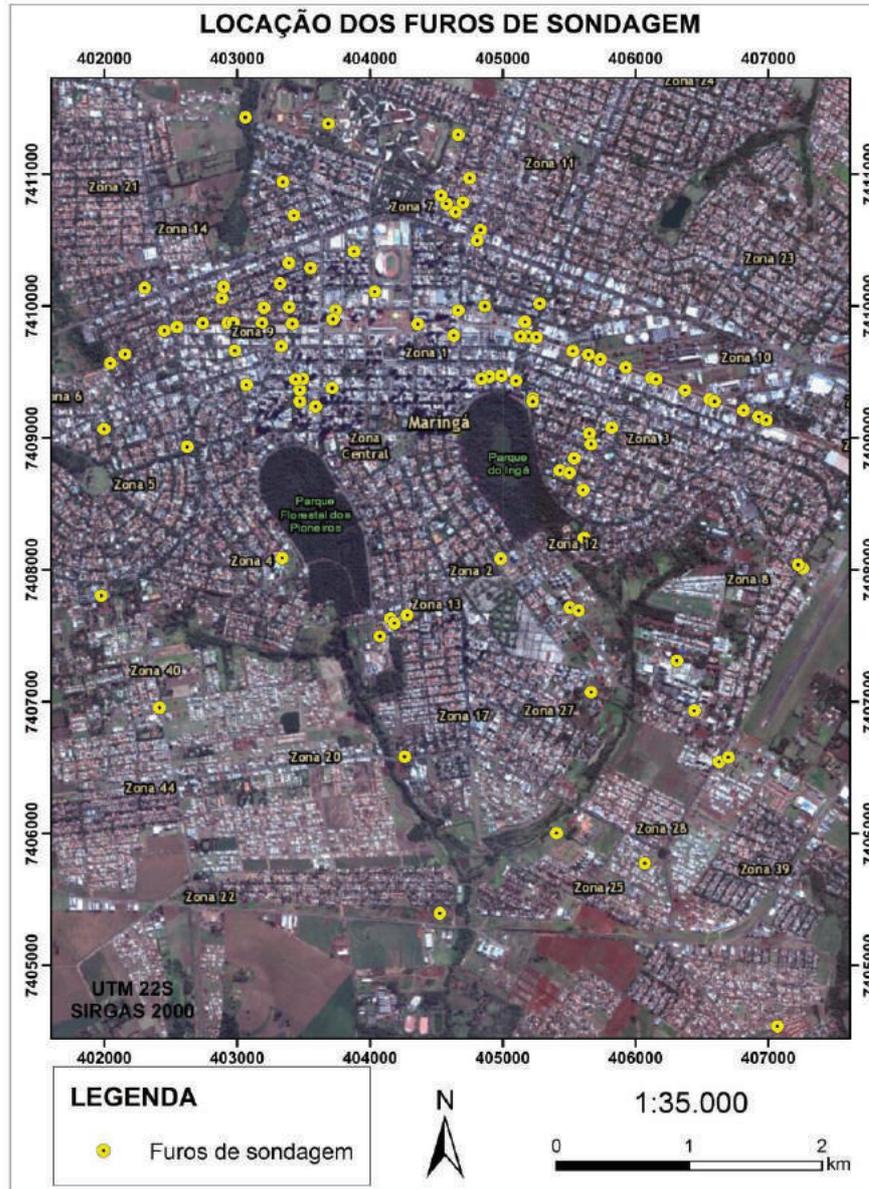


Figura 2.7 – Distribuição dos furos de sondagem na área de estudo

As sondagens que compõem o banco de dados deste estudo foram realizadas por Empresas da Construção Civil e pela equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Maringá.

O banco de dados conta com 107 poços de sondagem distribuídos em uma área de aproximadamente 47,5 km² na região central da zona urbana no município de Maringá, coletados entre os anos de 2011 e 2015.

2.3 FATORES DE FORMAÇÃO DOS SOLOS

As paisagens presentes na superfície terrestre se distinguem umas das outras por uma infinidade de eventos físicos e biológicos que ao longo dos anos vem moldando a paisagem que conhecemos. As características físicas que apresentam grande notoriedade são: a) modelo topográfico; b) cobertura vegetal; c) solos; d) regime climático; e) altitude e; f) idade das superfícies. (MONIZ, 1975)

O conjunto desses elementos e os efeitos que neles atuam dão lugar às mais variadas paisagens possíveis. Quando evidenciamos o elemento solo, podemos perceber nitidamente como sua formação é dependente de uma gama de fatores naturais que foram expressos por Jenny (1941, apud MONIZ, 1975, p. 275) através da Equação 2.1 a seguir:

$$S = f(mo, r, cl, o, t) \quad (2.1)$$

evidenciando que o solo (S) é função dos fatores material orgânico (mo), relevo (r), clima (cl), organismos (o) e tempo (t). Estes fatores são altamente dependentes e devem ser sempre analisados em conjunto, pois existe correlação entre os mesmos. Com relação ao material de origem, a formação do solo ocorre mediante a ação de alguns processos de intemperismo que agem sobre as rochas ao longo dos anos.

Fatores como tipo do relevo, intensidade e frequência das precipitações, fauna e flora, ação do homem entre outros também interferem no grau de alteração da rocha de forma que é possível, para um mesmo perfil geológico, verificar camadas de espessuras variáveis, que vão desde a rocha sã (topo rochoso) até o solo evoluído (superficial), passando por camadas intermediárias chamadas de solo de alteração (solo saprolítico ou saprolito).

Muitas das propriedades inerentes às rochas são transferidas aos solos após os processos de intemperismo, sendo a composição química e mineralógica dos solos uma dessas propriedades que são transmitidas em forma de herança.

2.3.1 Princípios da Geomorfologia

A Geomorfologia é definida como sendo a ciência que se ocupa das formas do relevo, caracterizada pelo modelo topográfico de uma área. De acordo com Christofolletti (1980), a forma atual da superfície terrestre foi esculpida por determinado processo ou grupo de processos que atuaram e continuam atuando de forma regular, contínua e bem específica. Fica evidente, então, a relação entre as formas do relevo e os processos que as deram origem.

Vertentes são superfícies inclinadas, não horizontais, definida especificamente como uma forma tridimensional que foram moldadas pelos processos de desnudação, atuantes no presente ou no passado, sendo um dos importantes setores da geomorfologia (DYLIK, 1968 apud CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 26).

2.3.2 Intemperismo e dinâmica das vertentes

Os mecanismos responsáveis pela esculturação das formas das vertentes são conhecidos como processos morfogenéticos que, apesar de não atuarem de forma isolada, são assim separados em classes para melhor entendimento dos fenômenos. São eles: meteorização ou intemperismo, movimentos do regolito e processo morfogenético pluvial por exemplo.

O intemperismo apresenta grande influência na conformação das vertentes sendo responsável pela produção de detritos que serão erodidos por processos químicos ou de decomposição, físicos ou mecânicos e biológicos.

Segundo Bigarella, Becker e Santos (1996):

“a decomposição de uma rocha efetua-se através de um processo muito lento, complexo e variado. Depende de muitos fatores, tais como: composição mineralógica e química da rocha, forma e estrutura de jazimento, bem como condições climáticas regionais predominantes. A temperatura influi diretamente sobre o intemperismo químico”

De acordo com Goldich (1938), os minerais presentes na constituição das rochas apresentam comportamento distinto quando em contato com a água. Alguns deles apresentam maior estabilidade (quartzo presente em areias, por exemplo) enquanto outros decompõem-se facilmente (piroxênios, plagioclásios e olivinas presentes em rochas basálticas, por exemplo) tendo influência na velocidade de decomposição das rochas refletindo na alteração das camadas de solo.

Strakhov (1967 apud CASSETI, 2005) elaborou um esquema que relaciona a espessura das camadas de alteração em diferentes condições de precipitação e temperatura, conforme pode ser observado na Figura 2.8.

O intemperismo físico ou mecânico, responsável pela fragmentação da rocha, não está diretamente ligado ao intemperismo químico, porém contribui para o seu desenvolvimento.

Dentro do processo de fragmentação da rocha, a temperatura do ambiente (em função das diferentes amplitudes térmicas entre dia e noite) juntamente com o processo de gelo-degelo comum em áreas de altas latitudes, constituem-se os principais agentes fomentadores do intemperismo mecânico. Este processo pode ser bem lento e variável conforme as características das rochas como, por exemplo, cor, textura e estrutura (CASSETI, 2005).

O intemperismo biológico está relacionado com a ação dos seres vivos na superfície terrestre podendo ser manifestada pela ação da vegetação e dos animais no sentido de desagregar e empobrecer a rocha sã.

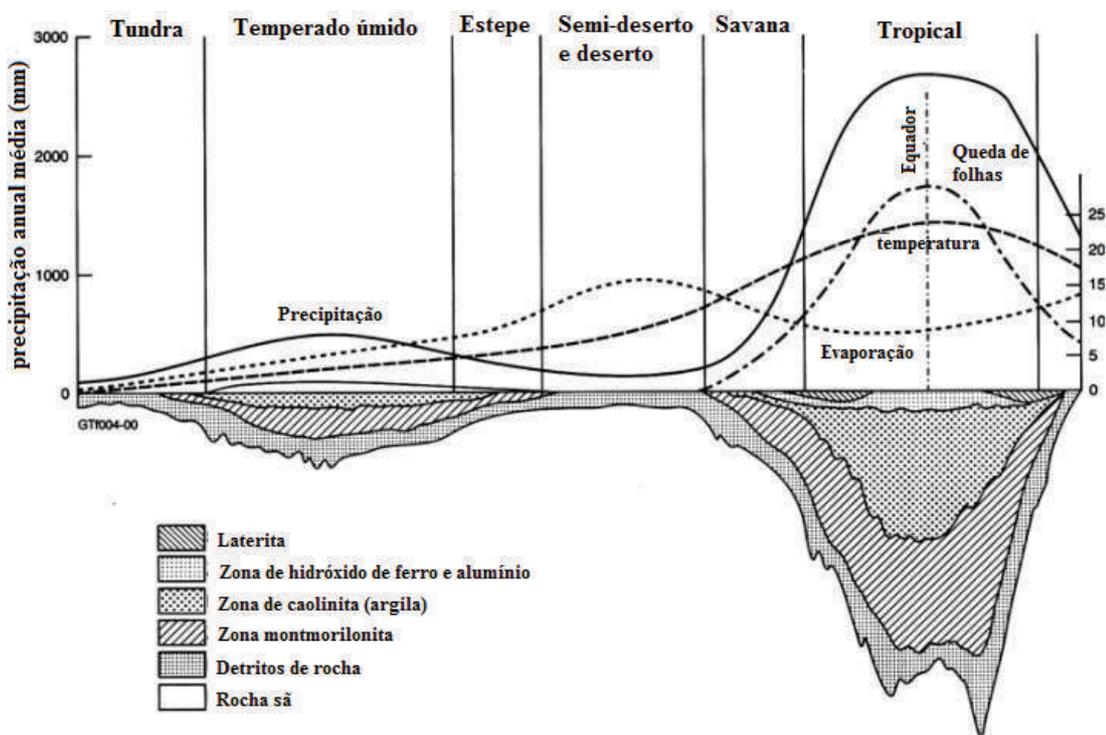


Figura 2.8 – Esquema da disposição do manto de intemperismo em diferentes climas

Fonte: adaptado de Strakhov (1967)

A dinâmica das vertentes apresenta alta complexidade em seu funcionamento. Para elucidar tal fenômeno é usual recorrer ao conceito de balanço morfogenético.

Segundo Christofolletti (1980), o balanço morfogenético pode ser compreendido pela ação de dois fatores: a) a meteorização e a pedogênese, que correspondem às componentes verticais da vertente onde a ação combinada destas duas atua no sentido de aumentar a espessura do manto de intemperismo; b) os demais processos morfogenéticos (movimentos do regolito, ação eólica e outros) correspondem às componentes paralelas atuando de forma a retirar detritos da vertente, promovendo a diminuição da espessura do manto de intemperismo.

A Figura 2.9 ilustra uma vertente típica caracterizada por um interflúvio e um canal fluvial separados por um manto de alteração limitados superiormente pela própria superfície topográfica e inferiormente pela superfície rochosa inalterada. O sistema é dito aberto, pois recebe e perde tanto matéria como energia.

Christofolletti (1980) coloca a precipitação, a rocha subjacente e a vegetação como fontes primárias de matéria, enquanto que as fontes de energia são constituídas pela gravidade e radiação solar. O fluxo de matéria ocorre desde o interflúvio até o canal fluvial mediante os vários processos que ocorrem na vertente como, por exemplo, escoamento, meteorização, movimentos de regolito e infiltração. As vertentes podem chegar até um estado de equilíbrio onde a forma permanecerá imutável com o decorrer do tempo embora ocorra desgaste ou diminuição altimétrica do relevo.

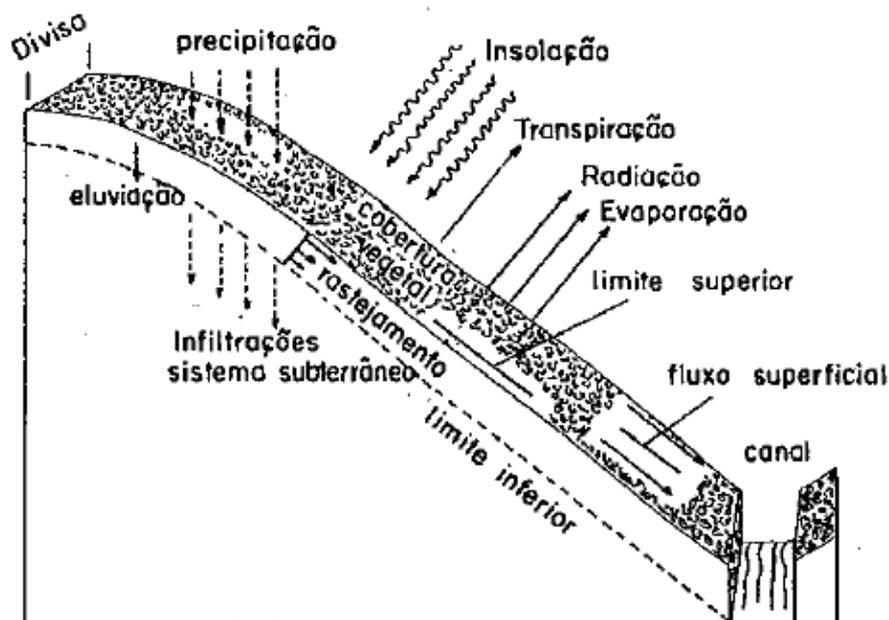


Figura 2.9 – Dinâmica da vertente considerada como sistema aberto

Fonte: Christofolletti (1980)

O contraste morfogenético gera diferenças na composição do manto de intemperismo como pode ser observado na Figura 2.10, onde é apresentado um perfil de vertente comum em regiões de latitudes intertropicais. As diferentes sequências cronodepositivas justificam a presença de material detrítico subjacente a um material pedogenizado formado, respectivamente, por processos morfogenéticos mecânicos e químicos. O material convertido em solo, após a atuação de agentes biológicos, recebe o nome de colúvio pedogenizado (colúvio formado por um sistema de erosão devido a um clima árido quente ou semiárido) (CASSETI, 2005).

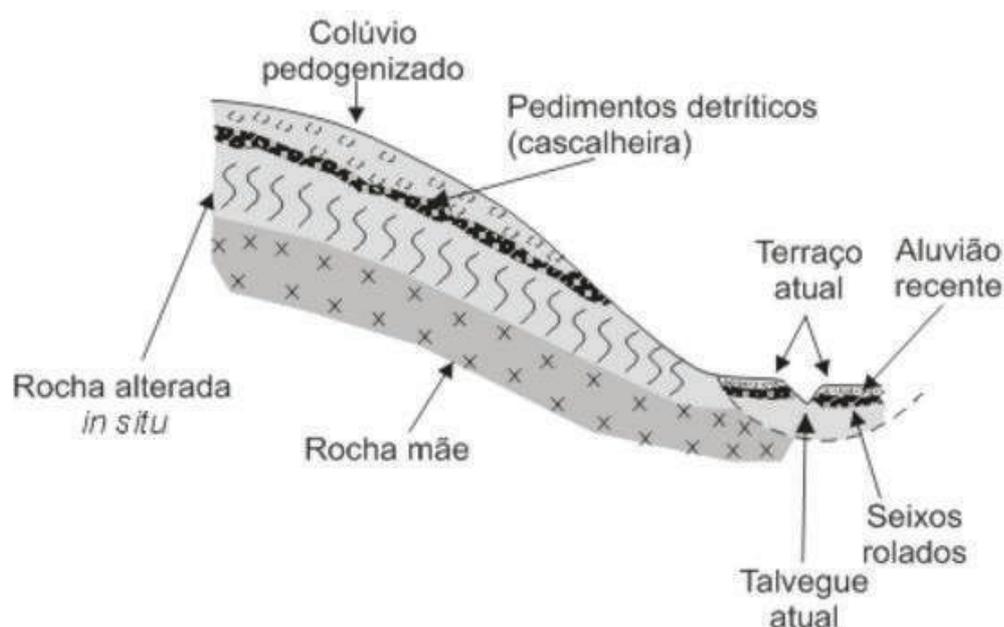


Figura 2.10 – Relações cronoposicionais em uma vertente

Fonte: Casseti (2005)

Ao analisar o processo evolutivo das vertentes registradas em eras geológicas mais recentes (pleistoceno), pode-se compreender a influência dos ciclos de aquecimento e resfriamento na forma das mesmas. A Figura 2.11, idealizada por Bigarella & Becker (1975) para a formação Itaipava (vale do Itajaí-Mirim-SC) evidencia quatro sequências cronodepositivas em função de períodos úmidos e secos, a saber:

- Fase I: verificam-se camadas espessas de depósitos e aluviamento no fundo do vale;
- Fase II: na transição da fase umidade para a fase semiárida, verifica-se o desaparecimento da cobertura vegetal com a retirada de material decomposto das partes mais elevadas e deposição de colúvio para o fundo de vale;
- Fase III: a desagregação mecânica provoca recuo paralelo da vertente e sedimentação da superfície cobrindo os colúvios depositadas na fase anterior;

- d) Fase IV: em uma nova fase úmida, a ocorrência de drenagem promove a retirada de materiais depositados no fundo de vale. As novas condições climáticas permitem o desenvolvimento da pedogênese com a reinstalação da cobertura vegetal.

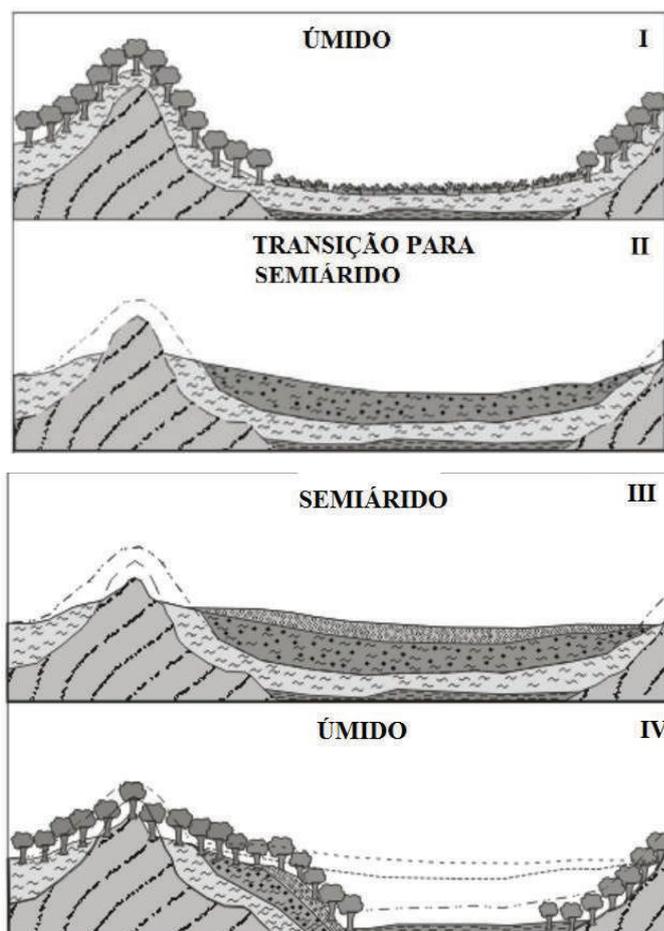


Figura 2.11 – Evolução de uma seção morfológica evidenciando as diferentes sequências cronodepositacionais

Fonte: Bigarella & Becker (1975)

Resumidamente, o clima árido ou semiárido contribui para a evolução dita horizontal da paisagem, por meio do recuo paralelo das vertentes, alargando vales ou destruindo as formas criadas em climas úmidos. Por outro lado, climas úmidos são responsáveis pela evolução dita vertical do relevo, promovendo o entalhamento da drenagem (CASSETI, 2005).

2.4 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O sistema de informações geográficas (SIG) se mostra como uma ferramenta fundamental para realizar análises de dados espaciais oferecendo soluções para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico (SILVA, 1999).

Este sistema contém dados espacialmente referenciados e que podem ser analisados e convertidos em informações para o uso em conjunto com outras finalidades. A característica principal de um SIG, segundo Parent (1988, *apud* Silva, 1999), é analisar dados para gerar novas informações.

Silva (2008) descreve o SIG como sendo constituído da união de várias informações, tais como: banco de dados, vetores, matriz e *raster* (uma foto de satélite, por exemplo). Cada um destes elementos é fundamental para uma análise conjunta e, por isso, sua conceituação também proposta por Silva (2008) está descrita a seguir:

- Banco de dados: é a forma organizada de se armazenar e recuperar dados. Um dos softwares utilizados em se tratando de armazenamento e processamento de dados é o ArcGis, que armazena informações a respeito dos vetores, raster e outros.
- Vetores: são representações gráficas das informações contidas no banco de dados podendo ser ponto, linha ou polígono.
- Raster: neste sistema as informações são armazenadas e discriminadas graficamente através dos *pixels*. O *pixel* é a menor unidade dentro deste sistema. É possível converter dados do tipo vetorial em raster e vice-versa.

Borges (2004) acrescenta que, nos dados gráficos ou cartográficos, os formatos vetorial e raster são utilizados na representação dos dados espaciais. O Quadro 2.1 ilustra as características destes elementos vetoriais.

Quadro 2.1 – Características dos elementos vetoriais

 PONTOS	 LINHAS	 POLÍGONOS
FORMATO	FORMATO	FORMATO
<ul style="list-style-type: none"> • Única coordenada x,y; • Sem comprimento; • Sem área. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cadeia de coordenadas x,y com ponto final e inicial; • Tem comprimento, mas não área. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cadeia de coordenadas como mesmo ponto inicial; • Tem comprimento e área.

Fonte: Adaptado de Yuaça (1997)

2.4.1 Bancos de dados geotécnicos

Bastos (2005) relata que países como Itália, Inglaterra, França, Escócia e Espanha, por exemplo, já utilizam dados com informações de sondagens para fins geotécnicos. No Brasil, esta iniciativa é relativamente recente.

Folle (2002) apresenta um procedimento detalhado para a aplicação de técnicas geoestatísticas na interpolação de dados provenientes do ensaio SPT, com finalidade de elaboração de mapas auxiliares em obras de engenharia. O trabalho foi baseado em 141 furos de sondagem com SPT em uma área total de 4,16 km² no município de Passo Fundo/RS.

Fonteles (2003) aplicou técnicas geoestatísticas na análise da variabilidade espacial e de estimativa de dados de sondagem com SPT objetivando a caracterização geotécnica de uma região com 44 km² do município de Fortaleza/CE, utilizando-se 126 furos de sondagem como base.

Martins (2005) desenvolveu uma pesquisa em cima do mapeamento geotécnico realizado no município de Goiânia/GO mediante o levantamento de dados em relação às características do meio físico (cartas de risco, mapas geológicos, mapas pedológicos e mapas geofísicos) em conjunto com dados obtidos em ensaios laboratoriais de caracterização dos solos.

Souza (2007) analisou o uso de métodos geoestatísticos probabilísticos na construção de um modelo prévio do corpo mineral, servindo de ferramenta auxiliar tanto na modelagem geológica quanto no planejamento de futuras campanhas de sondagem.

Silva (2008) realizou um mapeamento geoestatístico com dados provenientes de 228 furos de sondagem em uma área de aproximadamente 37 km² localizada no município de Londrina/PR com a finalidade de comparar parâmetros do ensaio SPT-T (Ensaio de penetração padrão com torque) com fatores como topografia e pedologia da região.

Soares (2011) estruturou um sistema de apoio a decisão em ambiente SIG, a ser utilizado como ferramenta de auxílio às ações de planejamento e gestão urbanas do município bem como instrumento adicional e alternativa técnico-científica em atividades do meio acadêmico e profissional. O estudo foi realizado no município de João Pessoa/PB, a partir de sondagens à percussão com SPT, divididos em três setores: setor 1 com 276 furos de sondagem em uma área de 10,7 km², setor 2 com 181 furos em uma área de 13,8 km² e setor 3 com 72 furos em uma área de 3,2 km².

Nas atividades de análise e modelagens espaciais foram utilizados métodos de interpolação determinísticos (Topo to Raster) e geoestatísticos (Krigagem Ordinária) e as principais variáveis analisadas foram profundidade do lençol freático e índice N do ensaio SPT.

Soares (2011) ainda destaca alguns trabalhos relevantes acerca deste tema, a saber:

- a) Coutinho, Monteiro e Oliveira (1996) elaboraram um banco de dados para armazenar as informações sobre argilas orgânicas, moles e médias do município de Recife/PE. As informações eram provenientes de ensaios de campo e laboratoriais realizados em pontos específicos;
- b) Meira e Calijuri (1996) desenvolveram um sistema auxiliar chamado GeoGis, elaborado com a finalidade de unir o mapeamento geotécnico convencional com a cartografia geotécnica digital;
- c) Talamini Neto e Celestino (2001) aplicaram SIG na integração de informações provenientes de cartas topográficas, de boletins de sondagens, levantamento de campo e análises geoestatísticas na elaboração de mapeamento do subsolo do município de Curitiba/PR com a finalidade de orientar o planejamento do uso do espaço subterrâneo.

2.5 PRINCÍPIOS DA ESTATÍSTICA CLÁSSICA

A formação dos solos se dá através da ação de fatores naturais como foi discutido anteriormente. Mediante estes fatores, a variabilidade é um elemento marcante em se tratando das características ou propriedades dos solos.

Naturalmente recorre-se a estatística para avaliar a variabilidade dos valores de N_{SPT} obtidos em sondagens com SPT ao longo da profundidade e, também entre os diferentes furos. (SILVA, 2008).

Dentre as diversas ferramentas disponíveis na estatística clássica, podemos citar: as medidas de localização (média e mediana), medidas de dispersão (desvio padrão e variância) e, medidas de forma (coeficientes de variação e assimetria).

2.5.1 Média aritmética simples

A média aritmética simples é o valor médio obtido dentro de uma amostra ou população. Este parâmetro, dado pela Equação 2.2, representa somente uma tendência dentro da amostra e não avalia a variação dos valores individuais.

$$x = \frac{1}{n} \sum a \quad (2.2)$$

em que: x: média aritmética;
n: número de componentes da amostra;
a: valor da variável em estudo.

2.5.2 Mediana

A mediana é o valor central dentro de uma amostra ou população após se ordenar os dados em ordem crescente ou decrescente e escolher o valor que separa a metade inferior da superior de uma amostra ou população. Desta forma, metade dos valores será superior a mediana e a outra metade inferior.

2.5.3 Variância e desvio padrão

A variância tem o objetivo de verificar o grau de variabilidade de determinadas situações uma vez que o valor médio obtido pela Equação 2.3 não representa qual o intervalo de variação dos valores.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum (v-x)^2 \quad (2.3)$$

em que: S²: variância;
n: número de componentes da amostra;
x: média aritmética;
v: valor assumido pela variável em estudo.

A raiz quadrada da variância é chamada de desvio padrão (σ) e a sua unidade é a mesma do valor da média.

2.5.4 Coeficiente de variação

O coeficiente de variação (CV) é um valor que pode fornecer maiores informações a respeito da distribuição encontrada na amostra ou população. O valor de CV é calculado pela Equação 2.4:

$$CV = \frac{\sigma}{x} \quad (2.4)$$

em que: CV: coeficiente de variação;
 σ : desvio padrão amostral;
 x: média amostral.

2.5.5 Covariância

A covariância é utilizada quando se deseja avaliar a correlação entre duas variáveis aleatórias. Se duas variáveis x_1 e x_2 possuem variâncias nos pontos n_1 e n_2 , então haverá uma covariância expressa pela equação 2.6:

$$C(x_1, x_2) = \{[Z(x_1) - x(x_1)].[Z(x_2) - x(x_2)]\} \quad (2.6)$$

em que: $C(x_1, x_2)$: covariância;
 E: esperança matemática;
 $Z(x_1)$: valor amostral no ponto n_1 ;
 $Z(x_2)$: valor amostral no ponto n_2 ;
 $x(x_1)$: média amostral dos valores de x_1 ;
 $x(x_2)$: média amostral dos valores de x_2 .

2.5.6 Distribuição normal ou de Gauss

A probabilidade da ocorrência de certos eventos pode ser definida pela observação de modelos matemáticos conhecidos como distribuição de probabilidade.

O estudo detalhado da distribuição normal surgiu no século XVIII ligada ao estudo de medições repetidas de uma mesma quantidade. Sabe-se que ao se efetuar repetidas mensurações de determinada grandeza com um aparelho equilibrado, não se chega ao mesmo resultado todas as vezes; obtém-se, ao contrário, um conjunto de valores que oscilam, de modo aproximadamente simétrico, em torno do verdadeiro valor (CORREA, 2003).

Conhecendo-se o histograma destes valores, obtém-se uma figura aproximadamente simétrica representada graficamente pela equação deduzida por Gauss. De fato, diversos fenômenos naturais apresentam distribuição normal justificando a sua larga aplicação em processos de inferência estatística.

A função de densidade da distribuição é dada pela equação 2.7:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.7)$$

em que: μ : posição central da distribuição (média);
 σ : dispersão da distribuição (desvio padrão).

A Figura 2.13 ilustra uma curva normal típica com seus parâmetros descritos graficamente.

A função $f(x)$ apresenta curva simétrica em relação a um eixo vertical passando por $x=\mu$ que coincide com o valor da moda da distribuição.

A análise da curva de distribuição normal, obtida pela elaboração do histograma, é de fundamental importância, pois pode-se, a partir dela, verificar se a variável em estudo apresenta distribuição normal. Se o gráfico apresentar razoável simetria e forma aproximada da curva normal mostrada na Figura 2.12, temos indicação de que os dados apresentam distribuição normal.

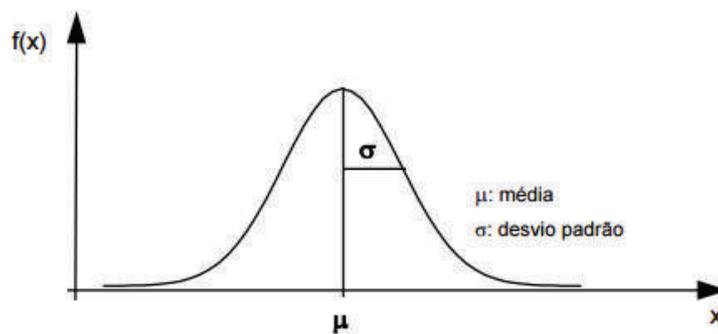


Figura 2.12 – Curva normal típica

Fonte: Correa (2003)

Outro critério utilizado para verificar a adaptação ao modelo normal é o gráfico Q-Q plot, disponível em softwares com módulos estatísticos. O *QQ-plot* é um gráfico dos dados ordenados contra os quantis esperados de uma certa distribuição. Quanto mais próximos os pontos estiverem da bissetriz do primeiro quadrante mais próximos os dados observados estão da distribuição considerada.

No eixo das abcissas, tem-se os valores observados para a variável, enquanto que no eixo das ordenadas os valores esperados caso a variável tenha distribuição normal. De acordo com Torman, Coster e Riboldi (2012), se há uma boa aderência dos dados à distribuição normal,

os pontos estão próximos a reta de referência apresentada na Figura 2.13. A mesma análise pode ser feita ao verificar a forma simétrica do histograma em torno de um determinado valor.

Quando os pontos não apresentam boa linearidade em torno da reta de referência, há indícios de que a distribuição se afasta da normal, conforme ilustra a Figura 2.14. Neste caso, é possível, ainda, modelar os dados para que estes venham a apresentar uma distribuição normal. Este procedimento comumente é referido como transformação de dados amostrais.

Diversas transformações podem ser aplicadas aos dados, contudo a transformação logarítmica é a mais comum e geralmente resolve os problemas de assimetria.

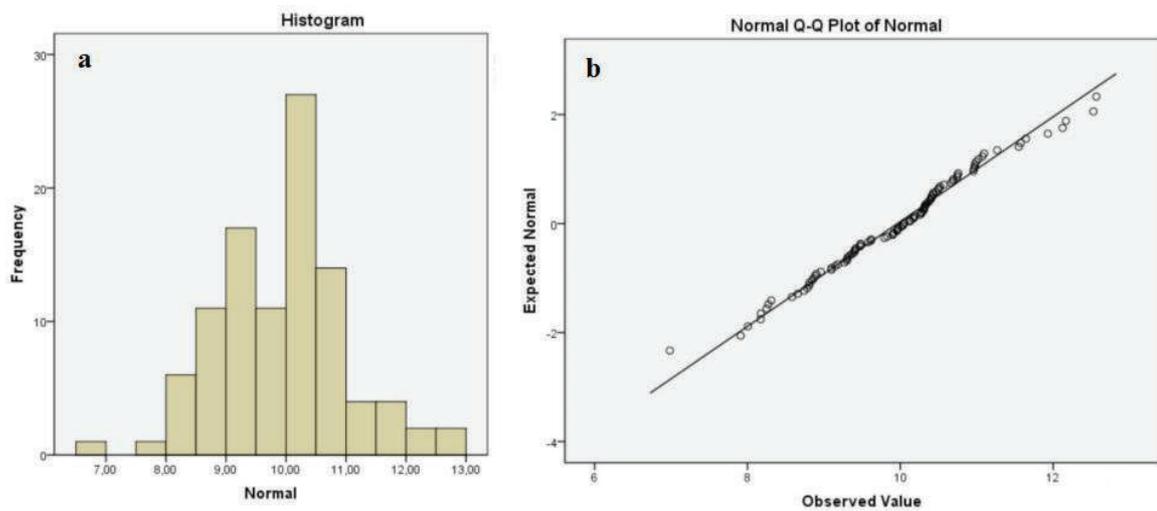


Figura 2.13 – Histograma (a) e gráfico Q-Q plot (b) para uma amostra “a”

Fonte: Torman, Coster e Riboldi (2012)

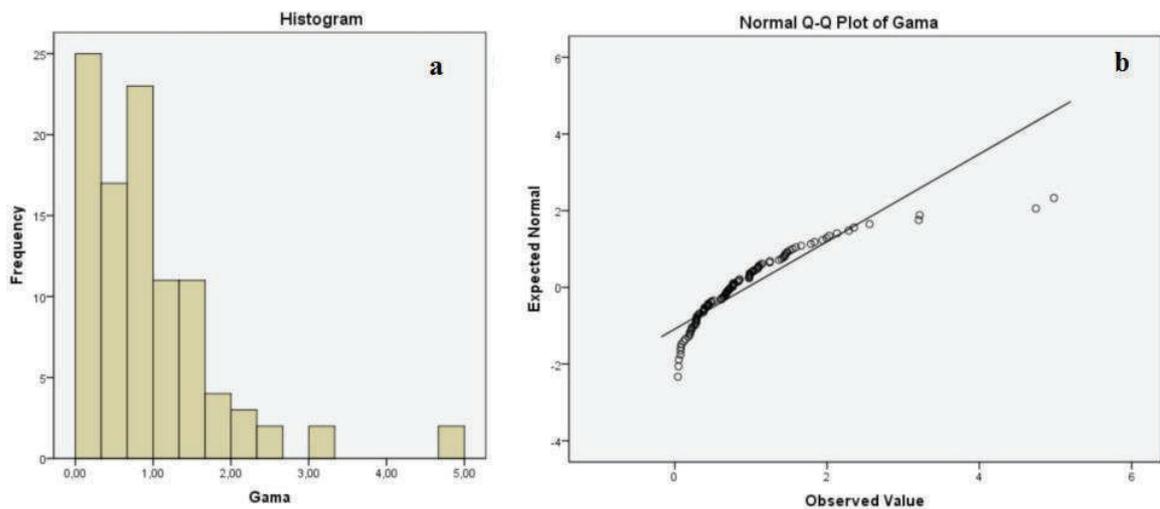


Figura 2.14 – Histograma (a) e gráfico Q-Q plot (b) para uma amostra “b”

Fonte: Torman, Coster e Riboldi (2012)

2.5.7 Coeficientes de assimetria

2.5.7.1 Coeficiente de skewness (obliquidade)

Skewness é uma medida de simetria de dados da distribuição de probabilidade de uma variável. Uma curva normal como a de Gauss apresenta coeficiente de skewness igual a zero. Desta forma, este coeficiente fornece uma ideia sobre a forma da curva de distribuição normal de um conjunto de dados amostrais.

Este parâmetro indica se a cauda mais longa da distribuição encontra-se deslocada para a direita, centrada ou desviada para a esquerda. Se a cauda se encontra deslocada para a esquerda da distribuição, então o valor de skewness será negativo, caso contrário, se a cauda se encontra deslocada para a direita, o valor será positivo conforme se observa na Figura 2.15.

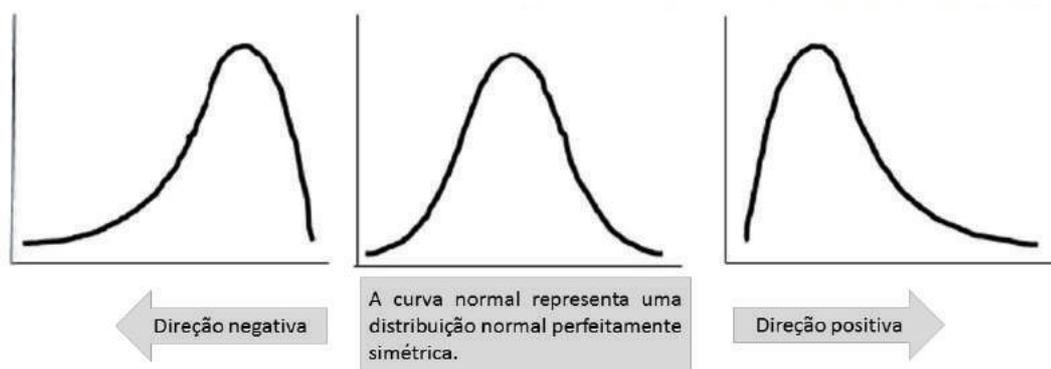


Figura 2.15 – Forma da curva da distribuição normal

Existem várias formas de se calcular este coeficiente como, por exemplo, método padrão e o método de Pearson que nem sempre retornam ao mesmo resultado. Para uma amostragem com n números de dados, a equação do método padrão é dada pela Equação 2.8:

$$g_1 = \frac{m_3}{s^3} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}} \quad (2.8)$$

em que:

- g_1 : coeficiente de skewness (obliquidade)
- \bar{x} : média amostral;
- x_i : valores amostrais;
- s : desvio padrão da amostra;
- m_3 : momento amostral terceira ordem.

A Equação 2.9 é referida como coeficiente de Fisher-Pearson muito empregada em softwares estatísticos considerando um ajuste em função do tamanho da amostra:

$$G_1 = g_1 \left(\frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-1} \right) \quad (2.9)$$

em que: G_1 : coeficiente de Fisher-Pearson ajustado
 g_1 : coeficiente de Fisher-Pearson;
 n : número total de amostras.

2.5.7.1 Coeficiente de curtose

Segundo Correa (2003), curtose é o grau de achatamento (ou afilamento) de uma distribuição em comparação com uma distribuição padrão (normal). Para medir o grau de curtose, utiliza-se a equação 2.10.

$$k = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})} \quad (2.10)$$

em que: k : grau de curtose
 Q_1 : valor do primeiro quartil;
 Q_3 : valor do terceiro quartil;
 P_{10} : valor do percentil 10;
 P_{90} : valor do percentil 90.

De acordo com o valor da curtose, as curvas de frequência podem ser classificadas como: mesocúrtica, platicúrtica e leptocúrtica conforme se observa na Figura 2.16.

Se o valor de k for igual a 0,263, a curva é dita mesocúrtica, que mais se assemelha a curva padrão da distribuição normal. Se o valor de k for superior a 0,263, a curva é dita leptocúrtica, ou seja, é uma curva mais afilada que a curva padrão. Por outro lado, se o valor de k for inferior a 0,263, a curva é dita platicúrtica, ou seja, é uma curva mais achatada (aberta) que a curva padrão.

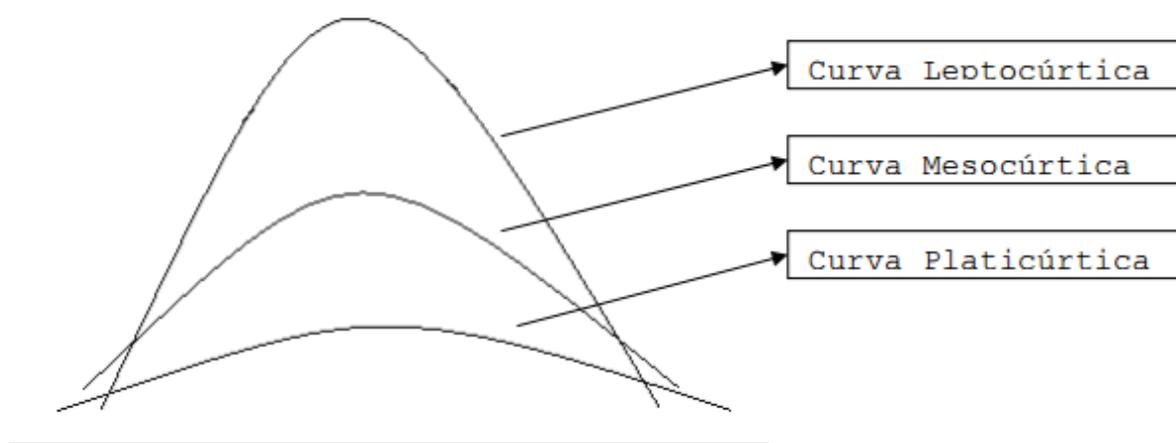


Figura 2.16 – Forma da curva da distribuição normal de acordo com o coeficiente de curtose

2.6 PRINCÍPIOS DA ESTATÍSTICA ESPACIAL

2.6.1 Os modelos estatísticos nas ciências da terra

Os fenômenos espaciais estruturados como, por exemplo, recursos ecológicos, geológicos e solos têm, regra geral, duas características comuns que, aparentemente sem ligação, justificam a aplicação de modelos probabilistas, em específico os modelos de função aleatória. A primeira característica é sua distribuição espacial de um modo não aleatório, ou seja, apresentam certa estrutura. A segunda diz respeito à forma com que elas são observadas ou amostradas. Na maioria das vezes a informação disponível é discreta e escassa, fazendo com que o conhecimento global do fenômeno esteja associado a uma incerteza uma vez que se deseja representar uma variável aleatória contínua através de uma variável aleatória discreta. (SOARES, 2000)

Para quantificar tais fenômenos, é necessário dispor de modelos que permitam inferir o espaço não amostrado a partir de informações disponíveis.

A incerteza inerente ao conhecimento destes fenômenos limita o uso das ferramentas estatísticas clássicas, principalmente devido ao fato dos fenômenos espaciais estarem correlacionados com outras variáveis.

2.6.1 Modelos determinísticos de inferência espacial

Nos modelos determinísticos, os fenômenos são representados por um conjunto de variáveis de entrada e um conjunto de variáveis de saída cuja relação depende dos valores das variáveis de entrada. Em geral, estes modelos são representados por modelos científicos baseados em alguma teoria.

Soares (2011) cita que os métodos determinísticos não consideram características espaciais da autocorrelação de variáveis regionalizadas, pois utilizam apenas os valores envolvidos nos processos.

Apesar desta limitação, alguns métodos determinísticos – polígonos de influência, triangulação e inverso da potência da distância - têm grande aplicabilidade na cartografia de fenômenos espaciais, uma vez que se ocupam apenas em interpolar os valores observados, calculando o valor de uma dada grandeza no espaço a partir de uma combinação linear destes valores.

No método dos polígonos de influência, o espaço é discretizado em polígonos centrados em cada amostra. A dimensão dessas regiões é determinada em função da distância das amostras entre si. Todos os pontos pertencentes ao mesmo polígono assumem o valor da amostra central. Devido a estas características, esta metodologia é recomendada para redes amostrais densas ou para estimação de valores globais (uma única função para toda a área de estudo).

No método da triangulação, o espaço é subdividido em triângulos tendo as amostras como vértice. O valor estimado de qualquer ponto no espaço será dado pela média ponderada dos três vértices que contém o ponto observado. Os ponderadores são obtidos em função da maior ou menor proximidade do ponto ao vértice. Este é um estimador local que considera a distância entre as amostras para quantificar os valores discretos na estimativa do fenômeno contínuo, tratando-se de um estimador mais rico quando comparado ao método dos polígonos de influência.

No método do inverso da potência da distância, a influência de cada uma das amostras é determinada pelo inverso de sua distância ao ponto elevado a uma determinada potência k como pode ser observado na Equação 2.11. Quanto maior o valor de k , maior será a influência das amostras mais próximas e conseqüentemente haverá um prejuízo nas demais amostras. Para o caso em que k tende ao infinito, obtém-se o método dos polígonos de influência (método do vizinho mais próximo), onde a estimativa apenas considera o vizinho mais próximo desconsiderando as demais amostras.

$$z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}} \quad (2.11)$$

em que: $z(x,y)$: valor estimado;
 d_i : distância entre as amostras;
 z_i : valor observado;
 k : ponderador empírico.

Em geral, emprega-se k igual a 2, que conduz ao método do inverso do quadrado da distância (IDW). Este método permite a inclusão de mais amostras na estimação conduzindo a melhores resultados quando comparado aos métodos anteriores. No caso de amostras agrupadas (clusterizadas) não se recomenda o uso deste interpolador.

A escolha do método interpolador deve ser realizada tendo em mente as limitações e aplicabilidades de cada método. Soares (2000) afirma que os métodos supracitados têm por base critérios estritamente geométricos, alguns deles definidos arbitrariamente, além de se tratarem de métodos, que por serem deterministas, não fornecem medidas de incerteza relacionadas com o fenômeno, com as observações e com o método de inferência.

A geoestatística procura solucionar estas limitações através de uma abordagem não determinística ou probabilística.

2.6.2 Modelos não-determinísticos (probabilísticos)

Os fenômenos descritos por estes modelos ainda não apresentam uma lei definida, ou seja, as leis que os regem ainda não são conhecidas. O conjunto de variáveis de saída são desconhecidos ou até mesmo imprevisíveis.

Dentro deste conjunto estão os modelos geoestatísticos onde os dados de entrada são interpretados como provenientes de um processo aleatório. Estes modelos resultam da associação entre a componente naturalista e os fundamentos teóricos da matemática e estatística, em particular da teoria das funções aleatórias.

Meirelles, Camara e Almeida (2007) definem a geoestatística como o ramo da Estatística Aplicada que desenvolve e aplica modelos para representar fenômenos naturais cujas propriedades variam em função da localização espacial dos pontos de observação. O tratamento

formal desta metodologia foi concebido pelo matemático e geólogo francês G. Matheron no início da década de 60.

Tanto no Brasil como no exterior, o uso da geoestatística como mecanismo de interpolação tem aplicações recentes no meio geotécnico. Seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado às atividades mineradoras exercidas na África do Sul em meados do século XX, onde a dificuldade para se determinar a localização dos blocos com concentrações significativas de minérios motivou o desenvolvimento desta técnica que considera a variabilidade espacial dos dados conhecidos para estimar a possível localização de jazidas.

Na segunda metade da década de 80, com a expansão das técnicas de simulação computacional, percebeu-se um aumento na utilização da geoestatística como ferramenta não só na modelagem de reservatórios petrolíferos, mas também nas demais ciências do solo, oceanografia, epidemiologia, hidrogeologia, meteorologia e em diversas áreas incluídas no monitoramento ambiental (MEIRELLES, CAMARA E ALMEIDA, 2007).

2.7 CONCEITOS DA GEOESTATÍSTICA

2.7.1 Variável regionalizada, variável aleatória e função aleatória

Segundo Andriotti (1988), o termo variável regionalizada foi escolhido por Matheron visando alertar sobre dois aspectos, um aleatório e outro estruturado dos fenômenos sobre os quais se ocupa. Seu comportamento aleatório diz respeito a variação que pode ocorrer nos valores medidos quando comparados entre si, e sua característica regionalizada, estruturada segundo uma determinada lei no espaço, é evidente se considerarmos que os valores das amostras que trabalhamos não são completamente independentes de sua localização espacial.

Considere um fenômeno desenvolvido de forma contínua dentro de um subconjunto A do espaço n -dimensional, $A \subset \mathbb{R}^n$. Considere, agora, o relevo na região A do plano horizontal local, relativo ao nível do mar. Diversas variáveis podem ser definidas para representar características desse fenômeno, tais como altitude topográfica em cada ponto $A \subset \mathbb{R}^2$. A altitude em cada ponto A , simbolizada por $t(x,y)$, é uma variável regionalizada. A declividade $d(x,y)$, seria outra variável regionalizada associada à topografia da região A . Matematicamente, a função regionalizada t pode ser expressa através de uma função real:

$$t: A \subset \mathbb{R}^2$$

$$(x,y) \rightarrow t(x,y)$$

em que: (x,y) : localização de um ponto em A;
 $t(x,y)$: altitude do ponto (x,y)

A função t descreve de modo único a distribuição geográfica da variável regionalizada altitude na região A, que é o seu domínio. Assim, ao ponto (x_0,y_0) corresponde o único valor $t(x_0,y_0)$, conforme ilustra a Figura 2.17.

Para representar o relevo da região A através de um modelo topográfico, tal como um mapa em curvas de nível, seria fisicamente impossível e economicamente inviável realizar o levantamento de todos os valores $t(x,y)$. Em função desta limitação, é comum escolher alguns pontos representativos dentro da região A.

Sabe-se que qualquer ponto apresenta uma cota única, porém somente os pontos amostrados a cota foi determinada. Nos demais pontos, a cota é desconhecida, sendo então representada por uma variável aleatória, que pode assumir uma determinada quantidade de valores segundo uma lei de probabilidade. Quanto mais próximo o ponto desconhecido estiver de um ponto amostrado, e quanto mais contínuo for o fenômeno representado por t , mais o valor esperado se aproximará do conhecido e menor será a incerteza representada pelo desvio padrão da amostra.

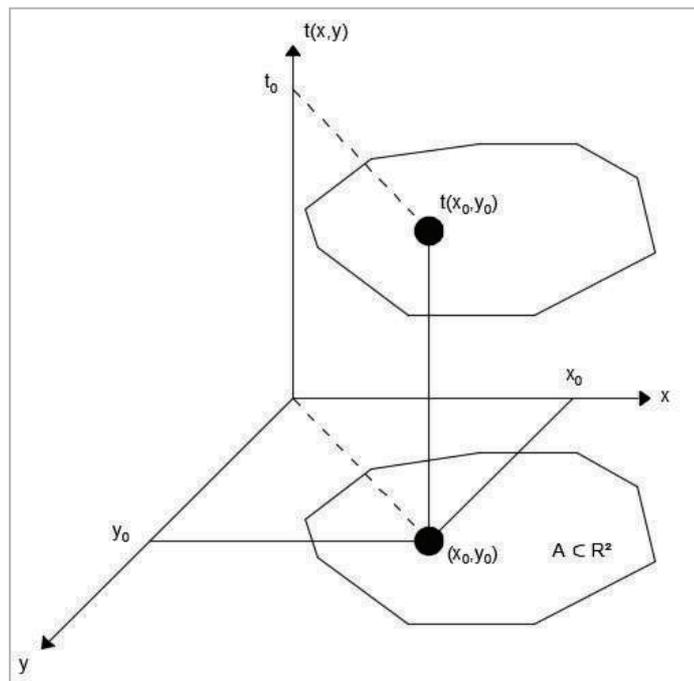


Figura 2.17 - Ilustração do conceito de variável regionalizada

Fonte: Adaptado de Meirelles, Camara e Almeida (2007)

Em função da continuidade espacial do fenômeno, duas variáveis aleatórias em pontos muito próximos são altamente correlacionadas, apresentando valores esperados com pequenas diferença e incertezas da mesma ordem de grandeza. A medida em que aumenta a distância entre as duas variáveis, espera-se que sua correlação também diminua.

A geoestatística utiliza-se das chamadas funções estruturais para representar a maior ou menor intensidade com que a correlação entre duas variáveis decresce em função do aumento da separação das mesmas.

O conjunto infinito das variáveis aleatórias constitui o modelo probabilístico denominado de função aleatória.

Andriotti (1988) afirma que para a realização de inferência estatística baseada nos conceitos da geoestatística, se faz necessário a introdução de algumas hipóteses suplementares sobre as funções aleatórias em estudo, também conhecidas como hipóteses restritivas e que tem por objetivo reduzir o número de parâmetros dos quais depende a sua lei.

A hipótese da estacionariedade garante que uma função aleatória $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ apresenta a mesma lei de distribuição de probabilidade que $z(x_1+h), z(x_2+h), \dots, z(x_n+h)$, sendo h um vetor qualquer. Ou seja, para um fenômeno qualquer os fatores influenciadores agiram de forma similar em toda a área de estudo, indicando que a variável regionalizada em questão é homogênea sob o ponto de vista estatístico.

Segundo Soares (2000), a hipótese de estacionariedade garante que a correlação entre duas variáveis aleatórias depende somente da distância espacial que as separa e é independente de sua localização. Estatisticamente equivale dizer que todas as variáveis aleatórias de um fenômeno têm a mesma média e que a covariância da variável depende apenas do vetor distância relativa entre todos os pares dos pontos, ou seja, não há tendência.

Em vista dessas propriedades, os principais objetivos da geoestatística se constituem em representar a variável regionalizada por um modelo probabilístico de função aleatória, representar a continuidade espacial da função aleatória através das chamadas funções estruturais (semivariograma e covariograma) e inferir a função aleatória em pontos não amostrados pertencentes a uma dada região.

2.7.2 Técnicas de aplicação da geoestatística

Para atender aos objetivos supracitados, Meirelles, Camara e Almeida (2007) dividem a geoestatística em duas classes de técnicas distintas: a estimação de valores médios e simulação geoestatística.

Na estimativa de valores médios, são utilizadas técnicas conhecidas como Krigagem. Em uma determinada amostra, estima-se o valor esperado de uma variável aleatória através da média ponderada dos valores vizinhos conhecidos. Assim, o princípio da krigagem pode ser comparado aos dos métodos convencionais (polígonos de influência, triangulação, média local, inverso da potência da distância) que também se baseiam na média ponderada de seus vizinhos. O que distingue a krigagem é a metodologia empregada para calcular os pesos λ_k que dependem não só da distância de cada ponto conhecido ao ponto estimado, mas também da continuidade e do arranjo geométrico do conjunto amostral.

A Figura 2.18 ilustra o princípio básico da estimação do valor esperado de uma variável aleatória a partir de dados amostrais localizados em uma determinada área.

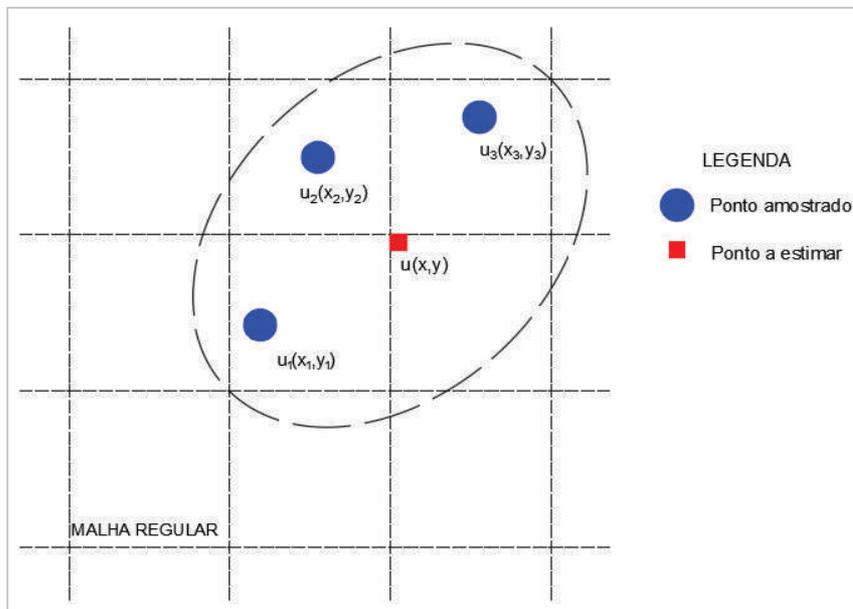


Figura 2.18 - Estimativa do valor esperado de uma variável aleatória

Fonte: Adaptado de Meirelles, Camara e Almeida (2007)

A estimativa do valor da variável $u(x,y)$ pela técnica da krigagem se baseia na Equação 2.12.

$$Z^*(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_k \cdot Z(u_k) \quad (2.12)$$

em que: $Z^*(u)$: valor estimado da variável em questão (x,y) ;
 λ_k : ponderador dos valores vizinhos;
 $Z(u_k)$: valor conhecido.

Em resumo, os modelos de estimação de valores médios têm por objetivo a obtenção de uma imagem mais provável das características de um dado recurso que, simultaneamente, passa pelos pontos experimentais. Na linguagem matemática, os algoritmos utilizados baseiam-se na regressão, por mínimos quadrados, dos valores experimentais resultando em interpolações que representam valores médios. (SOARES, 2000)

A krigagem ordinária é um procedimento de estimação linear para uma variável regionalizada que satisfaz a hipótese intrínseca e procura minimizar, sem viés, o erro de estimação, ou seja, objetiva que o erro residual médio seja igual a zero. Na realidade, a minimização do erro de estimação constitui um dos principais objetivos no processo de estimação, uma vez que, possibilita auferir a sua qualidade.

Além disso, a krigagem ordinária se caracteriza por apresentar um ótimo estimador, pelo fato de minimizar a variância dos erros.

Considerando que é difícil quantificar o erro e a variância para os pontos estimados, haja vista o desconhecimento dos valores reais, a krigagem ordinária faz uso do modelo de função aleatória, de base probabilística, que permite atribuir pesos às amostras usadas nas estimativas.

A krigagem ordinária é amplamente utilizada, pois é considerada, segundo Sturaro (1988), como o melhor estimador linear sem viés, em função das seguintes características: as estimativas são feitas através de uma combinação linear dos dados, o método objetiva que o erro residual médio seja igual a zero e o método objetiva minimizar a variância dos erros.

2.7.3 Medidas de continuidade espacial

Como relatado, a aplicação da geoestatística depende do modelo de continuidade espacial. Na estatística clássica, a dispersão de uma variável aleatória unidimensional pode ser expressa através de diversas medidas como, por exemplo, a variância e o desvio padrão. Analogamente, a variabilidade espacial de uma função aleatória pode ser representada por várias medidas dentre as quais se destacam o variograma, e covariograma.

2.7.3.1 Variograma

Silva (1988), afirma que, quando a amostragem envolve duas direções (x,y) o instrumento mais indicado na estimativa da dependência entre as amostras é o semivariograma

que para tal, define alguns parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem. O termo semivariograma é mais comumente utilizado, e representa metade do variograma. Para efeito prático, o variograma e o semivariograma são tratados como tendo o mesmo significado. Visando adequação com a maioria das bibliografias especializadas, optou-se pela utilização do termo variograma no decorrer deste estudo.

Andriotti (1988) define o variograma como uma função que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas que existem entre as amostras espaçadas de sucessivos valores de h . É uma função crescente com h até um determinado valor conhecido como alcance.

Para uma direção considerada, o variograma indica quão dispersos se tornam os valores quando as distâncias entre as amostras aumentam.

Matematicamente, o variograma é definido como a esperança matemática do quadrado dos acréscimos da variável regionalizada em estudo em uma determinada direção definida pelo vetor h , ou, em outras palavras, o valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos presentes na área de estudo, medidos a uma distância h uns dos outros. A Equação 2.13 descreve a formulação do variograma.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (2.13)$$

em que: N_h : número de pares separados entre h ;
 h : magnitude do vetor

Aplicando-se a função descrita pela Equação 2.13 a um conjunto experimental de dados, obtém-se o chamado variograma experimental. Usualmente a função variograma apresenta no eixo das ordenadas os valores de $\gamma(h)$ e no eixo das abscissas os valores de h , fazendo as duas origens iguais a zero coincidirem. Na Figura 2.19 observa-se a tendência crescente do valor de $\gamma(h)$, à medida que h também cresce. Entretanto, existem oscilações aleatórias em torno da tendência crescente.

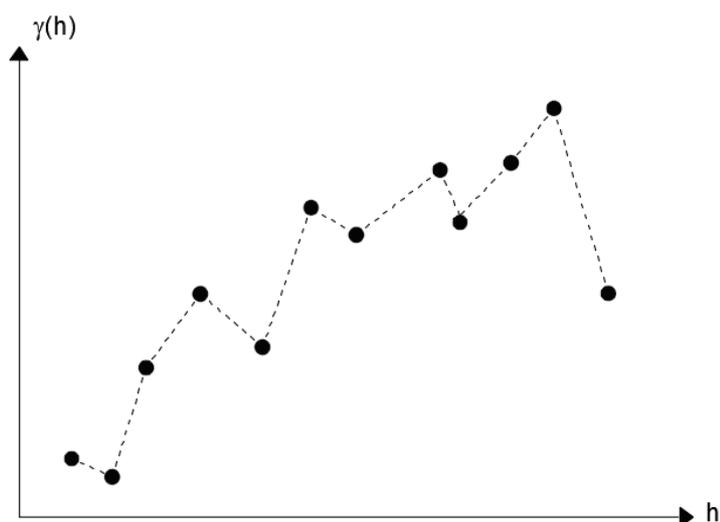


Figura 2.19 - Variograma experimental hipotético

O ajuste do modelo matemático aos dados experimentais define os parâmetros do variograma, representados na Figura 2.20, que são: **alcance (a)** que é o ponto máximo da dependência espacial, indicando que, a partir dessa distância, termina a dependência entre os dados estudados, **patamar (c)** que representa a altura no qual o valor se estabiliza aproximando-se da variabilidade total dos valores amostrados, **efeito pepita (c_0)** que é o valor da semivariância quando o vetor h tende a zero, ou seja, representa a variabilidade para distâncias menores que a distância de amostragem e , **contribuição (c')** ou altura que é o intervalo no qual o variograma cresce, havendo dependência espacial (OPROMOLLA, DALBEN, CARDIM, 2006).

Segundo Matheron (1971), o variograma representa o comportamento da vizinhança de amostra pontual e assim, algumas de suas propriedades podem ser destacadas:

- a) tamanho da zona de influência de uma amostra, pois toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual ao alcance fornece informações sobre o ponto;
- b) a anisotropia se manifesta através do comportamento distinto do variograma nas diferentes direções do espaço;
- c) o comportamento parabólico do variograma indica alto grau de regularidade no espaço enquanto o comportamento linear apresenta uma menor regularidade. O caso no qual o variograma não tende à origem dos eixos é denominado de efeito pepita onde o comportamento das amostras é considerado extremamente irregular (associado a erros de amostragem ou até mesmo a variabilidade natural do fenômeno amostrado).

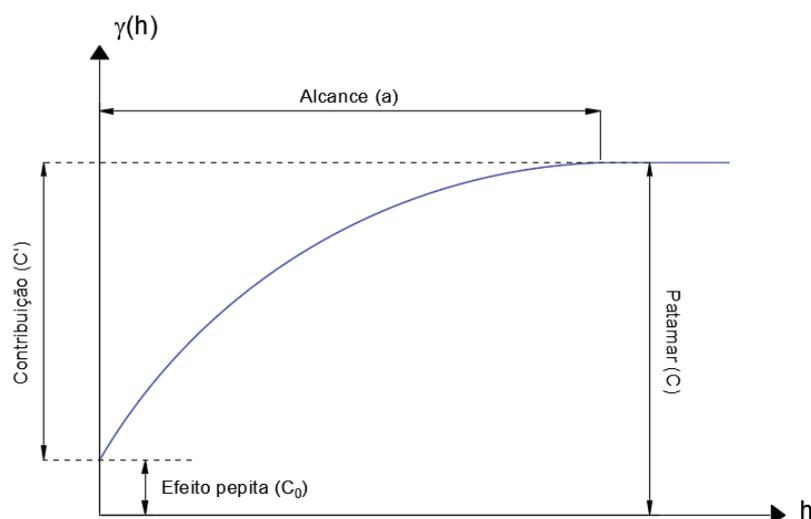


Figura 2.20 - Modelo padrão de um variograma teórico

Fonte: Adaptado de Vicente, 2004

Segundo Andriotti (2002), dentro deste último caso, pode ocorrer o efeito de pepita puro que significa que não há reconhecimento de que um ponto de observação esteja mais próximo do ponto a ser avaliado que outro, ou seja, pontos mais próximos não tem a menor influência no valor estimado, que se resume em desconsiderar o fator espacial, não havendo nenhuma vantagem em se adotar o método geoestatístico para o estudo da mesma.

Depois de elaborado o variograma com os dados amostrais, é necessário ajustá-los a um modelo experimental para obter o valor dos parâmetros de interesse (efeito pepita, alcance e patamar).

Os modelos mais utilizados se dividem em dois grupos: os com patamar e os sem patamar. Os modelos com patamar podem ser esférico (mais comum), exponencial, o modelo gaussiano e o linear. Já os modelos sem patamar costumam ser representados por um modelo potencial.

Segundo Vieira, Xavier e Grego (2008), o ajuste de um modelo teórico ao variograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas. Todos os cálculos da geoestatística dependem do valor do modelo do variograma para cada distância especificada. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(h)$ com relação à h .

Segundo Folle (2002), a variografia geralmente é realizada mapeando-se várias direções diferentes, com ângulo de tolerância e valor de tolerância do parâmetro h definidos, com o objetivo de se definir a direção de maior e menor continuidade do fenômeno em estudo.

Preferencialmente, esta etapa inicia-se com a obtenção do variograma omnidirecional, cuja tolerância direcional é grande o suficiente para tornar desprezível a direção de um vetor de separação h . Neste variograma, todas as direções possíveis são combinadas em um único variograma podendo-se considerá-lo como uma média dos variogramas direcionais.

O cálculo do variograma omnidirecional não implica em crer que a continuidade espacial seja a mesma em todas as direções. Ele serve simplesmente como um ponto de partida para a definição de alguns parâmetros requeridos para o cálculo do variograma direcional. Pode-se, a partir deste variograma, definir o melhor tipo de função de ajuste para os demais modelos. (FOLLE, 2002).

Na Figura 2.21 estão representados os principais modelos matemáticos com presença de patamar. O modelo esférico é um dos mais utilizados para modelar dados naturais enquanto que o modelo Holle Effect representa um fenômeno que apresenta periodicidade, por exemplo.

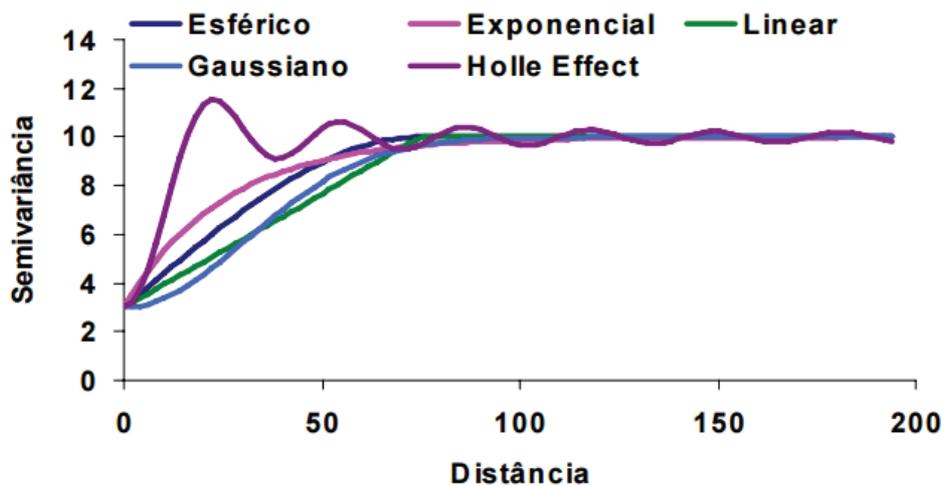


Figura 2.21 - Modelos de ajuste ao variograma

Fonte: Vieira, Xavier e Grego (2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada neste estudo segue o proposto por Soares (2011), ressaltando que algumas modificações foram realizadas devido a algumas limitações de dados e equipamentos, de forma que as etapas mencionadas a seguir serão cumpridas para se atingir o objetivo proposto.

A pesquisa foi estruturada segundo as etapas descritas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Resumo das etapas e atividades executadas

ETAPAS	ATIVIDADES
Aquisição e tratamento dos dados	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção e organização dos boletins de sondagem; • Elaboração do Mapa de declividade; • Estruturação das planilhas no Excel; • Entrada dos dados de sondagem no banco de dados (ArcGis).
Análise geoestatística dos dados e perfilagem	<ul style="list-style-type: none"> • Interpolação da superfície impenetrável ao SPT; • Interpolação do índice N do ensaio SPT nas profundidades de 4, 8, 12, 16 metros e 25 metros; • Interpolação da superfície freática; • Elaboração de perfis do subsolo em duas direções (norte-sul e leste-oeste).

3.1 A ÁREA DE ESTUDO

O município de Maringá localiza-se na porção norte do estado do Paraná (Figura. 3.1), distando cerca de 430 km da capital Curitiba e 650km da cidade de São Paulo. Apresenta altitude média de 596 metros acima do nível do mar, distribuída em uma área de aproximadamente 473km².



Figura 3.1 – Localização do município de Maringá

3.2 AQUISIÇÃO E SELEÇÃO DOS DADOS

3.2.1 Seleção e organização dos boletins de sondagem

As sondagens que compõem o banco de dados deste estudo foram realizadas por Empresas da Construção Civil e pela equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Maringá. Foram utilizados, ainda, dados complementares provenientes de relatórios de perfuração de poços das empresas Hidroingá, Yguatu e Copam na estimativa da superfície freática.

Numa investigação geotécnica, o número mínimo de sondagens de simples reconhecimento com SPT recomendado pela NBR 8036 (ABNT, 1983), no que se refere à construção de edifícios, é estimado em função da área de projeção em planta do edifício, sendo comumente constituída de no mínimo três furos de sondagem.

Na metodologia escolhida, optou-se por selecionar um furo de sondagem por obra que representasse o comportamento do subsolo dentro daquele terreno. Esta escolha foi realizada, dentre outros fatores, devido à relativa proximidade dos furos de um mesmo terreno. Como a finalidade do estudo é obter um mapeamento regional das propriedades do solo para o município de Maringá, poços de sondagens muito próximos uns aos outros não representariam

uma melhoria no mapeamento da região como um todo, apenas promoveriam uma melhor estimativa pontual (dentro do próprio terreno).

Em função da impossibilidade de georreferenciar os poços de sondagem, o levantamento planialtimétrico das obras foi realizado em um ponto próximo ao meio fio do passeio público, aproximadamente no centro do terreno. Desta forma, optou-se por selecionar o poço de sondagem mais próximo do meio fio (que geralmente é o referencial adotado para locação dos furos de sondagem) para minimizar a discrepância entre a medida coletada pelo GPS e a real posição do poço de sondagem representativo para cada terreno. Assim, o critério de seleção para a obtenção do poço representativo foi restringido pela metodologia utilizada para o georreferenciamento destes pontos.

Para a realização da etapa descrita anteriormente, utilizou-se GPSMAP 76CSx Garmin apresentando precisão de +/- 5 graus (resolução de 1 grau) para a bússola e +/- 3 metros (resolução de 0,3 metros) para o altímetro, sujeito a calibração do usuário. As informações foram coletadas no sistema geodésico de referência WGS 84 e posteriormente convertidos para o sistema SIRGAS 2000

O banco de dados deste estudo conta com 107 poços de sondagem distribuídos no município de Maringá coletados entre os anos de 2011 e 2015. Estas sondagens encontram-se concentradas na região central do município, justamente nos bairros que apresentaram um maior desenvolvimento da construção civil nos últimos anos. A Figura 3.2 ilustra um recorte da Figura 2.7 evidenciando as sondagens localizadas na região central do município.

As sondagens selecionadas para compor o banco de dados foram realizadas de acordo com a NBR 6484/2001, apresentando planta de locação dos furos de sondagem, referencial de nível, cota da boca do furo, índice N do ensaio SPT, divisão das camadas do solo de metro a metro e posição do nível d'água

Os dados foram tabelados em planilhas do Excel para posteriormente serem utilizados em um software de sistemas de informações geográficas (ArcGis).

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, tipo e grau de evolução (evoluído e de alteração);
- Valores do índice de resistência à penetração N de cada metro de profundidade;
- Profundidade do impenetrável ou limite de sondagem.

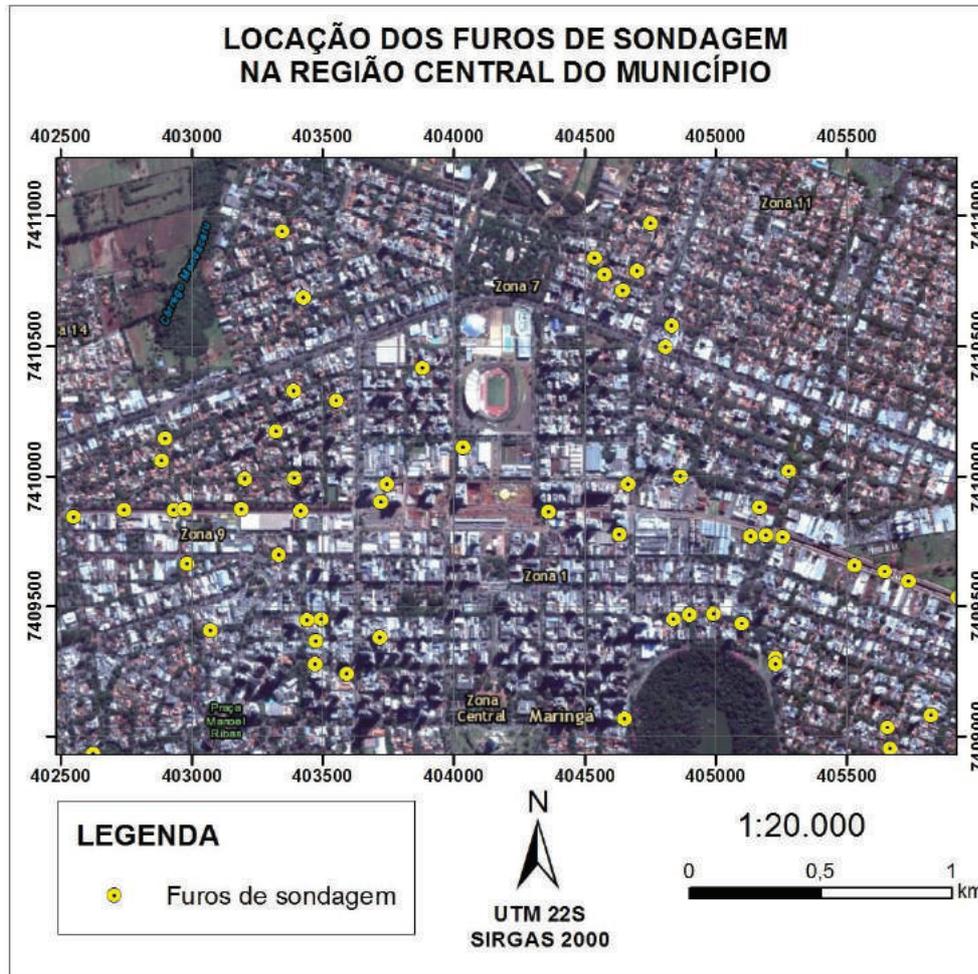


Figura 3.2 – Localização dos furos de sondagem na região central do município

A princípio, procedeu-se a geração de um arquivo em formato *shapefile* de pontos que representam a localização dos furos de sondagem (longitude e latitude), inseridos por meio de comando que plota as coordenadas na base de dados do software.

Após a inserção dos pontos que representam os furos, foram acrescentados, na tabela de atributos do *shapefile*, campos referentes às informações contidas nos boletins de sondagem que não variam com a profundidade (nível d'água, limite de sondagem, cota da boca do furo, data e coordenadas geográficas), conforme pode ser observado na Figura 3.3.

	A	B	E	F	G	I	J
1	Referência	Nível d'água	Cota final	Cota boca do furo	Data	Latitude	Longitude
2	1	NE	-15,28	1,42	26/06/2011	-23,4266	-51,9532
3	2	-28,48	-33,58	-1,30	20/10/2012	-23,4235	-51,9449
4	3	-24,2	-25,76	-0,83	28/05/2012	-23,4224	-51,9488
5	4	-20,1	-24,92	0,72	29/10/2012	-23,4219	-51,9309
6	5	-23,7	-25,00	0,47	01/12/2011	-23,4174	-51,9331

Figura 3.3 - Planilha com informações invariáveis para cada furo

Adicionalmente, é necessário armazenar, em outra tabela, as informações contidas nos perfis de sondagem que variam com a profundidade (valores de N, tipo de solo, cor) e associá-las (pelo comando *Join*) com a tabela inicial mostrada na Figura 3.2. O esquema da Figura 3.4, ilustra o princípio básico do processo de junção de uma tabela 1 por 1 com uma tabela de 1 para múltiplos dados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Ref.	Nível d'água		Ref.	PROF	cota_sup	cota_z_amostra	TEXTURA	NSPT
2	1	NE		1	-1	576	576,42	argila siltosa pouco arenosa	4
3	2	-28,48		1	-2	576	575,42	argila siltosa pouco arenosa	4
4	3	-24,2		1	-3	576	574,42	argila siltosa pouco arenosa	4
5	4	-20,1		1	-4	576	573,42	argila siltosa pouco arenosa	5
6	5	-23,7		2	-1	558	555,7	argila siltosa	1,9

Figura 3.4 - Esquema ilustrativo da junção pelo comando join

3.2.2 Produtos gerados pelo SIG

O software ArcGis permite a obtenção de diversos produtos cartográficos além da realização da análise geoestatística para a interpolação de dados que apresentem variabilidade espacial.

Os mapas gerados pela interpolação (impenetrável ao SPT e variação do índice N com a profundidade) serão comparados com os mapas auxiliares como o mapa hipsométrico, mapa de declividade e mapa pedológico fornecido pela EMBRAPA (2007). A Figura 3.5 sintetiza as comparações feitas na etapa de análise dos resultados

O mapa hipsométrico do município de Maringá foi utilizado na orientação da divisão da área de estudo em regiões de alta, média e baixa vertente, almejando correlacionar a variação do índice N com sua posição no relevo. Para avaliar as correlações com a forma do relevo, foi

utilizado o mapa de declividade do município elaborado mediante interpolação das curvas de nível, a partir de imagens SRTM obtidas por um sistema de radar com resolução espacial de 30 metros, disponíveis no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

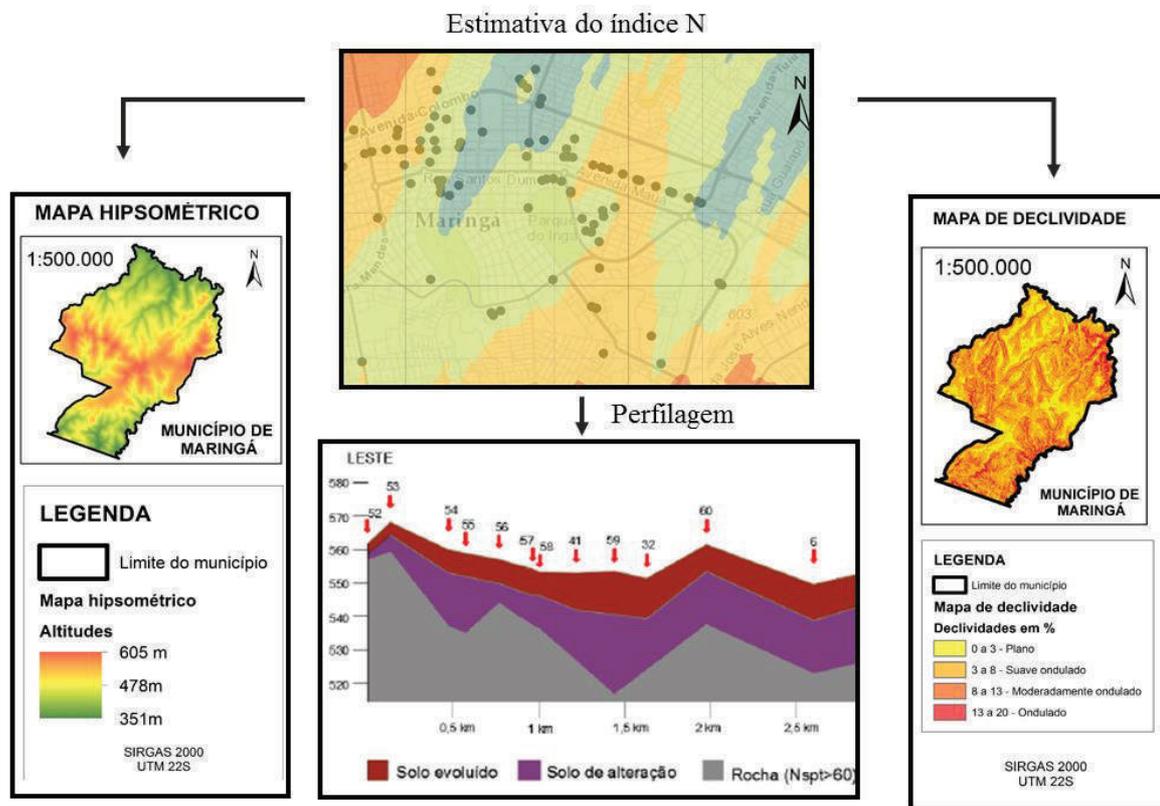


Figura 3.5 - Esquema dos produtos elaborados

Buscar-se-á também, comparar o mapa interpolado da superfície freática do município com os mesmos produtos mostrados na Figura 3.4, a fim de obter correlações entre estas informações.

3.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA E PERFILAGEM

3.3.1 Mapeamento geoestatístico pelo método da krigagem ordinária

Optou-se por escolher a krigagem ordinária para modelar os fenômenos relacionados ao solo devido a estas particularidades e a ampla gama de trabalhos já realizados com esta metodologia.

As etapas de um processo que emprega técnicas de krigagem incluem a análise exploratória dos dados, análise/modelagem da estrutura da correlação espacial e interpolação estatística da superfície.

3.3.1.1 Análise exploratória dos dados

A análise exploratória dos dados é executada pela ferramenta *Geostatistical Analyst* do ArcGis. Esta etapa é fundamental, pois fornece informações estatísticas a respeito da amostra em estudo. A verificação da existência ou não de correlação espacial entre os dados amostrados é identificada nesta etapa, bem como a obtenção de parâmetros estatísticos que serão utilizados nas etapas posteriores.

Para aplicação das técnicas geoestatísticas, é necessário que a amostragem apresente distribuição normal de probabilidade ou, quando esta não ocorrer, deve-se aplicar uma transformação à série de dados que se aproxime da curva da distribuição normal (média igual a mediana). A verificação da distribuição normal após a obtenção do histograma para a variável N do ensaio SPT, exemplificada para a profundidade de 4 metros, pode ser observada na Figura 3.6.

Aplicando a transformação logarítmica nesta distribuição, observa-se uma melhor aproximação da média e da mediana resultando em uma distribuição mais semelhante à normal de Gauss. O novo histograma com aplicação da transformação logarítmica dos dados pode ser observado na Figura 3.7.

Outro parâmetro que auxilia na escolha da transformação a ser aplicada é o gráfico Normal Q-Q plot.

Variando-se os tipos de transformações disponíveis no software, é possível encontrar uma que melhor aproxime os dados da distribuição normal. A Figura 3.8 mostra o gráfico Q-Q plot para uma transformação logarítmica.

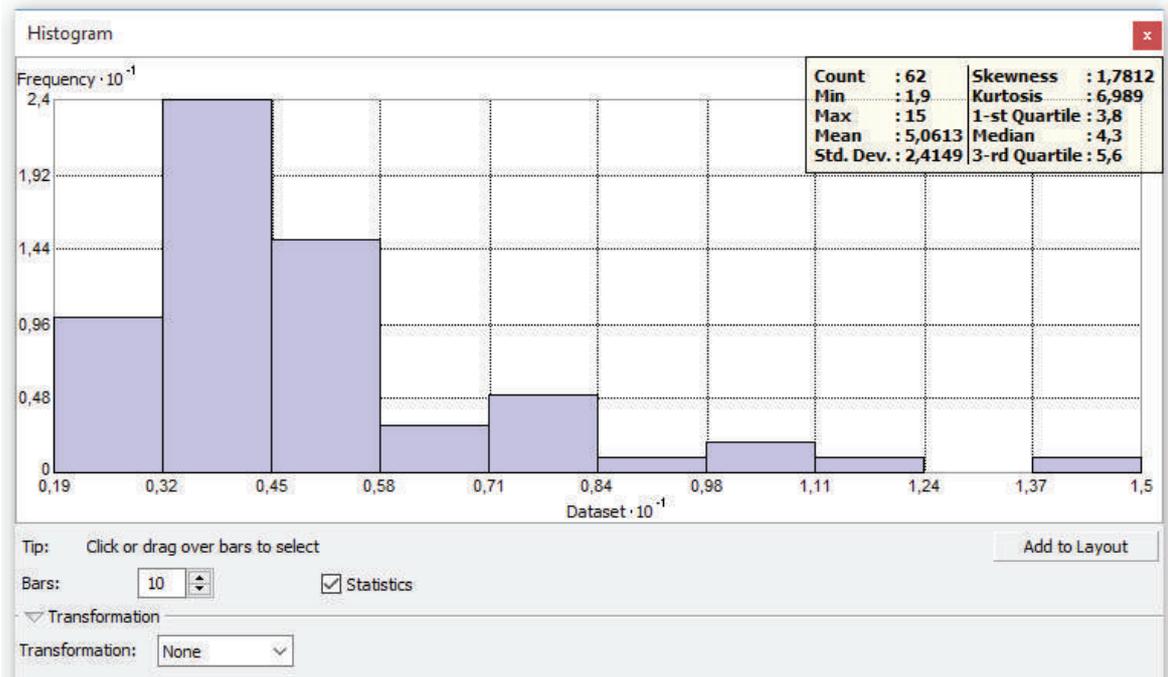


Figura 3.6 - Histograma para a variável N na profundidade de 4 metros sem a aplicação de transformação

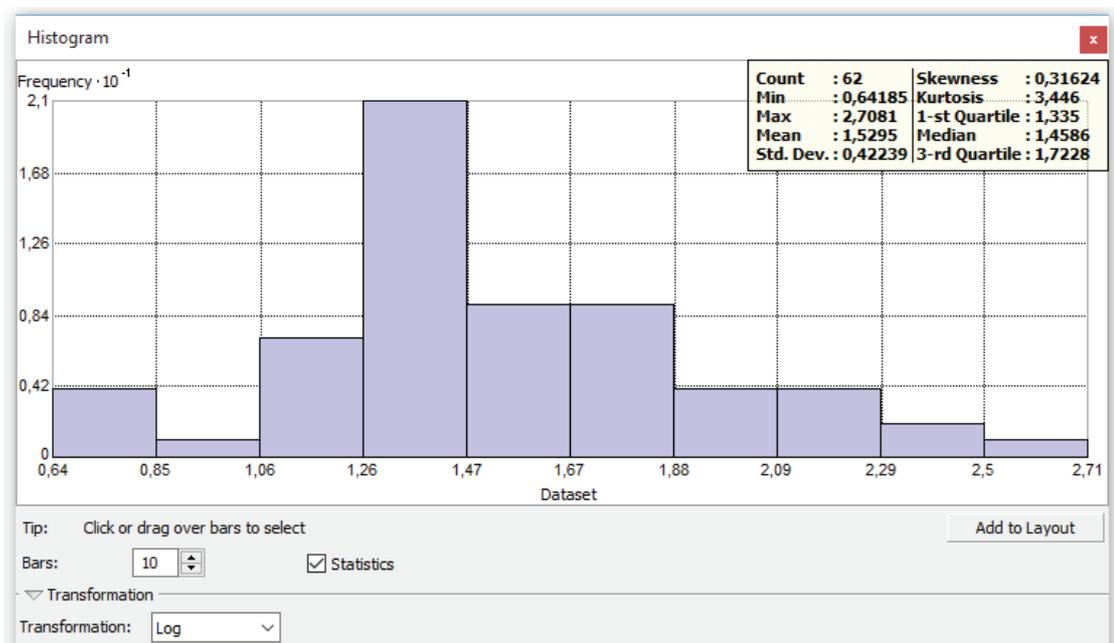


Figura 3.7 - Histograma para a variável N na profundidade de 4 metros com aplicação da transformação logarítmica

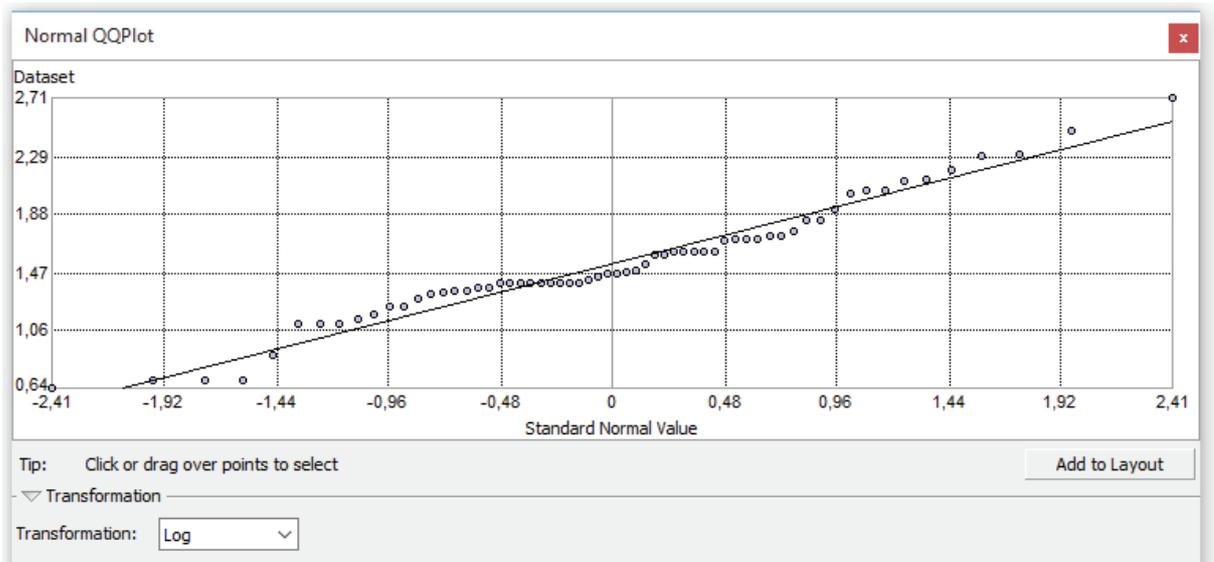


Figura 3.8 - Gráfico Normal Q-Q plot para a variável N na profundidade de 4 metros com aplicação da transformação logarítmica

A análise de tendência (*Trend Analysis*) é uma ferramenta que permite identificar o grau da superfície de tendência. No processo de krigagem, tanto a variabilidade local como global são modelados. Para isso, de forma resumida, o efeito global é retirado em primeira análise interpolando somente o efeito local através dos pesos obtidos pelo variograma. Em seguida, o efeito global é considerado isoladamente através da análise da superfície de tendência.

Para efeitos práticos, durante a análise de tendência deseja-se verificar qual é o maior grau que a curva assume ao rotacionar os eixos xy em torno de z, conforme pode ser verificado na Figura 3.9.

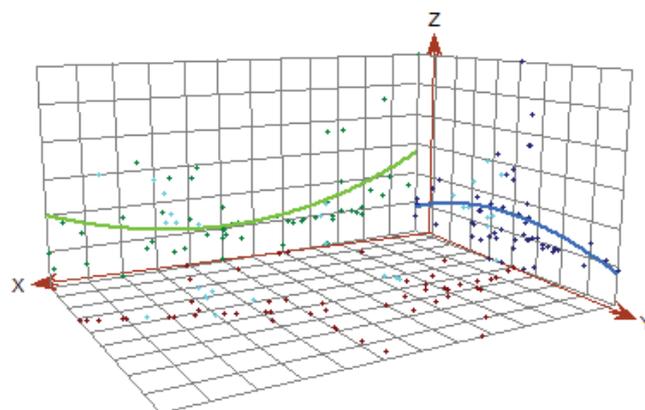


Figura 3.9 - Análise da superfície de tendência para modelagem do efeito global

De acordo com a Figura 3.9, a superfície de tendência se comporta de forma parabólica. De fato, a superfície de tendência parabólica é recorrente no estudo das variáveis; no presente estudo, todas as análises apresentaram este comportamento. Esta informação é imprescindível para a aplicação do método da krigagem ordinária na fase de interpolação estatística da superfície.

Para finalizar a etapa da análise exploratória dos dados, deve-se verificar a configuração da função variograma com a finalidade de detectar indícios de que o fenômeno apresenta dependência espacial. Configurações dos pontos muito dispersas é um indício da possível não dependência espacial.

Conforme pode ser visto na Figura 3.10, existe a tendência dos dados com menores distâncias h entre si apresentaram um menor valor para o parâmetro $\gamma(h)$, ou seja, amostras próximas apresentam valores relativamente próximos para o parâmetro N . A medida que a distância h aumenta, verifica-se que o parâmetro $\gamma(h)$ também aumenta, indicando que amostras mais distantes tem menos influência na estimativa do ponto em consideração.

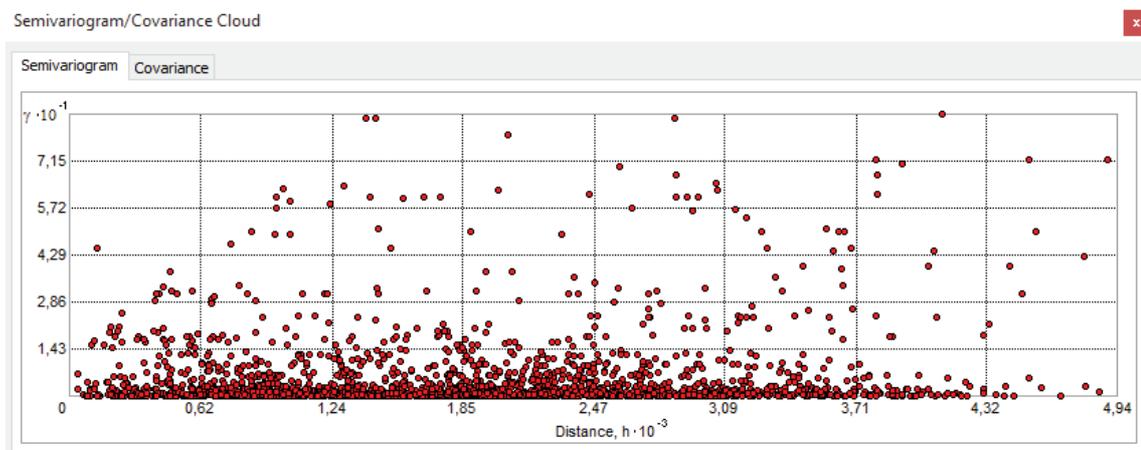


Figura 3.10 - Variograma experimental da variável N

3.3.1.2 Análise/modelagem da estrutura da correlação espacial e interpolação da superfície

Nesta etapa inicia-se o processo de krigagem ordinária propriamente dita, através da inserção dos parâmetros calculados na etapa anterior. A Figura 3.11 destaca o menu *Geostatistical Analyst* com foco na ferramenta *Geostatistical Wizard* que permite selecionar os modelos de interpolação.

Na modelagem do variograma, é possível observar a anisotropia dos dados variando-se as direções de busca do variograma. O comportamento anisotrópico se caracteriza por originar

diferentes variogramas para direções de busca distintas. Por sua vez, para que o fenômeno seja isotrópico, não devem ocorrer mudanças significativas na forma da função variograma seja qual for a direção de busca.

Os solos apresentam comportamento anisotrópico que, em maior ou menor grau, está relacionado, entre outros fatores, com a heterogeneidade dos agentes de intemperismo que os deram origem.

Dessa forma, nota-se, como era esperado, um comportamento altamente anisotrópico para a variável N do ensaio SPT em análise.

Adicionalmente, é possível obter um mapa com o erro padrão em função do mapa interpolado. O erro padrão é um indicativo da confiabilidade da média. Baixos valores do erro padrão indicam que a média amostral é um reflexo mais acurado da média populacional frequentemente desconhecida. Quanto maior o número de amostras, menor será o erro padrão.

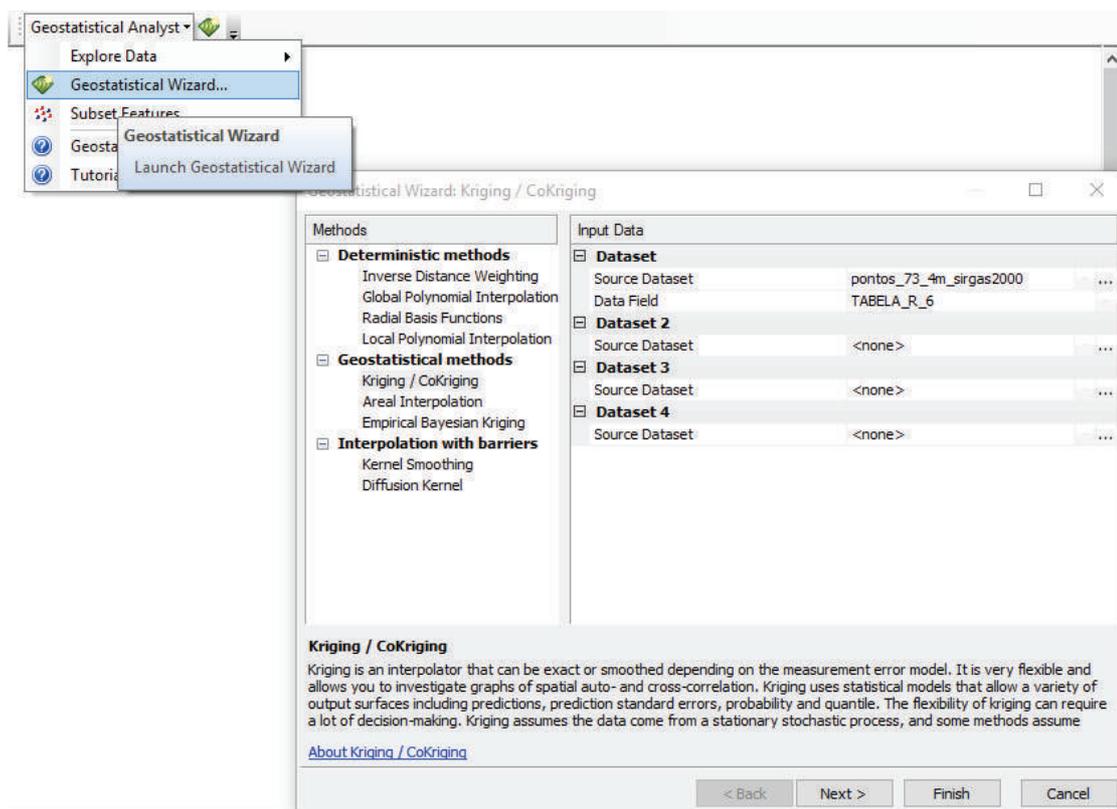


Figura 3.11 - Destaque da ferramenta Geostatistical Analyst no ArcGis

3.3.2 Superfície freática

O mapeamento da superfície freática foi realizado mediante a análise exploratória e posterior krigagem ordinária de 83 dados de nível do lençol freático extraídos de relatórios de

sondagens com SPT e também de relatório de perfuração de poços realizados por três empresas do segmento: Hidroingá, Yguati e Copam entre os anos de 1982 a 2000.

Para a elaboração do mapeamento, não foram feitas considerações com relação a possível variação do nível do lençol freático em função das estações chuvosas e de seca, ou seja, considerou-se que a variação entre estes períodos seja pequena, não sendo objeto de estudo deste trabalho.

3.3.3 Perfilagem

Em função da disposição dos dados de sondagem, verificou-se dois alinhamentos em destaque: norte-sul e leste-oeste. Os perfis foram elaborados evidenciando as camadas de alteração (solo evoluído para solo de alteração) e impenetrável ao SPT a fim de se verificar possíveis relações entre a espessura destas camadas, posição e forma da vertente.

Para a confecção do perfil norte-sul, foram selecionadas 20 sondagens e, para o perfil leste-oeste, 27 sondagens. Os perfis foram modelados no software ArcGis e editados no AutoCad.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELO DIGITAL DO TERRENO E MAPAS DERIVADOS

O mapa hipsométrico da região estudada foi elaborado a partir do modelo digital do terreno (MDT), gerado a partir das imagens SRTM, e pode ser observado na Figura 4.1.

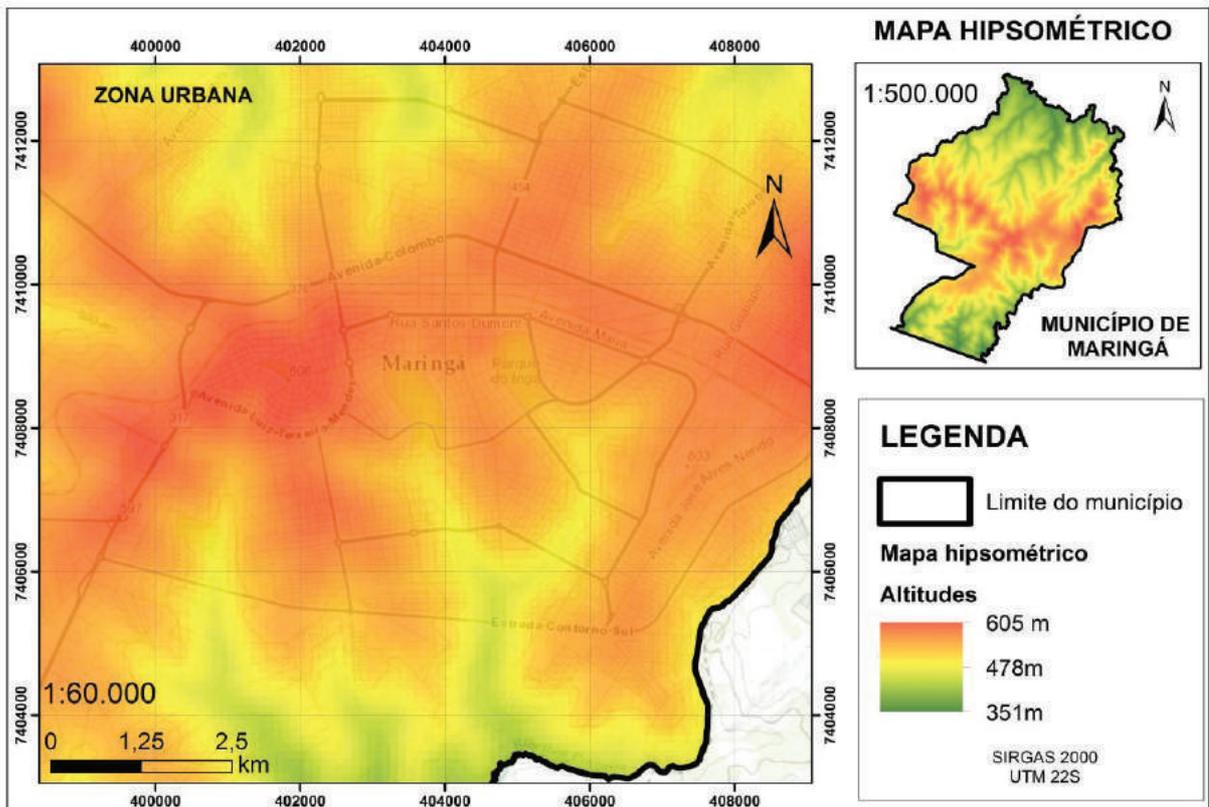


Figura 4.1 – Mapa hipsométrico do município de Maringá

Com base no mapa hipsométrico obteve-se o mapa de declividade do município com enfoque na região urbana.

Na seção norte do sítio urbano (domínio da bacia hidrográfica do rio Pirapó, afluente do rio Paranapanema) as vertentes são em geral longas, convexo-retilíneas, com declividades fracas, mas que se acentuam no terço inferior, enquanto que na seção sul (bacia hidrográfica do rio Ivaí), as vertentes são mais curtas, convexas e convexo-retilíneas, com declividades mais acentuadas, conforme pode ser visto na Figura 4.2.

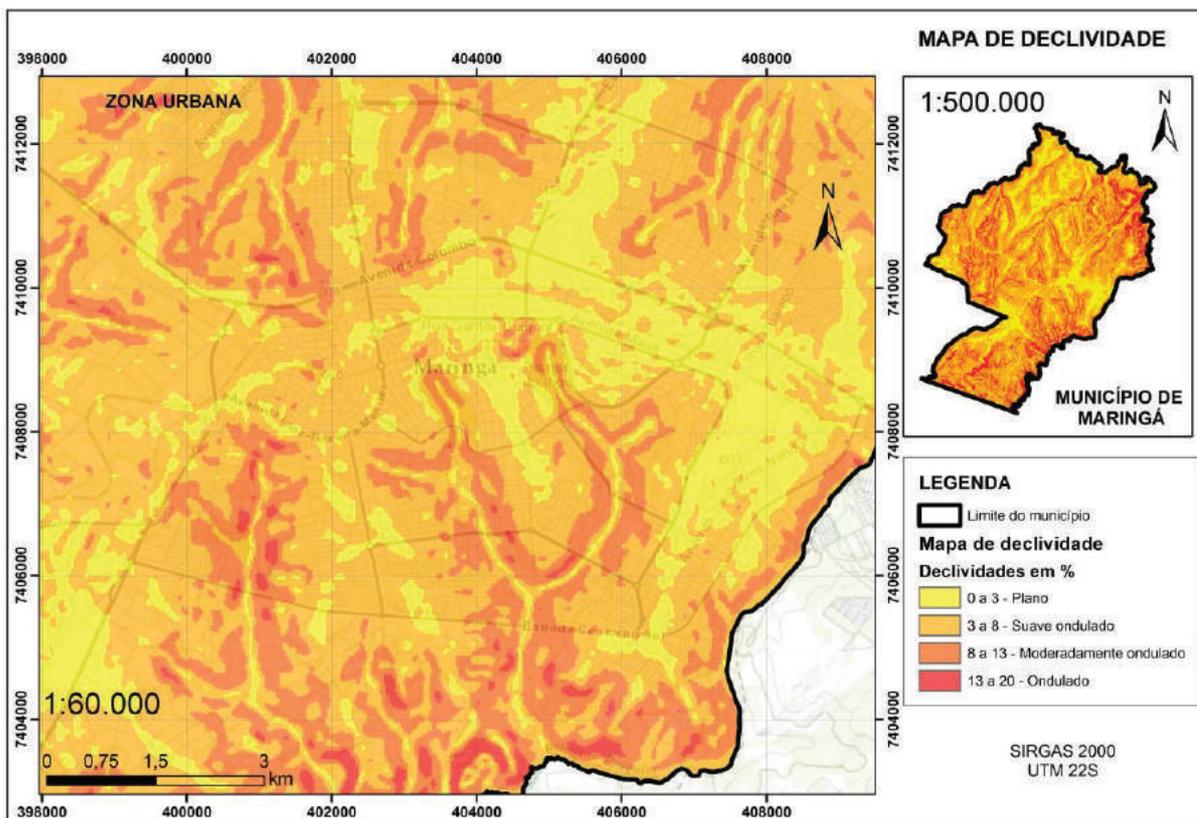


Figura 4.2– Mapa de declividade do município de Maringá

A região central do município apresenta declividades do relevo variando entre plano a suave ondulado, excetuando-se as regiões próximas aos corpos hídricos, onde a mesma varia de moderadamente ondulado a ondulado. Consta-se, como será visto a seguir, que esta característica pode ser correlacionada com a pedologia do solo, bem como com o índice N do ensaio SPT.

A Tabela 4.1 exibe a área correspondente às classes de declividade e sua porcentagem em relação a área total de estudo.

Tabela 4.1 – Classes de declividade e suas áreas

Declividade (%)	Classificação	Área (km ²)	Área (%)
0 – 3	Plano	36,73	77,3
3 – 8	Suave ondulado	9,91	20,9
8 – 13	Moderadamente ondulado	0,81	1,7
13 – 20	Ondulado	0,03	0,1

Como pode ser observado, mais de 80% da área de estudo apresenta relevo plano a suave ondulado, sendo sua grande maioria (77,3%) apresentando menos de 3% de declividade. Por outro lado, menos de 2% da área de estudo apresenta declividades acentuadas (relevo moderadamente ondulado a ondulado). Estas áreas mais declivosas estão localizadas, em sua grande maioria, nas regiões de baixa vertente próximas aos fundos de vale.

4.2 INTERPOLAÇÕES POR KRIGAGEM ORDINÁRIA

4.2.1 Impenetrável ao SPT

A profundidade do impenetrável ao SPT, que pode ser tomado como sendo correspondente a cota do topo rochoso ($N > 60$), apresenta variações significativas no intervalo da região estudada. Para obter melhores resultados na etapa de krigagem, a área de estudo foi dividida em duas seções: uma mais ao norte (seção norte) e outra mais ao sul (seção sul).

Buscando verificar a aplicabilidade dos processos geoestatísticos, o histograma dos dados foi gerado para as seções norte e sul conforme pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4. O gráfico Q-Q plot para a variável, nas duas seções (divididas aproximadamente sobre o interflúvio Leste-Oeste da região central do município), estão ilustrados, respectivamente, para as seções norte e sul, nas Figuras 4.5 e 4.6.

Na seção norte, a distribuição de frequências se aproxima da forma da curva de normal de Gauss, dispensando qualquer transformação prévia na aplicação das técnicas Geoestatísticas. Na seção sul, os dados encontram-se mais dispersos, porém sem a necessidade de transformação dos dados. Os gráficos Q-Q plot para as duas seções confirmam o que foi observado na análise do histograma referente a cada variável.

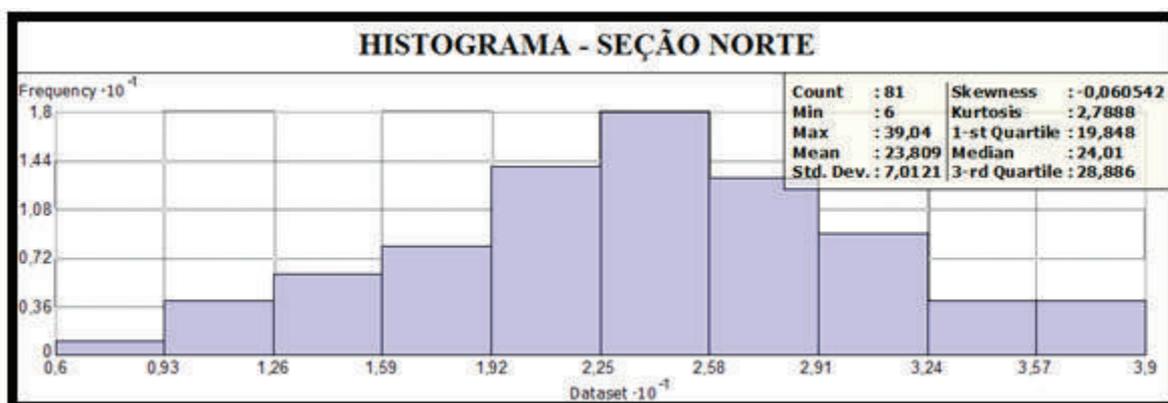


Figura 4.3 – Histograma para o impenetrável ao SPT na seção norte

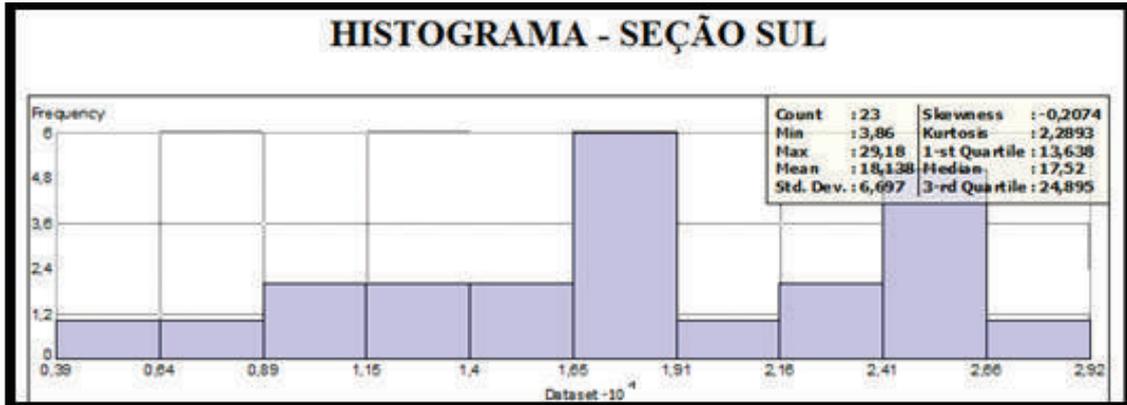


Figura 4.4 - Histograma para o impenetrável ao SPT na seção sul

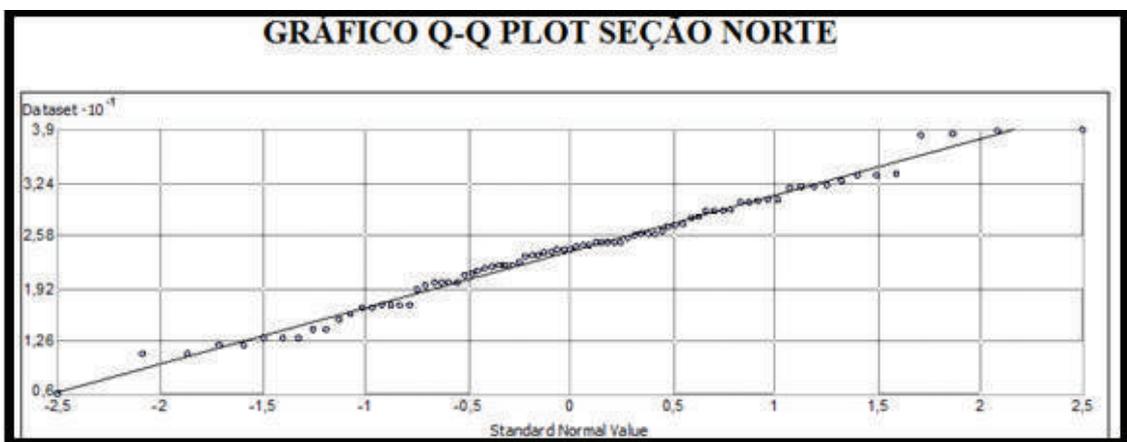


Figura 4.5 – Gráfico Q-Q Plot para a seção norte

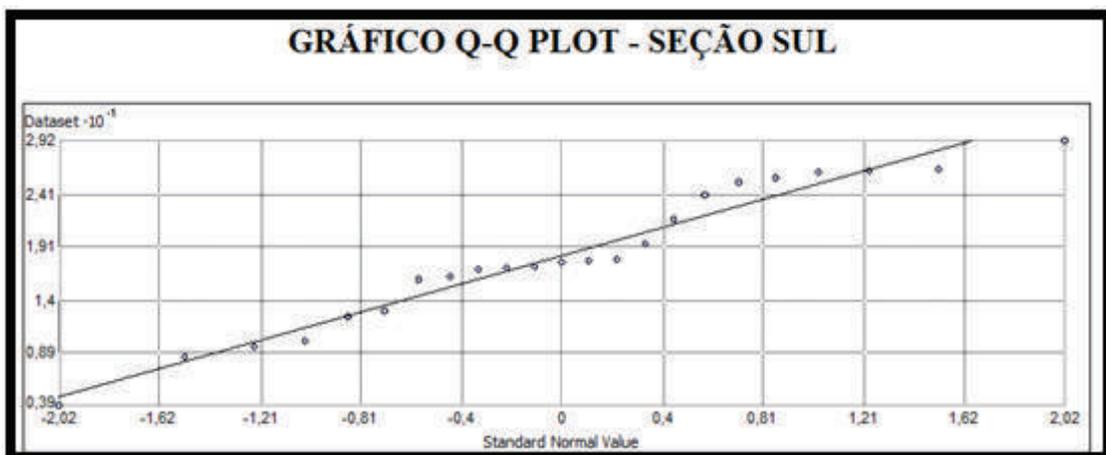


Figura 4.6 – Gráfico Q-Q Plot para a seção sul

Os parâmetros estatísticos obtidos na modelagem dos dados do impenetrável ao SPT estão contidos na Tabela 4.2. Observa-se que a seção mais ao norte do município apresenta maior densidade de amostras quando comparada com a seção mais ao sul. Ainda na seção sul,

verifica-se que as sondagens atingiram o impenetrável ao SPT em uma profundidade média de 18,14 metros com desvio padrão de aproximadamente 6,70 metros, enquanto que, para a seção norte este valor médio é de 23,81 metros com desvio padrão de 7,01 metros. Os coeficientes de Skewness e de curtose indicam que a cauda das curvas de distribuição de dados, para as duas seções, é levemente deslocada para a esquerda apresentando uma forma mais achatada (leptocúrtica).

Tabela 4.2 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT

Parâmetro	Seção norte	Seção Sul
Número de amostras	81	23
Média (metros)	23,81	18,14
Desvio padrão (metros)	7,01	6,70
Mediana (metros)	24,01	17,52
Coefficiente de Skewnes	-0,0605	-0,2074
Coefficiente de curtose	2,79	2,24

Para a interpolação com krigagem ordinária da variável impenetrável ao SPT, tanto para as seções norte e sul, foram gerados variogramas em direções diferentes com o objetivo de definir a direção de maior e menor continuidade do fenômeno em estudo. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram, respectivamente, para as seções norte e sul, os variogramas para a direção de maior continuidade (90°) e a de menor continuidade (0°) verificadas para estes dados.

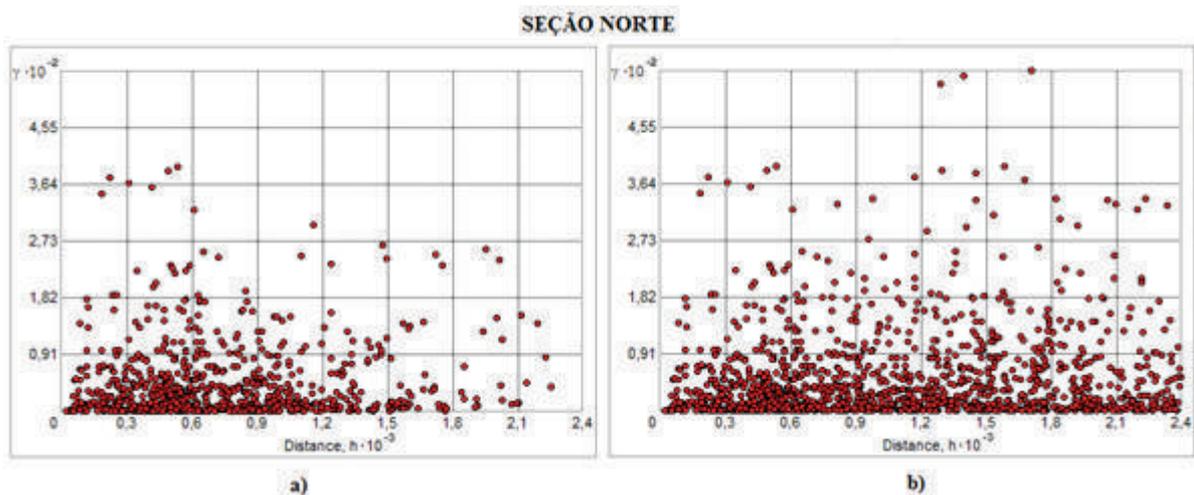


Figura 4.7 – Variogramas experimentais nas direções: a) 0° e b) 90° para a seção norte

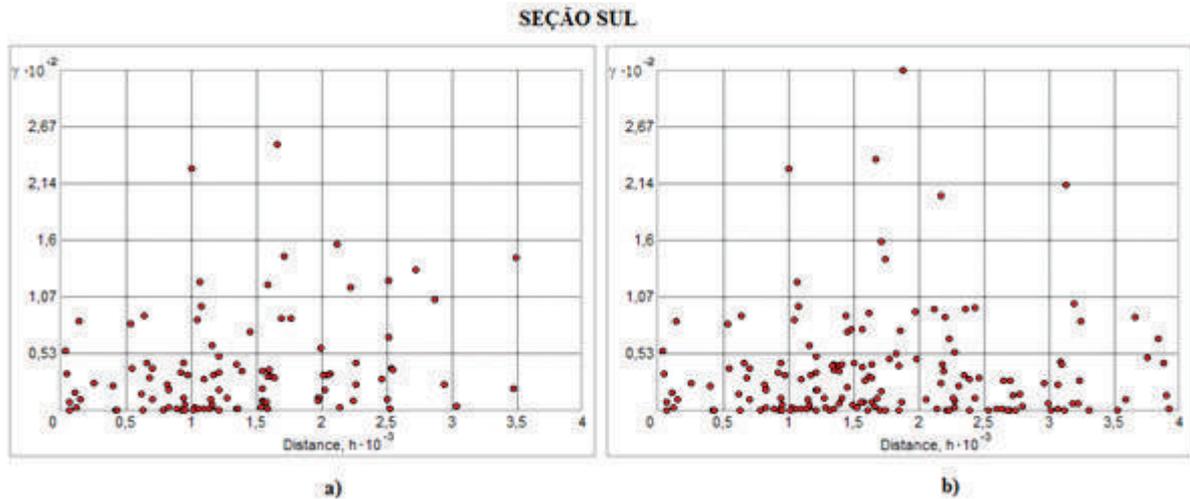


Figura 4.8 - Variogramas experimentais nas direções: a) 0° e b) 90° para a seção sul

Os parâmetros geoestatísticos utilizados na krigagem ordinária da superfície impenetrável ao SPT podem ser observados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3– Parâmetros geoestatísticos para a superfície impenetrável ao SPT

SEÇÃO	Tamanho do lag (m)	Quantidade de lag's	Alcance		Ângulo de anisotropia (graus)	Modelo teórico
			Eixo de maior continuidade (m)	Eixo de menor continuidade (m)		
Norte	60	7	190,05	136,40	81,91	Esférico
Sul	550	8	3720,63	11244,62	122,17	Esférico

Como visto, na seção sul, foi necessário utilizar um lag de maior tamanho para modelar a dispersão espacial dos dados em função da menor quantidade de amostras e, conseqüentemente, maior espaçamento entre elas.

A interpolação da cota do impenetrável ao SPT está apresentada, respectivamente, nas Figuras 4.9 e 4.10 que ilustram tal variável para uma seção mais ao norte e outra mais ao sul do município. Optou-se pela utilização do modelo esférico, pois este conduziu a melhores resultados.

Observa-se que na região central da seção mais ao norte, a rocha se apresenta a maiores profundidades. Esta é uma região de topo caracterizando-se por cotas altimétricas superiores a 600 metros e relevo plano. A leste da seção norte, observa-se uma inversão na profundidade do impenetrável ao SPT que, apesar de ser uma região de pico (alta vertente) apresenta declividades variando de moderadamente ondulado a ondulado justificando a presença de

camadas mais delgadas até a rocha. Tal fato é corrente em outros pontos das seções mais ao norte e mais ao sul do município.

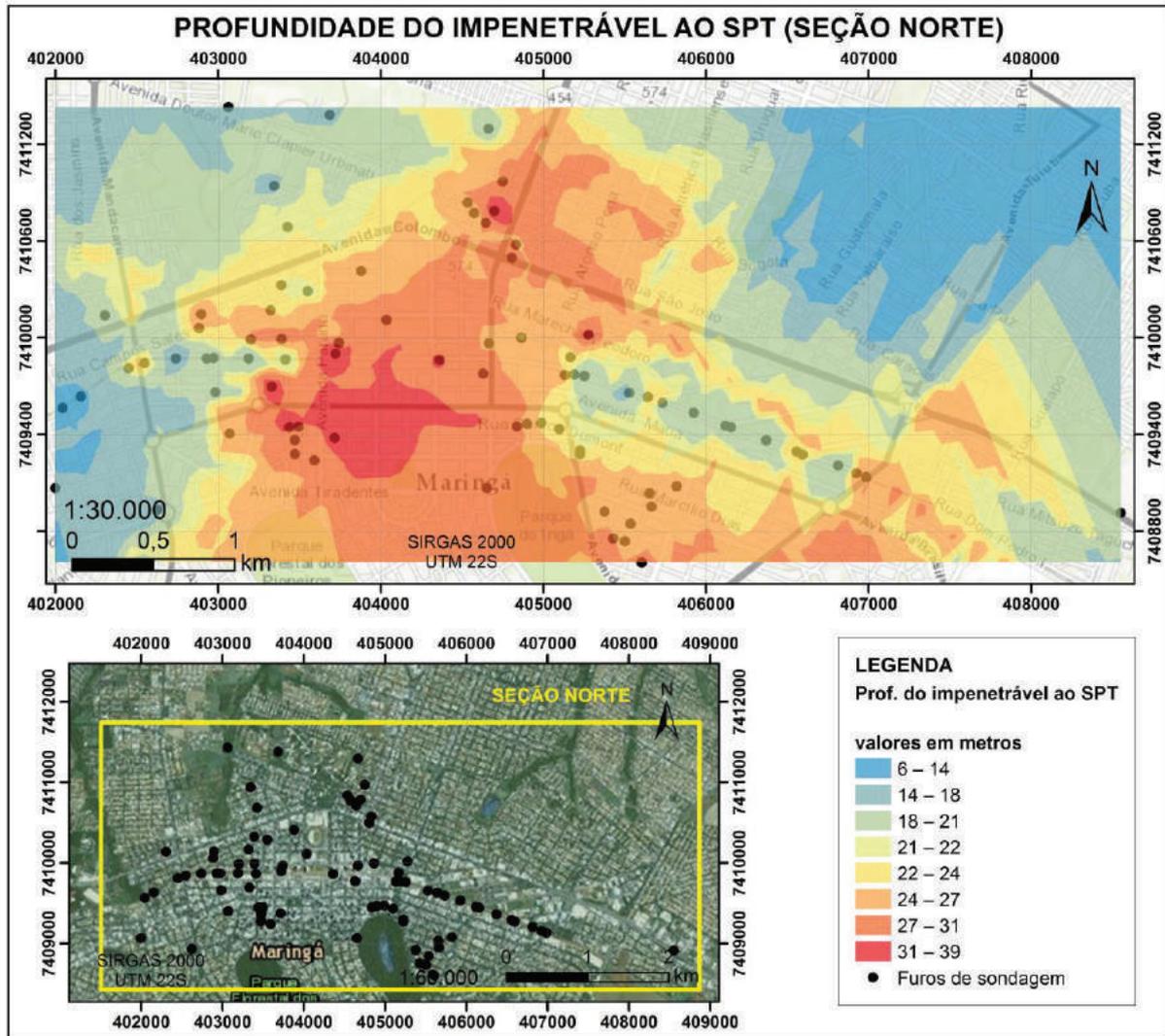


Figura 4.9 - Profundidade do impenetrável ao SPT para uma microrregião mais ao norte do município de Maringá.

Verifica-se ainda, que mesmo em uma região de topo (alta vertente), a espessura das camadas de solo é variável em função da forma do relevo. Comparando-se estas regiões de topo da seção norte com a declividade da região, é possível verificar a tendência de terrenos de alta vertente mais acidentados apresentarem perfis de solo mais delgados enquanto que regiões também de topo, porém com relevo mais plano apresentarem perfis de solo mais espessos até atingir a rocha sã.

A região centro-sul, mostrada na Figura 4.7, é uma região de média a baixa vertente que apresenta relevo mais acidentado.

É também nas regiões das vertentes mais declivosas que se concentram os Nitossolos Vermelhos, em contrapartida com a região central, onde ocorrem os Latossolos Vermelhos. A disposição destes dois grupos pedológicos pode ser associada com a resistência do solo, correlacionada aos valores do índice de resistência à penetração N obtidos nos ensaios SPT.

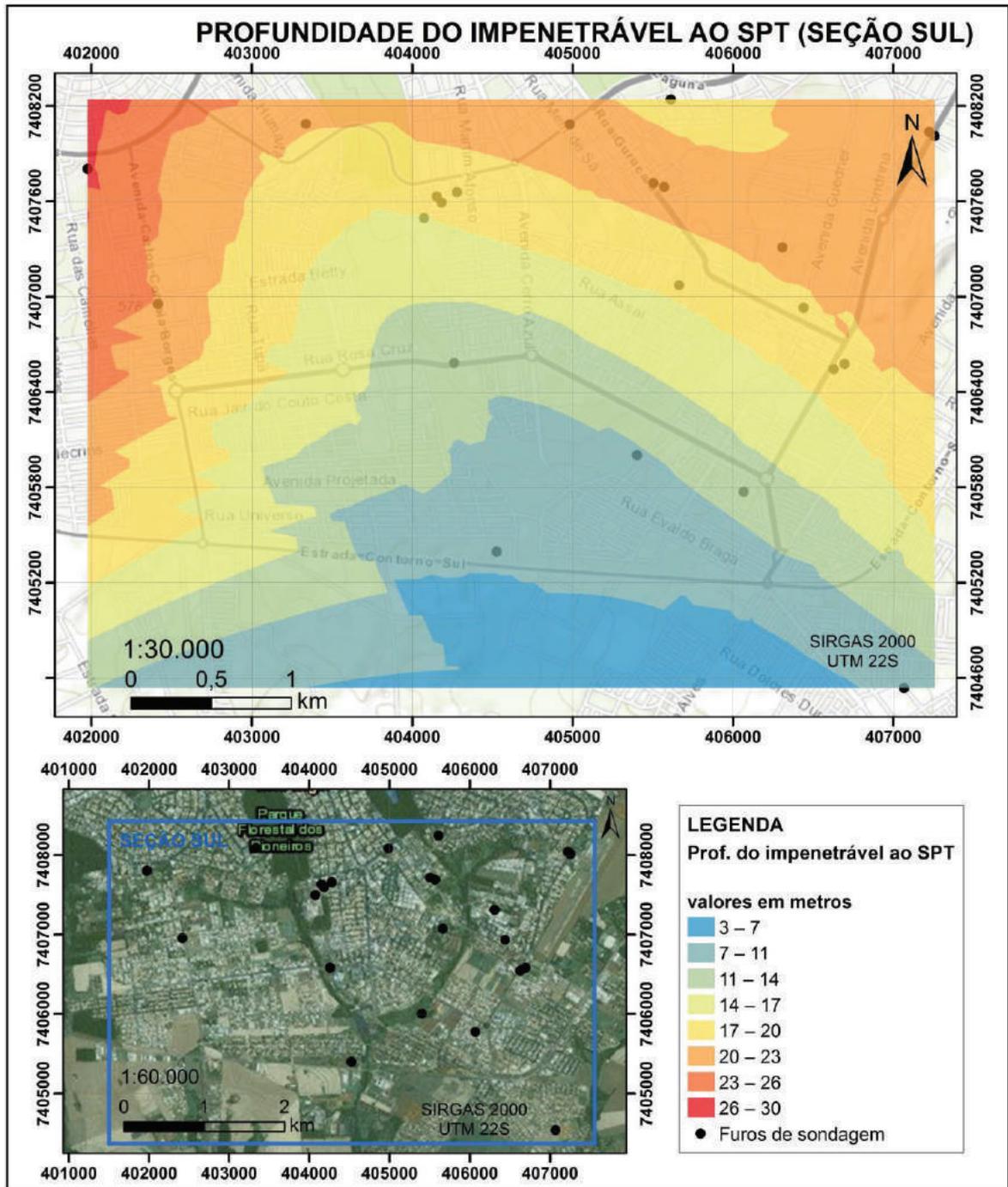


Figura 4.10 - Profundidade do impenetrável ao SPT para uma microrregião mais ao sul do município de Maringá

4.2.2 Índice N do ensaio SPT

A interpolação do índice N do ensaio SPT foi executado nas profundidades de 4, 8, 12, 16 e 25 metros a partir da superfície do terreno. As Figura 4.11 e 4.12 exibem os histogramas da variável N para as profundidades analisadas. Os variogramas para as variáveis N do ensaio SPT e superfície freática estão contidos no apêndice A.

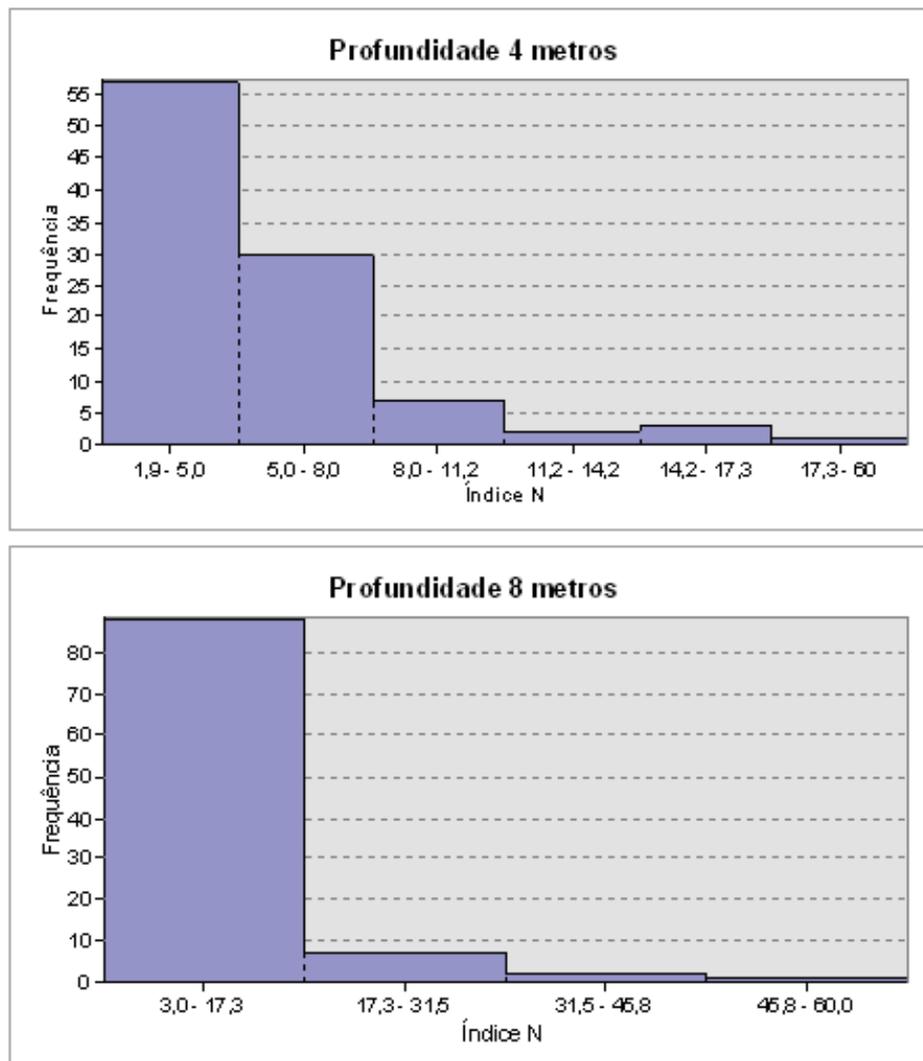


Figura 4.11 - Histograma da variável N para as profundidades de 4 e 8 metros

Na profundidade de 4 metros predominam valores baixos para o índice N, aproximadamente entre 2 a 8 e na profundidade de 8 metros predominam valores médios, aproximadamente entre 3 e 17, ressaltando que algumas sondagens superaram 30 golpes nesta profundidade. Analisando os histogramas para as profundidades de 12 e 16 metros, os baixos valores do índice N ainda são representativos, contudo os valores mais altos começam a

aparecem com maior frequência. É somente na profundidade de 25 metros que o índice N passa a apresentar em grande parte valores superiores a 43 golpes.

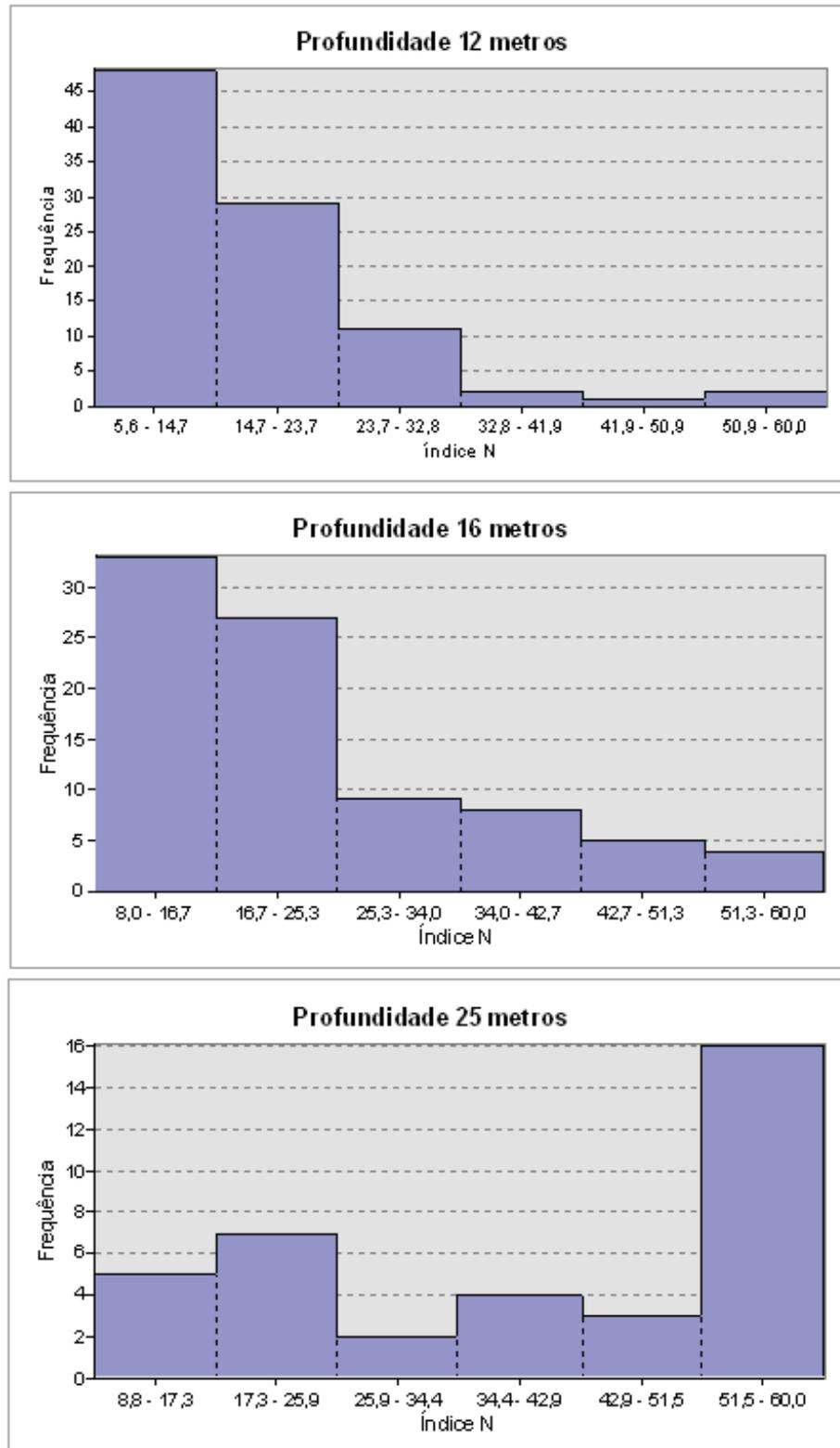


Figura 4.12 - Histograma da variável N para as profundidades de 12, 16 e 25 metros

4.2.2.1 Parâmetros geoestatísticos

Variando-se a direção de busca dos variogramas, verificou-se que o valor de N apresentou anisotropia em todas as profundidades analisadas.

O ajuste automático do software ArcGis indicou que o modelo esférico apresenta boa estruturação para a variograma experimental da variável N, desta forma, este modelo foi adotado na etapa de krigagem. Na Tabela 4.4 estão contidos os parâmetros geoestatísticos utilizados na interpolação do valor N para cada uma das profundidades estudadas.

Tabela 4.4 – Parâmetros geoestatísticos utilizados na interpolação do valor N

Profundidade. (m)	Tamanho do lag (m)	Quantidade de lag's	Alcance		Ângulo de anisotropia (graus)	Modelo teórico
			Eixo de maior continuidade (m)	Eixo de menor continuidade (m)		
4	100	10	544,6	182,4	142,03	Esférico
8	50	10	500	167,7	83,14	Esférico
12	50	12	536,4	179,5	3,34	Esférico
16	60	9	502,0	168,2	99,49	Esférico
25	100	11	889,2	415,9	157,5	Esférico

4.2.2.2 Interpolação na profundidade de 4 metros

Para a interpolação do valor N na profundidade de 4 metros, 100 sondagens foram analisadas e selecionadas. A Figura 4.13 exibe o mapa interpolado (krigagem ordinária) para a variável N na profundidade de 4 metros, conforme os parâmetros geoestatísticos apresentados na Tabela 4.4.

Conforme ilustrado na Tabela 4.4, o ângulo de anisotropia (contado a partir do norte no sentido horário) é igual a $(142,03^\circ)$ coincidindo com o eixo de maior continuidade das amostras, ou seja, nesta direção, a dependência espacial entre as amostras é mais forte.

Na Tabela 4.5 é possível observar alguns parâmetros estatísticos para a profundidade de 4 metros, onde os valores mínimos e máximos para a variável N são, respectivamente, 1,9 e 20,4, com média igual 5,5 e desvio padrão de 3,1.

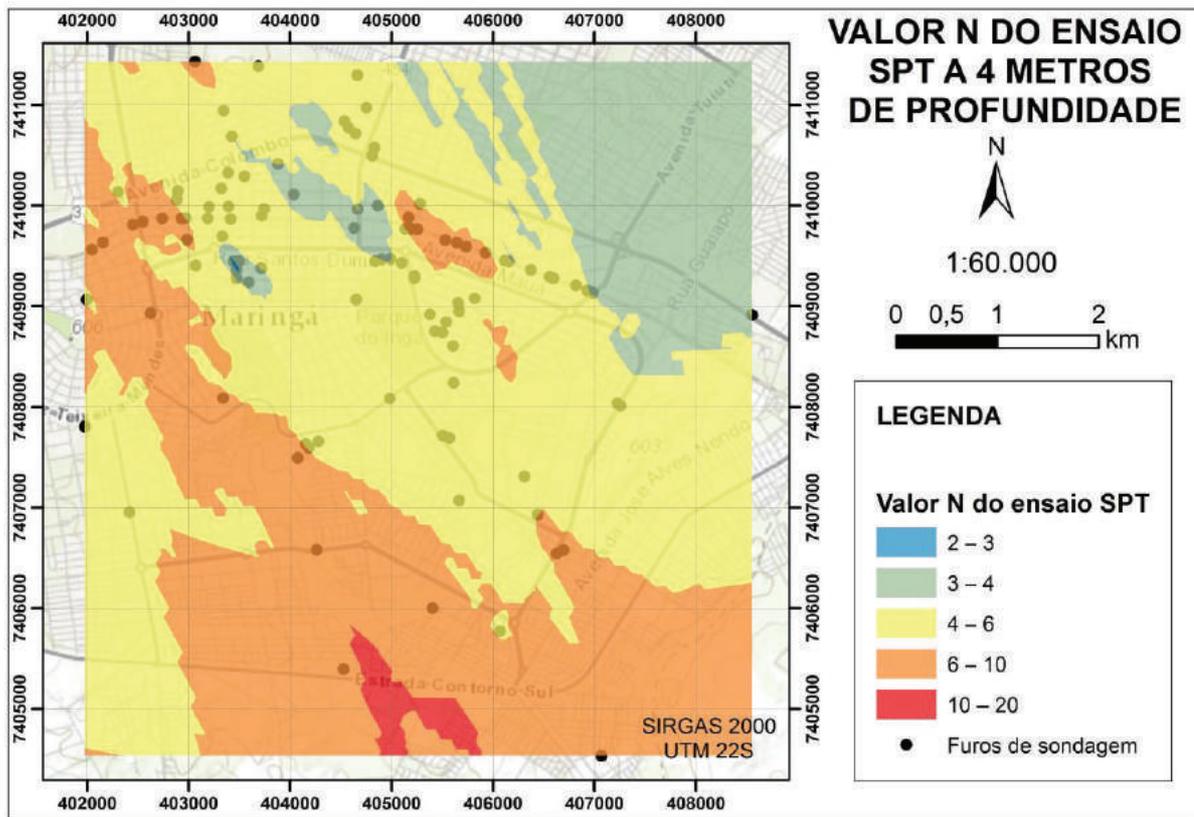


Figura 4.13 - Interpolação da variável N na profundidade de 4 metros

Tabela 4.5 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 4 metros

Parâmetro	Valores
Número de amostras	100
Valor mínimo	1,9
Valor máximo	20,4
Média	5,5
Desvio padrão	3,1
Mediana	4,3
Coefficiente de Skewnes	2,36
Coefficiente de curtose	9,47

Para fins de comparação com a forma do relevo, a Figura 4.14 exhibe a localização das amostras utilizadas na interpolação na profundidade de 4 metros dentro do mapa de declividade da região estudada.

A região com maior densidade de amostras está localizada em uma porção com relevo plano a suave ondulado. Na porção com relevo mais plano, na profundidade de 4 metros, observa-se a tendência do índice N apresentar baixos valores, inferiores a 6 golpes, por

exemplo. Por sua vez, as sondagens localizadas em porções de relevo mais declivoso, como é o caso das sondagens em regiões de baixa vertente, apresentaram valores mais elevados para este índice, valores entre 6 a 20.

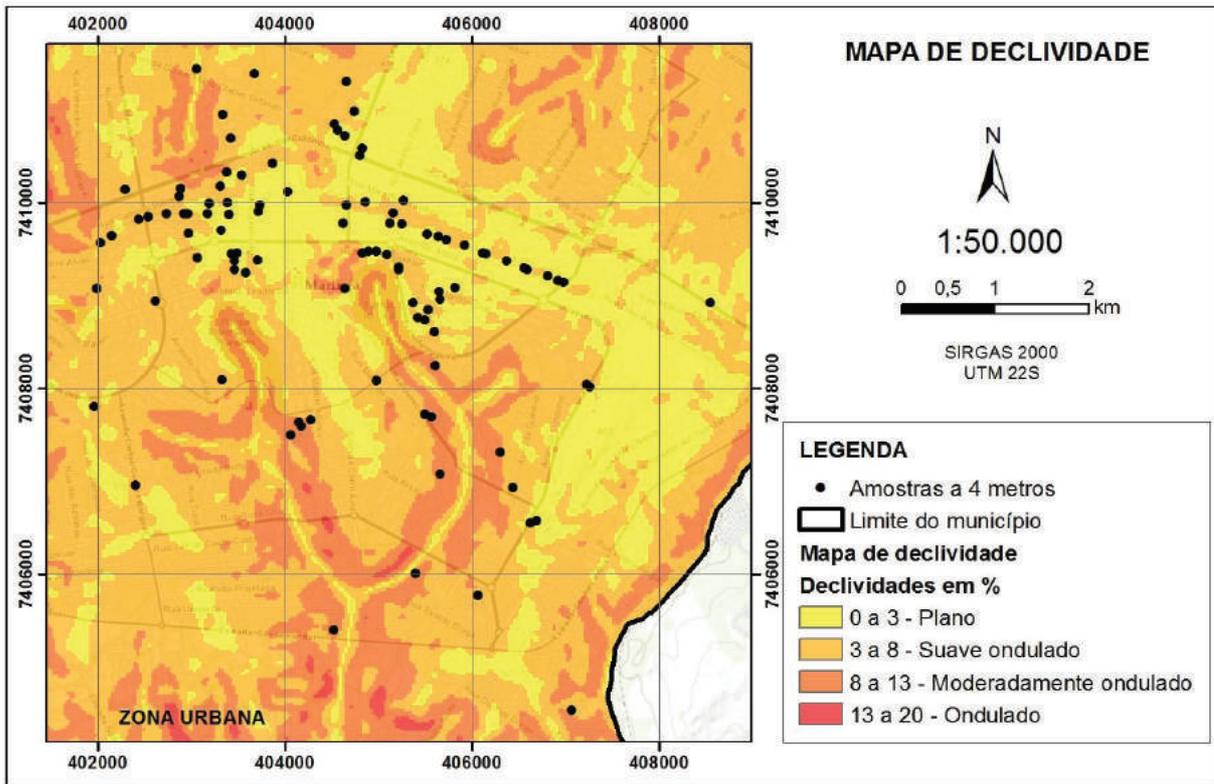


Figura 4.14 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 4 metros

4.2.2.2 Interpolação na profundidade de 8 metros

Para a interpolação do valor N na profundidade de 8 metros, 98 sondagens foram selecionadas. A Figura 4.15 exibe o mapa interpolado (krigagem ordinária) para a variável N na profundidade de 8 metros, conforme os parâmetros geoestatísticos apresentados na Tabela 4.4.

A direção de maior continuidade dos dados foi de $83,14^\circ$, contados a partir do norte. A Tabela 4.6 mostra alguns parâmetros estatísticos para a profundidade de 8 metros, onde os valores mínimos e máximos para a variável N são, respectivamente, 3 e 60, com média igual 10,6 e desvio padrão de 7,9.

Nesta profundidade, observa-se, também, como na profundidade de 4 metros, a tendência do índice N apresentar menores valores em regiões com menores declividades. Na

direção sudoeste, começam a ser observados solos mais resistentes com índices N elevados, superiores a 30 golpes.

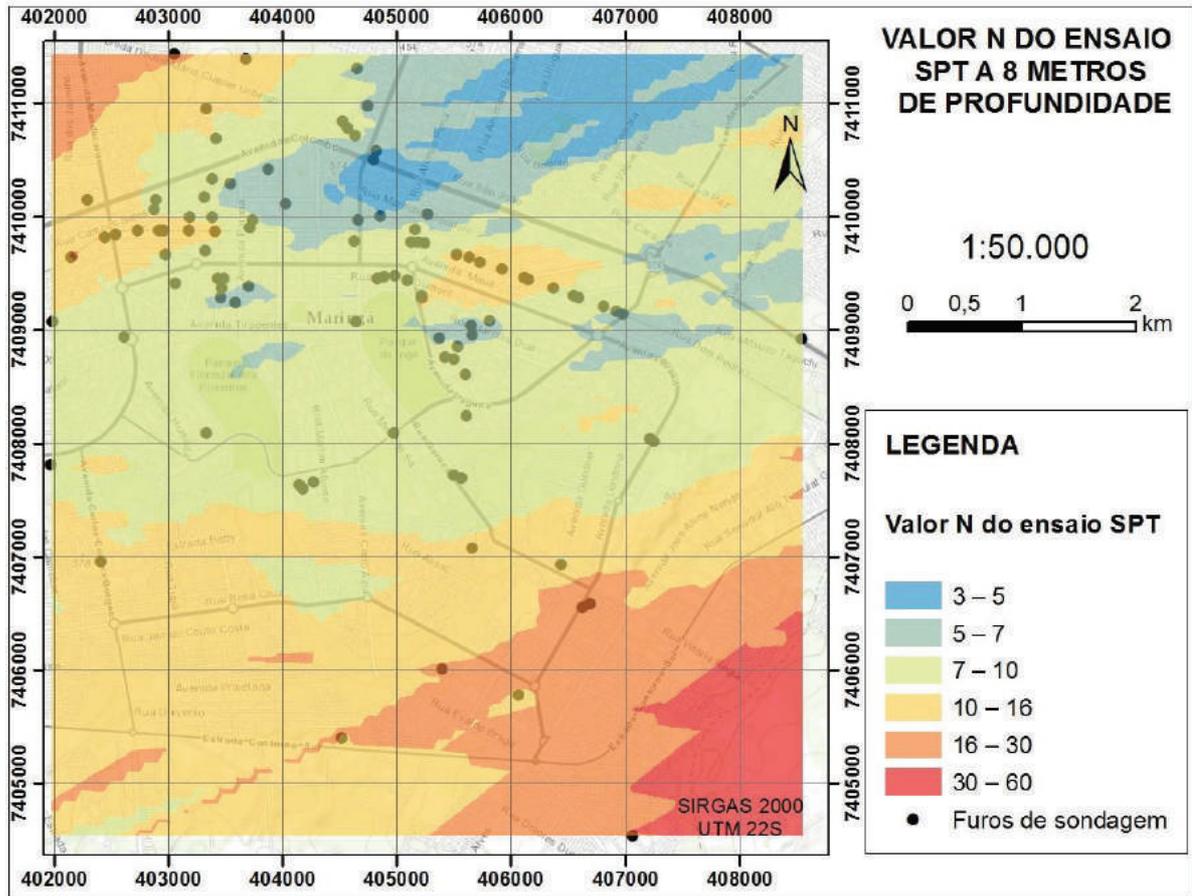


Figura 4.15 – Interpolação da variável N na profundidade de 8 metros

Tabela 4.6 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 8 metros

Parâmetro	Valores
Número de amostras	98
Valor mínimo	3,0
Valor máximo	60,0
Média	10,6
Desvio padrão	7,9
Mediana	8,0
Coefficiente de Skewnes	3,29
Coefficiente de curtose	18,11

A localização das amostras a 8 metros confrontada com a declividade da região pode ser observada na Figura 4.16.

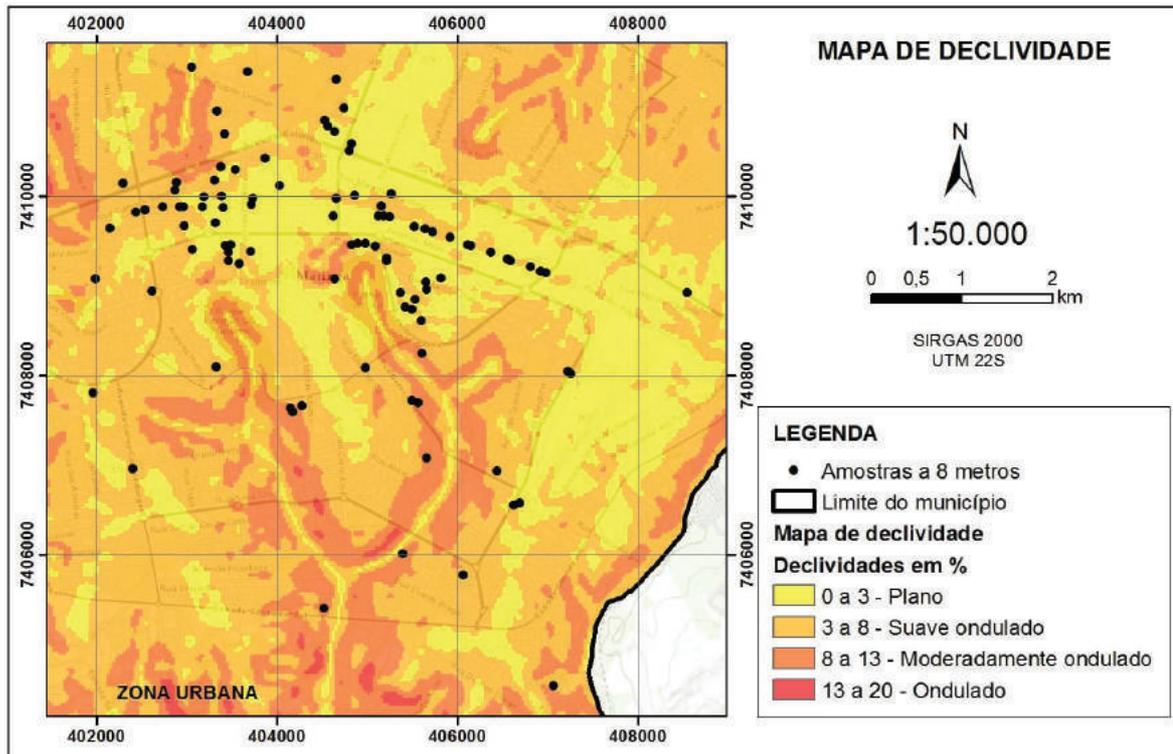


Figura 4.16 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 8 metros

4.2.2.3 Interpolação na profundidade de 12 metros

Para a interpolação do valor N na profundidade de 12 metros, 93 sondagens foram selecionadas. A Figura 4.17 exibe o mapa interpolado (krigagem ordinária) para a variável N na profundidade de 12 metros, conforme os parâmetros geoestatísticos apresentados na Tabela 4.4.

As sondagens que apresentam menores valores para o índice N estão localizadas predominantemente na região do Novo Centro do município. Nestes pontos, a evolução do crescimento do índice N com a profundidade não é tão acentuada como na região mais ao sul do município.

Novamente, ao se comparar a variação do índice N com a declividade da região, verifica-se que em regiões mais declivosas o índice N evolui com maior velocidade. Nesta profundidade predominam valores de N superiores a 15 golpes.

A Tabela 4.7 mostra alguns parâmetros estatísticos para a profundidade de 12 metros, onde os valores mínimos e máximos para a variável N são, respectivamente, 5,6 e 60, com média igual 16,9 e desvio padrão de 9,8.

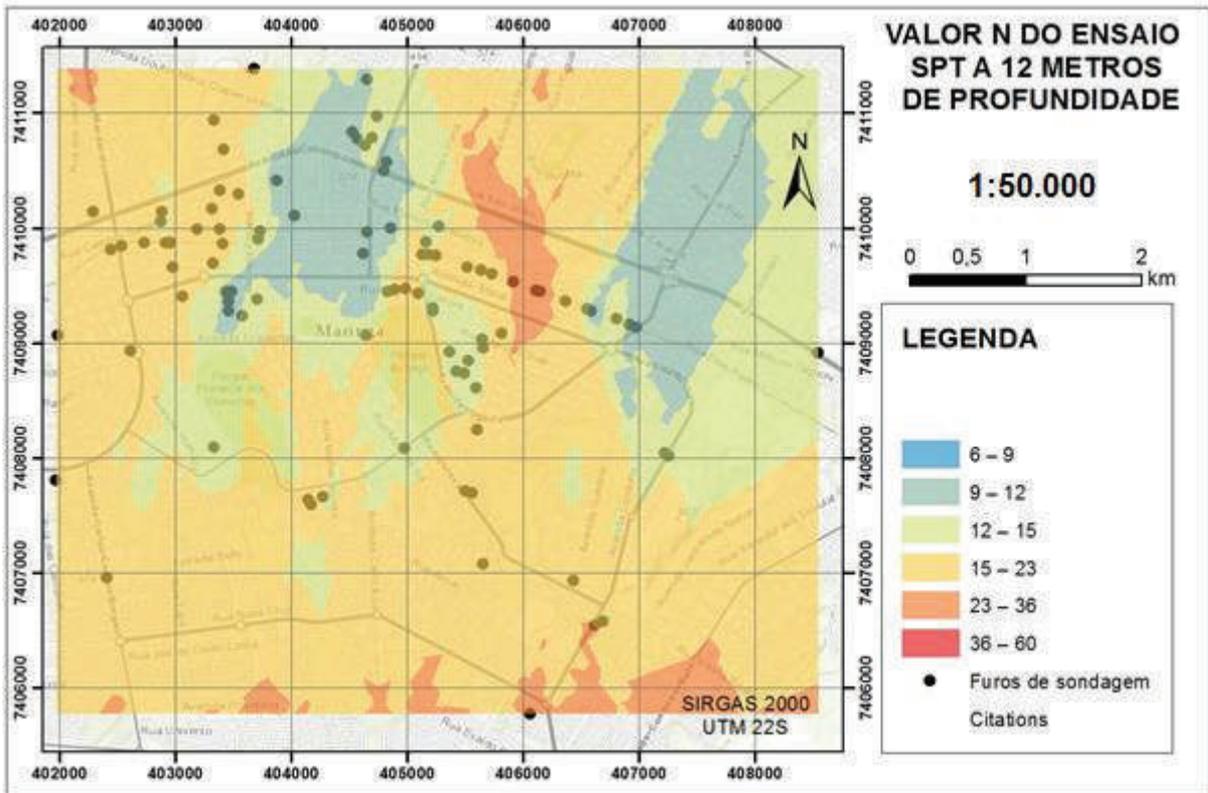


Figura 4.17 – Interpolação da variável N na profundidade de 12 metros

Tabela 4.7 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 12 metros

Parâmetro	Valores
Número de amostras	93
Valor mínimo	5,6
Valor máximo	60,0
Média	16,9
Desvio padrão	9,8
Mediana	14,5
Coefficiente de Skewnes	2,28
Coefficiente de curtose	10,06

A localização das amostras na profundidade de 12 metros confrontada com a declividade da região pode ser observada na Figura 4.18.

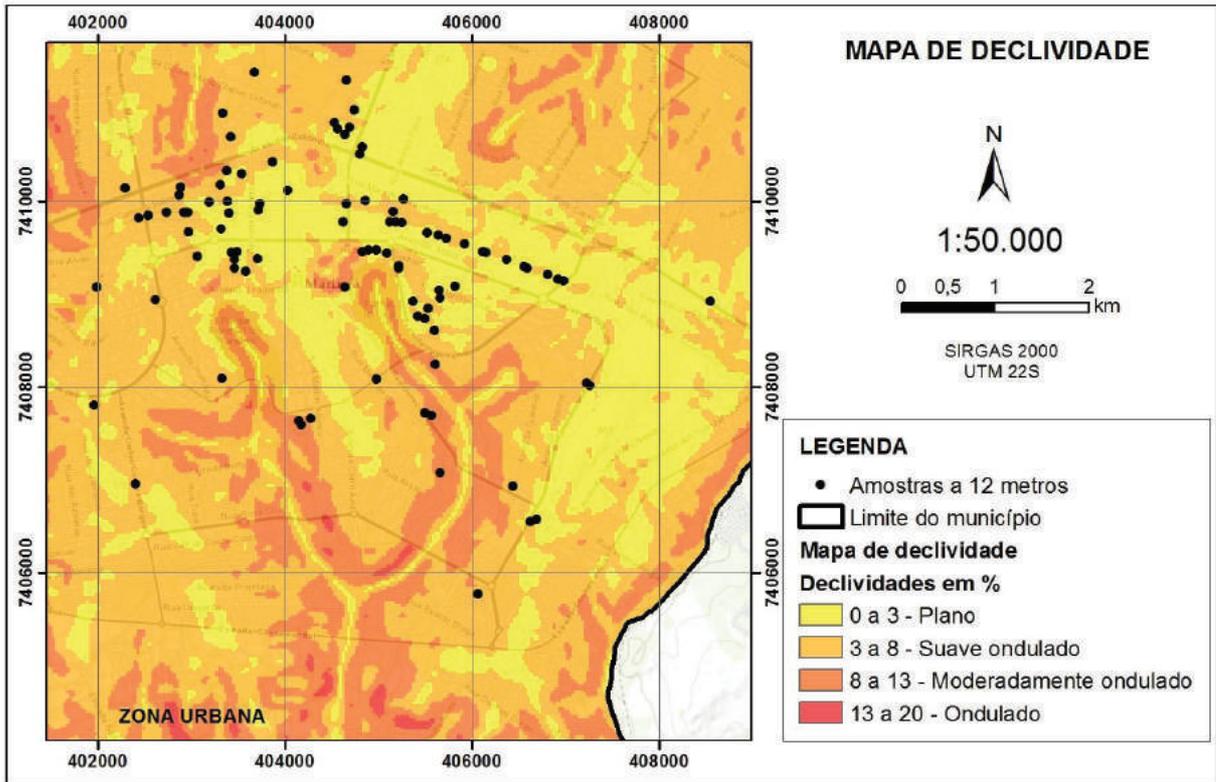


Figura 4.18 – Mapa de declividade e amostras na profundidade de 12 metros

4.2.2.4 Interpolação na profundidade de 16 metros

Para a interpolação do valor N na profundidade de 16 metros, 86 sondagens foram selecionadas. A Figura 4.19 exibe o mapa interpolado (krigagem ordinária) para a variável N na profundidade de 16 metros, conforme os parâmetros geoestatísticos apresentados na Tabela 4.4.

A 16 metros de profundidade, grande parte da região sul do mapa apresenta índice N superior a 27. Ao norte, no canto superior esquerdo, solos mais resistentes começam a ser encontrados, enquanto que na região mais central e nordeste do mapa ainda se encontram solos com índice N variando de 8 a 15 golpes.

A Tabela 4.8 mostra alguns parâmetros estatísticos para a profundidade de 16 metros, onde os valores mínimos e máximos para a variável N são, respectivamente, 8 e 60, com média igual 23,3 e desvio padrão de 13,1.

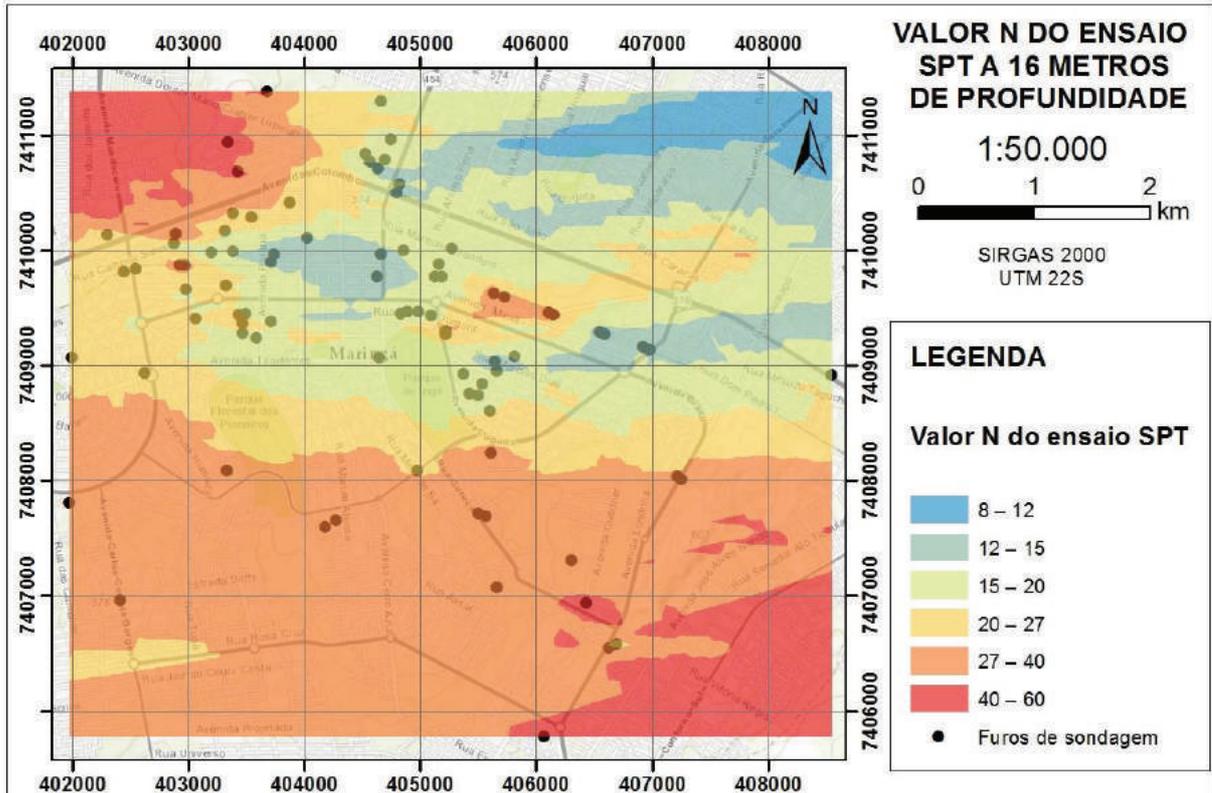


Figura 4.19 – Interpolação da variável N na profundidade de 16 metros

Tabela 4.8 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 16 metros

Parâmetro	Valores
Número de amostras	86
Valor mínimo	8,0
Valor máximo	60,0
Média	23,3
Desvio padrão	13,1
Mediana	19,0
Coefficiente de Skewnes	1,27
Coefficiente de curtose	3,90

A localização das amostras a 16 metros confrontada com a declividade da região pode ser observada na Figura 4.20.

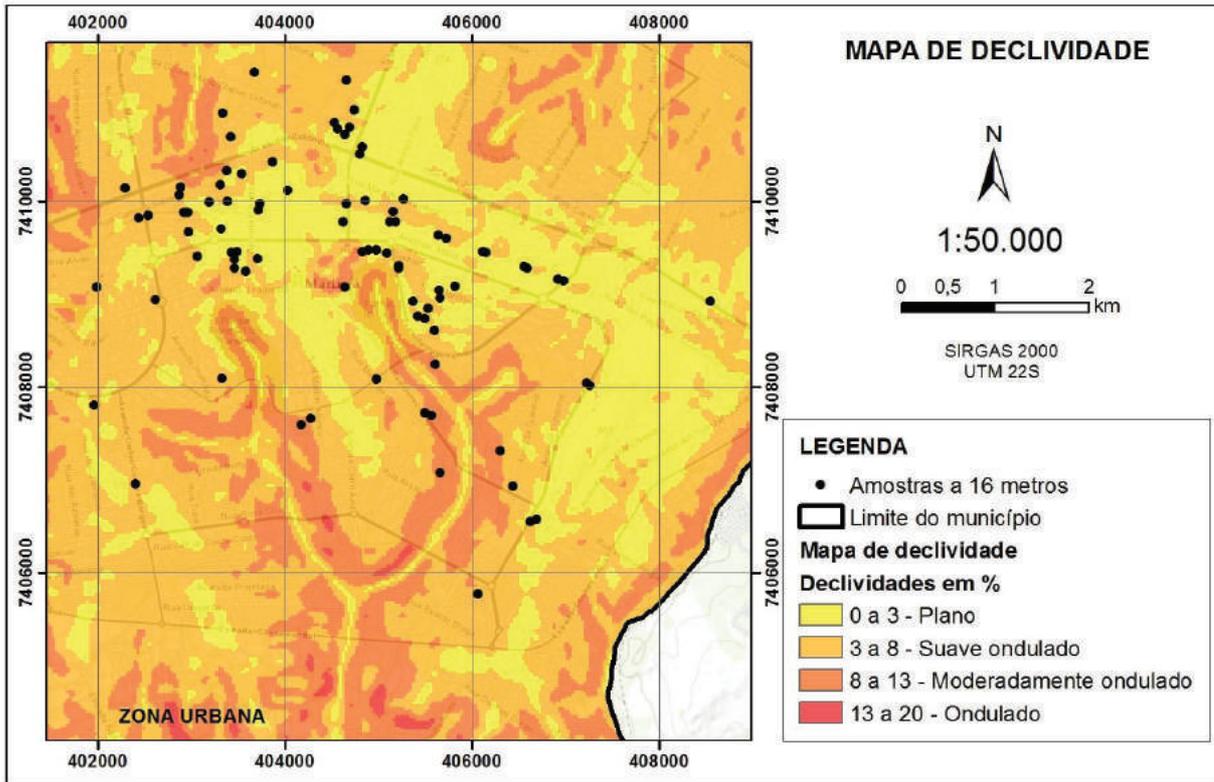


Figura 4.20 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 16 metros

4.2.2.5 Interpolação na profundidade de 25 metros

A Figura 4.21 exibe o mapa interpolado (krigagem ordinária) para a variável N na profundidade de 25 metros, conforme os parâmetros geoestatísticos apresentados na Tabela 4.4.

Para a interpolação do valor N na profundidade de 25 metros, 37 sondagens foram selecionadas.

A 25 metros de profundidade, grande parte das sondagens analisadas são consideradas impenetráveis ao SPT. Como pode-se observar, as 37 sondagens utilizadas para confeccionar o mapa da Figura 4.21 encontram-se em uma região de topo de terreno mais plano. Algumas sondagens ainda apresentavam índice N da ordem de 8 golpes, contudo a maioria dos solos a 25 metros apresentaram maior dificuldade a cravação do amostrador e conseqüentemente maiores valores para este índice.

Os resultados obtidos através da análise dos mapas da variação do índice N com a profundidade podem ser confirmadas através do mapa interpolado da superfície freática e dos perfis norte-sul e leste-oeste que serão apresentados na sequência.

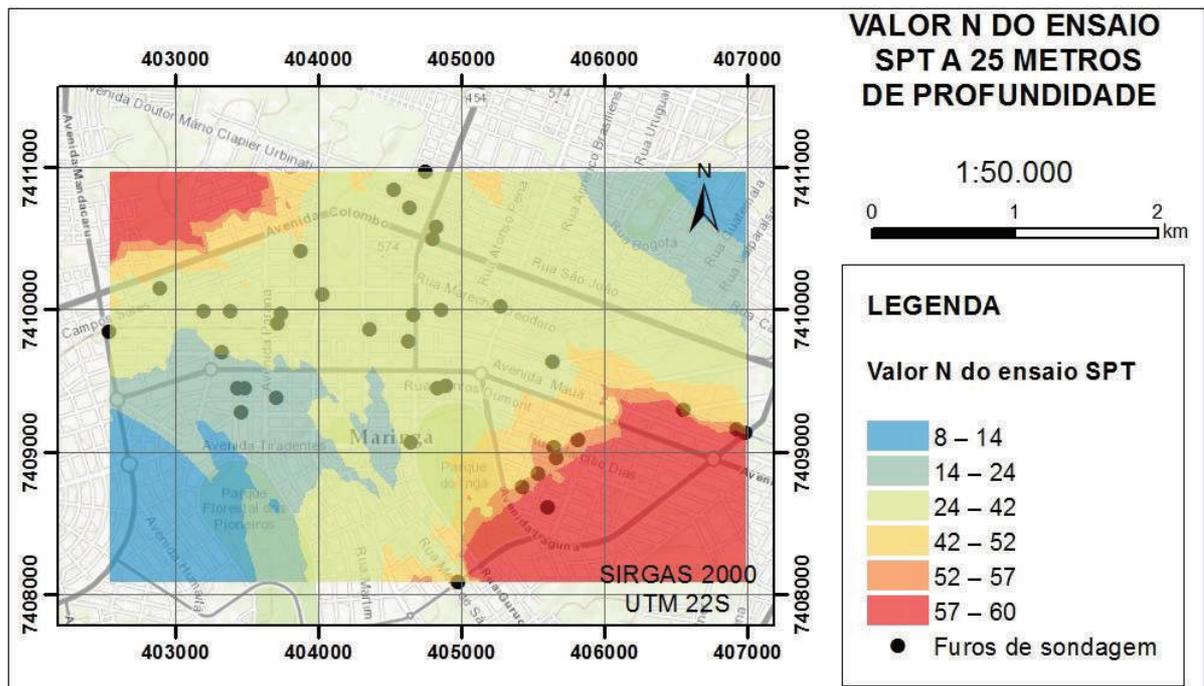


Figura 4.21 – Interpolação da variável N na profundidade de 25 metros

A Tabela 4.9 mostra alguns parâmetros estatísticos para a profundidade de 25 metros, onde os valores mínimos e máximos para a variável N são, respectivamente, 8,8 e 60, com média igual 40,9 e desvio padrão de 18,9.

Tabela 4.9 – Parâmetros estatísticos para a variável impenetrável ao SPT a 25 metros

Parâmetro	Valores
Número de amostras	37
Valor mínimo	8,8
Valor máximo	60,0
Média	40,9
Desvio padrão	18,9
Mediana	47,0
Coefficiente de Skewnes	-0,33
Coefficiente de curtose	1,51

Analisando os dados estatísticos de todas as profundidades, percebe-se um aumento no valor mínimo do índice N obtido em cada profundidade sendo o valor máximo, fixado em 60 (impenetrável ao SPT), observado na profundidade de 8 metros em diante. A média dos dados é crescente, assim como o desvio padrão, ou seja, para maiores profundidades existe um intervalo maior entre o valor mínimo e máximo observado para a variável N.

A localização das amostras a 25 metros confrontada com a declividade da região pode ser observada na Figura 4.22.

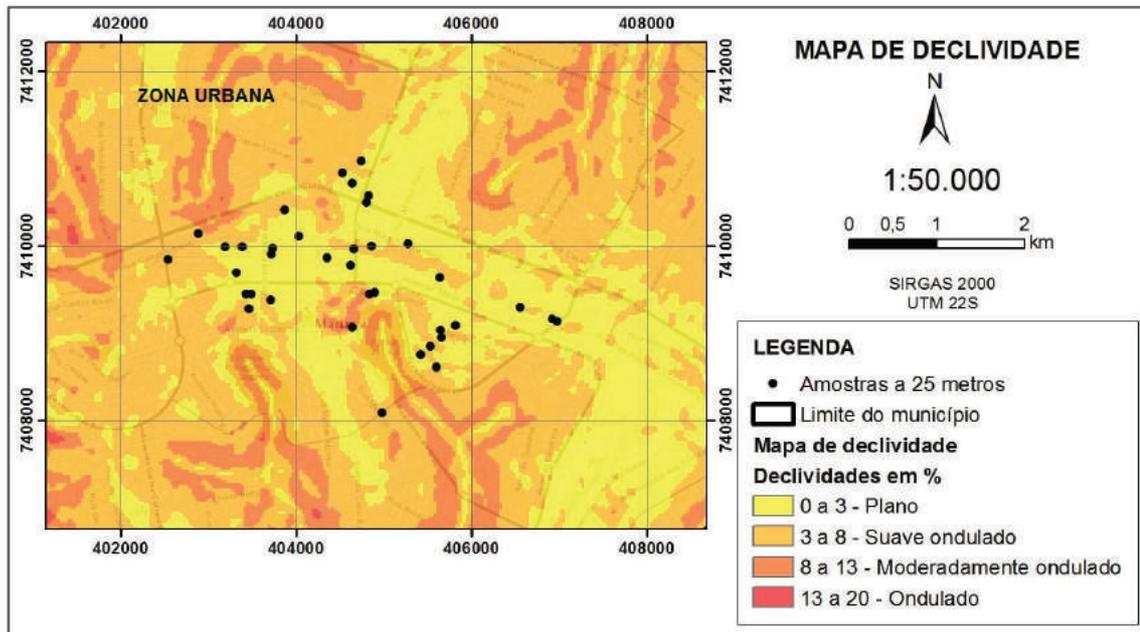


Figura 4.22 - Mapa de declividade e amostras na profundidade de 25 metros

4.2.3 Superfície freática

A Figura 4.23 ilustra o histograma de frequência dos dados do nível d'água. Como se observa, grande parte das amostras indicaram lençol freático entre as profundidades de 12,5 a 33,8 metros, sendo que apenas duas apresentaram valores superiores a este.

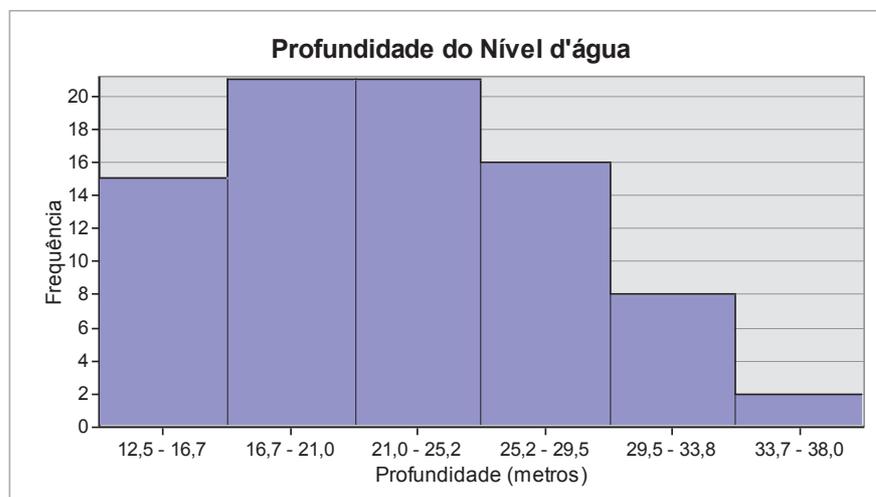


Figura 4.23 - Histograma da variável profundidade do nível d'água

A Tabela 4.10 mostra alguns parâmetros estatísticos obtidos durante a análise dos dados dos poços de perfuração e das sondagens com SPT que apresentaram leitura de nível d'água. A profundidade mínima e máxima foi de respectivamente, 12,5 e 38,0 metros, com média igual 22,5 e desvio padrão de 5,5.

Tabela 4.10 – Parâmetros estatísticos da profundidade do nível d'água

Parâmetro	Valor
Número de amostras	83
Valor mínimo (metros)	12,5
Valor máximo (metros)	38,0
Média (metros)	22,5
Desvio padrão (metros)	5,5
Mediana (metros)	22,4
Coefficiente de Skewnes	0,38
Coefficiente de curtose	2,47

Na Tabela 4.11 estão contidos os parâmetros geoestatísticos utilizados na interpolação da superfície freática

Tabela 4.11 – Parâmetros geoestatísticos utilizados na interpolação do nível d'água

Tamanho do lag (m)	Quantidade de lag's	Alcance		Ângulo de anisotropia (graus)	Modelo teórico
		Eixo de maior continuidade (m)	Eixo de menor continuidade (m)		
250	15	2941,21	985,72	155,57	Esférico

O mapeamento da superfície freática, observado na Figura 4.24, foi realizado mediante a interpolação de 83 dados cuja localização sobreposta ao mapa hipsométrico pode ser observada na Figura 4.25.

As sondagens localizadas em cotas altimétricas mais elevadas tendem a apresentar, de forma geral, ocorrência do lençol freático a maiores profundidades (superiores a 24 metros). Por sua vez, pontos próximos a corpos d'água em regiões de baixa e média vertente apresentam lençol freático mais aflorado.

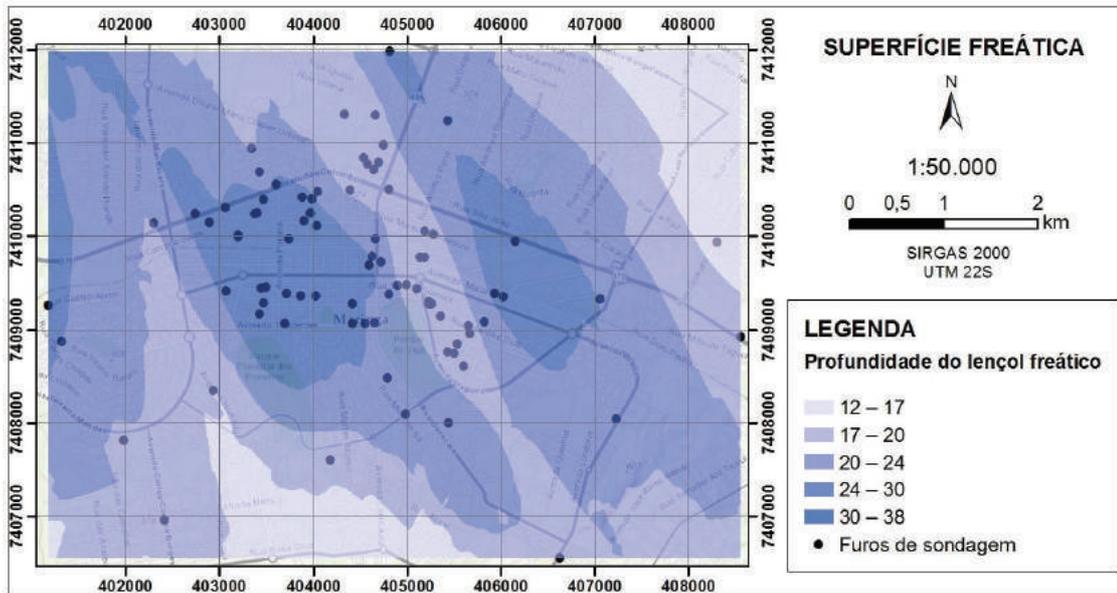


Figura 4.24 – Mapa da superfície freática

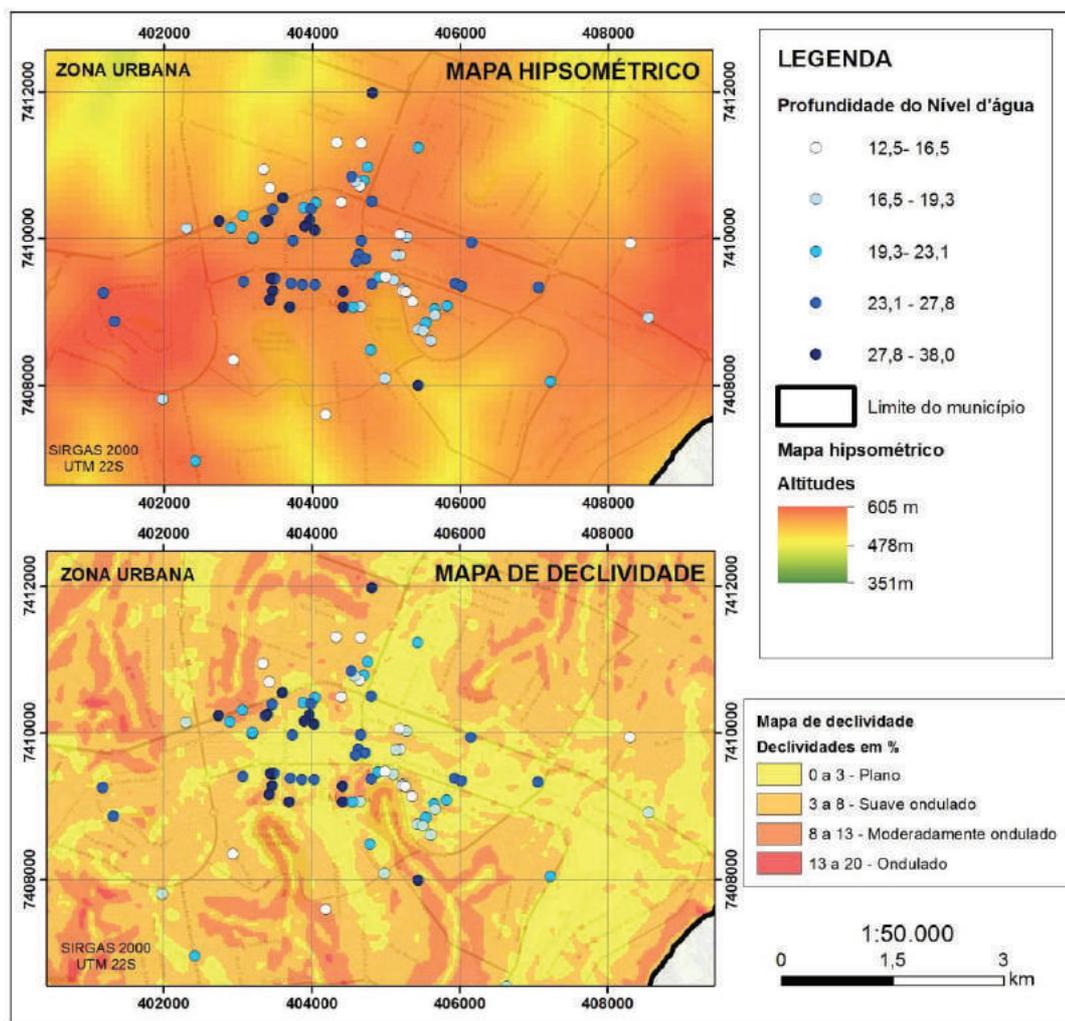


Figura 4.25 - Localização dos furos de sondagem no mapa hipsométrico e de declividade

4.2.4 Perfilagem

Os alinhamentos utilizados para traçar os perfis norte-sul e leste-oeste podem ser observados na Figura 4.26. No primeiro deles, foram utilizadas 27 sondagens distribuídas predominantemente ao longo da linha férrea na região central do município, em aproximadamente 5 km, enquanto que no segundo alinhamento, foram utilizadas 20 sondagens ao longo de, aproximadamente, 8 km.

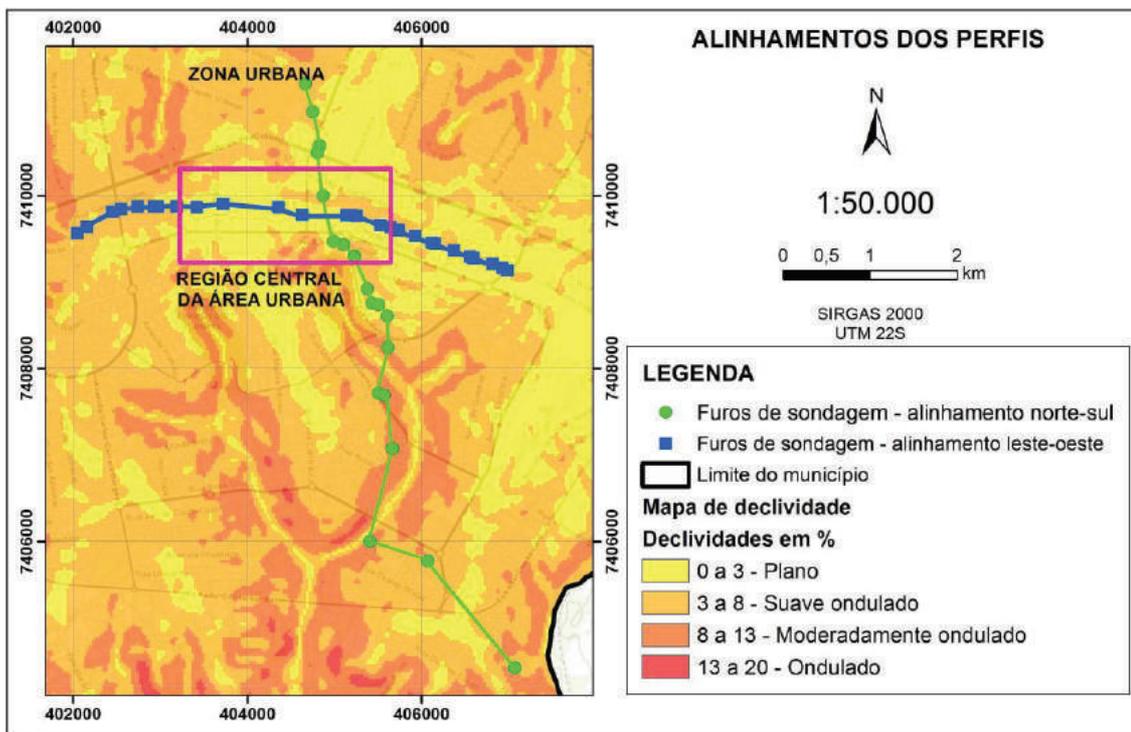


Figura 4.26 - Alinhamento dos perfil norte-sul e leste-oeste

Nos dois perfis, alguns comportamentos são semelhantes. O topo rochoso se mostra mais superficial em pontos de média a baixa vertente e com declividade mais pronunciada. Consequentemente, as camadas de solo evoluído e de alteração se tornam mais delgadas nestes pontos.

No perfil norte-sul (Figura 4.27), partindo da região central de Maringá, no sentido sul, é possível observar sequências de aclives e declives passando por regiões de alta, média e baixa vertente. Até, aproximadamente, 3000 metros, caracteriza-se uma região de topo com relevo plano a suave ondulado e com presença de Latossolos Vermelhos. Nesta região, a rocha se encontra a maiores profundidades, de 25 a 30 metros, por exemplo. Também nesta região, tanto

as camadas de solo evoluído quanto as de solo de alteração se apresentam mais espessas quando comparadas a outros pontos do mesmo perfil.

Percebe-se, também, que o crescimento do índice N com a profundidade é mais lento nesta região quando comparada às demais, sendo que dificilmente o índice N supera os 15 golpes em toda a camada de solo evoluído.

De 3000 a 8000 metros, correspondente à região de menores cotas altimétricas, observam-se dois vales consecutivos, onde as declividades variam de moderadamente ondulado a ondulado. Nestes vales, onde predominam os Nitossolos Vermelhos, ou seja, regiões de média a baixa vertente, a rocha se apresenta mais superficial sendo perceptível a diminuição das camadas de solo, com especial atenção à camada de solo evoluído. Em regiões de menores cotas altimétricas, porém com relevo mais suave, verifica-se a tendência de um leve espessamento das camadas de alteração bem como o aprofundamento do topo rochoso, como pode ser visualizado entre as sondagens SP-86 e SP-90.

O perfil leste-oeste (Figura 4.28) encontra-se em uma região onde predominam declividades plana a suave ondulada, sem grandes variações de cotas altimétricas. Nas regiões mais planas deste perfil, entre as sondagens SP-60 e SP-61, as camadas de solo de alteração apresentam grande espessura, sendo encontradas camadas de solo evoluído com até 15 metros de espessura.

Na extremidade do sentido leste, mesmo sendo uma região de maiores cotas altimétricas, o topo rochoso se encontra a menores profundidades. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato desta região ser mais declivosa que o restante do perfil.

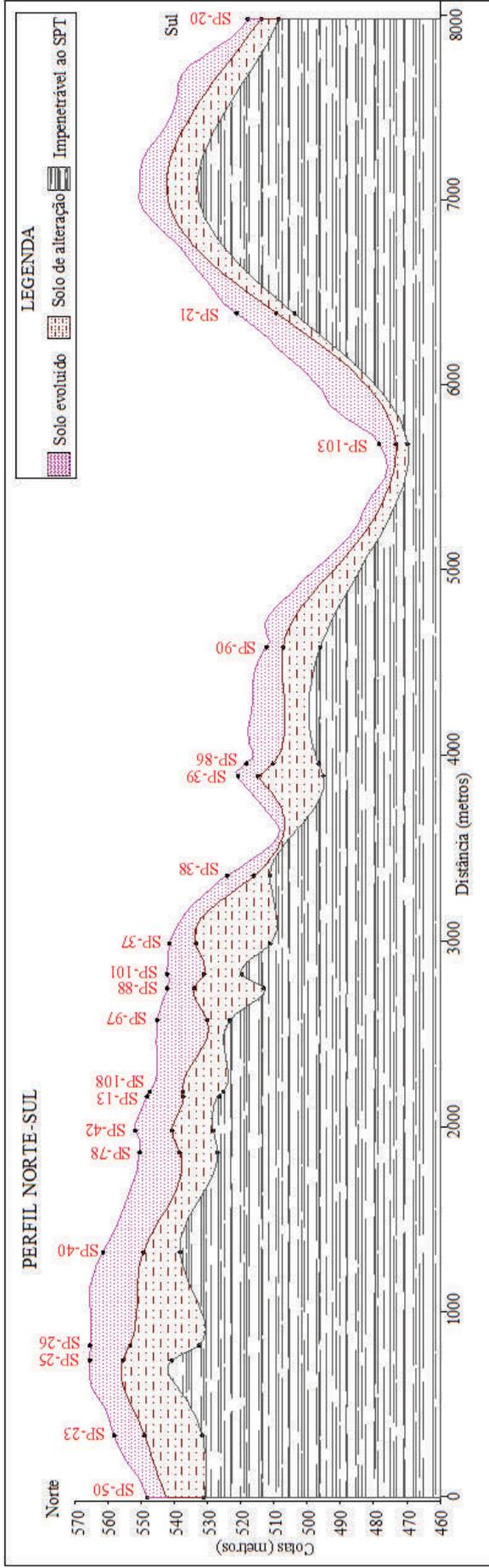


Figura 4.27 – Perfil norte-sul evidenciando as camadas de solo evoluído, de alteração e topo rochoso

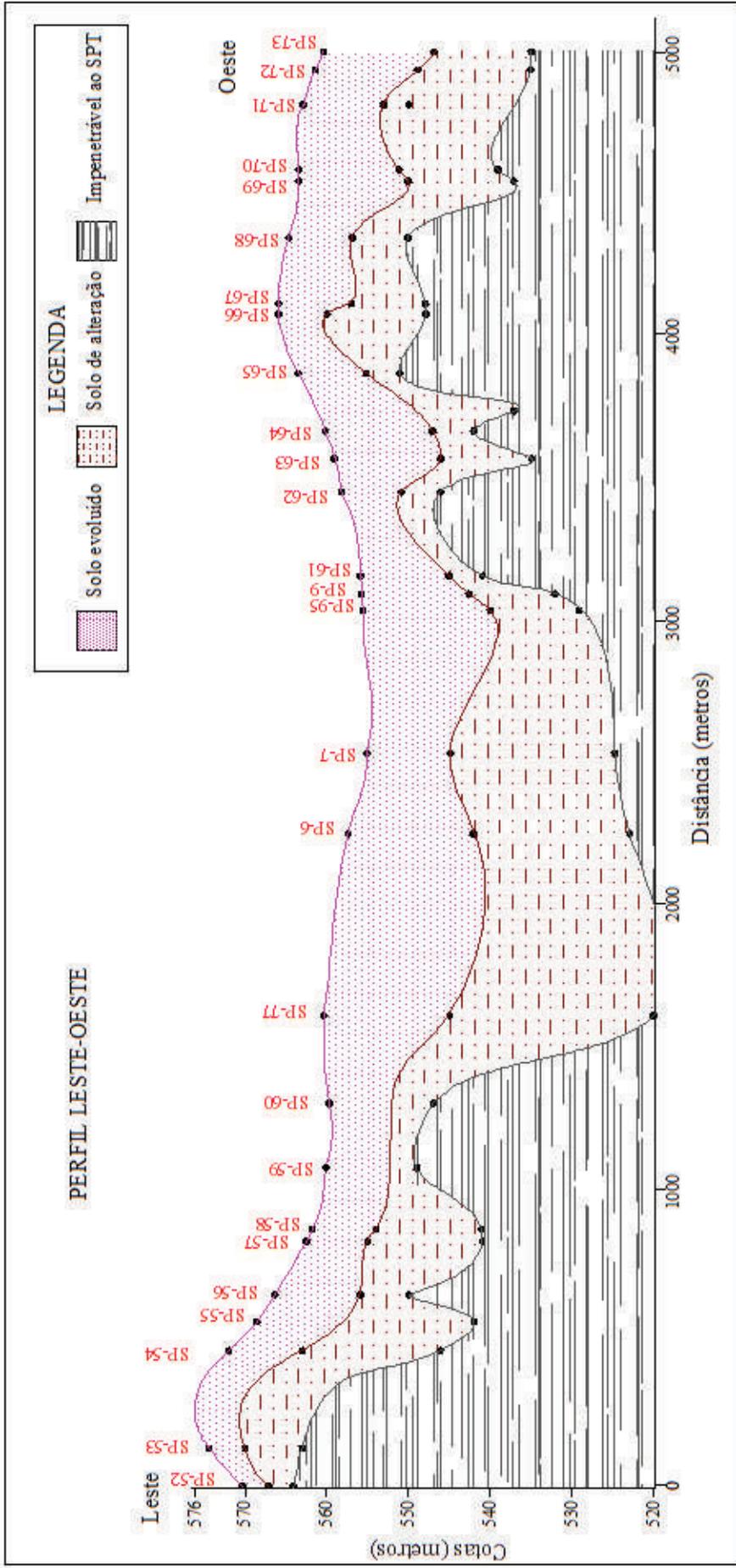


Figura 4.28 - Perfil leste-oeste evidenciando as camadas de solo evoluído, de alteração e topo rochoso

4.3 ANÁLISE DE ERROS

A ferramenta *Geostatistical Analyst* fornece, após a etapa de krigagem ordinária, parâmetros relativos aos erros gerados na interpolação. A Figura 4.29 mostra os gráficos do valor predito pelo método *versus* o valor medido durante a amostragem para o impenetrável ao SPT na seção norte e na seção sul.

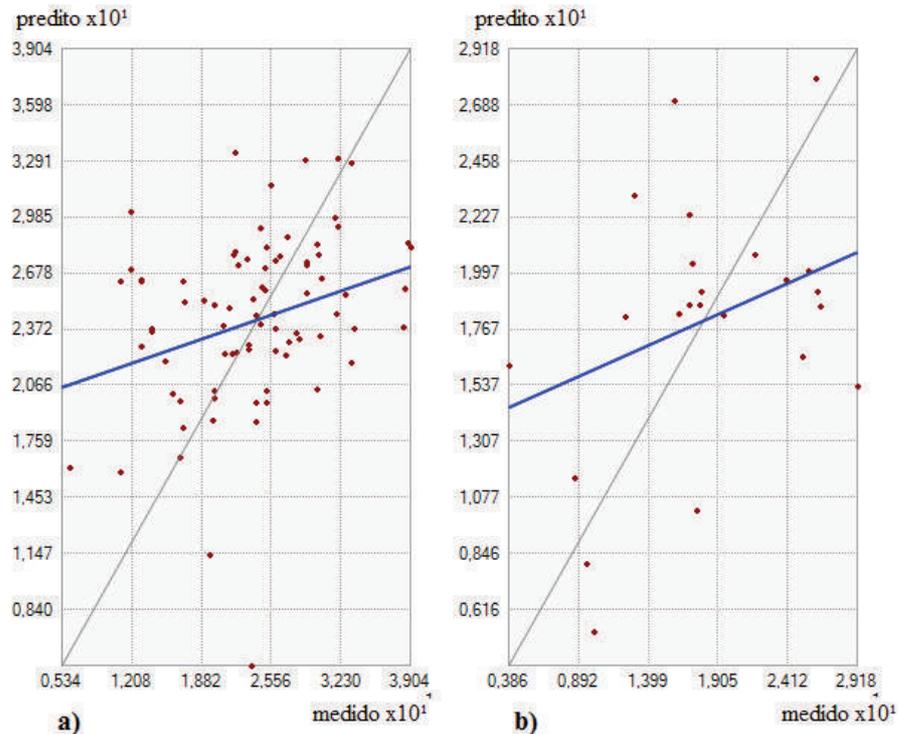


Figura 4.29 – Valor medido x valor predito a) impenetrável ao SPT na seção norte; b) impenetrável ao SPT na seção sul

Nota-se que para a variável impenetrável ao SPT a maiores profundidades, o método realiza uma previsão conservadora fornecendo um valor menor que a profundidade real e, inversamente, tende a superestimar a profundidade do impenetrável ao SPT.

De fato, observa-se que este fenômeno se repete, em maior ou menor grau, com as demais variáveis em estudo, mostrando que o método apresenta dificuldades em interpolar valores extremos, tanto para valores elevados de N como para os mais baixos.

As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram a mesma relação para a variável N nas profundidades de 4, 8, 12, 16 e 25 metros e a Figura 4.33 para a superfície freática.

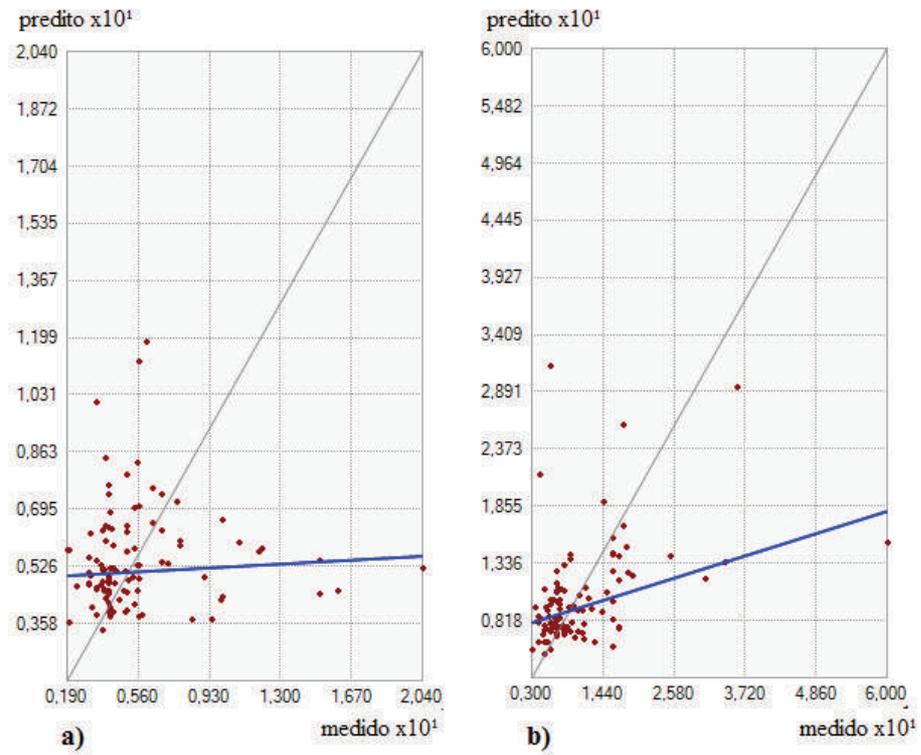


Figura 4.30 - Valor medido x valor predito para a variável N: a) 4 metros; b) 8 metros

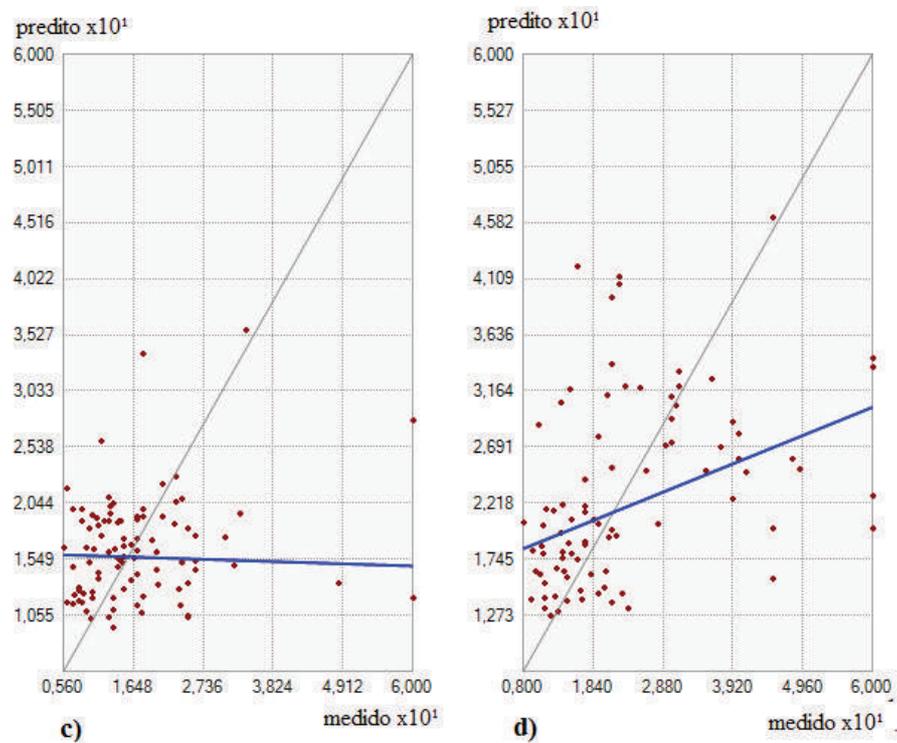


Figura 4.31 - Valor medido x valor predito para a variável N: c) 12 metros; d) 16 metros

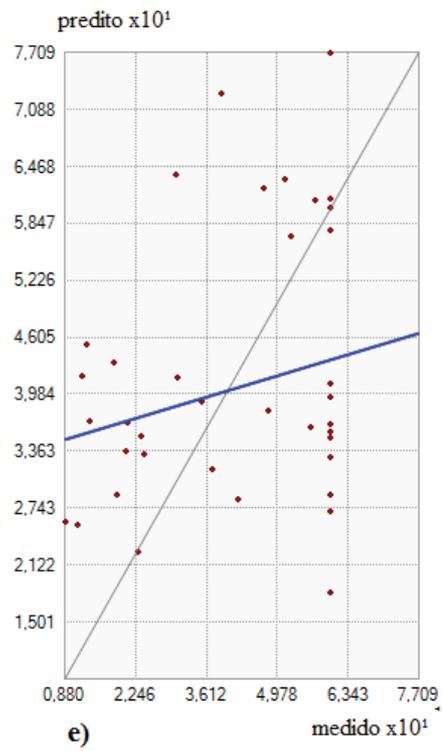


Figura 4.32 - Valor medido x valor predito para a variável N: e) 25 metros

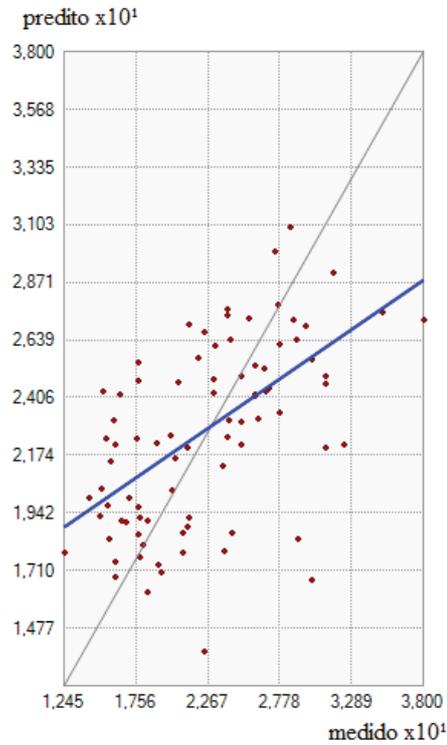


Figura 4.33 - Valor medido x valor predito para a superfície freática

5 CONCLUSÃO

A utilização da técnica geoestatística de krigagem ordinária se mostra satisfatória quando se pretende ter uma ideia geral do comportamento dos solos associados a variáveis que apresentam variabilidade espacial, permitindo identificar possíveis correlações entre suas propriedades e características geomorfológicas, como foi o objetivo deste estudo.

Verifica-se que a krigagem ordinária apresenta dificuldades em mapear valores extremos seja para a variável N do ensaio SPT como também para a profundidade do lençol freático. A presença de matacões isolados no solo, ou seja, índice N elevado próximos a amostras de solo menos resistentes constituem um fenômeno em que o método não apresenta bons resultados. Amostras próximas, porém com grande variação no valor da variável não conseguem ser bem compreendidas pelo método, resultando em valores preditos algumas vezes maiores e, em outras vezes, menores do que o valor real medido.

Este fenômeno se torna mais nocivo quando a região em estudo apresenta baixa densidade de amostras. Desta forma, uma maior quantidade de dados conduziria a resultados de valores preditos mais próximos dos valores medidos.

Com relação às características observadas nos mapas interpolados, verifica-se que na área estudada, é possível identificar regiões bem definidas onde as espessuras das camadas de solo são mais delgadas, e outras onde são mais espessas em função da sua posição e forma da vertente. Como constatado, existe a tendência de regiões de média a alta vertente, com relevo mais plano, apresentarem perfis de solo mais espessos e, conseqüentemente, maiores profundidades até o impenetrável ao SPT. O crescimento do índice N do ensaio SPT com a profundidade é mais suave nestes perfis espessos onde predominam os Latossolos Vermelhos, sendo possível associar tal comportamento com o tipo pedológico da área estudada. Nas regiões de média a baixa vertente ou até mesmo em regiões de alta vertente, porém com declividades mais pronunciadas, os perfis de solos são mais delgados, revelando menores profundidades até o impenetrável ao SPT (topo rochoso mais superficial). Nestas regiões de baixa vertente, onde predomina o Nitossolo Vermelho, verifica-se que o crescimento do índice N do ensaio SPT é mais acentuado, apresentando, para profundidades mais superficiais solos de consistência média a rija.

A região central de Maringá, no Bairro Novo Centro e entornos, apresenta um perfil típico de solos onde as camadas de alteração são mais espessas e a rocha se encontra a profundidades superiores a 25 metros. A camada de solo evoluído chega a atingir, em algumas situações, espessura da ordem de 15 metros. Além da grande espessura, esta camada apresenta

variação do índice N com a profundidade bem sutil, ou seja, até a profundidade de 12 metros é comum obter valores de N inferiores a 15 golpes.

Nas regiões de média e baixa vertente, observadas no perfil leste-oeste, é nítido a influência da geomorfologia do terreno na espessura das camadas de alteração e, também, na cota do impenetrável ao SPT.

Em função da presença de solos pouco resistentes nas camadas mais superficiais do solo, soluções em fundações diretas rasas podem ser consideradas inviáveis em grande parte da região central do município de Maringá. De fato, soluções em fundações indiretas são rotineiras em todo o município, porém deve-se verificar, particularmente em regiões de baixa a média vertente com declividades mais acentuadas, a possibilidade de adoção de outras alternativas em função da melhor resistência dos solos em profundidades mais superficiais.

A realização deste estudo mostra que a forma da vertente e sua posição na crosta terrestre são dois fatores que estão intimamente ligados ao comportamento dos solos, sendo decisivos na estimativa do impenetrável ao SPT e, também, da profundidade do lençol d'água.

A superfície interpolada do lençol freático revela que, em regiões de alta vertente, o nível d'água tende a estar a maiores profundidades, enquanto que, nas regiões de média a baixa vertente, o mesmo se aproxima da superfície do terreno. Em geral, o nível d'água, dentro da região estudada, se encontra a profundidades superiores a 17 metros, com destaque a alguns pontos, sondados durante a perfuração de poços, que revelaram nível d'água a grandes profundidades (superiores a 30 metros). Observa-se, também, que na maioria dos casos analisados a água se encontra na camada de solo de alteração, muito próxima ao impenetrável ao SPT.

A grande variabilidade dos solos indica que os resultados obtidos mediante interpoladores estatísticos devem ser analisados com cautela. Sabe-se que quanto maior for a densidade de pontos amostrados, mais confiáveis serão os produtos finais. Desta forma, a medida que novas sondagens forem executadas, o banco de dados poderá ser ampliado refletindo em estimativas mais acuradas e, conseqüentemente, resultados mais confiáveis sobre o conhecimento e aplicabilidade dos solos.

Assim, algumas recomendações podem ser de interesse em futuros estudos nesta linha de pesquisa, por exemplo:

- a) Alimentar o banco de dados de forma a trabalhar com o maior número possível de sondagens dentro da área de estudo buscando preencher regiões não amostradas;

- b) Comparar períodos chuvosos com períodos de seca buscando entender melhor o comportamento do fluxo de água no solo e estimar a superfície freática em função das diferentes estações do ano;
- c) Obter outros perfis típicos do subsolo a fim de confirmar as correlações com geomorfologia e a pedologia;
- d) Comparar os resultados obtidos com a krigagem ordinária com outros interpoladores.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1586-67**: Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. West Conshohocken, 1967.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Manual de Sondagens**. 4 ed. São Paulo, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio, 2001.

_____. **ABNT NBR 8036**: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios: procedimento. Rio de Janeiro, 1983.

ANDRIOTTI, J. L. S. Introdução à Geoestatística. *Estudos Tecnológicos-Acta Geológica Leopoldensia*, São Leopoldo, v. 11, n.27, p. 5-81, 1988.

AOKY, N.; CINTRA, J.C.A. **Fundação**. Notas de aulas (Disciplina SGS-404: Fundações). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

AOKY, N.; CINTRA, J.C.A. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

AOKI, N.; VELLOSO, D.A. **An Approximated Method to estimate the Bearing Capacity of Piles**, In: PROCEEDINGS OF THE V PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL AND FOUNDATION ENGINEERING, Buenos Aires, v.5, 1975.

BELINCANTA, A. **Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT**. 1998. 141f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BELINCANTA, A.; PEIXOTO, A. S. P.; MIGUEL, M. G. **Sondagem de simples reconhecimento com SPT e Torque**. Coleção Fundamentum, n° 63. Maringá: EDUEM, 2010.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R.D. **Sea level changes**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE QUATERNARY. Curitiba, v. 33, p. 245-251, 1975.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v.1. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996.

BRAJA M. DAS. **Principles of Geotechnical Engineering**. 7 ed. Stamford: Cengage Learning, 2010.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.I]: 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em 25 abr. 2016.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1980.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e estatística**. 2 ed. Belo Horizonta: PUC Minas Virtual, 2003.

DECOURT, L. **The Standard Penetration Test – State of Art Report**: In: XII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. Rio de Janeiro, v.4, 1989.

DE MELLO, V. F. B. **The standard penetration test**. In: 4th PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING. San Juan, v.1, p. 1-86, 1971.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 3ed. Brasília, 2013.

FOLLE, D. **O estudo geoestatístico de sondagens SPT para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia**. 2002, 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

FONTELES, H. R. N. **Caracterização geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em geoestatística**. 2003. 146f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

FLETCHER, G.F.A. Standard penetration test: it's uses and abuses. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**. ASCE. v. 91, n. SM4. 1965.

GOLDICH, S. S. A study in rock weathering. **Journal of Geology**. v. 46, n. 1, p. 17-58, 1938.

GUTIERREZ, N. H. M. **Influência de aspectos estruturais no colapso de solos do Norte do Paraná**. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

GUTIERREZ, N. H. M.; BELINCANTA, A. **Características físicas e geotécnicas de perfis de solos da cidade de Maringá**. I Encontro geotécnico do Terceiro Planalto Paranaense – ENGEOPAR. Paraná, 2003.

GUTIERREZ, N. H. M.; BELINCANTA, A. **Características básicas dos solos constituintes do subsolo da cidade de Maringá: locais de alta a média vertente**. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL – GEOSUL. Paraná, 2004.

GUTIERREZ, N. H. M.; NÓBREGA, M. T.; LUIZ, A. M. F. **Características e comportamentos de áres geotécnicos de áreas sobre basalto: o caso de Maringá-PR**. In: X SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL – GEOSUL. Maringá, 2015.

HACHICH, W.; FALCONI, F.F.; SAES, J.L.; FROTA, R.G.Q.; CARVALHO, C.S.; NIYAMA, S. **Fundações: teoria e prática**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1998;

JENNY, H. **Factors of soil formation**. 1 ed. New York: McGraw-Hill, 1941.

JUNIOR, P. F.; PETSCH, C.; DALLA VILLA, M. E. C.; MANIERI, D. D. Relato de campo sobre os aspectos físicos do terceiro planalto paranaense (Maringá aos terraços do rio Paraná). **Boletim de Geografia**. Maringá, v. 28, n. 2, p. 199-209, 2010.

MARTINS, A. H. C. **Mapeamento geotécnico do setor norte do município de Goiânia-GO, em escala 1:25000**. 2005, 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

MATHERON, G. The Theory of regionalized variables and its applications. **Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau**. n. 5, 1971

MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C.M. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. 1 ed. Brasília: Editores Técnicos, 2007.

MEYERHOFF, G. G. Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**. ASCE. v.1, p. 1-19, 1956.

MONIZ, A. C. **Elementos da pedologia**. 1 ed. Rio de Janeiro: Polígono S.A, 1975.

NAKASHIMA, P.; NÓBREGA, M. T. **Solos do terceiro planalto do Paraná**. I Encontro geotécnico do Terceiro Planalto Paranaense – ENGEOPAR. Paraná, 2003.

NOREÑA, P. C. T. **Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador**. 2011. 197f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

OPROMOLLA, P. A.; DALBEN, I.; CARDIM, M. Análise geoestatística de casos de hanseníase no estado de São Paulo, 1991-2002. *Revista Saúde Pública*. v.40, n.5, p. 907-13, 2006

RODRIGUES, V. L. **Mapeamento geotécnico como base para o planejamento urbano e ambiental: município de Jaú/SP**. 2008. 156f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas**. 1 ed. Campinas: Unicamp, 1999.

SILVA, D.F. **Mapeamento geoestatístico dos parâmetros N_{spt} e torque máximo de solos em parte da bacia do Ribeirão Cambezinho em Londrina/PR**. 2009. 212f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

SOARES, A. **Geoestatística para ciências da terra e do ambiente**. 2 ed. Lisboa: IST Press, 2000.

SOARES, W. C. **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**. 2011, 215f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SOUZA, G. B. **Estruturação de banco de dados a partir do mapeamento geotécnico aplicado à região de Ribeirão Preto (SP)**. 2005, 303F. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SOUZA, F. S. **Uso de métodos geoestatísticos no auxílio da modelagem geológica**. 2007, 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

STRAKHOV, N. M. **Principles of lithogenesis**. 1 ed. New York: Consultants Bureau, 1967

TEIXEIRA, A. H. **Projeto de execução de fundações**. In: III SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, São Paulo, v.1, 1996.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. **Análise, projeto e execução de fundações rasas**. In: FUNDAÇÃO: TEORIA E PRÁTICA. São Paulo, Cap. 7, p. 227-264, 1996.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 1 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948.

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista HCPA**. Porto Alegre, v. 32, n.2, p. 227-234, 2012.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; C. R GREGO. **Aplicações da geoestatística em pesquisas com cana de açúcar**. In: Cana de açúcar. Cap. 39, 2008.

VICENTE, J. **Estudos comparativos de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica). Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho – Unesp, Presidente Prudente, 2004.

APÊNDICE A – Variogramas para as variáveis N do ensaio SPT e superfície freática

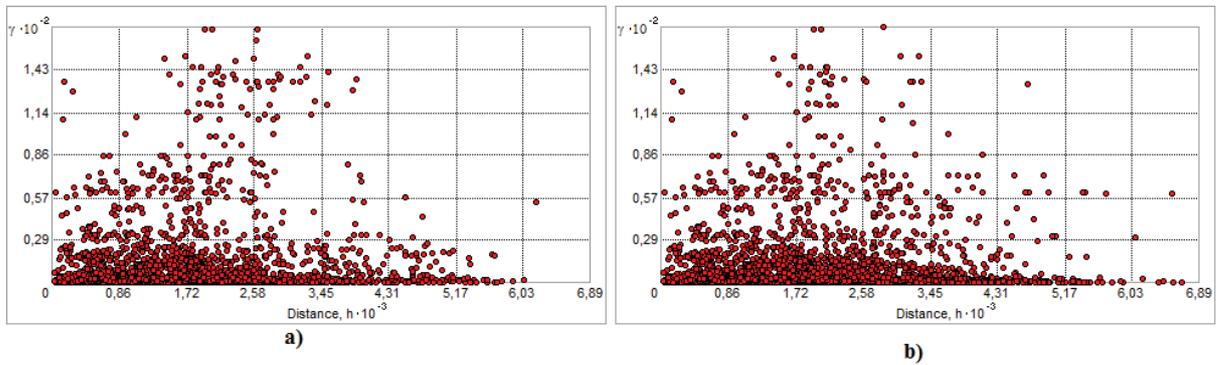


Figura 0-1.1 - Variograma para variável N na profundidade de 4 metros: a) direção de busca 0°; b) direção de busca 90°

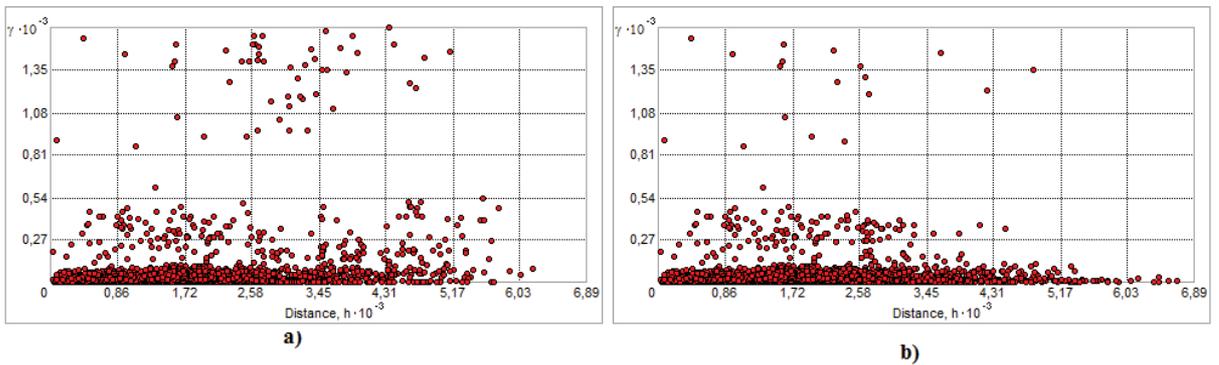


Figura A.2 - Variograma para variável N na profundidade de 8 metros: a) direção de busca 0°; b) direção de busca 90°

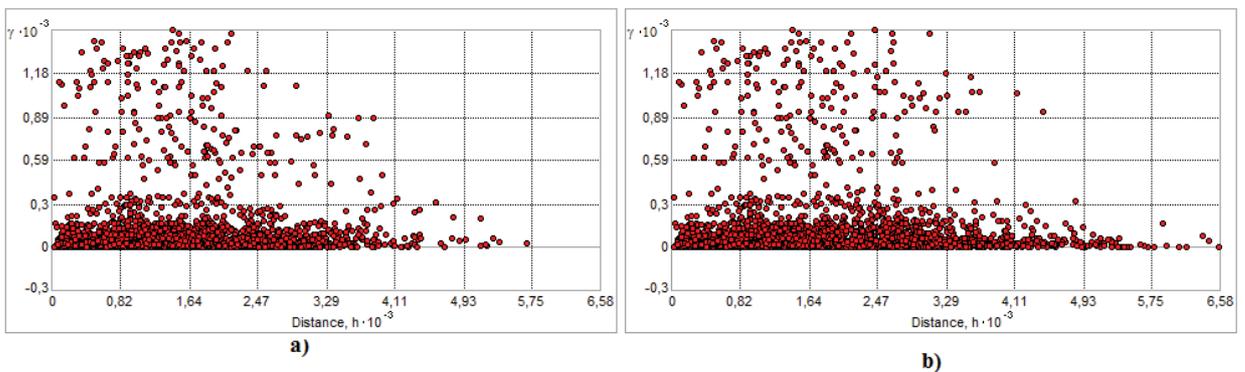


Figura A.3 - Variograma para variável N na profundidade de 12 metros: a) direção de busca 0°; b) direção de busca 90°

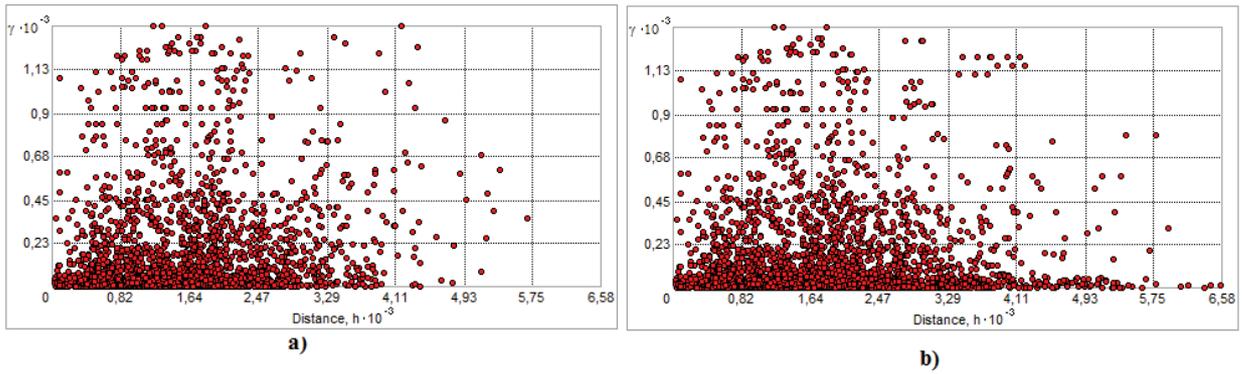


Figura A.4 - Variograma para variável N na profundidade de 16 metros: a) direção de busca 0°; b) direção de busca 90°

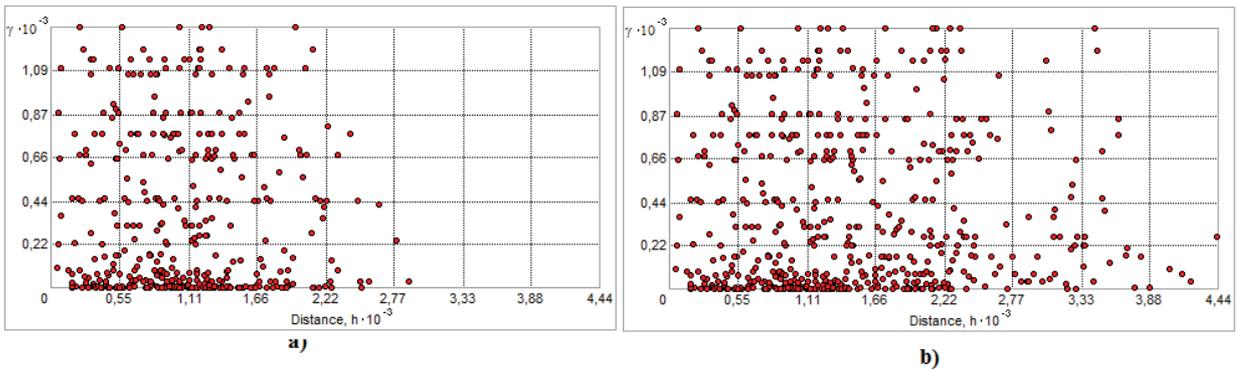


Figura A.5 - Variograma para variável N na profundidade de 25 metros: a) direção de busca 0°; b) direção de busca 90°

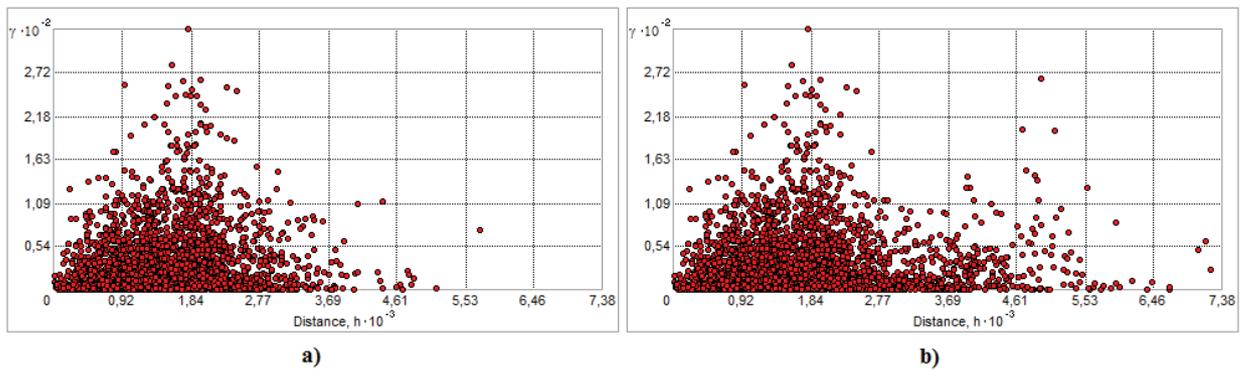


Figura A.6 - Variograma para variável profundidade do lençol freático: a) direção de busca 0°; b) direção de busca 90°