

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
MESTRADO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

REGIANE ORLOVSKI

AVALIAÇÃO DE ESPAÇAMENTOS DAS COLETAS DE SOLO PARA A
MODELAGEM DE GRANULOMETRIA COM APLICAÇÃO NA AGRICULTURA DE
PRECISÃO

PONTA GROSSA
2013

REGIANE ORLOVSKI

AVALIAÇÃO DE ESPAÇAMENTOS DAS COLETAS DE SOLO PARA A
MODELAGEM DE GRANULOMETRIA COM APLICAÇÃO NA AGRICULTURA DE
PRECISÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientação: Prof.^a Dr.^a Selma Regina Aranha Ribeiro

PONTA GROSSA
2013

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Orlovski, Regiane
O72 Avaliação de espaçamentos das coletas
de solo para a modelagem de granulometria
com aplicação na agricultura de precisão/
Regiane Orlovski. Ponta Grossa, 2013.
107f.

Dissertação (Mestrado em Computação
Aplicada - Área de Concentração:
Computação para Tecnologias em
Agricultura), Universidade Estadual de
Ponta Grossa.

Orientadora: Profª Drª Selma Regina
Aranha Ribeiro.

1.Amostra de Solo. 2.Argila.
3.Agricultura de Precisão. 4.Interpolação.
5.Geoestatística. I.Ribeiro, Selma Regina
Aranha. II. Universidade Estadual de
Ponta Grossa. Mestrado em Computação
Aplicada. III. T.

CDD: 631

TERMO DE APROVAÇÃO

Regiane Orlovski

“Avaliação de Espaçamento das Coletas de Solo para a Modelagem de Granulometria com aplicação na Agricultura de Precisão”.

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Dr^a. Selma Regina Aranha Ribeiro
UEPG


Dr. Luiz Gilberto Bertotti
UNICENTRO


Dr^a. Maria Salete Marcor Gomes Vaz
UEPG

Ponta Grossa, 28 de agosto de 2013.

Dedico este trabalho a minha mãe **Zenilzabel Orlovski**, por seu amor, pela garra e coragem em sua luta diária por me dar sempre o melhor, por estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Isso vai muito além que agradecimentos, quero deixar aqui registrado todos aqueles que estiveram me incentivando nesse sonho, antes mesmo dele se concretizar.

Primeiramente, ao amado Deus, por me dar forças e nunca me deixar desistir da realização desse sonho, ouvir minhas súplicas e me iluminar em todos os momentos. A Nossa Senhora, por interceder por mim em todos os momentos de angústia e dor.

A minha orientadora e amiga, Dra. Selma Regina Aranha Ribeiro, pelo constante incentivo, entusiasmo, paciência, me direcionando em todos os momentos que me senti perdida na minha pesquisa, caminhando ao meu lado, acreditando em minha capacidade.

A professora Dra. Neyde Fabiola Balarezo Giarola, por compartilhar seus conhecimentos e me direcionar na área de solos.

Ao pesquisador da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA, Dr. Étore Francisco Reynaldo, por toda a paciência e tempo destinado as minhas dúvidas em explicar o mundo da geoestatística e o *Software* Vesper.

A professora Valmy D. Blum Dalmolin por toda a ajuda e incentivo ao meu retorno aos estudos. Isso aqui é um pedacinho de um sonho que aos poucos está se tornando realidade.

Ao professor Dr. Luiz Gilberto Bertotti e a professora Dra. Maria Salete Marcon Gomes Vaz por aceitar o convite de participar da Banca Examinadora, pelos comentários e sugestões apresentadas, com o objetivo de valorizar o trabalho.

Ao corpo docente do Mestrado em Computação aplicada pelo conhecimento compartilhado.

Ao Laboratório de Física do Solo da UEPG, por ceder as amostras de solo em grade regular e ao acadêmico de Mestrado em Agronomia William Nasser Cassimiro pela ajuda nas coletas de amostra de solo.

Ao Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH) da UTFPR em especial a professora Dra. Cláudia Pereira Krueger e a Engenheira Cartográfica Msc. Suelen Cristina Movio Huinca pela ajuda no pós-processamento dos dados.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Geotecnologias, famosos Geotecs: Carla Eva Prichoa, Dinameres Antunes, Dulcina de Aquino Hernandez de Oliveira,

Graziela Maziero Pinhero Bini, Joel Zubek Rosa, Josilhane da Silva, Thays Marcela Hamulak e Willian Santana pelos ensinamentos, risos, e amizade. Sem vocês o laboratório não teria sentido.

Aos meus colegas do mestrado, em especial, a minha amiga Thalita Scharr Rodrigues que esteve sempre presente nos momentos de estudo, de dúvida, sempre oferecendo seu ombro ou seus conhecimentos. Agradeço a Deus por ter te colocado em minha vida!

A minha amiga e irmã de coração Cibeles Regina Piaceski, por me mostrar que nunca, jamais podemos desistir perante as dificuldades, são longos anos de sincera e verdadeira amizade, você é um exemplo de força e garra! E a sua tia Clarice de Fátima Schulmeister, por todo carinho e apoio na minha pesquisa me proporcionado um lar durante o mestrado.

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram, que entenderam essa minha fase de ausência em suas vidas e que mesmo longe estiveram torcendo e rezando por mim, para obter esse sonho concretizado.

Aos meus pais, que em muitos momentos sofreram a minha ausência, eu amo muito vocês. Em especial, a minha pequena e amada mãe Zeni Izabel que sempre esteve ao meu lado, me apoiando, tanto que ao falar as lágrimas me vêm. A senhora mesmo não podendo ajudar, esteve sentadinha ao meu lado em muitas noites frias, me dando carinho e amor! Ao meu irmão Ronaldo, minha cunhada Juliana e minha doce sobrinha Ana Julia Orlovski, pelo amor, carinho e apoio.

Ao meu noivo Willian Ricardo Fialka Agner, por seu amor incondicional, sua compreensão, por passar tantos finais de semana e noites ao meu lado nos meus momentos de estudo, de dúvida, tentando me ajudar de alguma maneira, segurando a minha mão e seguindo ao meu lado!

Os meus agradecimentos a todos que de alguma maneira participaram da realização desse sonho!

RESUMO

A Agricultura de Precisão depende do conhecimento dos fatores relacionados ao solo, em especial a granulometria. Uma das possibilidades de obtenção de tais informações do solo é por meio de mapas. Estes podem fornecer a variação de parâmetros do solo, dentre eles a granulometria e mais especificamente, os teores de argila. Para se obter mapas confiáveis necessita-se de quantidade elevada de amostras a campo, resultando em custo elevado na coleta e nas análises laboratoriais. O objetivo deste estudo foi testar diferentes espaçamentos de amostragem de solo no que tange a granulometria, dos teores de argila, para fins de modelagem na aplicação em Agricultura de Precisão, na Fazenda Escola Capão da Onça em, Ponta Grossa - PR. Foi usada grade regular e duas transeções em função do relevo, variando o espaçamento entre as coletas das amostras de solo. Ainda, foram testados diferentes interpoladores, comparando os geoestatísticos e não-geoestatísticos. O estudo parte do pressuposto que são necessárias técnicas para analisar a variabilidade do solo, aplicando estudos diferenciados de amostragens a campo. A metodologia apresentou resultados satisfatórios quanto à forma e o número de amostras coletadas em campo, demonstrando que a variabilidade da granulometria argila tem relação com a forma com que são coletadas, levando em consideração as diferenças do tipo de relevo. Dessa maneira, as amostras coletadas pela transeção Sudoeste-Nordeste com decréscimo do relevo foi a que apresentou resultado satisfatório, em ambos os interpoladores, geoestatístico e não-geoestatístico comparado com a transeção Noroeste-Sudeste, com espaçamento entre as amostras da granulometria argila de 80 e 100 metros.

Palavras-Chave: Amostra de Solo. Argila. Agricultura de Precisão. Interpolação. Geoestatística.

ABSTRACT

The Precision Agriculture relies on ground related factors especially granulometry and a potential way to get soil ground information is drawing developing soil maps. These maps can provide soil parameter variations such as granulometry and specifically clay contents. To get reliable soil maps a huge amount of field samples are necessary and it results in high costs mainly in gathering process and laboratory tests as well. The main goal of this study is to test different spacing techniques on getting ground sample belonging granulometry, clay contents, to the modeling process applied in precision agriculture, at Fazenda Escola Capão da Onça in Ponta Grossa city, Paraná state. Therefore, a normal grade and two transections were used due to topography using different spacing between soil sample gatherings. Also were tested different interpolators, comparing geostatic and non-geostatic. The study assumes that there is a necessity of technics to analysis soil parameter variations by distinguished studies of field samples. The methodology presented satisfactory outcomes according the way and the number of soil sample gathered evidencing that the clay granulometry variability is related to the way these samples are collected considering topography than the standard level of detail. Thus, the Southwest-Northeast transection collected with topography decrease was the one that have the best result compared to Northwest-Southeast transection with samples spacing between 80 and 100 meters.

Keywords: Soil Sample. Clay. Precision Agriculture. Interpolation. Geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática geral da utilização do Sistemas de Informação Geográfica.....	20
Figura 2 – Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica.....	21
Figura 3 – Tipos de amostragem por ponto (a) irregular e (b) regular.....	22
Figura 4 – Exemplo de grade regular.....	23
Figura 5 – Exemplo de grade triangular.....	24
Figura 6 – Divisão das frações granulométricas.....	26
Figura 7 – Divisão da área para diferentes formas de coleta de amostra de solo.....	28
Figura 8 – Sistema de grade e subamostras.....	29
Figura 9 – Ferramentas para amostragem de solo e procedimento para a preparação da amostra a ser enviada ao laboratório.....	30
Figura 10 – Separação de areia, silte e argila em laboratório.....	31
Figura 11 – Os segmentos do Sistema de Posicionamento Global.....	33
Figura 12 – Planos Orbitais dos satélites da constelação GPS.....	34
Figura 13 – Distribuição dos satélites GPS nos planos orbitais.....	34
Figura 14 – Estrutura básica do sinal GPS.....	37
Figura 15 – Posicionamento por ponto, método absoluto.....	38
Figura 16 – Posicionamento relativo.....	38
Figura 17 – Tiro ao alvo para ilustrar acurácia e precisão.....	41
Figura 18 – Modelo do semivariograma.....	44
Figura 19 – Representação gráfica dos modelos.....	47
Figura 20 – Convenções direcionais usadas na geoestatística.....	47
Figura 21 – Processo de interpolação estimação local: (a) amostras; (b) grade regular superposta às amostras; (c) interpolação local; (d) grade regular resultante.....	49
Figura 22 – Localização da área de estudo – FESCON.....	60
Figura 23 – Tipos de Solo da Área de Estudo – FESCON.....	61
Figura 24 – MDT da representação do relevo da FESCON.....	62
Figura 25 – Delimitação da área de mecanização agrícola.....	63
Figura 26 – Transeção no sentido Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste para coleta das amostras de solo.....	64
Figura 27 – Metodologia da coleta das amostras em campo, fotografias retiradas em 28 de Outubro de 2012.....	65
Figura 28 – Coleta das amostras de solo, fotografia retirada em 28 de Outubro de 2012.....	66
Figura 29 – Secagem das amostras de solo ao ar livre, fotografia retirada em 10 de Novembro de 2012.....	66
Figura 30 – Procedimento de georreferenciamento dos pontos de coleta das amostras de solo, fotografia retirada em 03 de Novembro de 2012.....	67
Figura 31 – Grade regular indicando os pontos coletados para a elaboração do mapa de textura da área FESCON.....	68
Figura 32 – Sentido das transeções e diferença de espaçamentos entre elas.....	70
Figura 33 – Diagrama de Bloco dos pontos em grade regular e as transeções. Giro em relação ao Norte = 40° NE; e em relação ao horizonte = 40°.....	71
Figura 34 – Classificação dos teores de argila da área comercial da FESCON.....	73
Figura 35 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador vizinho mais próximo em grade regular da FESCON, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.....	77

Figura 36 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador IDW em grade regular da FESCON, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.	78
Figura 37 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador pela transeção Sudoeste-Nordeste com distância entre os pontos de 80 metros, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.	80
Figura 38 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador pela transeção Sudoeste-Nordeste com distância entre os pontos de 100 metros, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.	81
Figura 39 – Mapa dos teores de argila com pontos na transeção Sudoeste-Nordeste, com espaçamento de 80 a 80 metros.	84
Figura 40 – Mapa dos teores de argila com pontos da área de interesse da transeção Sudoeste-Nordeste, com espaçamento de 100 a 100 metros.	85
Figura 41 – Variogramas (a) Surfer; (b) Vesper.	86
Figura 42 – Mapa dos teores de argila com pontos de 100 em 100 metros por meio do Surfer, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.	88
Figura 43 – Gráfico da correlação entre argila e altitude.	89
Figura 44 – Mapa de classe da declividade EMBRAPA da FESCON.	90
Figura 45– Mapa de classe da declividade da FESCON.	91
Figura 46 – Unidades de Paisagem da FESCON.	93
Figura 47 – Abertura dos dados no Geo Office e configuração do sistema de coordenadas geográficas.	105
Figura 48 – Importação da base RBMC.	106
Figura 49 – Configuração da base RBMC.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise descritiva da granulometria da área comercial da FESCON.....	74
Tabela 2 – Análise descritiva da granulometria para a transeção Sudoeste-Nordeste.	74
Tabela 3 – Análise descritiva da granulometria para a transeção Sudoeste-Nordeste	75
Tabela 4 – Resultados da interpolação em grade regular.	76
Tabela 5 – Análise quantitativa das grades de interpolação.	79
Tabela 6 – Resultados da análise dos dados em grade regular da área comercial FESCON.	82
Tabela 7 – Resultado dos variogramas para as transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste com variação de distância entre os pontos.	83
Tabela 8 – Resultado dos variogramas para as transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste com variação de distância entre os pontos por meio do interpolador Surfer.	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre grade regular e TIN	24
Quadro 2 - Classificação da textura do Solo	25
Quadro 3 – Influência das frações (areia, silte, argila) em algumas propriedades e comportamento do solo.....	27
Quadro 4 – Característica dos métodos de Interpolação	50
Quadro 5 – Interpolador Inverso da Distância Ponderada.	51
Quadro 6 – Interpolador Krigagem	55
Quadro 7 – Interpolador Vizinho mais Próximo	56

LISTA DE SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
BLUE	<i>Best Linear Unbiased Estimator</i>
C/A	<i>Coarse Acquisition Code</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CDR	Coeficiente de Desvio Relativo
CNSS	<i>China's Compass Navigation Satellite System</i>
CSNPC	<i>China Satellite Navigation Project Center</i>
CV	Coeficiente de Variação
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
FA	Função Aleatória
FESCON	Fazenda Escola Capão-da-Onça
g.Kg ⁻¹	grama.quilograma
GAGAN	<i>GPS Aided GEO Augmented Navigation</i>
GDE	Grau da Dependência Espacial
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global - <i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverso da Distância Ponderada – <i>Inverse Distances Weighted</i>
IGS	<i>International Geological Survey's</i>
IGSO	<i>Inclined Geostationary Orbit</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MHz	Megahertz
MSAS	<i>Multifunctional Satellite Augmentation System</i>
NAVSTAR	<i>Navigation System by time and Ranging</i>
P Code	<i>Precision Code</i>
PDOP	<i>Positional Dilution of Precision</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i>
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Médio
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
USA	Estados Unidos da América
UTM	Universal Transverse the Mercator
VR	Variável Regionalizada
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS-84	<i>World Geodetic System / 1984</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo.....	16
1.1.1. Objetivos Específicos.....	16
1.3. Justificativa	17
1.5. Estrutura do Trabalho.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Geoprocessamento.....	19
2.1.1 Sistemas de Informação Geográfica – SIG	19
2.2. Solos	24
2.2.1. Propriedades Físicas do Solo	25
2.2.1. Técnicas de Amostragem.....	27
2.2.2. Tratamento e Análise das Amostras	30
2.2.3. Agricultura de Precisão	31
2.3. Global Navigation Satellite System	32
2.3.1. NAVSTAR – GPS, GLONASS, Galileu e Beidou/Compass	33
2.3.2. Estrutura básica do sinal do GPS.....	36
2.3.3. Método de Posicionamento.....	37
2.3.4. Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS	39
2.3.5. Precisão e Acurácia	39
2.4. Geoestatística	41
2.4.1. Análise dos Variogramas	43
2.4.4. Isotropia e Anisotropia.....	47
2.5. Interpoladores	48
2.5.1. Processo Inverso da Distância Ponderada	51
2.5.2. Processo da Krigagem Ordinária	51
2.5.3. Processo Vizinho mais Próximo	55
2.6. Análise Exploratória dos dados e Avaliação do Processo de Interpolação	57
3. MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1. Organização em SIG e Amostragem em Campo	61
3.2. Processos de Seleção de Grupos e Análises Estatística Descritiva, Geoestatística e Interpolações	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1. Composição Granulométrica	73
4.2. Análise Descritiva dos Dados.....	73
4.3. Análise dos Dados e Interpolação não-Geoestatística.....	76
4.4. Análise Geoestatística em Grade Regular	82
4.4.1. Análise Geoestatística Vesper	82
4.4.2. Análise Geoestatística utilizando o Software Surfer.....	85
4.4.3. Relação entre Argila e Relevo.....	89

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE PESQUISAS FUTURAS	94
REFERÊNCIAS.....	97

1. INTRODUÇÃO

A agricultura está em fase de grandes produções, diversos estudos foram desenvolvidos ao longo do tempo, pois a busca por expansão da mesma é preocupação mundial, a fim de garantir a produção de alimentos para a humanidade.

Para o desenvolvimento voltado à preservação do meio ambiente, respeitando a heterogeneidade dos solos e fazendo uso adequado dos insumos agrícolas, a Agricultura de Precisão (AP) emerge como o caminho a ser seguido, por meio da granulometria do solo, é possível efetuar manejo mais adequado na agricultura, possibilitando aumento da produtividade, economia na produção e consequentemente menos impactos ambientais.

Ao se implantar ou rotacionar culturas é importante identificar no solo sua distribuição granulométrica ou textura do solo, pois como cita Bru e Molina (1999), tem participação nas relações de capacidade de troca de cátions, disponibilidade de nutrientes, capacidade de armazenamento de água, tendência à compactação, porosidade e permeabilidade.

Pela busca da identificação da granulometria do solo, avanços significativos foram obtidos na AP e consequentemente nas geotecnologias de geração de mapas, entre eles mapas de textura do solo. Concomitante a esse fator diversas metodologias de coleta de amostras são utilizadas. Nesse aspecto foram testados diferentes espaçamentos de coleta de amostra de solo para granulometria, em transeção Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste, para fins de modelagem na aplicação em Agricultura de Precisão.

1.1. Objetivo

O objetivo geral dessa dissertação foi testar diferentes espaçamentos de amostragem de solo, dos teores de argila, para fins de modelagem na aplicação em Agricultura de Precisão.

1.1.1. Objetivos Específicos

- i. Definir o espaçamento adequado para a modelagem da granulometria, argila na área de estudo;

- ii. Testar uso de interpoladores para obter aquele que melhor represente a granulometria, argila na área de estudo;
- iii. Testar e comparar interpoladores não-geoestatístico e geoestatístico.
- iv. Verificar a correlação entre a granulometria com o relevo;

1.3. Justificativa

Os avanços tecnológicos advindos da AP possibilitam o conhecimento detalhado da granulometria do solo. Estudos foram realizados quanto à padronização de espaçamento, refletindo as frações granulométricas do solo, porém, ocorrem que a variabilidade espacial existente, dependendo da grade de coleta das amostras de solo não reflete as porcentagens da granulometria.

Partindo do princípio que quanto mais minuciosa é efetuada a coleta das amostras de solo, obtém-se maior detalhamento da granulometria, o valor agregado com as análises laboratoriais impede que muitos estudos sejam realizados (ANDRIOTTI, 2003). Nesse aspecto, adotou em grade regular a seleção de duas transeções, para detalhamento em granulometria, representando o restante da área em função do relevo. Marques Júnior e Lepsch (2000) relatam que a utilização da altitude, declividade do solo para delinear área de estudo da variabilidade espacial para atributos do solo em diferentes tipos de solos são importantes na separação de unidades para fins para predição de mapas de solo.

Para isso foram testados diferentes interpoladores, primeiramente não-geoestatístico, como Inverso da Distância Ponderada que de acordo com Davis (1986), implementa conceito de autocorreção espacial, ou seja, assume que quanto mais próximo estiver um ponto da célula a ser estimada, mais semelhante será o valor dessa célula. Interpolador vizinho mais próximo, de acordo com Franke (1982), é o método mais simples e tem como principal característica, assegurar que o valor interpolado seja um dos valores originais, atribuindo o valor do vizinho mais próximo para cada célula.

E com relação à análise geoestatística foram usados variogramas e efetuado a interpolação por meio de krigagem, que de acordo com Isaaks e Srivastava (1989), associada com conjunto de técnicas geoestatística de ajuste utilizadas para aproximar dados, verificando a existência de correlação entre os dados, deixando implícita a necessidade de saber até onde, espacialmente, essa correlação é significativa. Por isso em pesquisas agrícolas relacionadas ao solo, a aplicação de

tecnologia associada à variabilidade espacial e temporal faz-se necessária (GREGO e VIEIRA, 2005).

1.5. Estrutura do Trabalho

A estruturação do trabalho encontra-se dividida em 5 capítulos, além desse capítulo introdutório, no Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre Geoprocessamento, Solos, *Global Navigation Satellite System*, Geoestatística e Interpoladores. No Capítulo 3, é apresentado o processo metodológico desenvolvido, tanto em laboratório como em campo. No Capítulo 4 são abordados os resultados e as discussões. Para finalizar, no Capítulo 5 são abordadas as conclusões e apresentadas as perspectivas de pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve a fundamentação teórica, partes fundamentais para a pesquisa, citando o Geoprocessamento, Solos, *Global Navigation Satellite System*, Geoestatística e Interpoladores.

2.1 Geoprocessamento

A sociedade organizada sempre manteve coleta de informação sobre distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas. Teve sua fase de registro em papel, porém com o desenvolvimento computacional foi possível armazenar e representar as informações, surgindo o Geoprocessamento (CÂMARA e DAVIS, 2001).

O Geoprocessamento é técnica computacional que integra bancos de dados de diferentes setores, permitindo entre outras análises, aplicação matemática e estatística nesses dados (HAMADA e GONÇALVES, 2007).

A aplicação de técnicas computacionais para o tratamento de informação geográfica influencia de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Humanos, Transporte, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional (CÂMARA e DAVIS, 2001).

Uma das técnicas computacionais de manipulação, modelagem e visualização, etc, para Geoprocessamento é denominada de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

2.1.1 Sistemas de Informação Geográfica – SIG

Compreender a distribuição espacial de dados, oriundos de fenômenos ocorridos no espaço, constitui grande desafio em diversas áreas do conhecimento, seja da saúde, geologia, agronomia, entre tantas. Isso foi possível devido à disponibilidade de Sistemas de Informação Geográfica, permitindo a visualização espacial de variáveis, como população de indivíduos, índice de qualidade de vida, entre outras, representadas de maneira visível por meio de mapas (CÂMARA et al. 2004).

Aronoff (1989) descreve que o SIG fornece meios pelos quais a informação geográfica pode ser usada para grande variedade de aplicações e por diferentes usuários.

A aplicação de SIG é para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e armazenam a geometria e os atributos dos dados que estão georreferenciados e representados em projeção cartográfica (CÂMARA et al., 2004).

O SIG é processo em ciclo, as fontes de dados são interpretações da realidade, pois vem do mundo real. No SIG ocorre o processo de entrada de dados, gerenciamento dos dados, armazenamento e análise desses dados. A partir disso são geradas informações que podem ser utilizadas para a tomada de decisões (HAMADA e GONÇALVES, 2007). O ciclo do SIG pode ser visualizado na Figura 1.

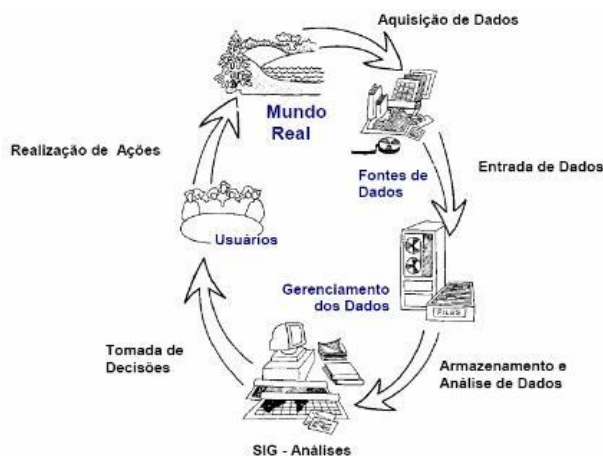


Figura 1 – Representação esquemática geral da utilização do Sistemas de Informação Geográfica.

Fonte: Hamada e Gonçalves, 2007.

Moreira (2011), Câmara et al. (2004) citam os seguintes componentes de SIG de forma hierárquica:

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Funções de processamento gráfico e de imagens;
- Visualização e plotagem e;
- Armazenamento e recuperação de dados em Banco de Dados.

No nível mais próximo ao usuário, na interface com o usuário, define como o sistema é operado e controlado. Um erro por parte do usuário pode comprometer todo o trabalho (HAMADA e GONÇALVES, 2007).

As operações de entrada de dados são a conversão da informação que se encontra disponível na forma que as pessoas percebem ou reconhecem, os valores definem a escala de todos os mapeamentos e resultados gerados em SIG (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

No nível intermediário ocorre o processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída), seguido pelo armazenamento em banco de dados geográfico (CÂMARA, 2004). Esse procedimento pode ser visualizado na Figura 2.

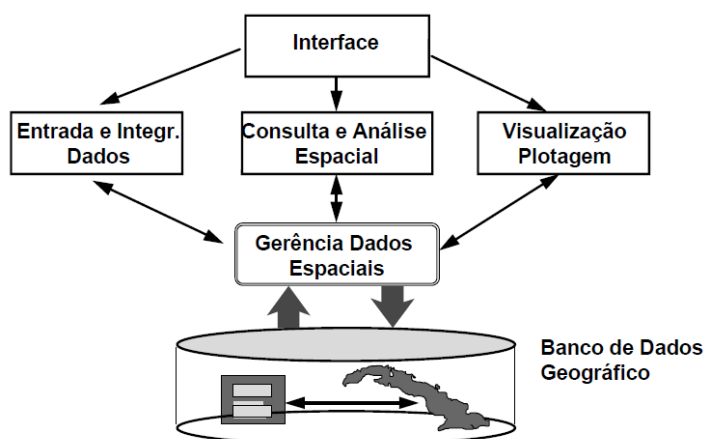


Figura 2 – Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica

Fonte: Câmara, 2004.

Os dados tratados em SIG podem estar disponíveis em diversas formas, essencialmente na forma digital. Assim, além de mapas e cartas, tabelas e atributos e imagens, é possível modelar o relevo denominado de Modelo Digital do Terreno (MDT) (HAMADA E GONÇALVES, 2007).

De acordo com Câmara e Monteiro (2001), o MDT denota a representação quantitativa de uma grandeza, variando continuamente no espaço, associada à altimetria, é gerada e usada geralmente sob forma de grade regular de pontos, em que o valor digital corresponde ou é proporcional a média de altimetria da célula representada (MOREIRA, 2011).

Entre os usos de MDT, pode-se citar (BURROUGH, 1982):

- Armazenamento de dados de altimetria, para geração de mapas topográficos;
- Análises de aterro por corte, para projeto de estradas e barragens;

- Mapas de declividade e exposição, para apoio a análises de geomorfologia e erodibilidade;
- Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas e;
- Apresentação tridimensional.

O MDT é definido como modelo matemático que reproduz superfície real, a partir de algoritmo e conjunto de pontos (x e y), com atributos denotados de z , descrevendo e representando a variação contínua da superfície (CÂMARA e MONTEIRO, 2001).

Na representação de superfície no computador é necessária a elaboração e criação de MDT, que pode estar representado por equações analíticas ou em rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno (FELGUEIRAS, 2001).

O processo de modelagem de um atributo mediante o MDT se divide em três etapas:

- Aquisição das amostras;
- Modelagem ou interpolação e;
- Aplicações ou procedimentos.

As amostras são valores representativos do fenômeno estudado, usualmente obtidas a partir do levantamento de campo (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004). Quanto à posição relativa das amostras pode-se classificar a amostragem regular e irregular.

A amostra regular é aquela cuja posição espacial (x , y) dos pontos mantém regularidade de distribuição nas direções x e y . Na amostragem irregular não existe proporção nas amostras (FELGUEIRAS, 2001). Dessa maneira, na Figura 3 (a) e (b) são apresentas as formas de amostragem. Na primeira, a forma irregular, não levando em consideração a posição em relação a x e y . Ao lado é representada a amostragem de maneira regular e uniformizada.

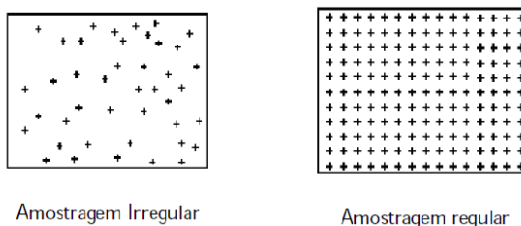


Figura 3 – Tipos de amostragem por ponto (a) irregular e (b) regular.

Fonte: Felgueiras, 2001.

As maneiras de aquisição de amostras, para a geração do MDT, citam arquivos digitais, bases topográficas com isolinhas e pontos notáveis e cotados, levantamentos em campo, necessitando de alguma forma a transformação em informações digitais. Para dados de altimetria pode-se, por exemplo, realizar levantamentos em campo, com o auxílio de Sistema de Posicionamento Global - *Global Positioning System* (GPS) (FELGUEIRAS, 2001).

As estruturas de dados do MDT usadas na prática são os modelos de grade regular e os modelos de malha triangular, *Triangular Irregular Network* (TIN) (FELGUEIRAS, 2001). A grade regular corresponde a representação matricial, onde cada elemento da matriz está associado a valor numérico. São gerados por meio de estimação de interpoladores matemáticos. Os valores para as células que não possuem medidas de elevação, considera a vizinhança de medidas de elevação conhecidas (CÂMARA e MONTEIRO, 2001). Na Figura 4, essa representação da grade regular por meio do processo de interpolação com os pontos, forma poliedro de faces regulares resultante, em área sob plano cartesiano.

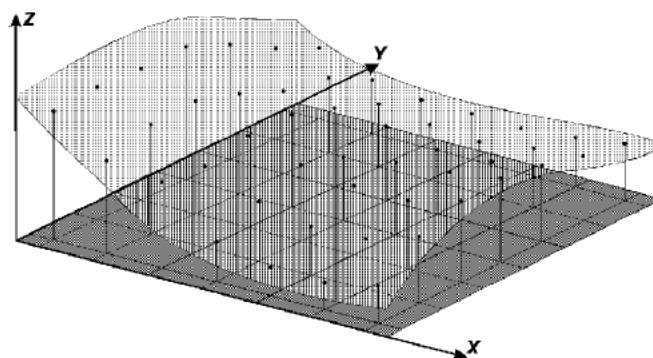


Figura 4 – Exemplo de grade regular.

Fonte: Felgueiras, 2001.

A grade regular aproxima superfícies, por meio de poliedro de faces regulares. Os vértices podem ser ou não os próprios pontos amostrados. A resolução em x e y deve ser igualmente menor ou igual à menor distância entre duas amostras, com atributos diferentes (FELGUEIRA, 2001).

O TIN é estrutura do tipo vetorial, com topologia do tipo nó-arco, representando por meio de conjunto de faces triangulares interligadas as coordenadas de localização (x, y) e o atributo z, com o valor de elevação ou altitude, ou outro atributo que se queira modelar (CÂMARA E MONTEIRO, 2001). A Figura 5 demonstra as faces triangulares da área gerada, pelo processo TIN.

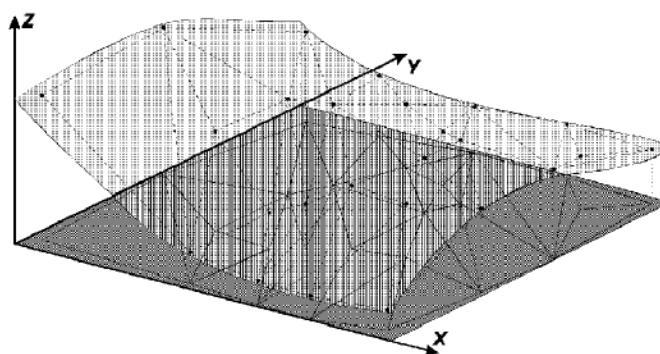


Figura 5 – Exemplo de grade triangular.

Fonte: Felgueiras e Câmara, 2001.

Câmara e Monteiro (2001) efetuaram comparação entre as grades regulares e as malhas triangulares, que são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparação entre grade regular e TIN

	Malha triangular	Grade regular
Vantagens	Melhor representação de relevo complexo. Incorporação de restrições como linhas de crista.	Facilita manuseio e conversão. Adequada para geofísica e visualização 3D.
Problemas	Complexidade de manuseio. Inadequada para visualização 3D.	Representação relevo complexo. Cálculo de declividade

Fonte: Câmara e Monteiro, 2001.

No presente estudo optou-se pela grade regular, devida a facilidade de manuseio e conversão. Mesmo apresentando problemas em relação ao cálculo de declividade, o relevo presente na área de estudo não é complexo, facilitando assim a modelagem.

2.2. Solos

Conhecer o solo de determinada região é preciso considerar os processos relacionados com a sua formação (SÁ, 2007).

O solo é coleção de corpos naturais, que contém partes sólida, líquida e gasosa, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos. Ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do planeta. Contém matéria viva e pode ser vegetado na natureza onde ocorrem e, eventualmente, modificados por interferências antrópicas (EMBRAPA, 2006).

A formação e evolução de sua característica estão relacionadas a fatores como clima, geologia, hidrologia, relevo, vegetação natural e uso do solo (SÁ, 2007).

Algumas áreas dos Campos Gerais são classificadas como solo arenoso, rasos e de baixa fertilidade, originadas de rochas denominadas arenito que possui quartzo, onde esse é muito resistente ao intemperismo. Permanece na fração areia e silte do solo. Outras áreas são formadas de rochas sedimentares denominadas folhetos e argilitos, que por possuírem constituição pelítica, predomina as frações de argila e silte. Ainda, os solos formados por sedimentos trabalhados, provenientes do intemperismo das rochas possuindo textura média e argilosa (SÁ, 2007).

As principais ordens de solos nos Campos Gerais (de acordo com a classificação determinada pela EMBRAPA, 2006) são Cambissolos (37%), Latossolos (33%), Argissolos (10%) e Neossolos (17%) (SÁ, 2007).

2.2.1. Propriedades Físicas do Solo

As propriedades físicas do solo influenciam em como ele se comporta e como deve ser efetuado seu manejo. A identificação das propriedades físicas é caracterizada pela cor, textura (granulometria), estrutura, porosidade e permeabilidade. Por meio dessa identificação resulta na classificação dos perfis e levantamentos sobre aptidão do solo (BRADY e WEIL, 2002).

O termo granulometria é utilizado para designar o conjunto de todas as frações ou partículas do solo, desde as mais finas (argilas), até as mais grosseiras (calhaus e cascalho), dividindo-se em 3 grupos: areia, silte e argila (IBGE, 2007). Para caracterização da textura é empregado a classificação, conforme especificada pela escala de Atterberg (IBGE, 2007), que é apresentada no Quadro 2.

Fração	Diâmetro
Argila	<0,002
Silte	0,002 - <0,05
Areia fina	0,05 - < 0,2
Areia grossa	0,2 – < 2

Quadro 2 - Classificação da textura do Solo

Fonte: IBGE, 2007.

Partículas denominadas de areia são aquelas com diâmetro entre 0,05 mm e 2 mm, sua textura dá a sensação de aspereza entre os dedos, visível a olho nu. Partículas menores que 0,05 mm e maiores que 0,002 mm classifica-se como silte, sua textura se apresenta de maneira sedosa e suave ao toque dos dedos, não visível a olho nu. Partículas de argila são menores que 0,002 mm e possuem grande

área superficial específica, apresentando enorme capacidade de adsorção de água e outras substâncias (BRADY e WEIL, 2002).

Pelo fato de que várias frações ocorrem no solo, de diferentes formas, foi necessário o agrupamento em classes texturais. A Figura 6 apresenta as combinações possíveis de classes texturais de acordo com o IBGE (2007), em relação à areia, silte e argila, de acordo com o conteúdo estimado em campo ou em laboratório. Caracteriza-se as classes de textura como areia, silte, argila, areia-franca, franco, franco-argiloarenosa, franco-argilosa, franco-arenosa, argiloarenosa, muito argilosa, argilossiltosa, franco-argilossiltosa e franco-siltosa.

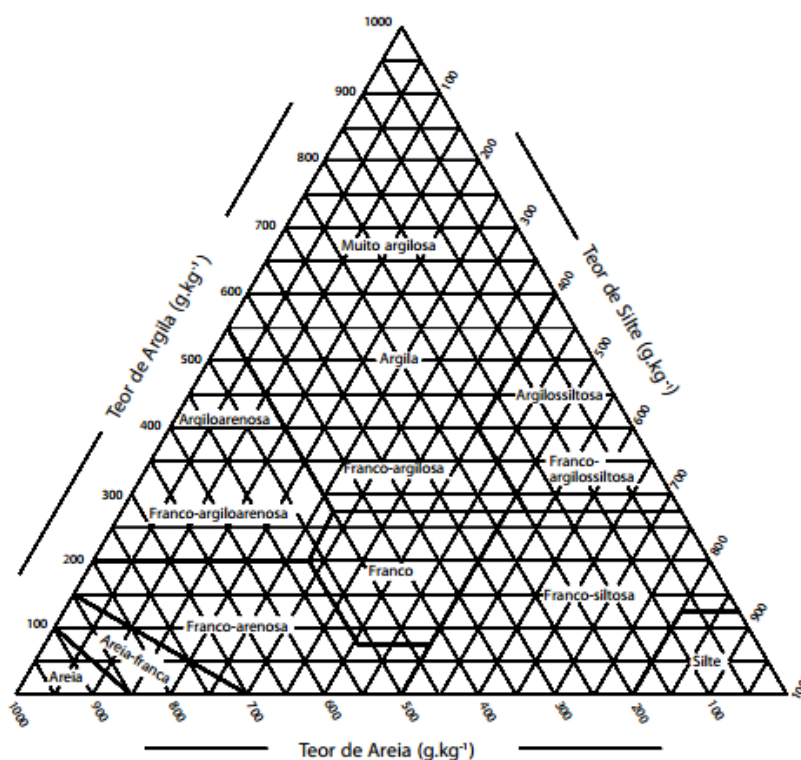


Figura 6 – Divisão das frações granulométricas

Fonte: IBGE (2007) adaptado de Lemos e Santos (1996).

O sucesso ou fracasso de projetos agrícolas ou de engenharia muitas vezes é dependente das propriedades físicas do solo, influenciando em vários fatores. O Quadro 3 apresenta as propriedades ou comportamento do solo, dependendo do teor de areia, silte ou argila. Nesse aspecto é necessário o conhecimento dessas propriedades, como exemplo a susceptibilidade à compactação que ocorre em solos argilosos, após período de chuva. Quando o solo está muito úmido evita-se trafegar com equipamentos agrícolas.

Quadro 3 – Influência das frações (areia, silte, argila) em algumas propriedades e comportamento do solo.

Propriedades/ Comportamento do solo	Areia	Silte	Argila
Capacidade de retenção água	Baixa	Média a Alta	Alta
Aeração	Boa	Média	Pobre
Taxa de drenagem	Alta	Lenta a Média	Muito lenta
Teor de matéria orgânica	Baixo	Médio a Alto	Alto a médio
Decomposição da matéria orgânica	Rápida	Média	Lenta
Aquecimento na primavera	Rápido	Moderado	Lento
Susceptibilidade à compactação	Baixa	Média	Alta
Susceptibilidade a erosão eólica	Moderada	Alta	Baixa
Susceptibilidade a erosão hídrica	Baixa	Alta	Solo agregado – baixa Solo não agregado – alta
Potencial de expansão e contração	Muito baixo	Baixo	Moderado a muito alto
Adequabilidade para construção de represas e aterros	Baixa	Baixa	Alta
Capacidade de cultivo após a chuva	Boa	Média	Baixa
Potencial de lixiviação de poluentes	Alto	Médio	Baixa
Capacidade de armazenamento de nutrientes	Baixa	Média a alta	Alta
Resistência à mudança de pH	Baixa	Média	Alta

Obs. Exceções a estas generalizações ocorrem, como resultado da estrutura do solo e mineralogia da argila.

Fonte: Brady e Weil, 2002.

A granulometria do solo argila está associada com alguns fatores como a impermeabilidade, a plasticidade e a coesão do solo, a absorção dos íons pelas plantas, com o equilíbrio da água no solo, a retenção de cátions, entre outros (PAIVA NETO, 1942).

De acordo com Calderano Filho et al. (1996), ao longo do perfil, dependendo da quantidade de argila é classificado da seguinte maneira:

- Muito Argiloso: solos que apresentam 59% ou mais de argila;
- Argiloso: solos que apresentam de 35% a 59% de argila;
- Médio: solos que apresentam de 15% a 35% de argila;
- Arenoso: solos que apresentam menos de 15% de argila.

2.2.1. Técnicas de Amostragem

O solo, por ser corpo tridimensional formado pela ação de vários fatores e processos, apresenta variação de suas características ao longo da superfície, bem como de seu perfil (COELHO et al., 2009).

No processo de avaliar a fertilidade do solo com o intuito de caracterizar sua capacidade em fornecer nutrientes para as plantas, identificar a presença de acidez

e elementos tóxicos, apontar quais são as melhores formas de adubação e correção do solo e escolher espécies ou variedades mais adaptadas ao cultivo em determinada área, é necessário conhecer o solo. Para tal é necessário a amostragem e análise do mesmo (IAPAR, 1996).

As amostras são valores representativos do fenômeno estudado, usualmente obtidas a partir de levantamento de campo, representando consistência de metodologia e unidade, onde essas amostras podem ser variáveis naturais (relacionadas com o solo) como socioeconômicas (como taxa de homicídios) (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004).

O processo de amostragem é a fase mais crítica do trabalho de campo, aonde uma pequena amostra de solo representa extensa área (VITTI, 1988).

Para a metodologia de campo, primeiramente, deve escolher as áreas, glebas ou talhões uniformes. Para isso considera-se os chamados fatores do solo, onde analise-se o tipo de solo, a topografia da área, ou seja, separar pela declividade (topo, encosta e baixada), cor do solo, áreas com diferentes tipos de drenagem, e a profundidade do solo; as práticas agrícolas englobam tipo de manejo, cobertura vegetal, histórico de calagem ou adubação (VITTI, 1988).

A Figura 7 demonstra as formas de separação e coleta de amostras de solo, as mesmas foram coletadas em função do tipo de solo, profundo, raso e baixada, com amostras em linha, zig-zag, etc.

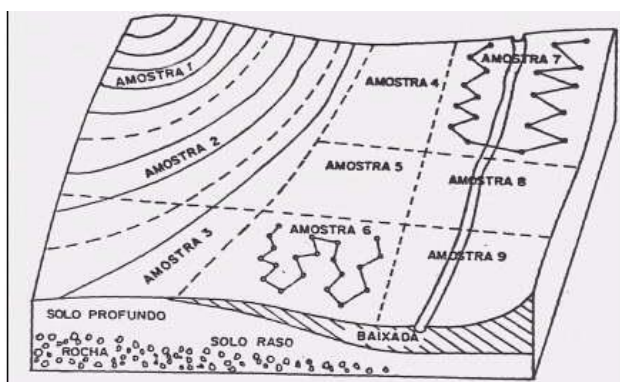


Figura 7 – Divisão da área para diferentes formas de coleta de amostra de solo.

Fonte: Coelho, 2012.

Com a introdução dos conceitos e tecnologias de Agricultura de Precisão, a amostragem passou para fase sistemática, onde se efetua o processo de sobrepor grade quadrada ou retangular em mapa ou fotografia da área, identificar no mapa os fatores do solo e ir a campo e coletar amostra de solos em cada célula, efetuando o processo de subamostras ou pontuais, onde essas amostras são retiradas num raio

de 3 a 6 metros do ponto central. Essa recomendação do espaçamento varia com grades de 60 x 60 metros a 135 x 135 metros, em função da precisão desejada, como pode ser visualizado na Figura 8 (COELHO et al., 2012).

Como exemplo, Coelho et al. (2012), demonstra na Figura 8 sistema de grade com tamanho de (100 m x 100 m), onde seriam coletadas em cada célula cinco subamostras, para a formação de amostra composta.

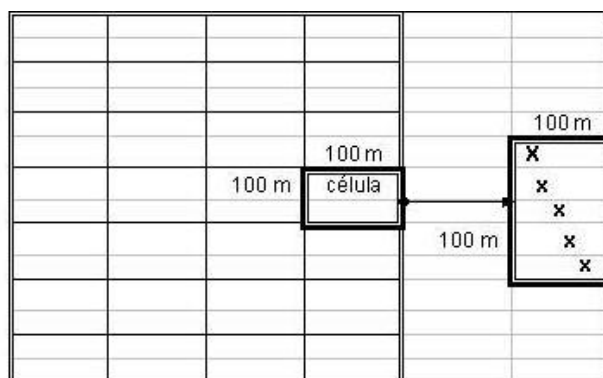


Figura 8 – Sistema de grade e subamostras.

Fonte: Coelho, 2012.

Andriotti (2003), descreve que buscar técnicas para otimizar as coletas de amostras de solo é essencial, pelo fato do alto valor agregado nas coletas de amostras. Dentre as maneiras de coletar amostras, IBGE (2007), cita três formas tais como amostras do perfil completo, para caracterização e classificação de solos; amostras extras, com o intuito de complementar ou confirmar informações em campo e amostras para fim de fertilidade, tanto em levantamentos pedológicos quanto para projetos agrícolas, que envolvem a identificação química e física do solo.

Para efetuar a amostragem de solo são necessários alguns materiais. A Figura 9 demonstra o processo de coleta. Para a retirada das amostras utilizam-se de diferentes tipos de trado, os mais comuns são o holandês, de rosca e tubo. Ainda as amostras podem ser coletadas com pá reta ou com enxadão. Após a retirada do solo, dependendo do objetivo da análise é efetuado o processo de homogeneização em balde plástico. Posteriormente, é colocada a mistura em caixa ou saco plástico e enviada ao laboratório.

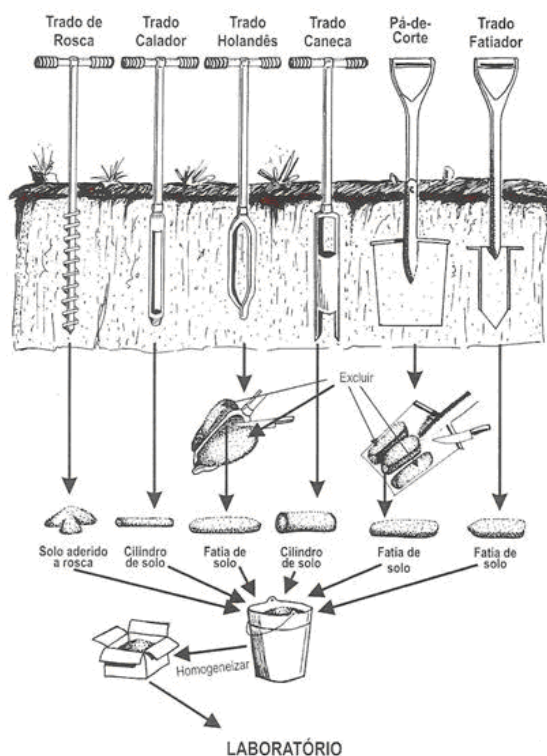


Figura 9 – Ferramentas para amostragem de solo e procedimento para a preparação da amostra a ser enviada ao laboratório.

Fonte: Anghinoni & Gianello, 2004.

O aspecto de profundidade de amostragem do solo é fator importante a ser considerado. As amostras podem ser coletadas com relação ao sistema radicular, como em lugares com pastagens ou olericultura onde é adotada a profundidade de 0 a 20 cm, e outras culturas de maior porte são coletadas a profundidade adotada é de 20 a 40 cm, e essas amostras são utilizadas tanto para a análise química quanto física do solo (VITTI, 1988).

2.2.2. Tratamento e Análise das Amostras

Para a determinação das frações granulométricas são necessárias avaliações, em campo ou em laboratório.

A primeira e mais crítica etapa no método da textura é a avaliação em campo (BRADY e WEIL, 2002). A textura no campo é avaliada em amostra de solo molhado, por meio de sensação de tato, esfregando-se a amostra entre os dedos, após amassada e homogeneizada. A areia dá sensação de atrito, o silte de sedosidade e a argila, de plasticidade e pegajosidade (IBGE 2007).

Para a determinação da fração granulométrica em laboratório, primeiramente faz-se necessário o processo de secagem das amostras, podendo ser em estufa a temperatura 40°, por tamisação ou por determinado período de tempo ao ar livre. Com essas amostras secas, o próximo passo se dá por destorramento em peneira de 2 milímetros de malha (EMBRAPA, 2007).

As amostras são suspensas em água, agitada vigorosamente, e em seguida deixada em repouso, onde as camadas de areia e silte são decantadas depois de 7 horas (BRADY e WEIL, 2002). Tal procedimento pode ser visualizado na Figura 10.

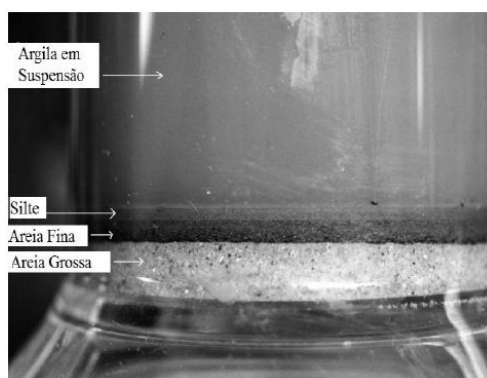


Figura 10 – Separação de areia, silte e argila em laboratório.

Fonte: Brady e Weil, 2002.

2.2.3. Agricultura de Precisão

A necessidade de produção de alimentos a nível mundial promoveu o desenvolvimento da mecanização agrícola em grande escala (COELHO et al., 2009). Esse setor recebe benefícios do uso da computação voltada para a agricultura, citando sensores embarcados, posicionamento global para mapeamento de áreas, entre outros (MELLO e CAIMI, 2008).

Essa aplicação de computação na agricultura denomina-se de Agricultura de Precisão (AP). Para Molin (1997), a AP surgiu como nova demanda de informática na agricultura, pois implica na coleta e manipulação de grande quantidade de dados, são gerenciados por métodos computacionais. De acordo com Antuniassi, Baio e Sharp (2007), a AP pode ser definida como tecnologia moderna para o manejo do solo, dos insumos e das culturas, de modo adequado e considerando as variações espaciais e temporais dos fatores que afetam a produtividade.

De acordo com MAPA (2011), a AP é sistema de gerenciamento agrícola, baseado na variação espacial de propriedades do solo e das plantas encontradas nas lavouras e visa à otimização do lucro, sustentabilidade e proteção do meio

ambiente. Molin (1997) cita que todo o embasamento da AP está na análise da variabilidade espacial dos fatores de produção, em especial o solo.

Silva e Silva (2009) descrevem que toda essa análise da variabilidade é o fundamento da AP, pois este tipo de agricultura ao reconhecer a variabilidade espacial, ou seja, com tratamento diferenciado, de forma a promover maior eficiência econômica do sistema e ao mesmo tempo torná-la atividade com menor risco ambiental.

De acordo com Antuniassi, Baio e Sharp (2007), em relação aos termos econômicos, a aplicação dessa tecnologia possibilita a priorização de investimentos em áreas onde o potencial de produção seja mais efetivo, garantindo maior retorno econômico.

O passo determinante para a implementação da AP foi o surgimento do sistema GPS (MAPA, 2011). Os receptores GPS facilitam todas as atividades que necessitam de posicionamento, possibilitando que algumas concepções antigas pudessem ser postas em prática, exemplo é a AP, que fora estabelecido em 1929, Monico (2008).

Machado et al. (2010), comentam que são inúmeras as aplicações das tecnologias de sistema GNSS na agricultura, para monitoramento e navegação na coleta de dados, nas colhedoras, nas máquinas aplicadoras de insumos e em muitas outras aplicações (MOLIN e CARREIRA, 2006). Ainda pode diminuir as exigências por energia associadas às operações de campo e aumentar a produtividade da mão de obra e da cultura (MOLIN et al., 2011).

Machado e Molin (2011) descrevem que devido a disponibilidade, o receptor GPS passou a representar técnicas com contribuições inovadoras na agricultura, utilizado em atividades que demandam posicionamento com distintos níveis de precisão para diferentes aplicações.

2.3. *Global Navigation Satellite System*

Nas últimas décadas, aumentou o interesse em se realizar o posicionamento de feições terrestres. O *Global Navigation Satellite System* (GNSS), uma das tecnologias espaciais de posicionamento avançadas, tem revolucionado as atividades relacionadas às área como Geodésia, Geodinâmica, Agricultura de

Precisão, Meteorologia, Navegação e até atividades de lazer (ALVES, ABREU e SOUZA, 2013).

Os principais sistemas globais que compõem o GNSS são: *Global Positioning System* (GPS), *Global Navigation Satellite System* (GLONASS), Galileo e mais recentemente o Beidou/Compass (IBGE, 2008).

De acordo com Alves, Abreu e Souza (2013), além desses sistemas, compõem o GNSS, os chamados *Satellite Based Augmentation System* (SBAS), tais como o *Wide Area Augmentation System* (WAAS) nos Estados Unidos, o *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) na Europa, o *Multifunctional Satellite Augmentation System* (MSAS) no Japão, o *GPS Aided GEO Augmented Navigation* (GAGAN) na Índia, além de outras iniciativas similares.

2.3.1. NAVSTAR – GPS, GLONASS, Galileo e Beidou/Compass

A primeira aproximação de sistema de navegação por satélite foi por meio do TRANSIT, porém seus satélites usavam órbitas baixas, com pouca constelação. Sua capacidade era de latitude e longitude (MIGUENS, 1996).

O GPS–NAVSTAR é constituído por três componentes principais: Segmento Espacial (satélites), o Terrestre (monitoramento e controle) e o Segmento do Usuário (receptores GPS e equipamentos associados), (MONICO, 2008) (MIGUENS, 1996). A Figura 11 ilustra a interação entre o segmento espacial, ou seja, os satélites que são monitorados e controlados pelo segmento terrestre e que proporcionam ao usuário a utilização de receptores GPS ou equipamentos associados.

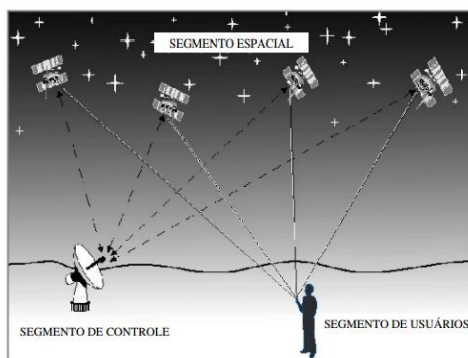


Figura 11 – Os segmentos do Sistema de Posicionamento Global.

Fonte: Figueirêdo, 2005.

O segmento espacial consiste na constelação de satélites e seus planos orbitais (FONTANA, 2002). Esse segmento do sistema GPS é composto por

constelação de 24 satélites orbitando ao redor da Terra distribuídos, em seis planos orbitais distintos, designados respectivamente de A, B, C, D, E e F, com inclinação de 55° em relação ao equador, a altitude de 20.200 km, com período de revolução de 12 horas siderais, como pode ser visualizado na Figura 12 (BERNARDI E LANDIM, 2002).

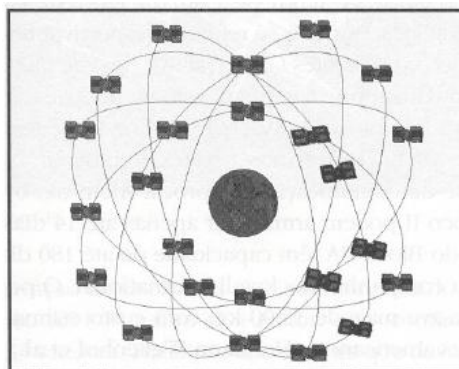


Figura 12 – Planos Orbitais dos satélites da constelação GPS.

Fonte: Fonte Dana, P. H, 1998.

A Figura 13 detalha a distribuição dos satélites GPS nos seis planos orbitais distintos, designados respectivamente de A, B, C, D, E e F, com inclinação de 55° em relação ao equador.

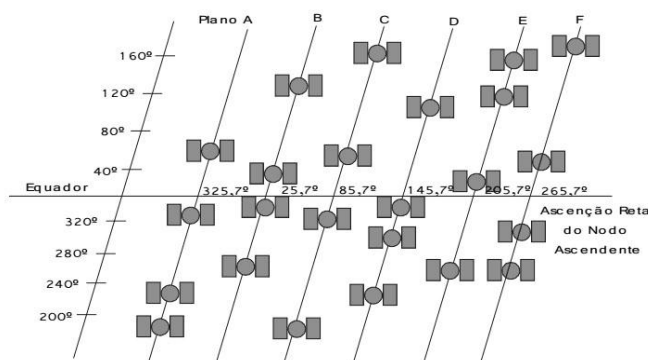


Figura 13 – Distribuição dos satélites GPS nos planos orbitais.

Fonte: Monico, 2008.

Com essa configuração é garantido que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre ou acima dela, a qualquer hora do dia (MONICO, 2008).

O segmento de controle tem como principais tarefas monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites, determinar o tempo GPS, calcular as correções dos relógios dos satélites, predizerem as efemérides dos satélites e

atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite (BERNARDI E LANDIM, 2002).

A finalidade do segmento de controle é manter base comum de tempo para todos os satélites, com dados precisos de suas posições no espaço, em qualquer instante (MIGUENS, 1996). Tem como objetivo checar as anormalidades que os satélites possam apresentar gerenciar seus sistemas, e seus planos orbitais e promover qualquer alteração e informação que seja necessária (FONTANA, 2002).

Esse sistema é composto por cinco estações de monitoramento mundial, localizadas nos seguintes locais: *Hawai* (EUA), *Atol Kwajalein* (Oceano Pacífico Norte), Ilha de Ascension (Oceano Atlântico Sul), Ilha de Diego Garcia (Oceano Índico Sul) e *Colorado Springs* (EUA); três delas com antenas para transmitir os dados para os satélites (Ilha Ascension, Ilha de Diego Garcia e *Atol de Kwajalein*); e estação de controle central (Master Control Station) localizada em Colorado Springs (BERNARDI E LANDIM, 2002).

O segmento do usuário é constituído pelos receptores GPS e equipamentos associados, que determinam com precisão a distância do receptor para vários satélites e computam a posição do receptor e à hora exata da medição referenciada pelo sistema geodésico *World Geodetic System/1984* (WGS-84) (MIGUENS, 1996).

Similar ao GPS, o GLONASS proporciona posicionamento 3-D e velocidade, sem interferência de condições climáticas. Teve seu início operacional em 1995, encontra-se com a constelação completa de 31 satélites, o número de satélites em operação na constelação GLONASS varia entre 22 e 24 (ALVES, ABREU e SOUZA, 2013).

O desenvolvimento do Sistema Europeu Galileo, teve como objetivo a modernização do GPS, trouxe novas perspectivas para os usuários que necessitam de posicionamento (MONICO, 2008). No que concerne ao Galileo, foram lançados dois satélites em outubro de 2011 e mais dois em outubro de 2012. Espera-se que o sistema esteja com capacidade operacional inicial por volta de 2014 com 18 satélites em órbita. Para a constelação completa é esperada para 2020 (ALVES, ABREU E SOUZA, 2013).

Assim, como os Estados Unidos, Rússia e União Européia, a China desenvolveu seu próprio sistema GNSS, o Compass/Beidou (*China's Compass Navigation Satellite System – CNSS*). Embora iniciado pelas Forças Militares da China, o recente estabelecimento do *China Satellite Navigation Project Center*

(CSNPC), intensificará as pesquisas, construção e administração do CNSS (IBGE, 2008). A ideia do sistema começou como serviço regional e mais tarde expandiu para serviço global. Atualmente, o sistema conta com 16 satélites, desses 5 satélites são *Medium Earth Orbit* (MEO), similares ao GPS. Os demais satélites são de órbita geoestacionária ou geoestacionária inclinada *Inclined Geostationary Orbit* (IGSO). O último lançamento de satélites MEO foi realizado em setembro de 2012 (satélites M5 e M6). Espera-se que a constelação esteja completa em 2020 (ALVES, ABREU e SOUZA, 2013).

2.3.2. Estrutura básica do sinal do GPS

Monico (2008) descreve que cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras, L1 e L2, geradas a partir da mesma frequência de 10,23 MHz, multiplicada por 154 e 120, respectivamente, obtendo os comprimentos:

- L1 = 1575,42 MHz e comprimento de onda = 19 cm
- L2 = 1227,60 MHz e comprimento de onda = 24 cm

O sinal de cada satélite é transmitido com modulação diferente, sob a forma de código, consistindo de Código de Precisão (*P* - Precision Code), e de Código de Aquisição Inicial (*C/A* – Coarse Acquisition Code), que proporcionam respectivamente, o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS – *Precise Positioning Service*) e o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS – *Standard Positioning Service*) (MIGUENS, 1996).

O código PRN (*Pseudo Random Noise*) é modulado, em fase, sobre as duas portadoras, com sequência de códigos binários +1 e -1, emitidos a frequência de 1,023 Mhz (código **C/A**) e 10,23 Mhz (código **P**). O código **C/A** se repete a cada milissegundo, enquanto o código **P**, a cada 267 dias, reservado para uso militar e usuários autorizados. A portadora L1 é modulada com os códigos **C/A** e **P**, enquanto L2 apenas com o código **P** (BERNARDI E LANDIM, 2002).

O Código de Precisão e consequentemente o PPS é acessível apenas para uso militar, o Código C/A e o SPS é acessível para os demais usuários (MIGUENS, 1996).

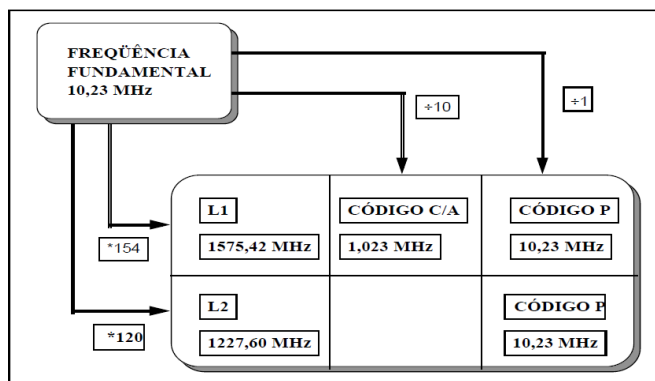


Figura 14 – Estrutura básica do sinal GPS

Fonte: Monico, 2008.

2.3.3. Método de Posicionamento.

Seu princípio de localização está baseado no conceito distância-velocidade-tempo (FONTANA, 2002).

O posicionamento por meio do sistema GPS pode ser realizado por diferentes técnicas, com diferentes níveis de precisão, que variam desde algumas dezenas de metros até poucos milímetros (IBGE, 2008).

O posicionamento consiste na determinação da posição de objetos em relação ao referencial específico. Para tal efetua cálculos de posicionamento, baseados na distância entre o receptor e os satélites e ainda da posição de cada satélite no espaço cartesiano, conhecido como triangulação, independente do estado do objeto, podendo ter posicionamento absoluto e relativo (IBGE, 2008).

No posicionamento efetuado absoluto por ponto, é usual ter como observável o código, o qual é igual à diferença entre o tempo do relógio do receptor, no momento da recepção do sinal e o tempo do relógio do satélite no instante que está transmitindo o sinal, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo (MONICO, CAMARGO e SILVA, 1997).

As coordenadas que são transmitidas estão implícitas na distância geométrica ρ e são obtidas a partir das efemérides transmitidas, de X , Y , Z e o erro do relógio do receptor, necessário no mínimo de quatro satélites para se obter as coordenadas (MONICO, CAMARGO e SILVA, 1997).

A Figura 15 demonstra o posicionamento por ponto, onde se necessita apenas de receptor para obtenção das coordenadas tridimensionais de estação, efetuado em tempo real, usando a pseudodistância derivada do código C/A presente na portadora L1.

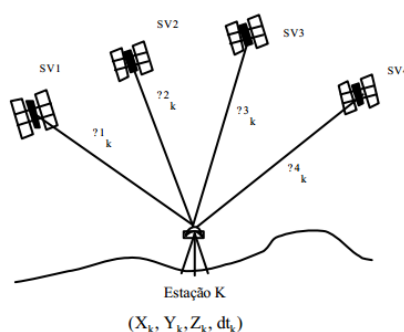


Figura 15 – Posicionamento por ponto, método absoluto.

Fonte: Monico, 2008.

No posicionamento relativo, o usuário deve dispor de dois ou mais receptores, a posição de um ponto é determinada com relação a de outro(s), cujas coordenadas são conhecidas. O objeto a ser posicionado, por estar em repouso, ou em movimento, denominado posicionamento cinemático. Com o advento dos Sistemas de Controle Ativo é possível efetuar o georreferenciamento com apenas um receptor (MONICO, 2008). A Figura 16 ilustra o posicionamento relativo, onde as coordenadas são determinadas em relação a referencial materializado, por meio de uma ou mais estações, com coordenadas conhecidas. Para isso é necessário que, pelo menos dois receptores, colem dados de, no mínimo, dois satélites simultaneamente, onde um dos receptores deve ocupar a estação com coordenadas, denominada de estação de referência ou estação base.

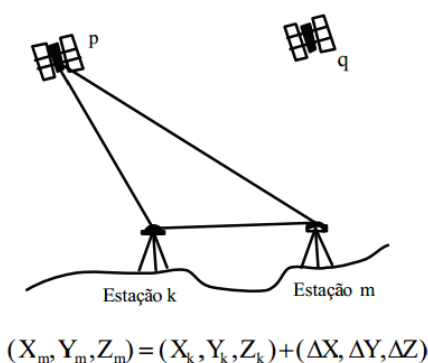


Figura 16 – Posicionamento relativo.

Fonte: Monico, 2008.

2.3.4. Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

Com o surgimento e a popularização do Sistema GPS, entre as décadas de 80 e 90, muitas instituições iniciaram sua utilização em atividades geodésicas, da mesma maneira o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) iniciou seus trabalhos com receptores GPS em 1991. Nessa época era necessário a aplicação de posicionamento relativo. Além dos erros, ainda existia o problema da realização de observações em um ou mais marcos de coordenadas conhecidas, que servem como estações de referência (IBGE, 2011).

Para sanar os erros ou uma forma de minimizar ou eliminar a influência de tais erros é a aplicação do posicionamento baseado em redes de estações de referência (OLIVEIRA, PROL e ALVES, 2012).

Em 1991, o IBGE iniciou as discussões e o desenvolvimento do projeto para estabelecimento da Rede de Monitoramento Contínuo do Sistema GNSS (RBMC) com sua implantação em 1996. Essas redes são equipadas com receptores GPS de dupla frequência, coletando continuamente as variáveis observáveis do sistema GPS. Esta rede, é a principal ligação com redes internacionais e com os sistemas de referência adotados globalmente (IBGE, 2011). Essas bases de dados se encontram disponíveis no site do IBGE para *download*, vale ressaltar que é necessário cadastro e validação do mesmo por parte do IBGE.

O receptor Leica-SR 20 é aparelho de Sistema GPS para topografia, fácil de usar, robusto, capaz de realizar medições estáticas e cinemáticas precisas, coleta de dados em tempo real ou por meio de sistema (MANFRA, 2004).

O receptor GPS é composto pelo aparelho, a antena, com cabo que faz a conexão entre a antena e o aparelho. Tripé acompanha o *Software Leica Geo Office Combined* destinado para a manipulação e pós-processamento dos dados coletados a partir do GPS.

O pós-processamento é necessário com o intuito de corrigir erros que possa ocorrer na georreferenciamento, por exemplo erros de posicionamento, em que reflete diretamente na precisão e acurácia.

2.3.5. Precisão e Acurácia

Nas áreas de Ciência Geodésicas e Cartografia é comum o termo acurácia, o qual se utiliza para indicar a qualidade da grandeza observada ou parâmetro

estimado. É importante lembrar que qualquer medida está sujeita aos mais variados tipos de erro (MONICO et al., 2009).

O posicionamento por sistema GPS está sujeito a interferências provocadas por algumas fontes de erro, tais como: satélites, propagação do sinal, receptor/antena e estação (MONICO, 2008).

Os erros relacionados com o relógio do satélite são devidos à pequenas variações. Os erros do receptor dependem da geometria dos satélites apresentada ao usuário por fator de diluição da precisão da posição, denominado *Positional Dilution of Precision* (PDOP). É utilizado como indicador de qualidade, quanto menor o fator PDOP, melhor a precisão da posição (MIGUENS, 1996).

De acordo com Bergeijk et al. (1998), o PDOP é o parâmetro utilizado para avaliar a acurácia do Sistema GPS, avaliando a distribuição dos satélites no espaço, onde alto valor desse índice indica baixa acurácia na medida, pois os satélites se encontram aglomerados na mesma área.

Para Mikhail e Ackermann (1976) citado por Monico et al. (2009), acurácia é o grau de proximidade de estimativa com seu parâmetro (ou o valor verdadeiro), enquanto a precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média, onde está diretamente ligada com a dispersão da distribuição das observações.

De acordo com Andrade (1998), precisão é função de espalhamento dos resultados obtidos, onde mais próximos da média os valores se encontram, mais preciso é o conjunto de dados. A contrario, quanto mais espalhados estão os valores em relação à média dos valores, menos precisos são.

Para ilustrar a precisão de conjunto de dados, tem-se na Figura 17 (a) e (b) dois atiradores diferentes que efetuaram vários disparos em um alvo. O atirador (b) conseguiu concentrar mais os disparos. Entende-se que esse seja o melhor atirador, pois seus disparos ficaram menos espalhados, porém nenhum conseguiu acertar o centro do alvo na média dos disparos. Nesse aspecto, faltou acurácia ou exatidão, que de acordo com Andrade (1998) é o grau de confiabilidade dos dados. Na Figura 17 (c) e (d) são ilustrados dois atiradores com acurácia ou exatidão, onde ambos foram exatos, porém o atirador (c) é o mais preciso.

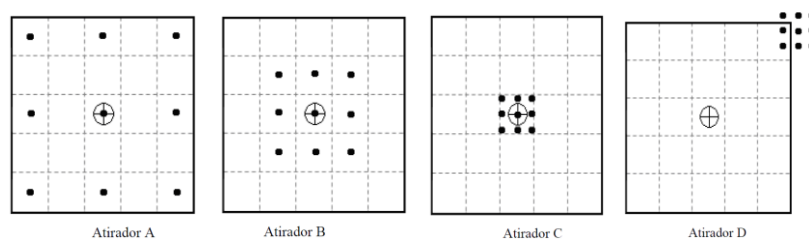


Figura 17 – Tiro ao alvo para ilustrar acurácia e precisão.

Fonte: Monico et al. 2009.

2.4. Geoestatística

Na estatística clássica se considera a independência entre as amostras baseadas na média, porém essa forma de tratar as amostras em alguns casos é substituída por análises geoestatísticas fundamentadas pela teoria das variáveis regionalizadas (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

Em seu início, a geoestatística aplicava métodos estatísticos em geologia, porém de acordo com o estudo de Daniel G. Krige e aperfeiçoamento por Georges Matheron, no início dos anos 60, expandiu-se para outras áreas, verificou-se os estudos entre a geoestatística envolvendo as variáveis regionalizadas (LANDIM, 2006).

A geoestatística é considerada como aplicação prática da Teoria das Variáveis Regionalizadas. Para tal, estima a correlação espacial para fazer previsões e estimativas de dados. É baseada em conceito probabilístico e, parte do princípio que a diferença de valor entre duas observações quaisquer é função da direção e da distância, em que ocorre o afastamento entre os pontos de medida, conhecida como hipótese intrínseca (ANDRIOTTI, 2003).

Segundo Landim (2010), a geoestatística é voltada para o estudo de variáveis com condicionamento espacial, mais conhecida como variáveis regionalizadas. Ela dispõe de técnicas necessárias para realizar a análise dos dados, e encontrar nestes dados com aparente aleatoriedade, correlação espacial. Com esta função é representada a base da estimativa da variabilidade espacial em geoestatística.

Andriotti (2003), descreve que para trabalhar a geoestatística, é definida Variável Aleatória (VA). Esta variável assume uma quantidade de valores, com base em determinada lei de probabilidade. Assim, VA possui família de valores e a cada um dos valores está associada uma probabilidade. Desta forma, define-se que o conjunto infinito de VA, forma o que se chama de Função Aleatória (FA). Nos termos

da notação utilizada na geoestatística, dá-se que o teor de $z(x_i)$ é a realização de uma VA $z(x_i)$ implantada no ponto x_i , e o conjunto das VA forma a FA.

Segundo Andriotti (2003) considera-se que, a realização de uma $z(x_i)$ de uma FA $z(x)$, como uma Variável Regionalizada (VR) e, reciprocamente se considera uma VR como uma realização de uma determinada FA, e é esta interpretação que possibilita a aplicação da teoria probabilística das FA às VR.

A definição VR pode ser definida como uma variável distribuída no espaço e puramente descritiva e não envolve qualquer interpretação probabilística (ANDRIOTTI, 2002).

São características das variáveis regionalizadas (VALENTE, 1982):

- Localização – as variáveis regionalizadas estão dispostas em campo geométrico;
- Continuidade – é preciso considerar a posição espacial relativa de cada uma das observações, visualizadas pelo variograma;
- Anisotropia – algumas variáveis são anisotrópicas, isto é, apresentam variações graduais em uma direção e rápidas ou irregulares em outra.

Burrough (1982) descreve que a teoria das VR assume que a variação de uma das variáveis pode ser expressa pela soma de três componentes, onde esse componente estrutural associado a tendência constante, com componente aleatório, espacialmente correlacionado e juntamente com ruído ou erro residual. Nesse aspecto, se uma variável x representa determinada posição em uma, duas ou três dimensões, então o valor da variável Z , em x , é dado pela equação (1):

$$Z(\mathbf{x}) = m(\mathbf{x}) + \varepsilon'(\mathbf{x}) + \varepsilon'' \quad (1)$$

Nesse aspecto Burrough (1982), descreve que:

- $m(x)$ é a função determinística que descreve o componente estrutural de Z em x ;
- $\varepsilon'(x)$ é termo estocástico, que varia localmente e dependente espacialmente de $m(x)$;
- $\varepsilon''(x)$ é ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal com média zero e variância σ^2 .

2.4.1. Análise dos Variogramas

Na literatura é abordado tanto como variogramas ou semivariograma, e muitas vezes se referindo a mesma quantidade. São duas quantidades diferentes, pois o variograma tem valor igual ao dobro do semivariograma (ANDRIOTTI, 2002).

O variograma é função intrínseca que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas que existem entre as amostras espaçadas de sucessivos valores de distância (h). O variograma é em termos matemáticos a esperança matemática do quadrado dos acréscimos da variável regionalizada em estudo em determinada direção definida pelo vetor h (ANDRIOTTI, 2003).

Segundo Talamini Neto (2001), existem vários parâmetros para se realizar a estimativa de variabilidade em conjunto amostral. O mais comumente utilizado é o variograma que é representado na Equação (2), onde y é o variograma, n é o número de amostras separadas pela distância representada por h , $v(x)$ simboliza o valor da amostra situada na posição x , e $v(x + h)$ é o valor da amostra situada na posição $(x+h)$.

$$y(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (v(x_i) - v(x_i + h))^2 \quad (2)$$

De acordo com Camargo, Fucks e Câmara (2004), a determinação espacial do semivariograma, para cada valor de h , considera todos os pares de amostras $Z(x)$ e $z(x+h)$, separadas pelo vetor distância h , tendo como atributos $\gamma(h)$ é o semivariograma estimado e $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $x(z)$ e $z(x+h)$, separados pelo vetor h , como apresentado na equação (3).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Camargo (2001) cita que o padrão do semivariograma representa o que, intuitivamente se espera de dados de campo, ou seja, que as diferenças $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$, decrescem a medida que h , a distância que os separa decresce, assim $\gamma(h)$ aumenta com a distância h .

A Figura 18 ilustra semivariograma, no eixo x ($\gamma(h)$) encontra-se o efeito pepita (C_0), que está relacionado ao erro associado a coleta das amostras. A

contribuição é a diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0); no eixo x encontra-se a distância em metros, o alcance (a) está relacionado com a distância que existe a dependência espacial. Os dados que se encontram foram do alcance não possuem mais dependência espacial, passando a ser analisado pela estatística clássica, ainda encontra-se a modelo teórico representado pela linha e o semivariograma experimental representado pelos pontos.

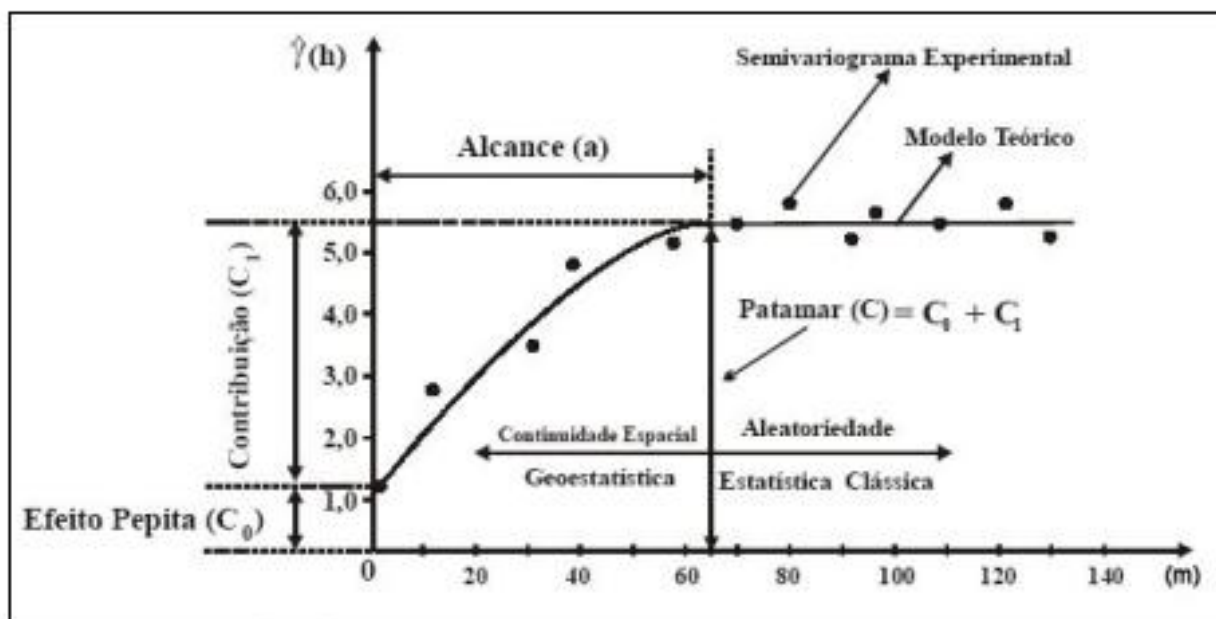


Figura 18 – Modelo do semivariograma.

Fonte: Camargo, 2001.

Para tal Andriotti (2003), cita que o Alcance (a), reflete o grau de homogeneização entre as amostras, ou seja, quanto maior for o seu valor, mais homogêneo será o processo estudado. Camargo (2001) descreve o alcance (a) representado a distância entre as amostras que apresentam correlação espacial.

No variograma, o patamar (C) é o valor da variância correspondente ao ponto em que o mesmo estabiliza (ANDRIOTTI, 2003), na concepção de Camargo (2001), é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance (a), para tal considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre os pares de amostras ($\text{Var} [Z(x) - Z(x+h)]$) torna-se invariante com a distância.

O Efeito Pepita (C_0), de acordo com Valente (1989), reflete as microestruturas não alcançadas pela amostragem, ou seja, se as amostras possuem algum erro. Camargo (2001), idealmente $\gamma(0) = 0$, entretanto na prática, à medida

que h tende para zero, $\gamma(h)$ se aproxima de valor positivo chamado efeito pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte dessa descontinuidade pode ser devida a erros de medição (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

De acordo com Camargo (2001), a Contribuição (C_1) é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

Segundo Silva (2000), a análise do variograma é feita com base nos parâmetros de entrada. Para tanto, deve-se definir a distância h de separação entre os pares de amostras do variograma é o número de *lags* que serão analisados no variograma. De acordo com Camargo (2001), eles referem-se a distância pré-definida, a qual é utilizada no cálculo dos variogramas e está relacionada com a distância que as amostras serão utilizadas.

De acordo com Camargo, Fucks e Câmara (2004), a partir da escolha dos parâmetros o modelo deve ser ajustado. Tal procedimento não é direto e automático, porém é efetuado de maneira interativa, onde o intérprete faz primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico, o procedimento se repete até que se considere satisfatório.

Descreve Amaral (2010), a escolha do modelo apropriado para o variograma é de suma importância, pois cada modelo apresenta diferenciados valores para os parâmetros efeito pepita, variância e alcance, e estes são relevantes para a krigagem.

O modelo gerado pelo variograma e sua interpretação não são simples. Nos dois casos necessita conhecimento do fenômeno e da maneira que é efetuado o processo da coleta das amostras, para que se possam analisar adequadamente os dados (VALENTE, 1982).

Segundo Landim (2010) após possuir o variograma experimental criado com os dados amostrais, se faz necessário o ajuste do variograma ao modelo teórico, a partir deste ajuste se obtém os parâmetros de patamar, efeito pepita e alcance.

O gráfico do semivariograma experimental, $\gamma^{(n)}$ é formado por uma série de valores, sobre os quais se objetiva ajustar a função, de tal maneira representa a tendência de $\gamma^{(n)}$ em relação à distância h . Dessa maneira, as estimativas obtidas por meio da krigagem serão exatas e confiáveis, comparadas a outros interpoladores (CAMARGO, FUCKS E CÂMARA, 2004).

De acordo com Landim (2006), os modelos de variogramas com patamar são:

- Modelo Esférico: É um dos modelos mais utilizados e a equação (4) de normalização deste modelo é:

$$y(h) = C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \quad (4)$$

$$y(h) = C, \text{ para } h \geq a,$$

Nesse modelo a inclinação da tangente junto à origem ($h \equiv 0$) é $3C/2a$; é o modelo mais comum.

- Modelo exponencial: Amplamente utilizado. Este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância, na qual o valor do modelo é 95% do patamar e a sua equação (5) de normalização é:

$$y(h) = C [1 - e^{-3h/a}] \quad (5)$$

Neste modelo, a inclinação da tangente junto à origem é C/a ; C é a assíntota de curva exponencial e pode ser equalizada junto ao patamar; “a” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% do patamar foi alcançado.

- Modelo Gaussiano: É transitivo, muitas vezes usado para modelar fenômenos extremamente contínuos e sua equação (6) de normalização é descrita conforme abaixo:

$$y(h) = C [1 - e^{(-3h/a)^2}] \quad (6)$$

A curva é parabólica junto à origem e a tangente nesse ponto é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias; “a” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% do patamar foi alcançado.

A Figura 19 apresenta a aplicação dos modelos de variogramas teóricos supracitados.

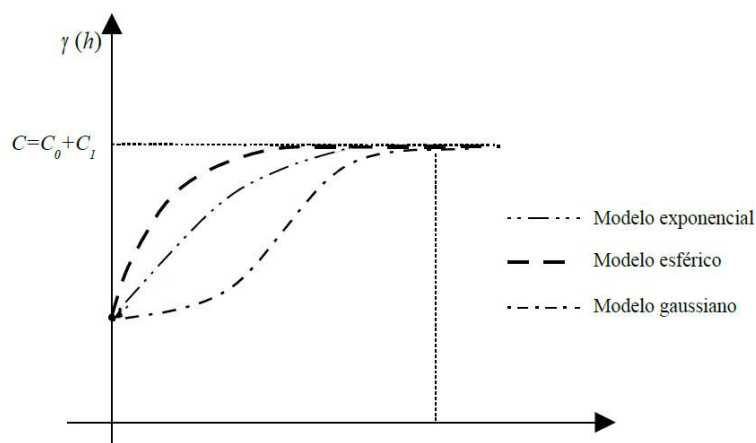


Figura 19 – Representação gráfica dos modelos.

Fonte: Camargo (2001) adaptado de Isaacks e Srivastava (1989)

2.4.4. Isotropia e Anisotropia

A anisotropia é característica encontrada nos elementos da natureza, ou seja, a variabilidade ou distribuição espacial dos elementos ocorre com mais frequência em uma direção. Nesse aspecto, quando se efetua o variograma é essencial que o modelo proposto represente a variabilidade do estudo (CAMARGO, FUCKS E CÂMARA, 2004).

A anisotropia pode ser facilmente constatada por meio da observação dos variogramas obtidos em diferentes direções, pois algumas variáveis regionalizadas são anisotrópicas. Isto é, apresentam variações graduais em uma direção e rápidas ou irregulares em outra utilizando para tal as convenções direcionais na geoestatística, Figura 20.

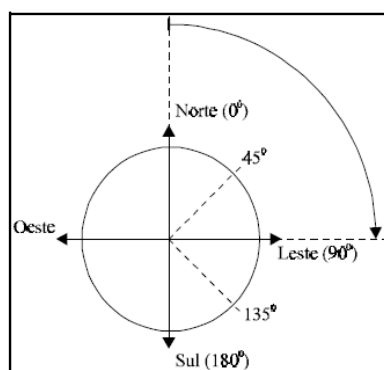


Figura 20 – Convenções direcionais usadas na geoestatística.

Fonte: Camargo, 2001.

Se os variogramas para diferentes direções tiverem o mesmo comportamento, diz-se haver isotropia da variável, caso contrário, representa anisotropia. No caso da isotropia $\gamma(h)$, não depende da direção em que se estuda o fenômeno, pois seu comportamento será o mesmo em qualquer uma delas, para a anisotropia, o $\gamma(h)$ terá influência também na direção de h e não apenas no módulo (ANDRIOTTI, 2003).

Nesse aspecto a VR é isotrópica quando sua continuidade espacial é idêntica em todas as direções, essa forma de modelo é importante para a estimativa de locais onde não foi amostrado, obtendo mapas de variabilidade a partir de único variograma denominado omnidirecional (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

2.5. Interpoladores

Os interpoladores são conjuntos de procedimentos matemáticos, com a finalidade de estimar valores de variáveis, permitindo representar na forma de mapa, de forma contínua, o comportamento das variáveis amostradas pontualmente (ANDRIOTTI, 2003).

Para a estimativa, quando os dados são abundantes no momento da interpolação, a maior parte dos métodos produz valores semelhantes (BURROUGH, 1982).

Os interpoladores são distinguidos em (1) globais ou locais; (2) exatos ou suavizantes; e (3) determinísticos ou estocásticos (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

O processo de estimativa pode ser realizado por modelo determinístico de efeito local, onde cada ponto da superfície é estimado apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas, não levando em consideração qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial, cita-se como exemplo Inverso da Distância Ponderada (IDW), e a equação 7 mostra como é calculado o IDW: (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004).

$$\hat{z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n w_{ij}},$$

(7)

em que,

z = valores estimados;

n = número de amostras;

z_i = valores conhecidos;

d_i = distâncias entre os valores conhecidos e estimados (z_i e z).

Onde: z_i é o valor de cota de um ponto i qualquer da grade, z_j é a cota de uma amostra, j vizinha do ponto i da grade e w_{ij} é fator de ponderação (CAMARGO, FUCKS E CÂMARA, 2004). A Figura 21 mostra como é efetuado o processo de interpolação local, tem-se primeiramente em (a) grade irregular com amostras, com os respectivos pontos, partindo deles gera-se *grid* ou malha de interpolação (b), por ser de maneira local ocorre influência dos pontos próximos (c) e tem como resultado final (d) grade gerada pelo processo de interpolação.

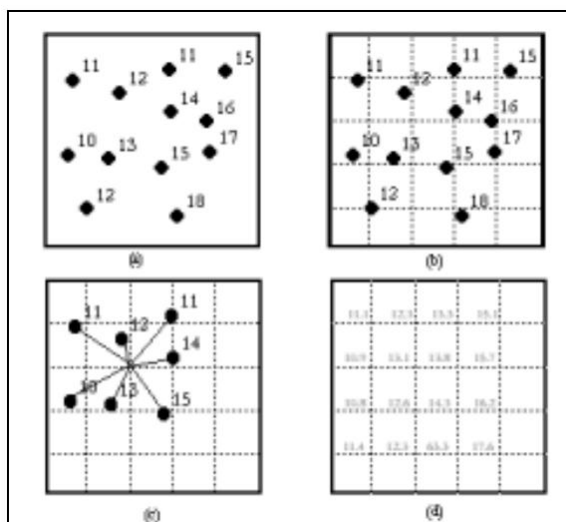


Figura 21 – Processo de interpolação estimacão local: (a) amostras; (b) grade regular superposta às amostras; (c) interpolação local; (d) grade regular resultante.

Fonte: Camargo, Fucks e Câmara, 2004.

Nesse modelo, determinístico local definido para porções do mapa, a alteração de um valor afetará localmente os pontos próximos ao mesmo (LANDIM, 2000), (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

No modelo determinístico de efeito global, para a caracterização do fenômeno em estudo, predomina a variação em larga escala, não levando em consideração a variabilidade local, são interpoladores por superfície de tendência, onde a superfície é aproximada por ajuste polinomial aos dados, por meio de processo de regressão múltipla entre os valores do atributo e as localizações geográficas (CAMARGO, FUCKS E CÂMARA, 2004).

Na função global de interpolação consideram-se todos os pontos da área, permitindo estimar valor em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais, ocasionando que a adição ou remoção de um valor terá como consequência no domínio de definição da função (LANDIM, 2000). Existe tendência dos algoritmos de interpolação global a gerar superfícies mais suaves, com mudanças menos bruscas (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

Os interpoladores exatos usualmente são aplicados quando se tem certeza dos valores dos pontos no qual a interpolação está baseada, o modelo sempre fideliza os dados, de maneira que após o processo de interpolação não há presença de resíduos, ou seja, a predição ocorre sobre os locais amostrados vai ser igual ao próprio valor amostrado (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

Os interpoladores estocásticos utilizam da teoria da probabilidade e, incorporam critérios estatísticos na determinação do peso atribuído aos pontos amostrais para o cálculo das interpolações, ao contrário os interpoladores determinísticos que não fazem uso da probabilidade, efetua combinação linear dos valores amostrados, baseado na geometria da distribuição espacial (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

Ainda, em relação aos interpoladores, eles podem ser divididos entre geoestatístico e não-geoestatísticos, a principal diferença é a maneira como se determina os pesos para o cálculo a ser interpolado, nomeia-se interpolador geoestatístico a krigagem e os não-geoestatísticos a média móvel, inverso da distância ponderada, triangulação, poligonação, etc (BETTINI, 2007).

Quadro 4 – Característica dos métodos de Interpolação

Métodos Geoestatísticos	Métodos Não-Geoestatísticos
Os pesos são determinados a partir de uma análise de correlação espacial baseada no semivariograma $\lambda_i = f[\gamma(\mathbf{h})]$	Os pesos são determinados meramente em função da distância. $\lambda_i = f(d_i)$
Área de influência na interpolação é indicada pelo alcance.	Raio de busca é arbitrário.
Modela anisotropia, isto é, detecta as direções de maior e menor continuidade espacial do fenômeno.	Anisotropia é ignorada.
Trata redundância ("Clusters"), isto é, atribuem pesos adequados para agrupamentos de amostras.	Redundância é ignorada. Neste caso, pode ocorrer superestimação ou subestimação de valores.

Fonte: Camargo, 2001.

2.5.1. Processo Inverso da Distância Ponderada

É método de interpolação onde o peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó da grade a serem estimados (LANDIM, 2000).

O Inverso da Distância Ponderada - *Inverse Distance Weighting (IDW)* ou (*IQD*), implementam a teoria de que as coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes, utilizando desta maneira para a interpolação valores que se encontram mais aproximados do ponto a ser predito, da maneira que a influência diminui da maneira que a distância aumenta, apresentado na equação 7 (JACOB e YOUNG, 2006).

O IDW é método interpolador exato, poucas decisões são tomadas acerca do parâmetro do modelo, não é realizada avaliação da predição dos erros (JACOB e YOUNG, 2006). O Quadro 5 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização da interpolação por meio do IDW.

Quadro 5 – Interpolador Inverso da Distância Ponderada.

Vantagens:	Desvantagens
Fácil de entender matematicamente; Algoritmo bem conhecido e discutido; Disponível em muitos <i>Softwares</i> ; Razoavelmente fiel aos valores amostrados; Não estimula Z_i maiores ou menores que os valores mínimos dos dados; Bom para estimação de propriedades físicas; Muito bom para analisar variações de pequena amplitude (anomalias) entre os dados irregularmente distribuídos; Bom estimador para propósitos gerais;	Não estima valores de Z_i maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; Muito difícil obter a localização precisa de determinada isolinha se os valores amostrados não contiverem este valor; Influência de valores locais anômalos é dificilmente removida, dados dos clusters podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso; Criar muitos artefatos, o que pode ser reduzido ou eliminado se o raio de busca for reduzido, se a tendência for removida previamente e se ocorrer mudanças no expoente utilizado, no tamanho da grade, no número de pontos utilizados e ponderação direcional;
Quando usar:	Quando não usar:
Estimativa de propósito geral; Distribuição uniforme de dados; Boa densidade dos dados; Para destacar anomalias locais; Para cálculo de volume em operação de <i>grids</i>	Dados agrupados; Tendência pronunciada presente; Dados com falhas e distribuídos de forma esparsa; Não quiser artefatos;

Fonte: Landim, 2000.

2.5.2. Processo da Krigagem Ordinária

A qualidade da interpolação não está em simplesmente associar valor a um ponto ou bloco, mas está em associar a essa avaliação a ideia da qualidade de estimativa, é necessário saber quão distante o valor atribuído pode estar do valor

real, nesse aspecto a krigagem fornece medida de acuracidade dessa interpolação (ANDRIOTTI, 2003).

O termo Krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige que foi o pioneiro a utilizar as médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração, a estrutura teórica da krigagem está baseada no conceito da variável regionalizada, desenvolvida por Georges Matheron (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2000).

A krigagem está associada com conjunto de técnicas geoestatística de ajuste utilizadas para aproximar dados partindo do ponto que, fixando ponto no espaço, os pontos que se encontram a sua volta, são mais relevantes do que os afastados, isso implica na existência de correlação entre os dados, deixando implícita a necessidade de saber até onde, espacialmente, essa correlação é significativa (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

De acordo com Camargo, Fucks e Câmara (2000), os passos em estudo empregando técnicas de Krigagem abrangem:

- Análise exploratória dos dados;
- Análise estrutural, com modelação da correlação espacial;
- Interpolação estatística da superfície;

Andriotti (2003) cita que a krigagem leva em consideração:

- O número de amostras utilizadas;
- As posições das amostras e a zona a ser estimada;
- As distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada;
- E a continuidade *espacial* da variável em estudo.

O estimado de Krigagem é do tipo BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*), que se considera linear por ser formado por combinação linear dos dados (ANDRIOTTI, 2003)

Considere superfície na qual se observa alguma propriedade do solo Z , com n pontos distintos, com coordenadas representadas por vetor x , assim obtém conjunto $\{Z(x_i), i=1, \dots, n\}$, onde x_i identifica posição em duas dimensões representadas por pares de coordenadas (x_i, y_i) , nesse sentido para se obter o valor de Z no ponto c , o valor desconhecido de $Z(x_0)$, pode ser obtido a partir da combinação linear dos n valores observados, somando parâmetro λ_0 , apresentado na equação (8)(CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004).

$$Z^*(x_0) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (8)$$

Camargo (2001) no intuito do estimador não tendencioso, para isto obtém-se a equação (9):

$$E [Z(x_0) - Z^*(x_0)] = 0 \quad (9)$$

A relação acima impõe que as duas médias sejam iguais, para tal somam-se ambas e se obtém a equação (10): (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004).

$$E [Z(x_0)] = E \left[\lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \right] \Rightarrow m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i m \quad (10)$$

Camargo (2001) descreve que a krigagem ordinária não requer o prévio conhecimento da média m , então para que a igualdade da Equação acima seja satisfeita é necessário que efetue o processo da equação (11):

$$\lambda_0 = 0 \quad \text{e} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (11)$$

Para tal Camargo, Fucks e Câmara (2004), descrevem que a o estimador krigagem se apresenta na equação (12):

$$Z_{x_0}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad , \quad \text{com} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (12)$$

Nesse sentido, minimizando a variância do erro ($Var[Z(x_0) - Z^*(x_0)]$) na condição de $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, os pesos de λ_i são obtidos por meio do seguinte sistema de equação (13), denominado de sistema de krigagem ordinária: (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2000).

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \alpha = C(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0) & \text{para } i=1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (13)$$

Para tal Camargo (2001), descreve:

- $C(x_i, x_j)$ e $C(x_i, x_0)$ são respectivamente, a semivariância entre os pontos x_i e x_j e entre os pontos x_i e x_0 ;
- α é o multiplicador da Langrange necessário para a minimização da variância do erro.

Nesse aspecto Camargo, Fucks e Câmara (2004), descrevem que a correspondente variância de krigagem ordinária (σ_{ko}^2), é dada pela equação (14) que é apresentada abaixo:

$$\sigma_{ko}^2 = \text{Var}[Z(\mathbf{x}) - Z^*(\mathbf{x}_0)] = C(\mathbf{0}) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0) - \alpha \quad (14)$$

A krigagem ordinária é interpolador exato no aspecto que, quando as equações de 8 a 14 forem utilizadas, os valores preditos irão coincidir com os valores dos pontos amostrais (CAMARGO, 2001).

Os resultados obtidos pela krigagem são robustos, os mapas de krigagem de blocos são mais suavizados que se comparados com outros interpoladores (ANDRIOTTI, 2003).

Os resultados obtidos pelo interpolador krigagem apresentam boa confiabilidade, devido à forma que os pesos são atribuídos, não tendencioso, com variância mínima e visualização da variância estimada (WEBSTER e OLIVER, 2007).

O Quadro 6 apresenta algumas vantagens e desvantagens apontadas por Landim (2000) em relação ao uso do interpolador krigagem.

Quadro 6 – Interpolador Krigagem

Vantagens:	Desvantagens
Valores estimados baseiam-se no variograma, se for apropriado, fornece as seguintes informações: Parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade; Parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsóide), e se elipsóide, orientação do eixo principal; Parâmetro adequado da grade: tamanho das células, forma e orientação; Natureza da distribuição espacial da variável investigada: uniformidade da distribuição, importância espacial x causal; Previsibilidade da variação espacial da variável avaliada; Se o semivariograma for apropriado controla a krigagem, com as seguintes vantagens: Evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados; Permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade, o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); Permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; Precisão, contornos suaves, artefatos indesejáveis raros a não ser nas bordas do mapa; Interpolador exato: os valores estimados para os nós das células são exatamente iguais ao valor amostrado naquela posição; Estima além dos limites Máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados; Modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais;	O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto resultados são sempre obtidos; É necessário tempo para preparo do semivariograma e entendimento geoestatístico; Pode não ser possível a construção de semivariograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos. Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos; Necessidade de <i>Software</i> capacitado.
Quando usar:	Quando não usar:
Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais; Anomalia local não presente em toda a área, por exemplo, em ambiente fluvial; Quiser estimar com base em média global; Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados.	Menos de 30 pontos amostrados: número insuficiente de pares para modelar o semivariograma; Valores discrepantes de Z: removê-los antecipadamente; Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado); Amostras de populações diversas.

Fonte: Landim (2000).

2.5.3. Processo Vizinho mais Próximo

A interpolação por vizinho mais próximo é efetuada pela escolha de apenas uma amostra vizinha para cada ponto da grade, utilizando quando deseja manter os

valores de cotas sem gerar valores intermediários (CAMARGO, FUCKS E CÂMARA, 2004).

De acordo com Matos (2005), a equação (15) geral para este tipo de interpolação é:

$$Z_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} Z_{ij}}{\sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (15)$$

Onde, Z_i é o valor de um ponto i qualquer a ser calculado, Z_{ij} é a altitude (ou outro valor que estiver interpolando) da amostra j vizinha do ponto i da malha, W_{ij} é o peso ou fator de ponderação, ocorrendo alternativas desse esquema básico podem ser apresentadas como: adoção da cota do vizinho mais próximo, efetuar o cálculo da média simples ($W_{ij} = 1$), calcular a média ponderada com n vizinhos por quadrante (MATOS, 2005).

A interpolação por vizinho mais próximo é efetuada pela escolha de apenas um ponto da amostra mais próximo ao ponto que será interpolado, da maneira que $j = 1$ (MATOS, 2005).

O método objetiva a responder bem nos casos em que se dispõe de malhas regulares com pouca ausência de ponto de observação (ANDRIOTTI, 2003).

O Quadro 7 apresenta as vantagens e desvantagens de se utilizar o interpolador vizinho mais próximo.

Quadro 7 – Interpolador Vizinho mais Próximo

Vantagens:	Desvantagens
Interpolador Simples; Aproxima da superfície real do terreno; Rapidez computacional; Não gera valores intermediários;	Valores se repetem não acrescentando informações; Gera distorção em detalhes finos;
Quando usar:	Quando não usar:
Áreas de estudo bem amostradas;	Imagens de radar, pois pode conduzir a artefatos e estatística distorcida;

Fonte: Landim (2000).

2.6. Análise Exploratória dos dados e Avaliação do Processo de Interpolação

Na estatística clássica aplica-se medidas como média e desvio padrão como forma de representação de fenômenos e se baseia em hipóteses de que não há dependência espacial entre as amostras.

Por meio de cálculos da estatística descritiva, segundo Vieira et al. (2002), obtendo-se média, variância, coeficiente de variação (CV), para análise geral de como se comportavam os dados.

O CV que de acordo com Costa, Seraphin e Zimmermann (2002), se define como desvio padrão em porcentagem da média e é calculado pela razão entre o quadrado médio do resíduo e a média geral do experimento. Em relação às margens de análise do CV a variabilidade das variáveis é classificada como baixa quando o ($CV < 12\%$), média ($12\% < CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$) (WARRICK e NIELSEN, 1980).

Nesse aspecto faz-se uso de técnicas exploratórias de dados amostrais como a análise descritiva sem considerar a sua variabilidade e posição, onde essas análises são exploratórias com representação de pontos extremos ou *outliers* (RIBEIRO JUNIOR, 1995).

Para a avaliação da precisão dos diferentes interpoladores, aplicam-se métodos de avaliação da qualidade da interpolação. Para as interpolações realizadas no programa Surfer utiliza-se o módulo *grid/residual* que o *Software* Surfer oferece, que permite computar a diferença entre os valores de Z (cotas) dos dados originais e os valores de Z (cotas) dos dados interpolados. Com esses resultados é possível efetuar medidas estatísticas como média e desvio padrão que permitem a análise da qualidade dos *grids* gerados com os dados originais (SOUZA, KRUEGER e SLUTER, 2003).

Com a finalidade de avaliar a precisão da interpolação por krigagem efetua-se o processo de validação cruzada, a qual consiste na técnica de avaliação de erro, que permite comparar os valores estimados e amostrados (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989).

Nesse método retira-se um ponto de cada vez e o reestima usando os demais dados pelo processo de interpolação por krigagem, retorna-se o valor ao conjunto original e retira-se outro ponto, repetindo o processo, dessa maneira, pode-se calcular os resíduos, onde o melhor modelo é aquele com a média próxima ao zero e desvio padrão pequeno (FARACO et al., 2008).

Ainda, em relação a avaliação de qualidade da interpolação utiliza-se o cálculo do Coeficiente de Desvio Relativo (CDR), que de acordo com Coelho et al. (2009), expressa a diferença média em módulo dos valores interpolados com o valor real, em porcentagem, como visualizado na equação 16:

$$CDR_i = \left(\frac{P_i - P_{ipad}}{P_{ipad}} \right) * 100 \quad (16)$$

Onde:

CDR_i = Coeficiente de desvio relativo pontual, %;

P_{ipad} = Ponto i do mapa padrão;

P_i = Ponto interpolado;

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo mostrar o material e os métodos aplicados nessa dissertação para alcançar seus respectivos resultados.

Para se alcançar os objetivos dessa pesquisa foram usados o conjunto de material:

- ArcGIS 9.3: produzido pela *Environmental Systems Research Institute, Inc.* (ESRI). Usado quanto da organização dos dados de entrada em SIG e nos produtos finais.
- Curvas de Nível folha Ponta Grossa MI-2842-4, com equidistância de vinte metros cedidas pelo Paranaidade. Foram a base para a geração do MDT da área.
- Grade regular com coletas de amostras da granulometria areia, silte e argila, a cada 170 metros, cedidos pelo Laboratório de Física do Solo da UEPG. Esses dados da área de estudo foram empregados tanto nas primeiras análises e estudos da área, quanto foram a base para os processos de interpolação.
- Receptor *Global Positioning System* – (GPS) Leica SR-20 produzido pela Leica. Por meio desse equipamento foi possível efetuar o georreferenciamento dos pontos, fundamentais para AP.
- Surfer 9: produzido pela *Golden Software*. Utilizado para o processo de geração dos *grids*, interpolação e análise dos resultados, tanto das interpolações não-geoestatística quanto na geração dos variogramas e posteriormente interpolação geoestatística.
- Vesper 1.6: produzido pela *The University of Sydney*. Utilizado na geração dos variogramas e posteriormente interpolação geoestatística.

A área de estudo dessa pesquisa, denominada Fazenda Escola Capão-da-Onça (FESCON) é administrada pela Universidade Estadual de Ponta Grossa

(UEPG), no Município de Ponta Grossa, PR, latitude 25° 05' 35,7"S e longitude 50° 03' 19"W, com altitude em média de 1041 metros (FERREIRA et al. 2010). A FESCON divide-se em duas áreas: experimental, onde fica a sede administrativa, e outra de produção comercial com área de 2.181.166,29 m², o que equivale a 218,11 hectares, cuja localização pode ser observada na Figura 22.

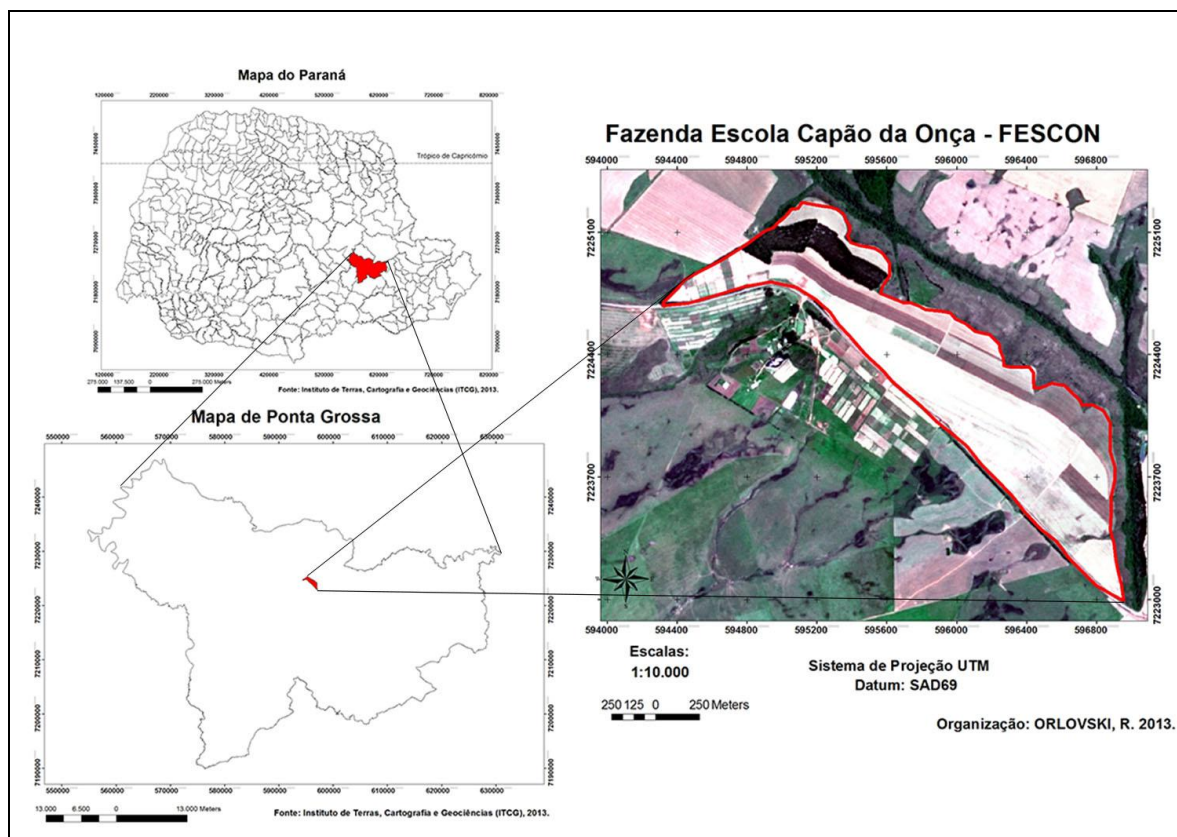


Figura 22 – Localização da área de estudo – FESCON.

As classes de solo encontrados na FESCON de acordo com o estudo realizado por Gomes (2010) e aperfeiçoado por Adacheski (2010), foram os Cambissolos, Organossolos, Latossolos, além de afloramento de rochas, apresentado na Figura 23. Cabe aqui destacar que, esses dois estudos citados são os únicos desenvolvidos, na escala pertinente, na área de estudos e por isso aplicados nessa dissertação.

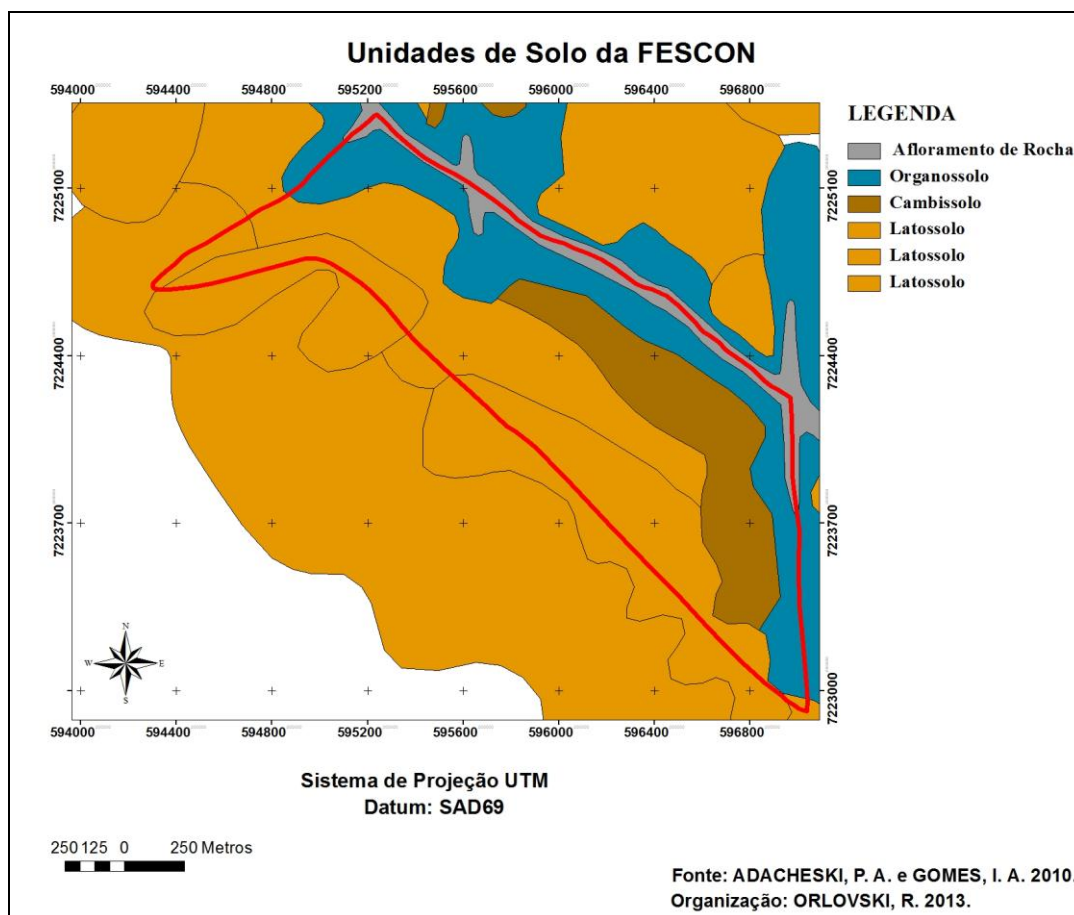


Figura 23 – Tipos de Solo da Área de Estudo – FESCON.

3.1. Organização em SIG e Amostragem em Campo

A metodologia da pesquisa teve início em laboratório na fase denominada, pré-campo, por meio de SIG. Tal processo foi necessário para caracterização e definição da área, para coleta das amostras de solo.

No processo de coleta de amostras para AP, primeiramente foi necessário delimitar as áreas de interesse. Nesse aspecto delimitou-se em função do relevo, mediante o ArcGIS, por meio das curvas de nível com equidistância de 20 metros. Efetuou-se a *Triangular Irregular Network* (TIN), representando superfície com conjunto de faces triangulares interligadas, com a localização de coordenadas $E(x)$ e coordenadas $N(y)$, do sistema UTM, com os valores de altitude (h). A partir da rede TIN, efetuou a modelagem do Modelo Digital do Terreno (MDT) e evidenciou a caracterização do relevo, como exibido na Figura 24. A área da FESCON se encontra em relevo de 920 a 1040 metros. Para a representação hipsométrica o MDT foi fatiado de 20 em 20 metros de acordo com a distância das Curvas de Nível.

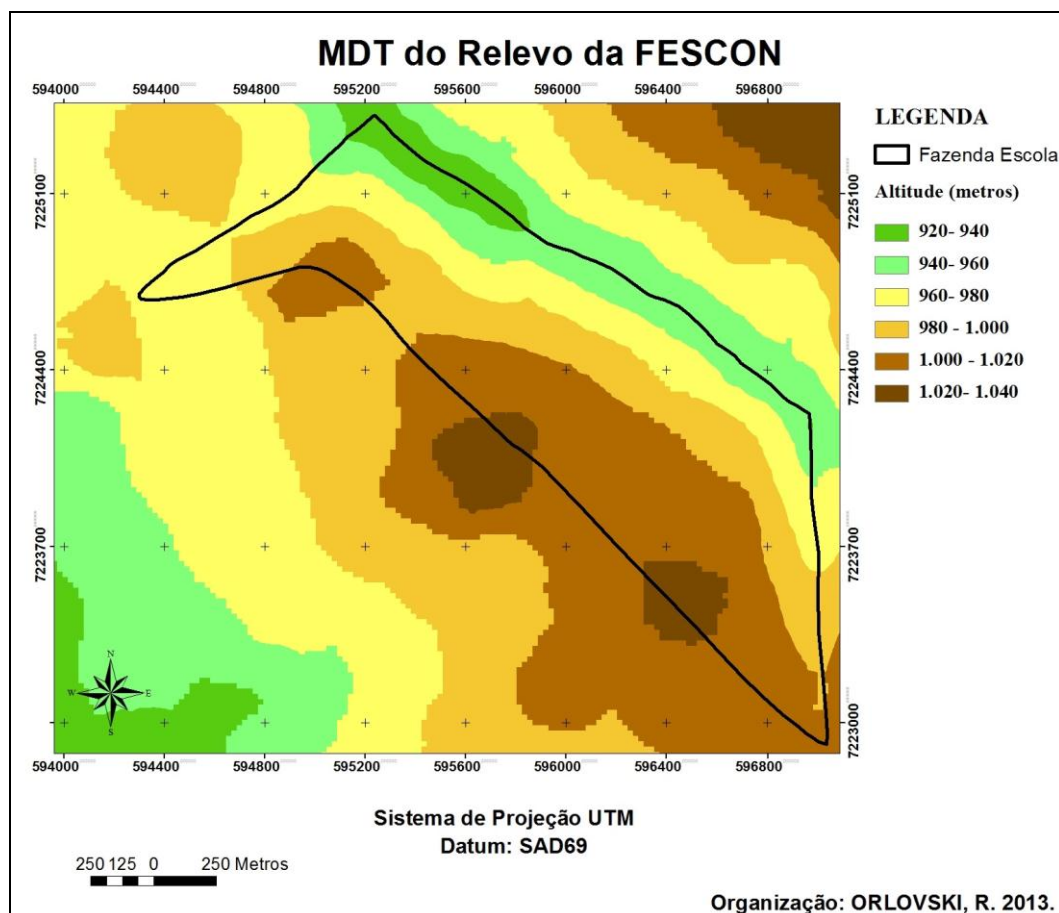


Figura 24 – MDT da representação do relevo da FESCON.

Sequentemente a caracterização do relevo, percebeu-se a necessidade da delimitação apenas da área onde é possível a mecanização agrícola, pois esse contorno delimitaria os processos de interpolação, adequando os mapas apenas na área de interesse, ou seja, apenas na área de produção agrícola. A Figura 25 apresenta a área onde é possível efetuar a mecanização agrícola.

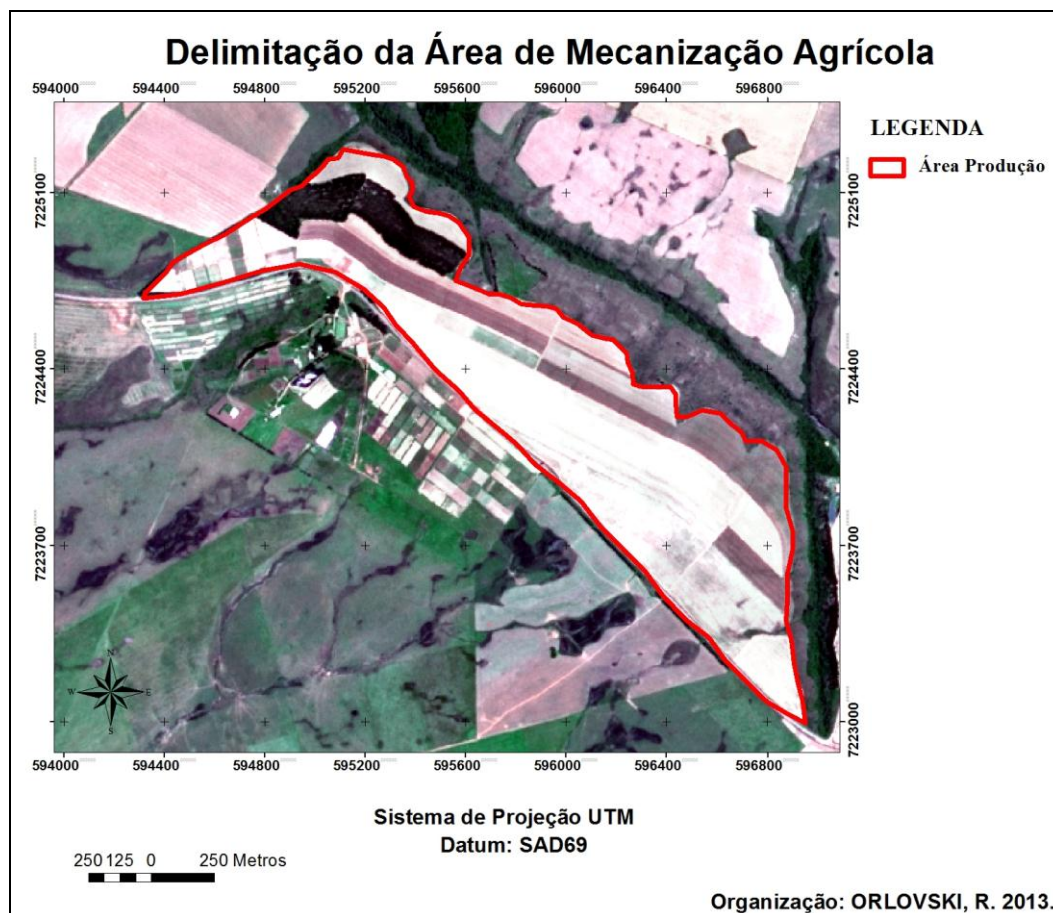


Figura 25 – Delimitação da área de mecanização agrícola.

Com o relevo caracterizado na Figura 24 e a área destinada a agricultura destacada na Figura 25, foram delimitadas as áreas de interesse e que melhor representariam o todo, em função do relevo. Para tal, foram traçadas duas transeções na direção Noroeste-Sudeste e outras duas no sentido Sudoeste-Nordeste, apresentadas na Figura 26. Vale ressaltar que devido a distância entre as transeções Noroeste-Sudeste, ou seja, 1,60 metros entre linhas e a escala utilizada no mapa não é possível visualizar as duas linhas, como ocorre na transeção Sudoeste-Nordeste que a distância entre as transeções é de 20 metros.

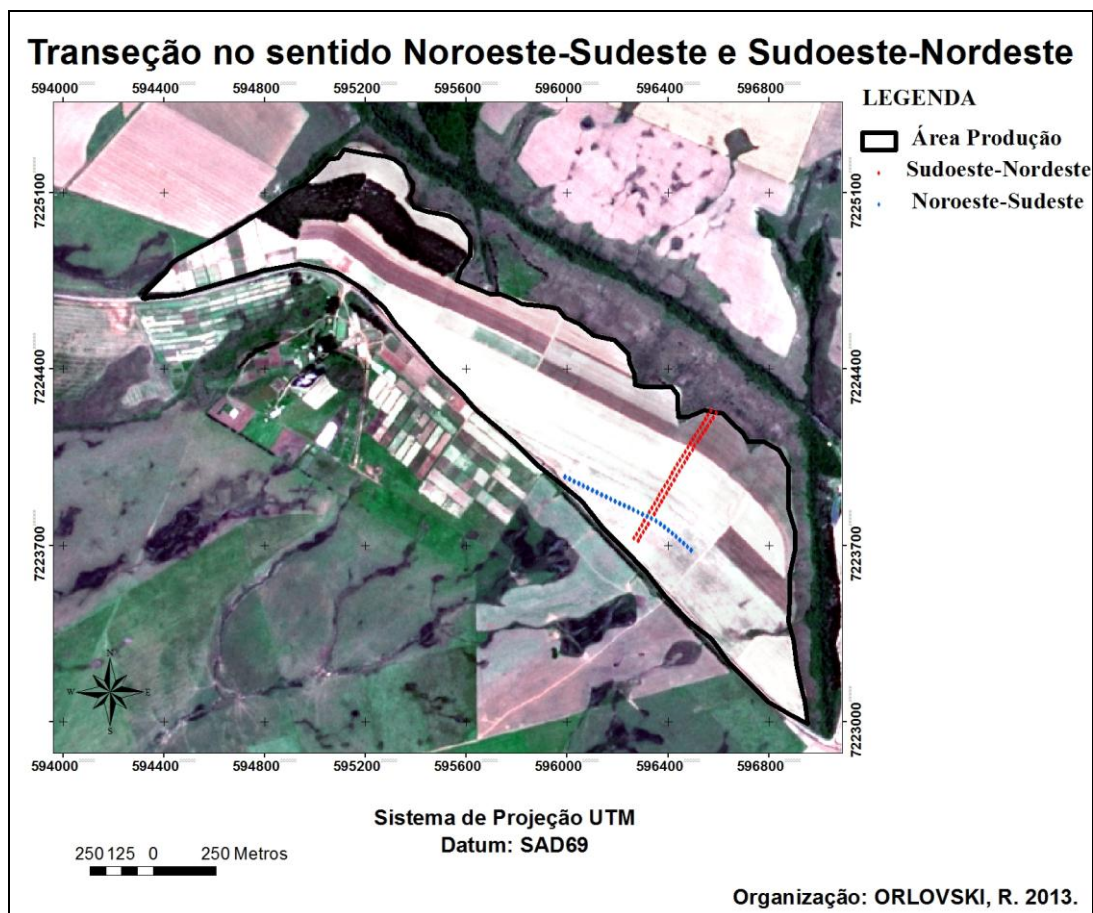


Figura 26 – Transeção no sentido Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste para coleta das amostras de solo.

Com a área de interesse, de coleta de amostras, delimitada em SIG, representada na Figura 26, iniciou a fase de campo, ou seja, o georreferenciamento dos pontos e a coleta das amostras de solo.

Primeiramente, efetuou-se o georreferenciamento e a coleta de 30 pontos a distância de 20 metros cada. Posteriormente, traçou-se a segunda linha paralela no sentido Noroeste-Sudeste à distância de 1,60 metros da primeira linha.

Procedeu-se a coleta de 4 pontos na segunda linha, com distância de 0,80 e 0,50 centímetros de cada ponto. A próxima coleta foi realizada a distância de 20 metros do primeiro ponto. Assim, foi efetuada a coleta das amostras de solo na segunda linha, resultando em 120 amostras na distância de 600 metros. Resultando em 150 pontos georreferenciados e coletados na transeção Noroeste-Sudeste. Da mesma maneira, foi efetuada a coleta da amostra de solo no sentido Sudoeste-Nordeste, resultando em mais 240 amostras, totalizando 390 amostras.

A Figura 27 apresenta a metodologia que foi utilizada em campo, demonstrando as transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste, com seus respectivos espaçamentos e as imagens de campo, na coleta das amostras.

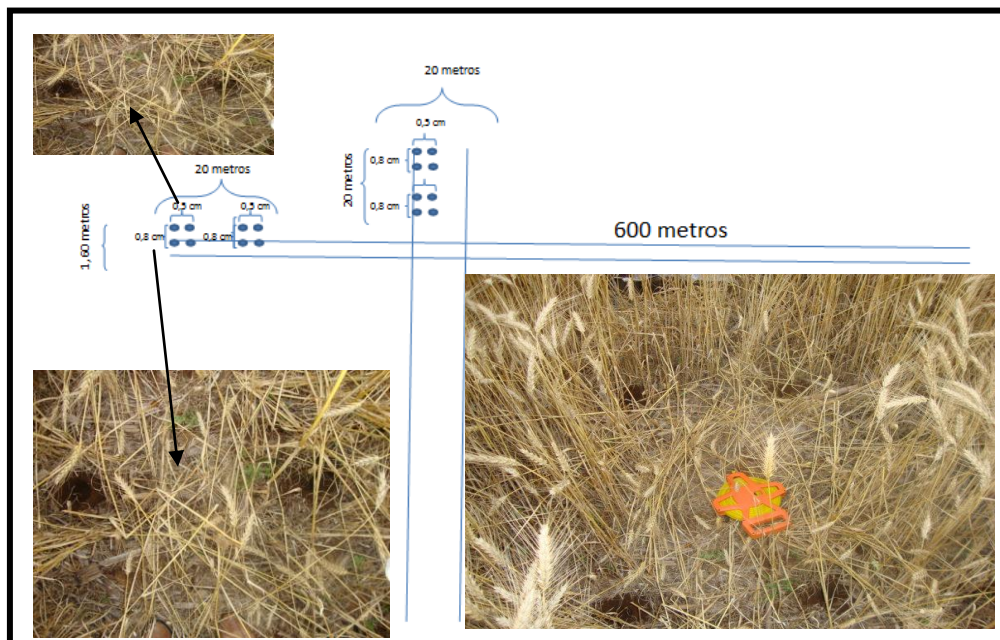


Figura 27 – Metodologia da coleta das amostras em campo, fotografias retiradas em 28 de Outubro de 2012.

Para a metodologia apresentada na Figura 27, a coleta das amostras de solo foi feita com trado holandês, a profundidade de 0 a 10 cm. Tal processo teve como objetivo a retirada das amostras de solo, para a caracterização das frações granulométricas, não levando em consideração outros fatores a ele relacionados, como resistência a penetração, agregados, etc. As amostras foram coletadas e colocadas em saco plástico, com sua identificação, como pode ser visualizado na Figura 28.



Figura 28 – Coleta das amostras de solo, fotografia retirada em 28 de Outubro de 2012.

Com as 390 amostras de solo coletadas, e antecedendo o processo de separação das frações granulométricas em laboratório, efetuou-se a etapa da retirada do excesso de umidade das mesmas, para que fosse possível uniformizar as partículas. Neste processo retiraram-se as amostras das suas embalagens e foram dispostas sobre jornal, durante uma semana aproximadamente ficaram ao ar livre, como visualiza-se na Figura 29.



Figura 29 – Secagem das amostras de solo ao ar livre, fotografia retirada em 10 de Novembro de 2012.

Com o processo de retirada do excesso da umidade das amostras apresentado na Figura 29 e com as amostras secas, uniformizou-se as partículas, peneirando as mesmas em peneira 0,2 mm, obtendo a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Após as mesmas voltaram para sua devida embalagem e foram encaminhadas para a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, onde a análise granulométrica, ou seja, a determinação dos teores de areia, silte e argila de cada amostra.

Concomitantemente com à coleta das amostras de solo, os pontos foram georreferenciamento, como mencionado nos parágrafos anteriores. Para isso foi utilizado receptor GPS topográfico, da marca Leica-SR 20. Em AP e outras técnicas conservacionistas é necessário que os levantamentos possuam coordenadas para que se possa após os levantamentos no campo, gerenciá-los em SIG, possibilitando gestão e planejamento da área ou glebas em estudo, gerando mapas dos mais diversos (relevo, granulometria, produtividade, etc).

No georreferenciamento foi necessário o nivelamento do tripé que dá suporte tanto para a antena quanto para o equipamento. Ainda, foi necessária a configuração da altura da antena no receptor GPS, e posteriormente na antena, utilizando os mesmos parâmetros. Após, interligou a antena ao equipamento por meio do cabo, configurou-se o tempo de georreferenciamento. No trabalho em questão foram utilizados o tempo de observação de 10 minutos. A Figura 30 apresenta o processo de georreferenciamento dos pontos.



Figura 30 – Procedimento de georreferenciamento dos pontos de coleta das amostras de solo, fotografia retirada em 03 de Novembro de 2012.

Com a finalidade de correção dos erros do sinal do receptor GPS no momento da coleta das amostras de solo efetuou-se o processo de pós-processamento dos valores de georreferenciamento advindos do campo, com o auxílio do *Software Geo Office Combined*, como é mostrado no Apêndice A.

Para o processamento dos pontos georreferenciados em campo usou-se a base de dados com coordenadas conhecidas. Foram utilizadas as bases da Rede de Monitoramento Contínuo (RBMC) fornecidas pelo IBGE, da estação da Universidade Federal do Paraná - Curitiba. Para tanto efetuou-se o *download* referente aos onze dias de trabalho a campo.

3.2. Processos de Seleção de Grupos e Análises Estatística Descritiva, Geoestatística e Interpolações

As análises iniciaram-se na grade regular com malha de 170 metros entre os pontos, com os valores da granulometria do solo, com os teores de areia, silte e argila. Para visualização da malha em grade regular foi gerado mapa de pontos na Figura 31.

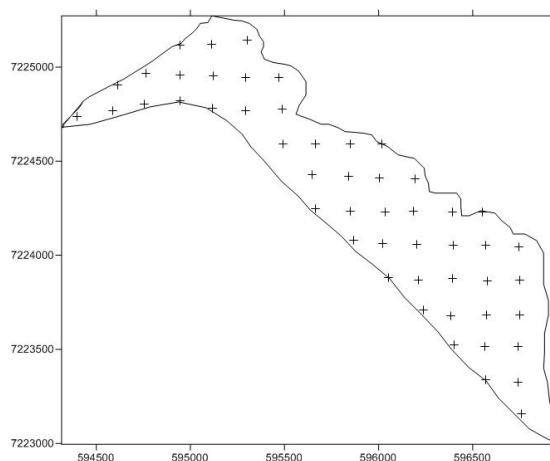


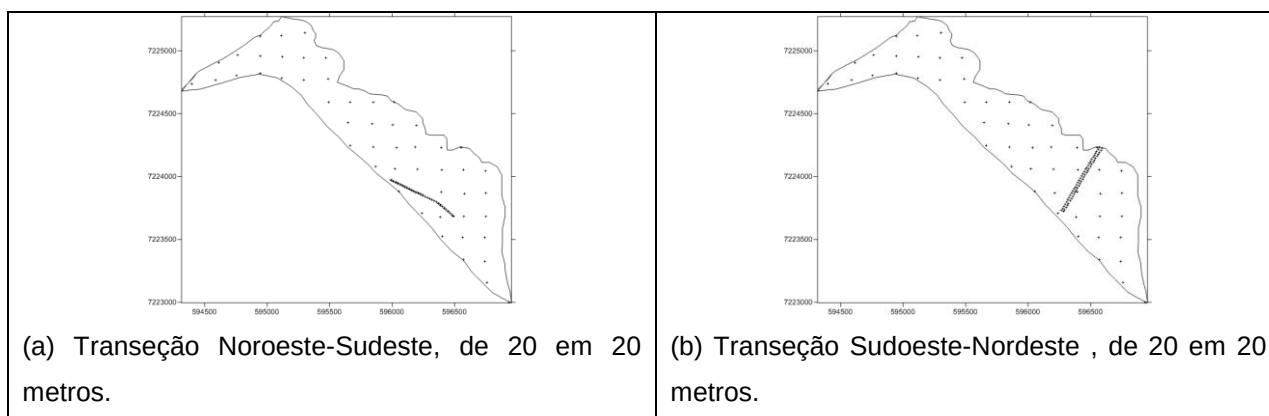
Figura 31 – Grade regular indicando os pontos coletados para a elaboração do mapa de textura da área FESCON.

Com a grade definida na Figura 31, foi efetuado o processo da divisão dos pontos das transeções em relação à distância dos pontos. Primeiramente, manteve-se a distância entre a coleta de 20 metros, ou seja, grupo de interesse com distância entre os pontos de 20 em 20 metros nas transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste. Posteriormente, foi deduzindo em cada ciclo 20 metros. Dessa maneira

foram obtidos grupos de distância entre os pontos, 20 metros, 40 metros, 60 metros, 80 metros e 100 metros. Ficando os grupos da seguinte maneira:

- Transeção Noroeste-Sudeste com distância de 20 a 20 metros com 112 pontos;
- Transeção Noroeste-Sudeste com distância de 40 a 40 metros com 72 pontos;
- Transeção Noroeste-Sudeste com distância de 60 a 60 metros com 67 pontos;
- Transeção Noroeste-Sudeste com distância de 80 a 80 metros com 64 pontos;
- Transeção Noroeste-Sudeste com distância de 100 a 100 metros com 62 pontos;
- Transeção Sudoeste-Nordeste com distância de 20 a 20 metros com 112 pontos;
- Transeção Sudoeste-Nordeste com distância de 40 a 40 metros com 72 pontos;
- Transeção Sudoeste-Nordeste com distância de 60 a 60 metros 67 pontos;
- Transeção Sudoeste-Nordeste com distância de 80 a 80 metros 64 pontos;
- Transeção Sudoeste-Nordeste com distância de 100 a 100 metros 62 pontos;

Para melhor representação das transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste, juntamente com as diferenças de distância entre cada grupo de pontos foi gerado os mapas de pontos da Figura 32 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i) e (j).



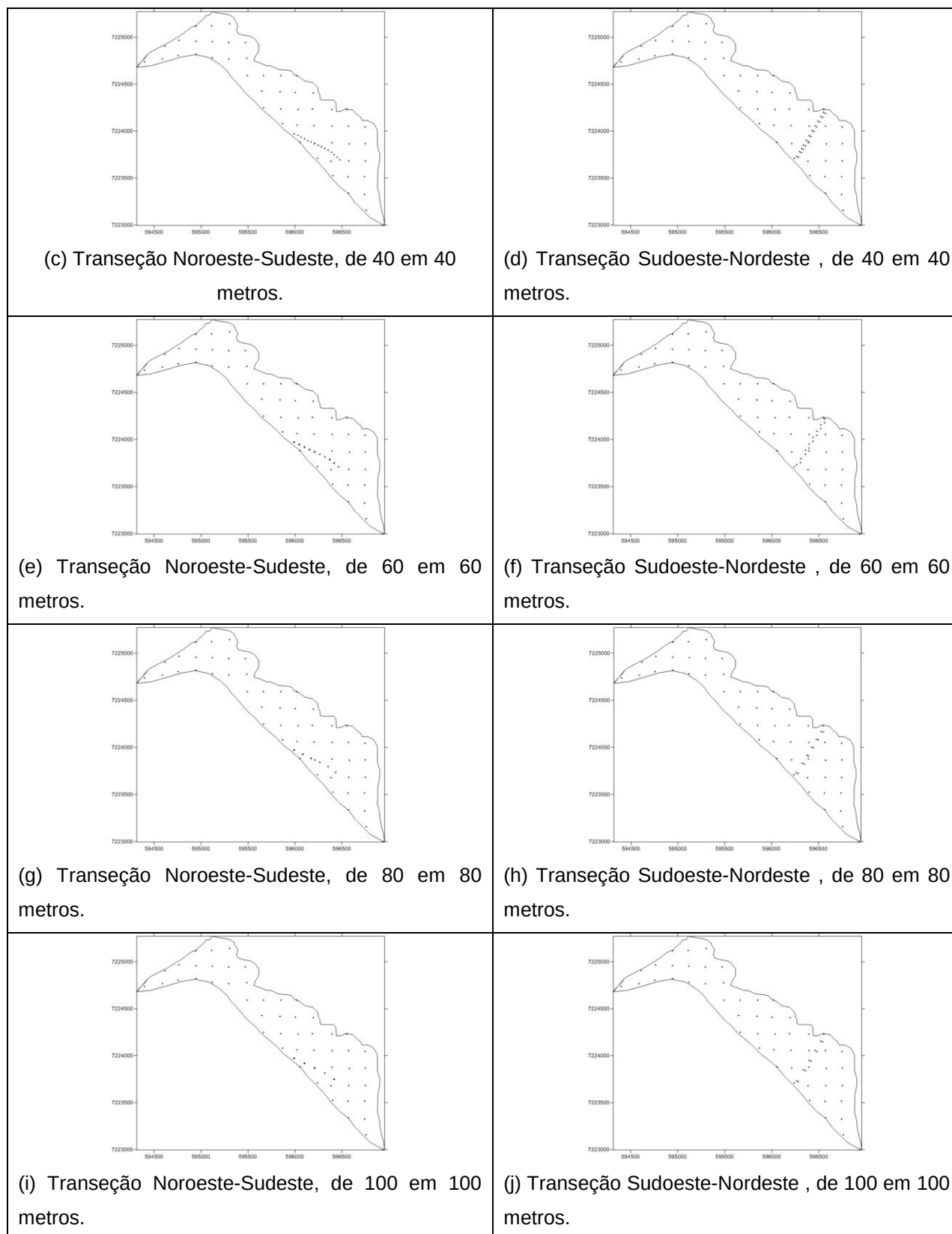


Figura 32 – Sentido das transeções e diferença de espaçamentos entre elas.

Com todos os pontos coletados a campo e as transeções definidas Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste obteve-se a seguinte grade que é

apresentada por meio do bloco diagrama (*wireframe*), como se pode visualizar na Figura 33, onde se sobrepôs o vetor da área de estudo, com as transeções.

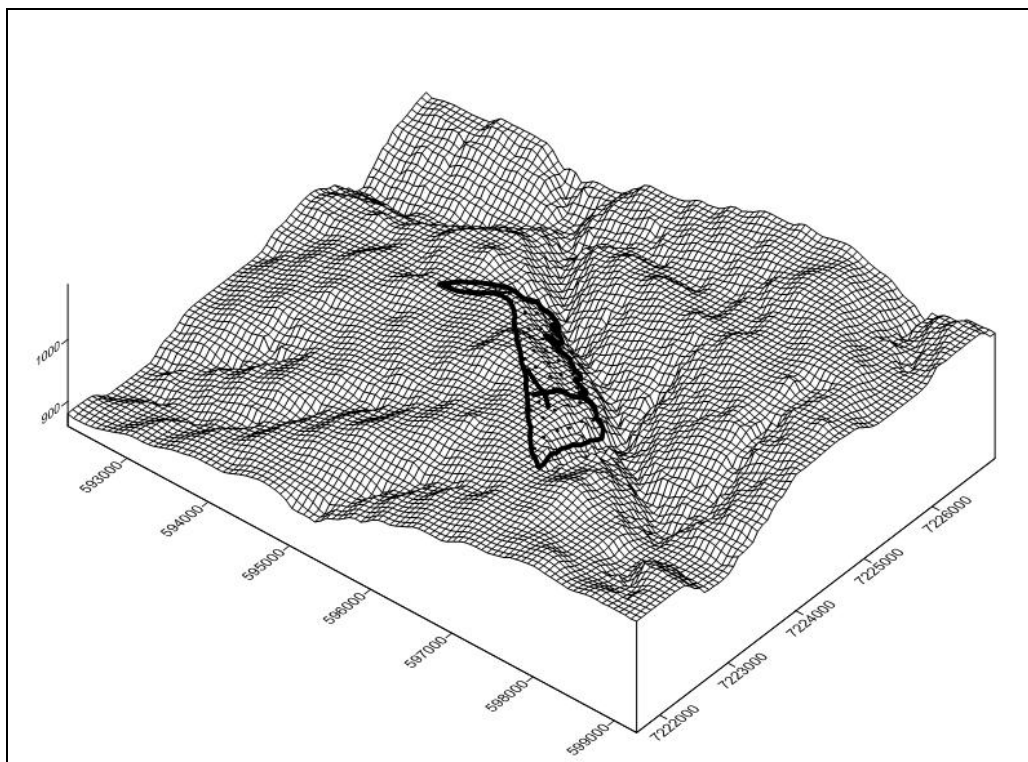


Figura 33 – Diagrama de Bloco dos pontos em grade regular e as transeções. Giro em relação ao Norte = 40° NE; e em relação ao horizonte = 40°.

Após a organização dos dados em relação às transeções e a distância entre os pontos com os teores da granulometrias de areia, silte e argila e com o auxílio do *Software* Minitab 15.0 foram calculados a média, mediana, o coeficiente de variação (CV) e o desvio padrão. Ainda foi verificada a normalidade dos dados com o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) com nível de significância de 5%, ou seja, esse tipo de teste de aderência específico para a distribuição normal. Esse procedimento de estatística descritiva tem por objetivo resumir e descrever os aspectos importantes de conjunto de características observadas. Onde efetuou-se a análise na média, desvio padrão e CV.

Para verificar a influência da dependência espacial entre as amostras gerou-se os variogramas no programa Vesper (BERNARDI et al., 2011), (WHELAN, MCBRATNEY e MINASNY, 2001). Foram adotados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, com a adoção do modelo isotrópico (ÁVILA, MELLO e SILVA, 2010).

O *Software Vesper* foi desenvolvido pelo *Australian Centre for Precision Agriculture* (ASPA), para predição espacial geoestatística executando krigagem por meio dos variogramas (WHELAN, MCBRATNEY E MINASNY, 2001). A adoção do *Software Vesper* foi realizada pelo fato de ser *shareware*, desenvolvido para predição espacial na Agricultura de Precisão. As grades de interpolação no *Vesper* foram utilizadas de 5 em 5 metros (SILVA NETO et al. 2011).

Da mesma maneira as grades utilizadas no programa *Surfer* para interpolação foram de 5 em 5 metros, compatível com a resolução espacial da ortomagem (SILVA NETO et al. 2012), com avaliação da qualidade da interpolação por meio do módulo *Grid/Residual*.

Na análise geoestatística, tanto no programa *Vesper* quanto no programa *Surfer*, foi utilizada a classificação do grau da dependência espacial (GDE) realizada com base na razão entre o efeito pepita e a contribuição $[C_0/(C_0 + C_1)]$, onde C_0 é o efeito pepita e C_1 a contribuição, e é considerado forte quando a razão for $\leq 25\%$, moderado quando $25 < GDE \leq 75\%$ e fraco quando $> 75\%$ (CAMBARDELLA et al., 1994).

Foram analisados para o *Vesper* os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) (WHELAN, MCBRATNEY E MINASNY, 2001) e critério de Akaike (AIC) que determinada que o modelo do variograma com o menor erro é o melhor (McBRATNEY e WEBSTER, 1986). Foi efetuado o processo de validação cruzada e Coeficiente de Desvio Relativo.

Nos testes, para a verificar qual interpolador que melhor modelaria a granulometria do solo, utilizou-se:

- IDW: Exato, local e determinístico;
- Vizinho mais próximo: Exato, local e determinístico;
- Krigagem: Exato, local e estocástico;

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo mostrar os resultados que foram alcançados.

4.1. Composição Granulométrica

Com os resultados advindos das análises laboratoriais, e a classificação proposta por Calderano Filho et al. (1996), foi efetuado o gráfico que é apresentado na Figura 34 que demonstra a classificação da argila em função dos seus teores.

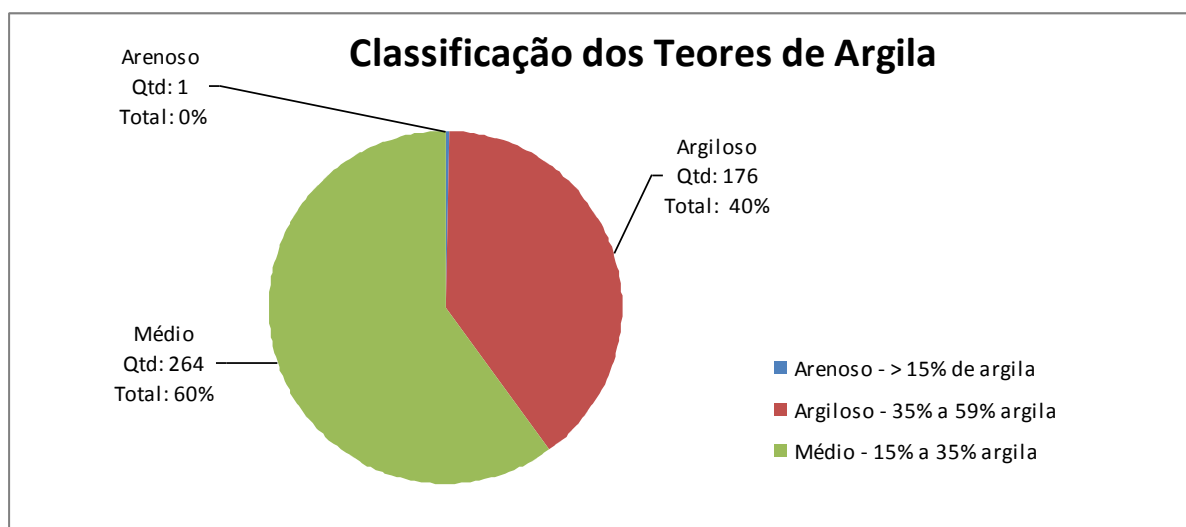


Figura 34 – Classificação dos teores de argila da área comercial da FESCON.

Fonte: O autor.

A partir dos valores apresentados na Figura 34, pode-se perceber que do total de amostras coletadas a campo pelas transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste e juntamente com os pontos em grade regular que juntas totalizaram 441 amostras de solo, concluindo que as classes textural da argila encontradas na FESCON, concentra-se entre médio com percentual de 60% e argiloso que resultou em 40%, somando 100% dos teores de argila.

4.2. Análise Descritiva dos Dados

Com os dados no formato de grade regular, da área comercial FESCON e as transeções Sudoeste-Nordeste e Noroeste-Sudeste e juntamente com o *Software* Minitab, efetuou-se a análise descritiva dos dados, com nível de confiança de 95%. A primeira análise foi realizada na grade regular da FESCON, com distância entre os pontos de 170 metros. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos teores granulométricos de areia, silte e argila, onde se avaliou a média, mediana,

coeficiente de variação, desvio padrão, os valores máximos e mínimos e o Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 1 – Análise descritiva da granulometria da área comercial da FESCON.

Fração	Transeção	Média g.Kg ⁻¹	Mediana g.Kg ⁻¹	*CV (%)	**DP g.Kg ⁻¹	Máximo g.Kg ⁻¹	Mínimo g.Kg ⁻¹	***KS (%)
Argila	Grade regular	261,30	228,00	39,44	103,00	228,00	100,30	0,16
Silte	Grade regular	60,64	48,50	71,49	43,35	217,30	48,50	0,18
Areia	Grade regular	378,10	702,40	19,57	132,70	702,40	340,40	0,15

*CV= Coeficiente de variação; **DP= Desvio Padrão, ***KS= Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

Fonte: O autor.

A partir dos dados apresentados na Tabela 1 e analisando-se a granulometria argila, a média foi de 261,30 g.Kg⁻¹, apresentando CV classificado como médio, com o DP de 103,00 g.Kg⁻¹, comparando com o trabalho de Souza e Souza (2011), que obteve com 58 pontos média de 297 g.Kg⁻¹, com DP de 31,49 g.Kg⁻¹. Nesse aspecto, comprova-se que o DP em grade regular foi inferior ao resultado de Souza e Souza (2011). O teste de normalidade apresentou a distribuição normal, ao nível de 5% de significância. Da mesma maneira na fração silte obteve-se a média de 60,64 g.Kg⁻¹, com CV de 71,49%, com distribuição normal dos dados. Para a granulometria areia obteve-se a média de 378,10 g.Kg⁻¹, com o CV de 19,57% e da mesma maneira que as outras granulometrias apresentam distribuição normal dos dados.

Para os dados referentes à transeção Noroeste-Sudeste, com os pontos a distância de 20 metros, a partir da análise descritiva dos dados, a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pela análise descritiva nos teores granulométricos de areia, silte e argila, onde se avaliou a média, mediana, coeficiente de variação, desvio padrão, os valores máximos e mínimos e o Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 2 – Análise descritiva da granulometria para a transeção Sudoeste-Nordeste.

Fração	Transeção	Média g.Kg ⁻¹	Mediana g.Kg ⁻¹	*CV (%)	**DP g.Kg ⁻¹	Máximo g.Kg ⁻¹	Mínimo g.Kg ⁻¹	***KS (%)
Argila	Noroeste-Sudeste	344,50	333,48	22,13	76,23	480,00	200,00	0,109
Silte	Noroeste-Sudeste	67,92	70,38	28,71	19,50	102,00	12,00	0,122
Areia	Noroeste-Sudeste	587,63	611,50	16,45	79,02	724,00	454,00	0,104

CV= Coeficiente de variação; **DP= Desvio Padrão, ***KS= Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

Fonte: O autor.

Analisando o conjunto de 150 pontos que pertencem a transeção Noroeste-Sudeste, o resultado da Tabela 2 mostra que, para a granulometria argila obteve-se média de 344,50 g.Kg⁻¹, seu CV apresentou classificação média, com DP de 76,23 g.Kg⁻¹, comparando com o trabalho de Souza e Souza (2011), com o grupo de 105 pontos, onde obteve média de 296 g.Kg⁻¹, com DP de 30,30 g.Kg⁻¹. Novamente comparando ambos os resultados o DP alcançado por Souza e Souza (2011), foi superior ao alcançado na transeção Noroeste-Sudeste. O silte apresentou média de 67,92 g.Kg⁻¹ e seu CV foi o superior em comparação com argila e areia, com 28,71%. A areia apresentou a maior média com 587,33 g.Kg⁻¹ e com CV de 16,45%. As três granulometrias apresentaram distribuição normal.

Com relação à análise efetuada na transeção Sudoeste-Nordeste, com os 240 pontos a cada 20 metros obteve-se os resultados apresentados na tabela 3 pela análise descritiva nos teores granulométricos de areia, silte e argila, onde se avaliou a média, mediana, coeficiente de variação, desvio padrão, os valores máximos e mínimos e o Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 3 – Análise descritiva da granulometria para a transeção Sudoeste-Nordeste

Fração	Transeção	Média g.Kg ⁻¹	Mediana g.Kg ⁻¹	*CV (%)	**DP g.Kg ⁻¹	Máximo g.Kg ⁻¹	Mínimo g.Kg ⁻¹	***KS (%)
Argila	Sudoeste-Nordeste	301,06	278,50	27,39	82,45	474,00	175,00	0,18
Silte	Sudoeste-Nordeste	69,28	70,00	24,07	16,68	100,00	28,00	0,08
Areia	Sudoeste-Nordeste	629,63	647,50	14,25	89,70	777,00	455,00	0,13

* CV= Coeficiente de variação; **DP= Desvio Padrão, ***KS= Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

Fonte: O autor.

Analisando os dados da tabela 3, a média da argila foi menor comparando-se com a média da Tabela 2. Seu valor foi de 301,06 g.Kg⁻¹ com DP de 82,45 g.Kg⁻¹, com CV de 27,39%, classificada como média. Analisando o grupo de 208 pontos no trabalho de Souza e Souza (2011), onde apresentou média de 294 g.Kg⁻¹ com DP de 29,05 g.Kg⁻¹. Nesse aspecto o DP foi superior ao apresentado na Tabela 3. A granulometria silte apresentou média de 69,28 g.Kg⁻¹ com 24,07 de CV. Os resultados obtidos da granulometria areia foram média de 629,63 g.Kg⁻¹ com CV de 14,25%. Os dados apresentaram distribuição normal.

De acordo com Warrick e Nielsen (1980), os CVs das transeções obtiveram média variabilidade. Comparando com a grade regular teve diferença significativa, pois a granulometria silte apresentou alta variabilidade.

4.3. Análise dos Dados e Interpolação não-Geoestatística

Com a finalidade de efetuar a análise quantitativa dos resultados obtidos, escolhendo o interpolador não-geoestatístico que obteve resultado mais satisfatório em relação média e desvio padrão. Ou seja, o interpolador retrata com menor taxa de erro associada a modelagem da granulometria argila. Para tal, utilizou-se o módulo do Surfer 9 *grid/residual* que permite computar a diferença entre os valores reais dos dados de entrada com a grade de saída dos valores interpolados.

Com esses resultados, realizaram-se as medidas estatísticas, na qual se obtém a qualidade da interpolação. Ou seja, aquele que interpola adequadamente. Com esses resultados calculou-se a média e o desvio padrão, baseando-se na medida de dispersão que é representada pelo desvio padrão.

A primeira análise foi efetuada com os pontos em grade regular, em todas as combinações de espaçamento das transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste, mediante interpolador IDW e vizinho mais próximo, como apresentado em material e métodos.

Com os dados interpolados e com os resultados gerados pelo *grid/residual* obteve-se os valores que são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da interpolação em grade regular.

Interpolador	Média do erro g.kg ⁻¹	Desvio Padrão g.kg ⁻¹
IDW	0	0,17
Vizinho	0	0

Fonte: O autor.

A partir dos resultados, a interpolação com menor erro atribuído foi o vizinho mais próximo, com a finalidade de comparação visual foi gerado tanto o mapa de contorno como o mapa de imagem de ambos os interpoladores da fração argila. Primeiramente, a Figura 35 (a) e (b) apresenta o mapa de contorno e o mapa de imagem da granulometria argila, interpolado pelo vizinho mais próximo.

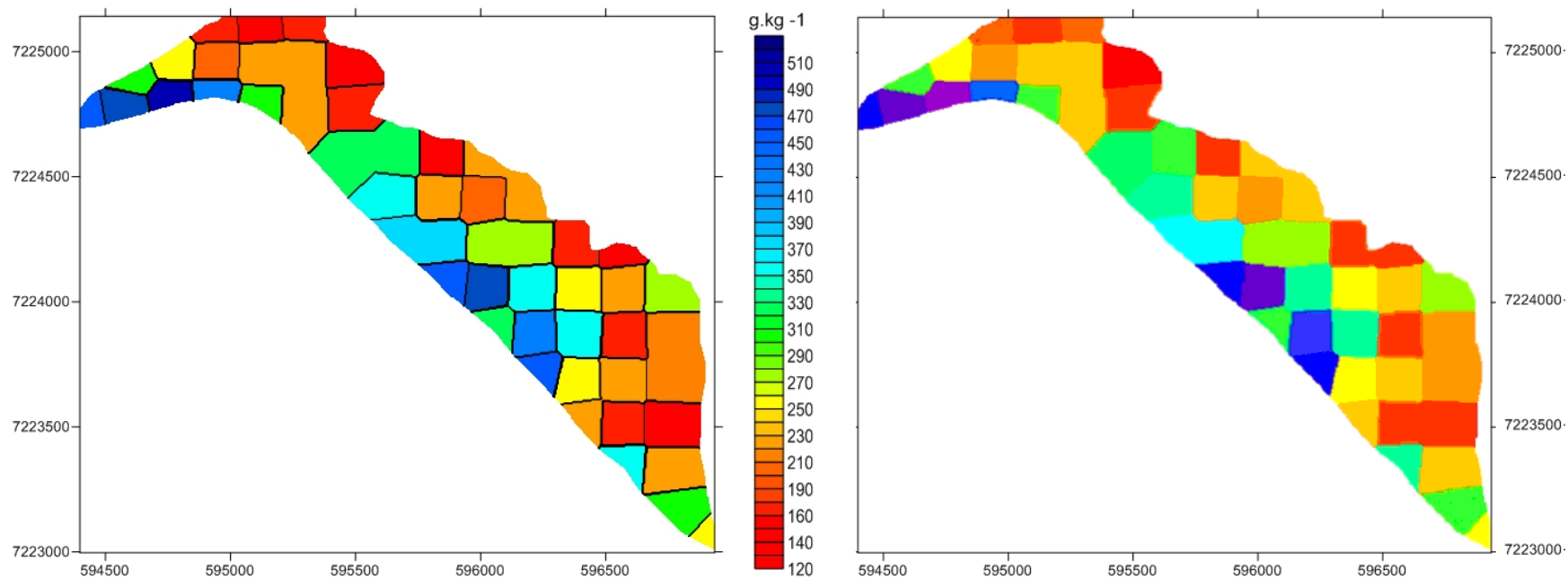


Figura 35 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador vizinho mais próximo em grade regular da FESCON, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.

Da mesma maneira efetuou-se a geração do mapa de contorno e o mapa de imagem da granulometria argila pelo interpolador IDW, que é ilustrado na Figura 36 (a) e (b).

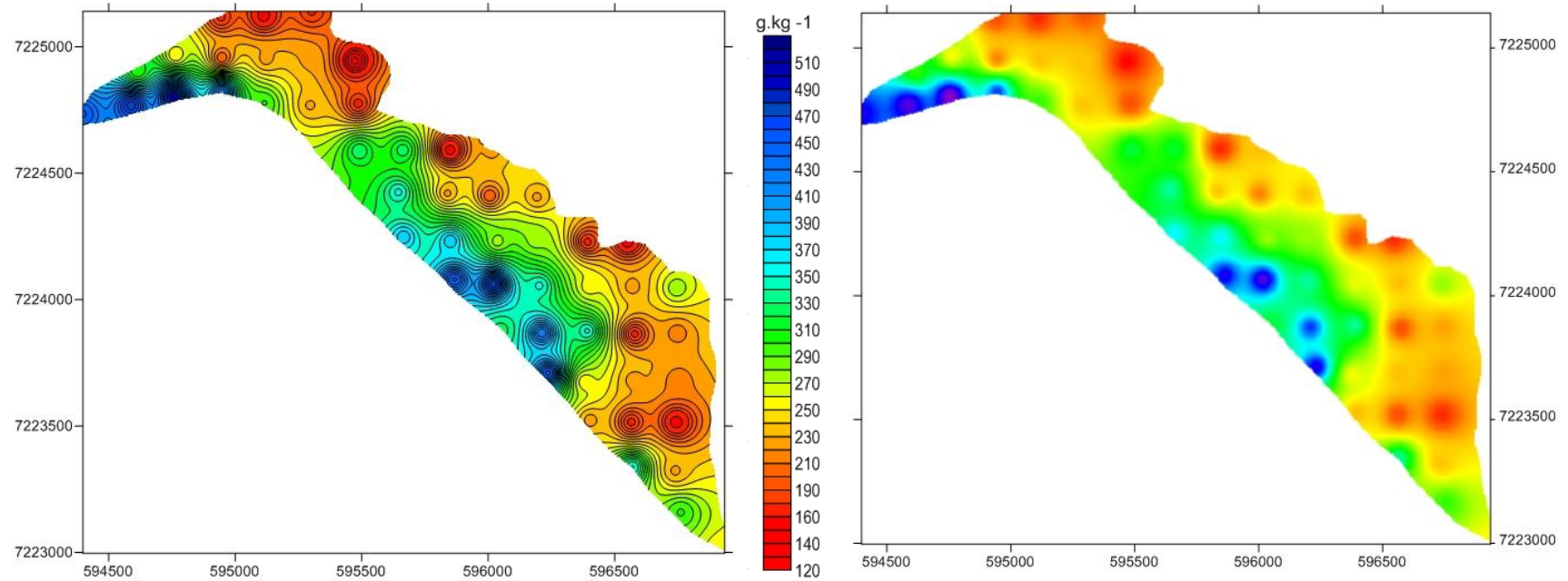


Figura 36 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador IDW em grade regular da FESCON, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.

Pela análise visual o interpolador vizinho mais próximo ilustrado na Figura 35 representa o teor de argila de maneira não suavizada, não condizente com a realidade de campo. Dessa maneira adota-se o interpolador IDW. Na Figura 36, a fração argila varia entre 180 a 380 g.Kg⁻¹, representados nas cores vermelha e azul claro, predominando em quase toda a extensão da área, contendo apenas alguns pontos superiores a 390 g.Kg⁻¹.

A partir dos pontos em grade regular foram analisadas as interpolações realizadas pelos pontos nas transeções no sentido Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste, com diferença de distância entre os pontos de 20 metros, com os interpoladores citados. Os resultados do *grid/residual* dos cálculos de média e desvio padrão são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise quantitativa das grades de interpolação.

Transeção	Distância pontos controle	Interpolado	Média (g.kg ⁻¹)	Desvio Padrão (g.kg ⁻¹)
Noroeste-Sudeste	20 metros	IDW	-1,59	18,32
Sudoeste-Nordeste	20 metros	IDW	0	1,67
Noroeste-Sudeste	40 metros	IDW	0	8,89
Sudoeste-Nordeste	40 metros	IDW	0	0,72
Noroeste-Sudeste	60 metros	IDW	0,19	4,44
Sudoeste-Nordeste	60 metros	IDW	0	0,52
Noroeste-Sudeste	80 metros	IDW	0	1,53
Sudoeste-Nordeste	80 metros	IDW	<u>0</u>	<u>0,514</u>
Noroeste-Sudeste	100 metros	IDW	0,12	6,30
Sudoeste-Nordeste	100 metros	IDW	<u>0</u>	<u>0,515</u>

Fonte: O autor.

Com base na Tabela 5, que apresenta os valores de média e desvio padrão da fração argila, o melhor resultado encontrado pelo interpolador IDW foi à distância entre os pontos da transeção de 80 metros, no sentido Sudoeste-Nordeste. A partir do resultado apresentado foi gerado a Figura 37 (a) e (b) que apresenta o mapa de contorno e o mapa de imagem para a transeção Sudoeste-Nordeste pelo interpolador IDW.

—

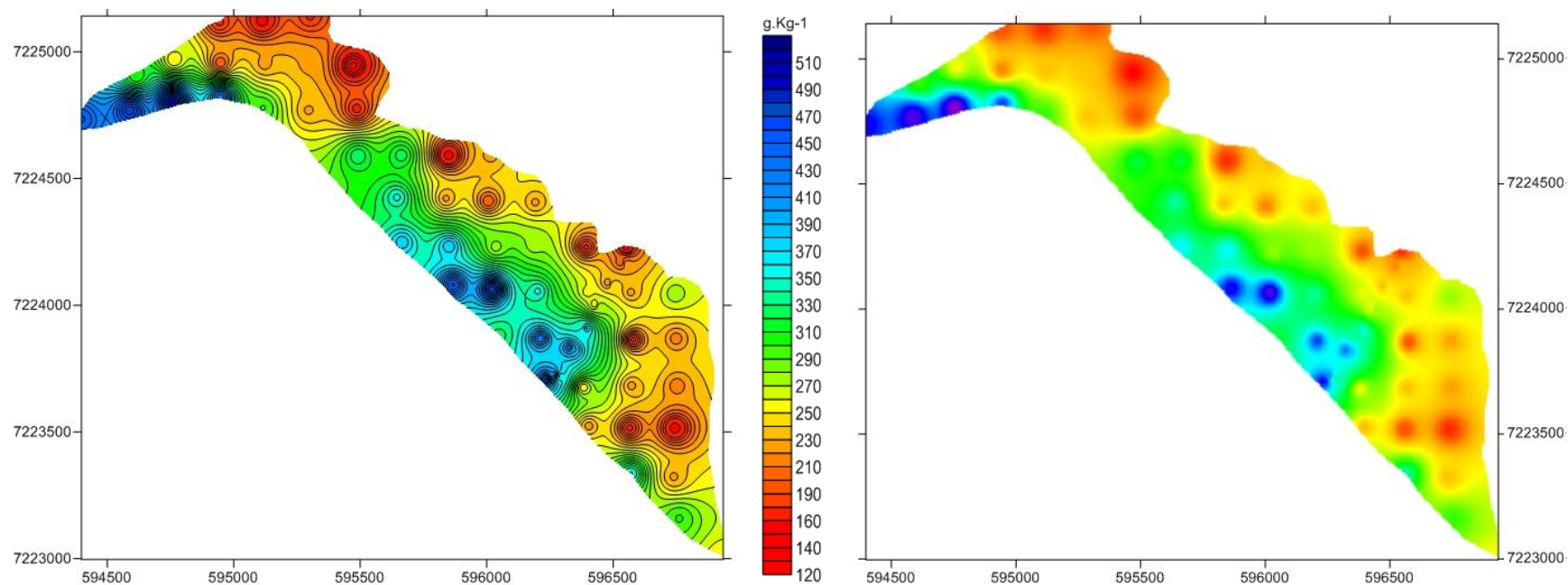


Figura 37 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador pela transeção Sudoeste-Nordeste com distância entre os pontos de 80 metros, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.

Da mesma maneira foi efetuado o processo de geração do mapa de contorno e mapa de imagem para o segundo melhor resultado, ou seja para os pontos a cada 100 metros da transeção no sentido Sudoeste-Nordeste, assim apresenta-se na Figura 38 (a) e (b) o mapa de contorno e mapa de imagem.

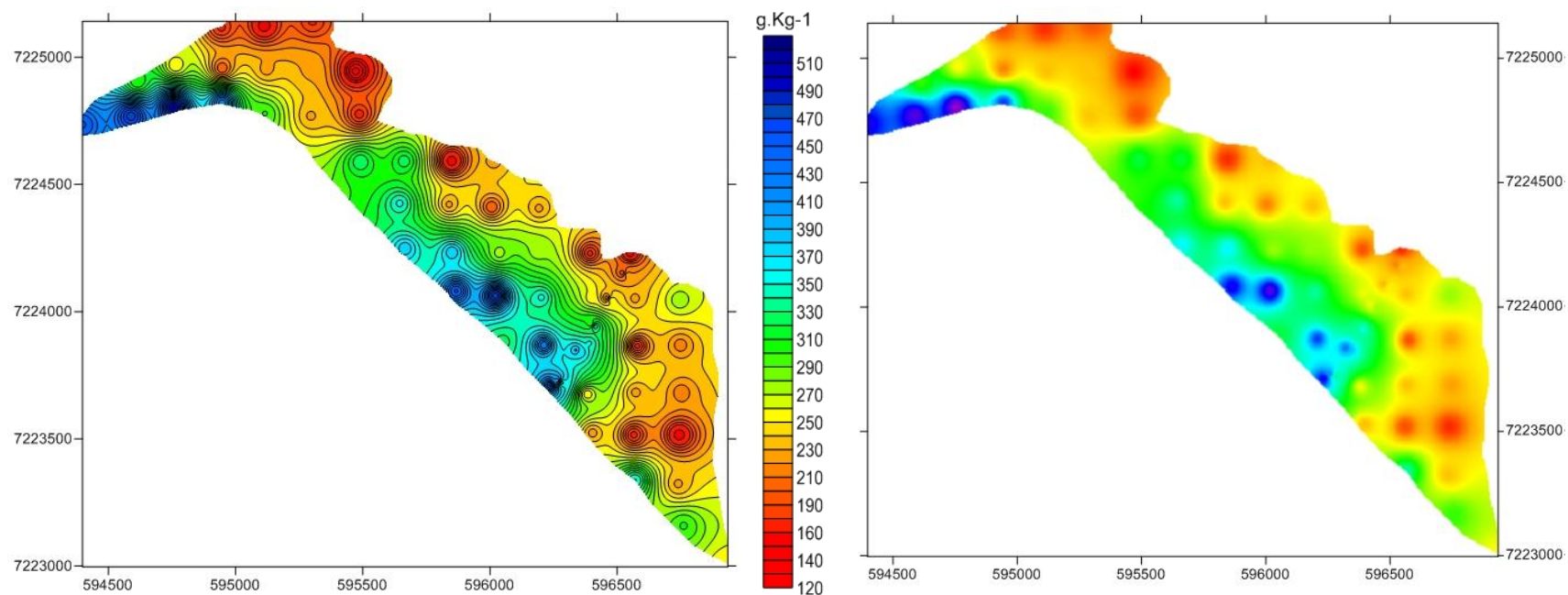


Figura 38 – Mapa da fração granulometria argila com interpolador pela transeção Sudoeste-Nordeste com distância entre os pontos de 100 metros, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.

4.4. Análise Geoestatística em Grade Regular

As análises dos interpoladores não-geoestatísticos não levam em consideração a variabilidade espacial. Em seus estudos Campos et al. (2007), descreve que as propriedades físicas do solo apresentam correlação ou dependência espacial.

Com o intuito da verificação do modelo que obtivesse melhor ajuste foi efetuado o processo de análise geoestatística para o conjunto de pontos em grade regular, onde aplicou-se os modelos esférico, exponencial e gaussiano. Nesse aspecto, obtiveram-se os resultados da Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da análise dos dados em grade regular da área comercial FESCON.

Distância entre os pontos	Modelo	Efeito Pepita (C^0)	Contribuição (C^1)	Alcance (a) m	Patamar (C^0+C^1)	GDE (%)* $[C^0/(C^0+C^1)]\%$
170 metros	Esférico	0	10437	542	10437	0
170 metros	Exponencial	0	10562	227,9	10562	0
170 metros	Gaussiano	231	10137	242	10368	2,22

* GDE = grau de dependência espacial.

Fonte: O autor.

Com os resultados, nos modelos esférico e exponencial obteve-se o efeito pepita puro. Em todos os modelos o C_0 deveria ser 0, pois duas amostras retiradas no ponto ($h=0$) deveriam ter o mesmo valor. Quando ocorrem valores ($h \neq 0$), existe erro em amostragem (ANDRIOTTI, 2002). Outro fator analisado foi em relação ao alcance (a), pois indica que amostras localizadas a distâncias menores que o alcance é dependente espacialmente umas das outras. O alcance reflete o grau de homogeneização entre as amostras, ou seja, quanto maior for o alcance maior será a homogeneidade que existe entre elas (TRANGMAR et al., 1985). Ainda, analisou-se o grau de dependência espacial que de acordo com a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), nos três modelos obteve dependência forte, com valores inferiores a 25%. Perante as 3 análises, o modelo que mais se destacou foi o esférico, que confirmando a citação de Vieira (1997) o modelo esférico predomina nos estudos dos atributos do solo.

4.4.1. Análise Geoestatística Vesper

Com os grupos de dados definidos juntamente com o interpolador Vesper iniciou-se o processo de geração e análise dos variogramas pelo modelo esférico, onde se obteve os seguintes resultados na tabela 7.

Tabela 7 – Resultado dos variogramas para as transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste com variação de distância entre os pontos.

Transeção	Distância entre os pontos	Modelo	Efeito Pepita (C^0)	Contribuição (C^1)	Alcance (a) m	Patamar (C^0+C^1)	RMSE*	AIC**	GDE (%)*** [$C^0/(C^0+C^1)$]%
Noroeste-Sudeste	20 metros	Esférico	2382,3	8594,4	616,9	10976,7	2050,6	585,3	21,70
Sudoeste-Nordeste	20 metros	Esférico	0	10739	472	10739	3071,2	610,3	0,00
Noroeste-Sudeste	40 metros	Esférico	1661	9880,3	542,3	11541,3	1945,2	582	14,39
Sudoeste-Nordeste	40 metros	Esférico	0	10854	546,7	10854	2451,8	596,3	0,00
Noroeste-Sudeste	60 metros	Esférico	607,3	10372	557,4	10979,3	2002,8	583,8	5,53
Sudoeste-Nordeste	60 metros	Esférico	0	10488	531,6	10488	2321	592,9	0,00
Noroeste-Sudeste	80 metros	Esférico	2002,7	9657	583,4	11659,7	2002,2	583,8	17,18
Sudoeste-Nordeste	80 metros	Esférico	0	10603	540,5	10603	2222,2	590,2	0,00
Noroeste-Sudeste	100 metros	Esférico	0	11543	548,8	11543	1948	582,1	0,00
Sudoeste-Nordeste	100 metros	Esférico	0	10488	555,8	10488	2224,5	590,3	0,00

*RMSE = raiz quadrada do erro médio; **AIC (informação de Akaike) = ajuste em relação ao menor erro; *** GDE = grau de dependência espacial.

Fonte: O autor.

Com os parâmetros iniciais de avaliação, efeito pepita (C_0), alcance (a) e grau de dependência espacial (GDE), primeiramente a comparação foi efetuada entre as transeção em função da distância entre as amostras.

Com os grupos selecionados para análise e como primeiro parâmetro a ser analisado o efeito pepita, os valores das transeções Sudoeste-Nordeste, em todas as diferenças entre os espaçamentos, foram os que alcançaram efeito pepita puro, não ocorrendo erro relacionado as amostras. Após, analisou-se os valores com relação ao alcance, onde os espaçamento que apresentaram maior alcance foram de 40 metros com alcance de 546,7 metros, 80 metros com alcance de 540,5 metros e o espaçamento de coleta de amostras de solo a 100 metros com o maior alcance de 555,8 metros.

Posteriormente, foram analisados os valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e critério de Akaike (AIC) que determinada que o modelo do variograma com o menor erro é o melhor. Nota-se que a coleta entre as amostras de 80 metros e 100 metros foram com menor erro atribuído, e ambas com grau de dependência forte.

Com os melhores resultados apresentados, foi aplicada a validação cruzada, ou seja, foi efetuado o processo de retirada de um ponto, interpolado e comparado com o valor real, com esses resultados foi calculado o CDR.

Para o processo de validação cruzada para a transeção Sudoeste-Nordeste 80 por 80 metros, o resultado obtido pelo CDR foi de 2,49%. A Figura 39 apresenta o mapa do teor argila, interpolado por meio de krigagem, gerado pela transeção Sudoeste-Nordeste, com diferença de distância entre os pontos de 80 metros.

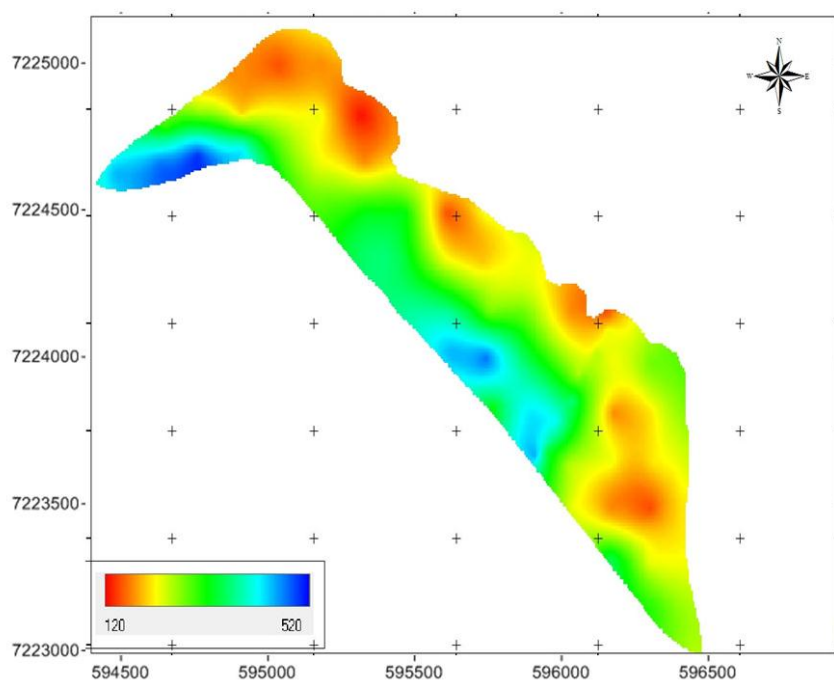


Figura 39 – Mapa dos teores de argila com pontos na transeção Sudoeste-Nordeste, com espaçamento de 80 a 80 metros.

Pelo mapa apresentado na Figura 39, são apresentados os teores de argila, variando entre 120 g.Kg⁻¹ a 520 g.K⁻¹.

Na comparação para a transeção Sudoeste-Nordeste 100 por 100 metros, o CDR obtido foi de 3,19%. A Figura 40 apresenta o mapa do teor argila, interpolado por meio de krigagem gerado pela transeção Sudoeste-Nordeste, com diferença de distância entre os pontos de 100 metros.

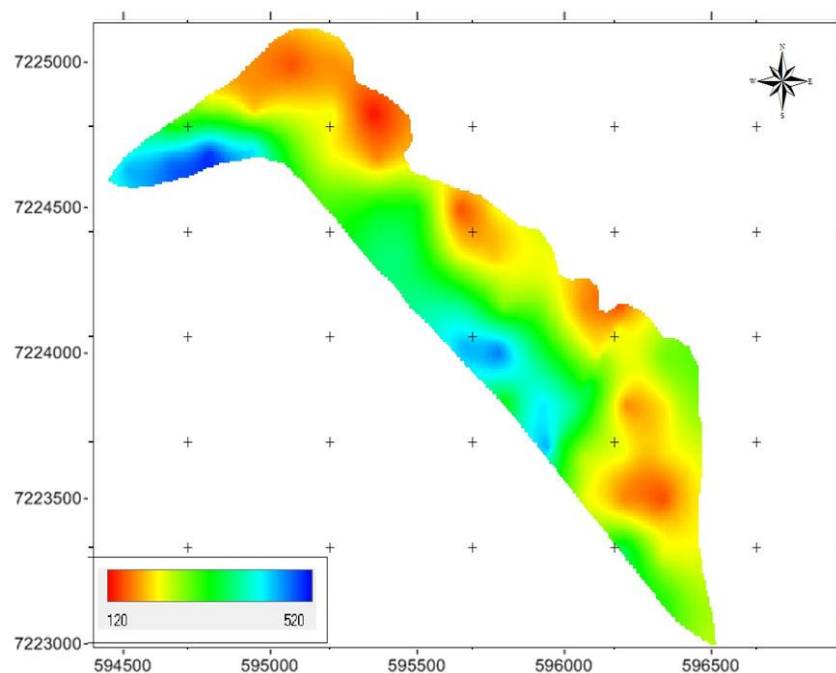


Figura 40 – Mapa dos teores de argila com pontos da área de interesse da transeção Sudoeste-Nordeste, com espaçamento de 100 a 100 metros.

De todo o conjunto de análise, o resultado satisfatório com o menor CDR e representando de melhor maneira a variabilidade em campo, foi obtido com o espaçamento entre os pontos de 80 em 80 metros pela transeção Sudoeste-Nordeste .

4.4.2. Análise Geoestatística utilizando o Software Surfer

A análise geoestatística por meio do *Software Surfer*, iniciou-se pela geração dos variogramas aplicando o modelo esférico. Dessa análise obtiveram os resultados, apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado dos variogramas para as transeções Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste com variação de distância entre os pontos por meio do interpolador Surfer.

Transeção	Distância pontos	Modelo	Efeito Pepita (C0)	Contribuição (C1)	Alcance (A) m	Patamar (C0+C1)	GDE (%)** [C0/(C0+C1)]%	Média (g.Kg-1)	Desvio Padrão (g.Kg-1)
Noroeste-Sudeste	20 metros	Esférico	3700	4555	250	8255	44,82	2,18	35,91
Sudoeste-Nordeste	20 metros	Esférico	350	7900	300	8250	4,24	-0,24	14,63
Noroeste-Sudeste	40 metros	Esférico	900	8100	350	9000	10	-0,07	18,28
Sudoeste-Nordeste	40 metros	Esférico	600	2980	300	3580	16,75	-0,01	20,31
Noroeste-Sudeste	60 metros	Esférico	2000	1450	130	3450	57,97	0,06	59,84
Sudoeste-	60	Esférico	720	8400	350	9120	7,89	0,07	12,83

Nordeste	metros								
Noroeste-Sudeste	80 metros	Esférico	7000	1800	230	8800	79,54	0,10	75,84
Sudoeste-Nordeste	80 metros	Esférico	500	2595	190	3095	16,15	0,16	22,57
Noroeste-Sudeste	100 metros	Esférico	980	2930	190	3910	25,06	0,26	30,49
Sudoeste-Nordeste	<u>100 metros</u>	<u>Esférico</u>	<u>450</u>	<u>19900</u>	<u>1200</u>	<u>20350</u>	<u>2,21</u>	<u>-0,11</u>	<u>11,76</u>

Fonte: O autor.

Da primeira análise, compararam-se as Tabelas 7 e 8 com os resultados dos valores dos variogramas. Nota-se que essa equiparação dos resultados apresentam dados diferentes em todos os valores e principalmente ao efeito pepita

Isso pode ser notado quando é efetuado a modelagem dos variogramas, que são apresentados na Figura 41 (a) e (b).

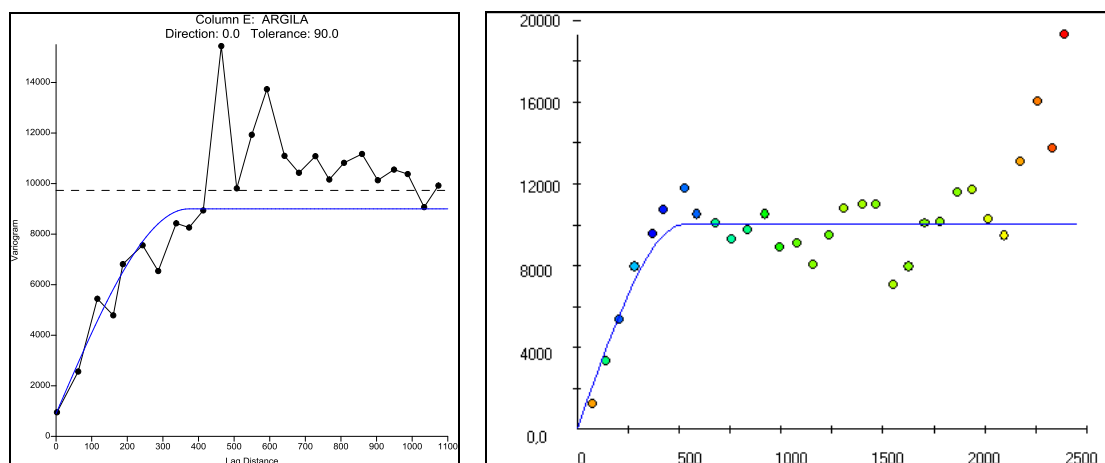


Figura 41 – Variogramas (a) Surfer; (b) Vesper.

Fonte: O autor.

Percebe-se que a modelagem é gerada de maneira diferente entre os interpoladores Surfer da Figura 41 (a) e Vesper da Figura 41 (b), resultando em valores diferentes.

O que ocorre analisando a modelagem dos variogramas do Vesper é que nesse aspecto ele busca ajuste perfeito da variabilidade dos dados, busca minimizar ao máximo o efeito pepita, ocorrendo que isso pode camuflar dados importantes advindo do campo e prejudicar o resultado final.

Com os mesmos parâmetros aplicados na avaliação dos dados do Vesper, efeito pepita (C_0), alcance (a) e grau de dependência espacial (GDE). Primeiramente

a comparação foi efetuada entre as transeção, em função da distância entre as amostras.

Da mesma maneira que os resultados apresentados pelo Vesper, os valores da transeção Sudoeste-Nordeste foram que apresentaram resultados satisfatórios comparados com a transeção Noroeste-Sudeste.

Primeiramente, as análises foram efetuadas por meio do Efeito Pepita. Dessa maneira os grupos selecionados foram de 20, 40, 80 e 100 metros. Sequentemente, comparados os resultados do alcance, onde a transeção com 80 metros foi a que obteve o menor valor, comparada com as demais. Ainda com relação ao GDE, nas análises dos três melhores resultados das transeções todos obtiveram grau de dependência forte, com valores abaixo dos 25 %.

Com o objetivo de resultado quantitativo, utilizou-se novamente o módulo do *Software Surfer grid/residual* dos valores interpolados, pois com esses valores é possível obter as medidas estatísticas que permitem a obtenção da qualidade da interpolação. Com esses resultados foram calculadas a média e o desvio padrão.

A partir dos valores apresentados na Tabela 16 e tomando por base a medida de dispersão à transeção, com o resultado satisfatório foi Sudoeste-Nordeste, com distância de 100 metros entre os pontos. A Figura 42 (a) e (b) apresentam o mapa de contorno e o mapa de imagem da granulometria de argila gerado pelo *Software Surfer* com a transeção Sudoeste-Nordeste, a distância de 100 metros.

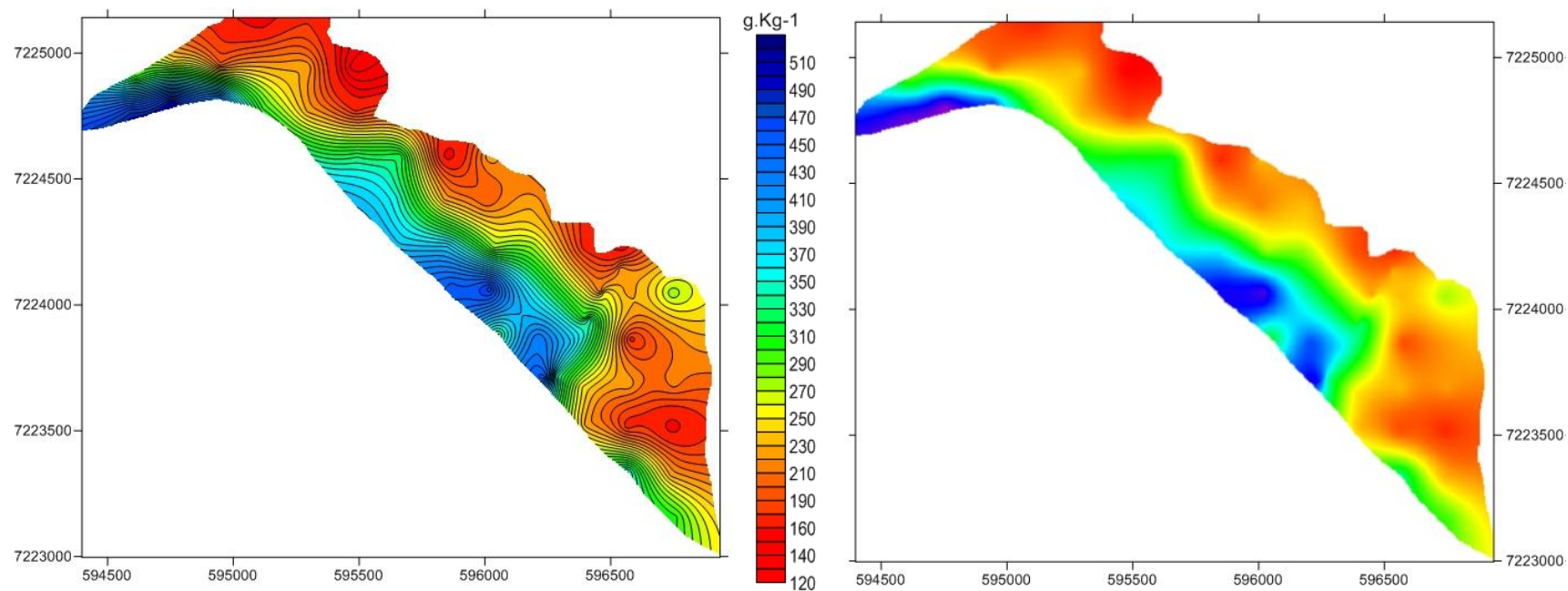


Figura 42 – Mapa dos teores de argila com pontos de 100 em 100 metros por meio do Surfer, (a) mapa de contorno e (b) mapa de imagem.

Comparando-se os resultados obtidos pelos interpoladores, de maneira geral, as interpolações obtiveram melhores resultados na transeção Sudoeste-Nordeste com distância entre os pontos de 80 e 100 metros.

Os mesmos resultados foram obtidos entre o interpolador IDW não-geoestatístico no Surfer com e geoestatística aplicada no interpolador krigagem no *Software Vesper*. Os mapas com pontos coletados a cada 80 metros na transeção Sudoeste-Nordeste em ambas as aplicações, foram os que representaram melhor a granulometria argila.

Comparando os processos geoestatísticos no Surfer e no Vesper, ambos resultaram em mapas gerados por krigagem, com representação de variabilidade, por meio da transeção Sudoeste-Nordeste, a distância entre os pontos de 100 metros.

4.4.3. Relação entre Argila e Relevo

De maneira geral, os valores da transeção Sudoeste-Nordeste foram os que apresentaram resultados satisfatórios comparados com a transeção Noroeste-Sudeste. Isso leva a análise da correlação com o relevo, e a forma que ocorre a variabilidade espacial entre as amostras. Nesse aspecto, efetuou-se o gráfico de correlação argila e altitude que é apresentado na Figura 43.

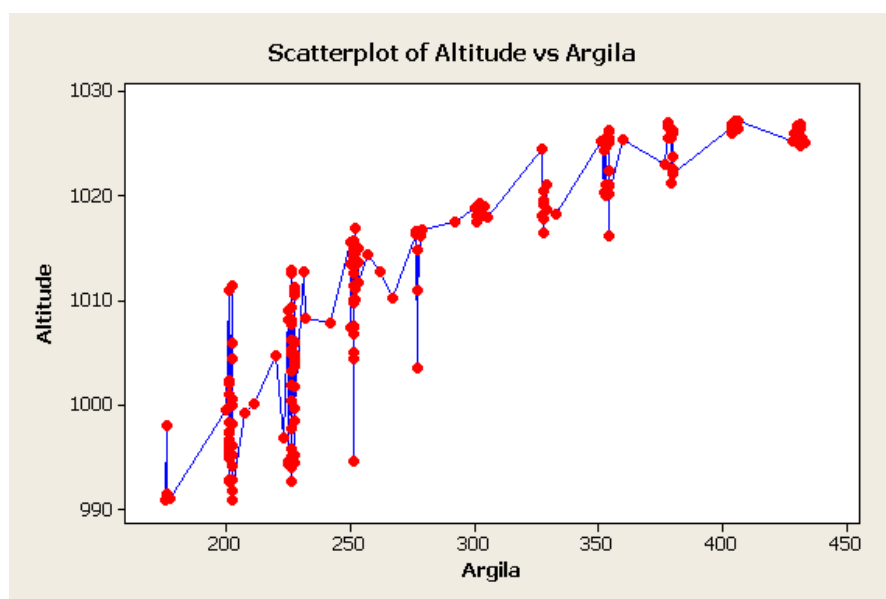


Figura 43 – Gráfico da correlação entre argila e altitude.

Pode-se notar que na Figura 43 que a medida que a altitude aumenta, da mesma maneira ocorre o acréscimo no valor dos teores de argila. Para analisar essa correlação foi gerado o mapa de declividade com as classes proposta pela EMBRAPA (2006) da área de produção da FESCON, como visualizada na figura 44.

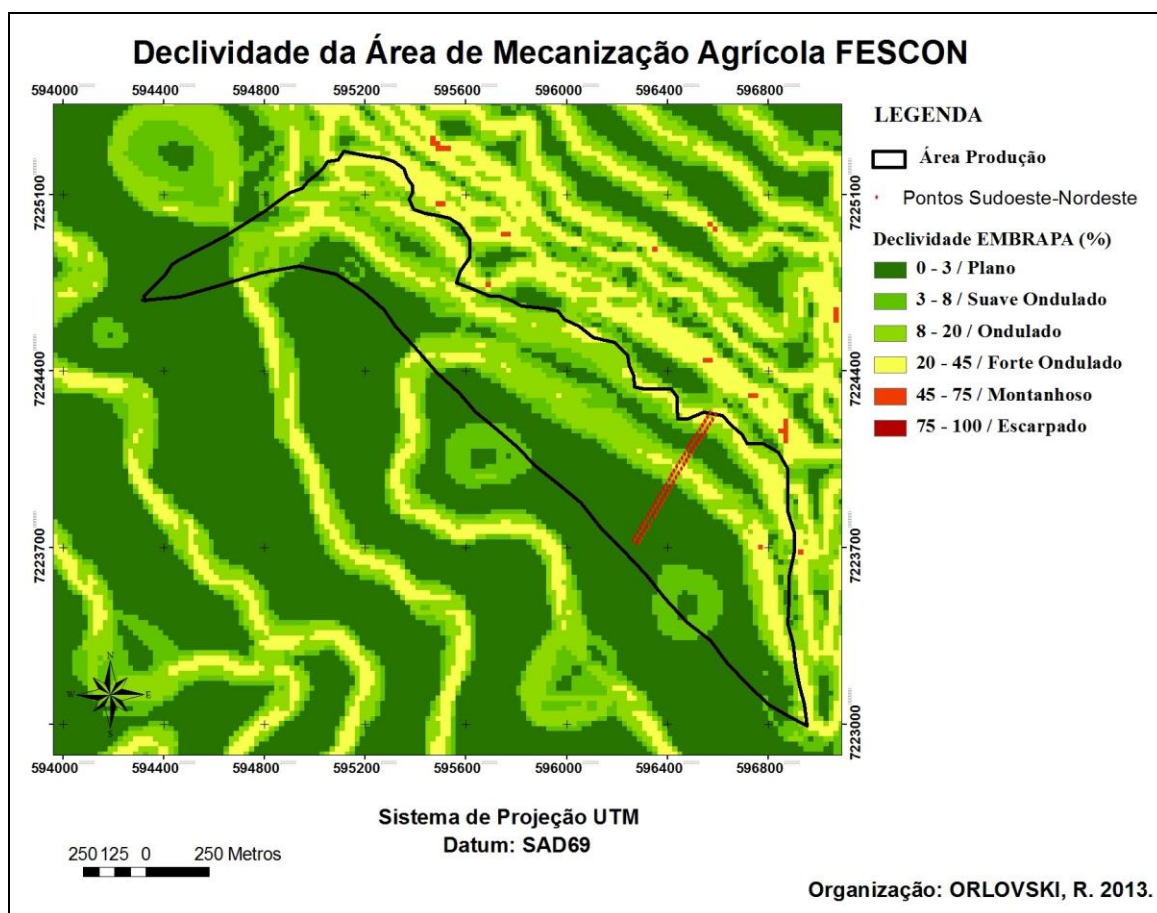


Figura 44 – Mapa de classe da declividade EMBRAPA da FESCON

As amostras de solo coletadas na transeção Sudoeste-Nordeste tiveram início no relevo plano, em direção ao suave ondulado, ondulado, com amostras de solo no relevo forte ondulado.

Comparando o gráfico com as classes de declive pode-se notar que onde a altitude é maior, ou seja, no relevo plano, proporcionalmente os teores de argila são os mais elevados, isso pode ser decorrente do não transporte das partículas por fatores naturais, como chuva e vento ou por meio do uso da solo.

Analisando os valores de declividade, onde ocorre o decréscimo de altitude, com as classes de declividade variando entre suave ondulado a forte ondulado, com essa alteração ocorre a redução dos teores de argila, ou seja, quanto menor é

altitude, com declividade mais acentuada, menores são os teores encontrados de argila.

Nesse aspecto é possível evidenciar que o sucesso no resultado da elaboração dos mapas nas transeções Sudoeste-Nordeste deve-se a diferença entre o relevo encontrada nessa área. Ficando evidente que a argila está relacionada com a declividade.

Nota-se que essa forma de divisão da EMBRAPA (2006), pode ocultar detalhes de declividade importantes em muitos estudos, por isso da necessidade da modificação das classes de declive devido a contemplação de mais classes mostrando as nuances da declividade, nesse aspecto, buscando maior detalhamento das classes de relevo gerou-se mapa embasado na EMBRAPA (2006) com novas classes de relevo, como é apresentado na Figura 45.

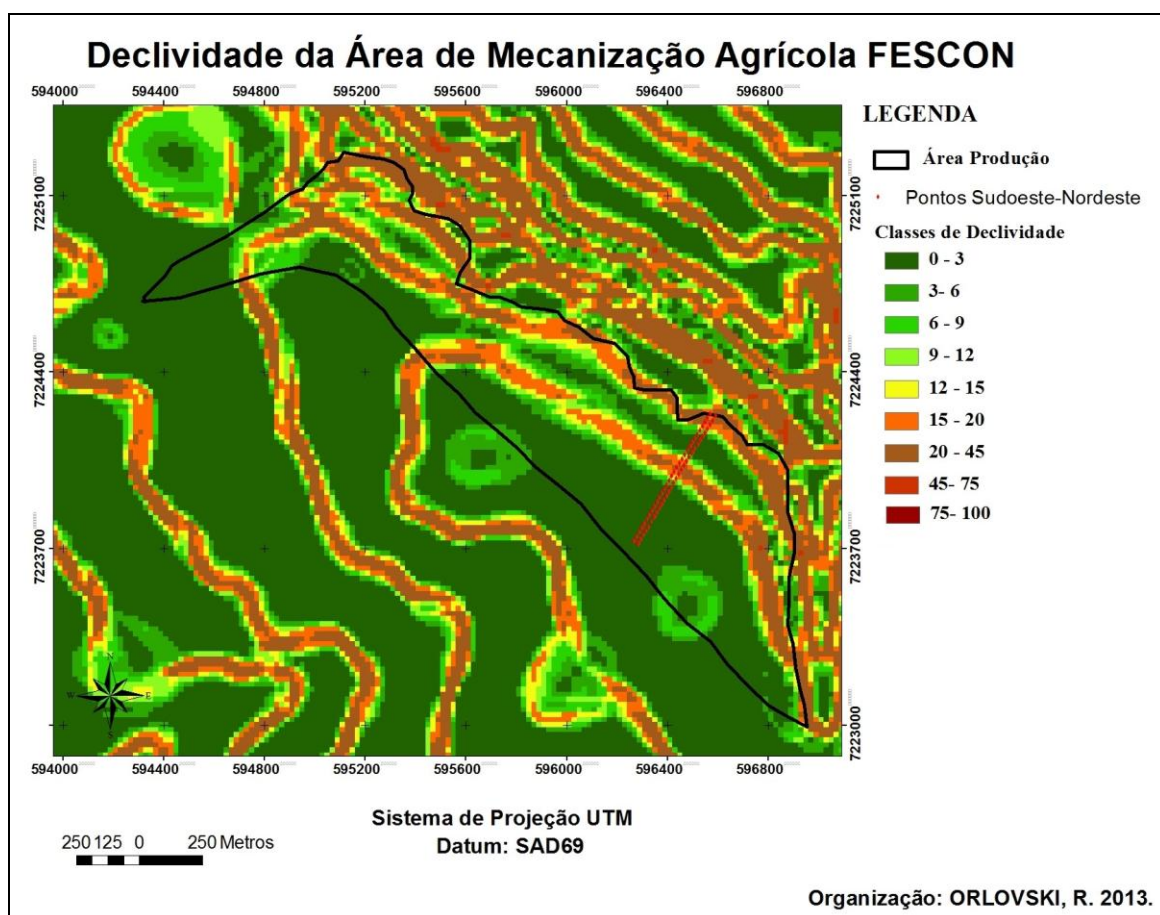


Figura 45– Mapa de classe da declividade da FESCON.

Pode-se notar maior detalhamento nas classes declive, comparando com as classes propostas pela EMBRAPA (2006), ficando evidente a necessidade de novas

classes de declividade. Nesse aspecto é possível evidenciar que o sucesso no resultado da elaboração dos mapas nas transeções Sudoeste-Nordeste deve-se a diferença entre o relevo encontrada nessa área. Ficando evidente que a argila está relacionada com a declividade.

Comparando as transeções com os tipos de solos encontrado na FESCON apresentados na Figura 23, pode-se notar que os teores mais altos da argila são encontrados no Latossolo, inversamente proporcional estão os menores teores de argila, distribuídos no Cambissolo.

Para corroboração, o mapa das unidades de paisagem é apresentado na Figura 46, discriminando para cada unidade a declividade, bem como a rede de drenagem local. Nesse mapa da FESCON foram destacadas as 5 classes de declive, como segue: relevo plano, relevo suave ondulado, terço médio a inferior, terço médio a superior e alta declividade. Os pontos coletados na transeção Sudoeste-Nordeste encontram-se nas classes de relevo plano, no sentido relevo suave ondulado a terço médio a inferior.

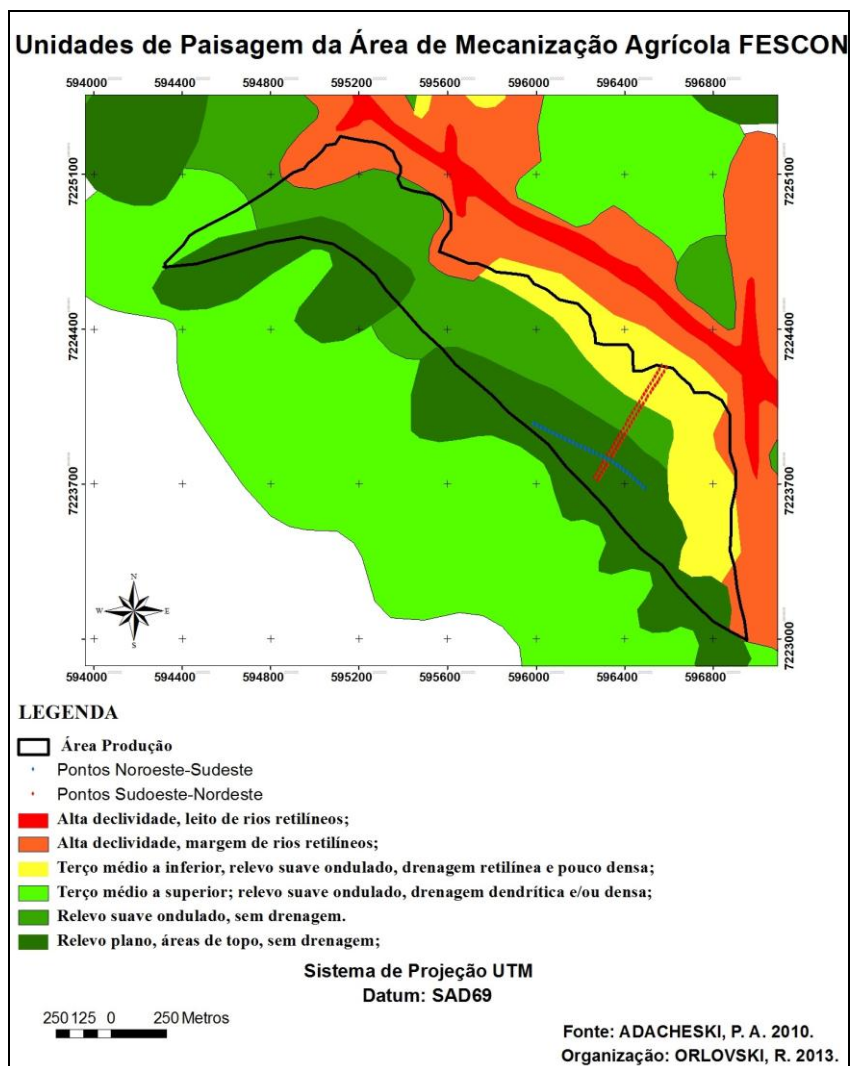


Figura 46 – Unidades de Paisagem da FESCON.

Analisando a Figura 46, nota-se que na transeção Noroeste-Sudeste, os pontos foram coletados no relevo plano, as análises efetuadas por meio dos variogramas demonstrou que neste tipo de relevo a variabilidade espacial é baixa com teores de argila elevado, porém, na transeção Sudoeste-Nordeste, as amostras de solo foram coletadas em diferentes classes de declividade, com alta variabilidade espacial e com teores de argila inferiores comparando com aqueles coletados no relevo plano. Nesse aspecto, foi possível evidenciar por meio das análises dos variogramas que o relevo tem influência direta nos teores de argila do solo, evidenciando o sucesso da transeção Sudoeste-Nordeste.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE PESQUISAS FUTURAS

Esta pesquisa teve como objetivo geral testar diferentes espaçamentos de amostragem de solo, dos teores de argila, para fins de modelagem na aplicação em Agricultura de Precisão. Para tanto a coleta das amostras de solo foram detalhadas em duas transeções que representa o todo. No restante da área foram realizadas as coletas de amostra de solo em grade regular.

Nesse aspecto pesquisou-se interpolador que modelasse adequadamente a granulometria argila, portanto adotou-se os interpoladores não geoestatísticos, que não levam em consideração a variabilidade espacial e ainda os geoestatísticos, que representam a variabilidade espacial, por meio dos variogramas.

Com base no objetivo proposto chegaram-se as seguintes conclusões:

1. Comparando os resultados dos interpoladores não-geoestatístico com o geoestatístico, notou-se que ambos modelaram de maneira semelhante os resultados, mesmo os não-geoestatísticos (IDW) não levando em consideração a variabilidade espacial.
2. Com a metodologia adotada em campo, ou seja, com as transeções nos sentidos Noroeste-Sudeste e Sudoeste-Nordeste e a variação da distância entre cada ponto, (primeiramente a 20 metros, 40 metros, 60 metros, 80 metros e 100 metros), conclui-se que a transeção no sentido Sudoeste-Nordeste foi a que representou a maior variabilidade em campo, devido as classes de declive serem diferentes comparando com a classe da transeção Noroeste-Sudeste que se encontra em relevo plano, em relação aos teores de argila com os resultados obtidos pelos interpoladores.
3. Outro fator que ficou evidente é que os teores de argila estão associados com a altitude, por meio das análises efetuadas no decorrer da pesquisa, nota-se que a modelagem realizada pelos interpoladores nas transeções Sudoeste-Nordeste apresentou resultado mais satisfatório devido as diferentes classes de declive. Nesse aspecto, em mapas de granulometria um dos primeiros fatores a serem analisados para a coleta das amostras de solo é o relevo existente na área, e planejar a coleta das amostras em função do mesmo.
4. Ainda, em relação a análise nas classes de declividade proposta pela EMBRAPA (2006), percebe-se que novas classificações podem ser usadas,

para contemplar mais classes de declividade de interesse mostrando de forma detalhada as nuances do relevo.

5. Os testes quando da coleta das amostras de solo, variando os espaçamentos entre os pontos nas transeções definiu que o espaçamento entre as coletas de teor de argila em 80 metros é o adequado em ambos interpoladores, geoestatísticos no Vesper e não-geoestatístico no Surfer, na transeção Sudoeste-Nordeste. A diminuição nos espaçamentos (primeiramente a 20 metros, 40 metros, 60 metros, 80 metros e 100 metros) não melhora a modelagem dos teores de argila, pois o espaçamento menor (20 metros) possui super amostragem para a interpolação e o contrário acontece com os espaçamentos mais distantes, faltam informações referentes a modelagem, subamostragem.
6. O Programa Vesper foi desenvolvido para Agricultura de Precisão, adotado nessa pesquisa por possuir o mesmo foco. É excelente para a análise “a priori” da variabilidade espacial dos dados de campo, mediante os variogramas e também para otimização dos resultados, porém os mapas gerados não possui coordenadas geográficas, a legenda apresenta apenas o valor mínimo e máximo dos dados interpolados, na pesquisa em questão dos teores de argila, sem possibilidade de edição, seja nos teores ou até mesmo das cores empregadas. Em Agricultura de Precisão as coordenadas geográfica são fundamentais para a identificação de pontos de interesse da área, principalmente em se tratando da textura, ou até mesmo, na caracterização dos locais com diferentes teores de granulometria. Ainda a edição da legenda é fundamental para adequação do resultado final com a realidade em campo. Nesse aspecto o programa Vesper deixa a desejar em relação ao resultado final dos mapas para Agricultura de Precisão.
7. Comparando os interpoladores geoestatístico processados nos programas Surfer e Vesper, ambos modelaram a granulometria argila pela transeção Sudoeste-Nordeste com distância entre os pontos de 100 metros de maneira quantitativa satisfatória, porém o interpolador Vesper não possui as particularidades necessárias para a AP nos mapas gerados pelo processo de interpolação krigagem, como apresentado nas Figuras 39 e 40; o mapa não possui legenda fidedigno dos resultados, necessitando de conhecimento da área para interpretação dos teores de argila.

Como indicação de pesquisas futuras sugere-se a seleção de outra área de interesse na FESCON que seja similar as transeções, a coleta das amostras e o processo de interpolação. Ainda propõe-se migrar a metodologia para outra área com diferenciação de relevo e efetuar o mesmo processo em campo. Além de validar os resultados aqui obtidos.

Propõe-se ainda, modelar a relação entre granulometria (teores de argila), altitude e espaçamento.

Devido ao valor agregado na amostragem, sugere-se, testar as Redes Neurais Artificiais (RNA) como interpolador. Primeiramente com a inserção das amostras originais pelas transeções, para treinar a rede e a partir disso efetuar testes com a inserção de menos amostras, para verificar a sua resposta como estimadora de valores preditivos ou estimados.

REFERÊNCIAS

- ADACHESKI, P. A. **Mapeamento de Solos por Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica com base em critérios de Fotopedologia: o caso da Fazenda Escola Capão da Onça (Ponta Grossa – PR).** Trabalho de Conclusão do Curso de Geografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2011.
- ALVES, D. B. M.; ABREU, P. A. G.; SOUZA, J. S. **GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento.** Revista Brasileira Geomática, v. 1, n. 1, 8-13, 2013.
- AMARAL, L. P. **Geoestatística na caracterização do solo e da vegetação em floresta ombrófila Mista.** 2010. 154 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava 2010.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria.** Curitiba:SBEE, 1998.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística.** São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Notas de Geoestatística.** Acta Geológica Leopoldensica XXV(55), 3-14, 2002.
- ANGHINONI, I, GIANELLO, C. **Amostragem de solo e de plantas para análise.** In: BISSANI, A. C; GIANELLO, C. TEDESCO, M.J., CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas.** Porto Alegre: Genesis, 2004. 49-60 p.
- ANTUNIASSI, U. R.; BAIO, F. H. R.; SHARP, T. C. Agricultura de Precisão. In: FREIRE, E. C. **Aldodão no Cerrado do Brasil.** 1. ed. Brasília/DF: ABRAPA, 2007. p. 889-918.
- ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective.** Ottawa: DL Publications, 1989. 249p.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Continuidade e distribuição espacial da idade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.14, n.12, 2010. p.1257–1266.
- BERGEIJK, J. V.; GOENSE, D.; KEESMAN, K. J.; SPEELMN, L. **Digital Filters to Integrate Global Positioning System and Dead Reckoning.** J. Agric. Engineering Research. v. 70, 1998. 135-143p.
- BERNARDI, J.V.E., LANDIM, P.M.B. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados.** DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática,Texto Didático 10, 2002. 31 p.
- BERNARDI, A. C.C.; BETTIOL, G. M.; INAMASU, R.Y.; RABELLO, L. **Avaliação da produção e propriedades químicas espacializadas e da calagem e adubação a taxas variadas em lavoura de milho para silagem em São Carlos – SP.**

Agricultura de precisão: um novo olhar - São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011.

BETTINI, C. **Conceitos básicos de geoestatística**. In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. cap. 4. Brasília: Embrapa, 2007. p. 193-234.

BRADY, N.; WEIL, R. **The Nature and Properties of Soils**, 13th Edition. New Jersey. Prentice Hall. Upper Saddle River, 2002. 960p.

BRU, R. O.; MOLINA, L. F. **Muestreo de suelos para recomendación de fertilizantes**. In: **Agricultura de precisión: introducción al manejo sitio-específico**. Chillán: INIA e Cargil Chile, 1999. p.115-133.

BURROUGH, P. A. **Five reasons why geographical information systems are not Being used efficiently for land resources assessment**. Department of Physical Geography, University of Utrecht, Postbox 80.115,3508" TC Utrecht, The Netherlands, 1982.

BURROUGH, P.A.; McDONNELL, R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333p.

CALDERANO FILHO, B.; FONSECA, O. O. M.; SANTOS, H. G.; LEMOS A. L. **Levantamento Semidetalhado dos Solos da Fazenda Canchim São Carlos - SP**. Rio de Janeiro, EMBRAPA- CNPS, 1996. 261p.

CÂMARA, G. Banco de Dados Geográficos. **Capítulo 1: Representação Computacional de Dados Geográficos [on line]**. INPE. São José dos Campos, 2004.

CÂMARA, G., DAVIS, C. **Introdução à Ciência da Geoinformação. Introdução. São José dos Campos [on line]**. INPE. São José dos Campos, 2001.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.; FUCKS, S. D.; CARVALHO, A. S. **Análise Espacial de Dados Geográficos. Capítulo 1: Análise Espacial e Geoprocessamento [on line]**. INPE. São José dos Campos, 2004.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação. Capítulo 2: Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação [on line]**. INPE. São José dos Campos, 2001.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. **Análise Espacial de Dados Geográficos. Capítulo 3: Análise Espacial das Superfícies [on line]**. INPE. São José dos Campos, 2004.

CAMARGO, E. C. G. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais. Capítulo 5: Geoestatística: Fundamentos e Aplicações [on line]**. INPE. São José dos Campos, 2001.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; URCO, R. F.; KONOPKA, A. E. **Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils**. Soil Science Society of America Journal, v. 58, 1994 p. 1501-1511. Disponível em<
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>>.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. **Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP**. Revista Ciência Agronômica, v. 38, n. 02, 2007. 149-157 p.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C. **Amostragens de solos: a base para a aplicação de corretivos e fertilizantes – Sete Lagoas/MG**. EMBRAPA Comunicado técnico. 2012.

COELHO, E. C.; Souza, E. G. S.; Uribe-Opazo, M. A. Pinheiro Neto, R. **Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos**. Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 31, n. 1, 2009. 165-174p.

COSTA, N. H. A. D.; SERAPHIN, J. C.; ZIMMERMANN, F. J. P. **Novo método de classificação de coeficientes de variação para a cultura do arroz de terras altas**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 3, 2002. 243-249p.

DAVIS, J. C.; **Statistics and data analysis in geology**. Second Edition, New York, John Wiley & Sons. 1986. 646p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa/Centro Nacional de Pesquisa de Solos e Embrapa/Produção de Informação/Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. **Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja**. Revista Brasileira da Ciência do Solo, Viçosa, v.32, n.2, p. 463-476, 2008.

FELGUEIRAS, C. A. **Introdução à ciência da Geoinformação. Capítulo 7: Modelagem numérica de Terreno [on line]**. INPE. São José dos Campos, 2001.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; NASCIMENTO, C. G.; BRIEDIS, C.; RAMOS, F. S.; **Impacto de resíduos orgânicos de abatedouro de aves e suínos na produtividade do feijão na região dos Campos Gerais – PR – Brasil**. Revista Verde v.5, n.4, dezembro 2010. p. 15 – 21.

FONTANA, S. – **GPS A Navegação do Futuro** – Editora Mercado Aberto LTDA, Porto Alegre - RS, 2002. 304p.

FRANKE, R. **Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods**. Mathematics of Computations, v. 33, n. 157, 1982. p.181-200.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.29, 2005. 169-177p.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V. **Introdução ao geoprocessamento: princípios básicos e aplicação**. Jaguariúna. Embrapa Meio Ambiente, 2007. 52 p.: il. — (Embrapa Meio Ambiente. Documentos; 67).

IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná. **Amostragem de solo para análise química: plantio direto e convencional, culturas perenes, várzeas, pastagens e capineiras**. Londrina, 1996. 28 p. (Iapar. Circular, 90).

IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Disponível em <http://geofp.ibge.gov.br/RBMC/relatorio/RBMC_15anos_1996-2011.pdf>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560p.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais. Brasil. 2006.

LANDIM, P.M.B. **Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados**, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, 2010.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 20p. 2000. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>.

LANDIM P.M.B. **Sobre Geoestatística e mapas**. Terra Didatica, 2(1):19-33. 2006. Disponível em <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>.

MACHADO, T. M.; MOLIN, J. P. **Ensaio estáticos e cinemáticos de receptores de GPS**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, 2011. p. 981-988.

MACHADO, T. M.; MOLIN, J. P.; POVH, F.P.; SALVI, J.V. **Metodologia para avaliação do desempenho de receptor de GPS de uso agrícola em condição cinemática**. Engenharia Agrícola, v. 30, 2010. p. 121-129.

MANFRA LEICA SR20 – **GPS para Topografia** – Disponível em <http://www.manfra.com.br/produtos/catalogos/Catalogo_SR20.pdf>.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. – Brasília : Mapa/ACS, 2011. 36 p.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. **Depósitos superficiais neoceno-zóicos, superficiais geomórficas e solos em Monte Alto, SP**. Geociências. 19:265-281, 2000 New York. 236p.

MATOS, A. C. O. C. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicação na área de geodésia, geofísica na América do Sul. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)** – Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. **Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos**. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology, v. 13, n. 1, 2009. 53-64p.

McBRATNEY, A.B. WEBSTER, R. **Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates**. Journal of Soil Science, v. 37, n. 4, 1986. 617-639p.

MELLO, B. A. de; CAIMI, L. L. **Simulação na validação de sistemas computacionais para a agricultura de precisão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.6, nov./dez. 2008, 666-675p.

MIGUENS, A. P. **Navegação: A Ciência e A Arte, Volume III – Navegação Eletrônica e em Condições Especiais**. Manual de Navegação, DHN. 1996.

MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. University Press of America, 1976. 497 p.

MOLIN, J. P.; **Agricultura de precisão. Parte 1: O que é e estado da arte em sensoriamento**. Engenharia Agrícola , v. 17 , f. 2 , 1997. 97-107p.

MOLIN, J. P.; CARREIRA, P.T. **Metodologia para ensaios cinemáticos de receptores de GNSS utilizando um GPS RTK como referência**. Revista Brasileira de Agroinformática, v. 8, f. 1, 2006. 53-62p.

MOLIN, J. P.; POVH, F. P.; PAULA, V. R.; SALVI, J. V. **Método de avaliação de equipamentos para direcionamento de veículos agrícolas e efeito de sinais de gnss**. Engenharia Agrícola, v. 31, 2011. 121-129p.

MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O.; SILVA, E. F. **Integração GPS de Navegação e RBMC no Posicionamento e Cálculo de Áreas: Análise dos Resultados**. GisBrasil. 1997.

MONICO, J. F. G.; **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. **Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada.** Bol. Ciênc. Geod., sec. Comunicações, Curitiba, v. 15, no 3, p.469-483, jul-set, 2009 Dana, P. H, 1998.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de Aplicação.** 4.ed. atual e ampl. – Viçosa, MG: UFV, 2011.

OLIVEIRA, A. F.; PROL, F. S.; ALVES, D. B. M. **Análise da qualidade do efeito multicaminho em Estações de Monitoramento Contínuo da rede GNSS/SP.** Anais do III Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente - SP, 26-28 de julho de 2012. v.1. p.309-314.

PAIVA NETO, J. E. de. **A "fração argila" dos solos do Estado de São Paulo e seu estudo roentgenográfico.** Bragantia[online]. vol.2, n.10, 1942, 355-432p.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial dos parâmetros do solo.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. . 99 f. 1995.

SÁ, M. F. M. **Os solos dos Campos Gerais.** In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná.** Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007. Cap. 6, 73-83p.

SILVA, J. L. B. **Geoprocessamento aplicado à identificação de áreas para rejeitos e estimativa de recursos de carvão na região da mina Leão II.** Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000. 166p.

SILVA, J. R. M.; SILVA, L. L. **Agricultura De Precisão. Exemplo da avaliação do efeito da topografia e da rega sobre a variabilidade espacial e temporal da produtividade do milho.** Revista *Vida Rural*, *Vida Rural*, nº 1708, p.32-34. 2009.

SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; LIMA LEITE, R. L.; DIM, V. P.; NEVES NETO, D. N.; CRUZ, R. S. **Dependência espacial em levantamentos do estoque de carbono em áreas de pastagens de Brachiaria brizantha cv.Marandu.** vol. ACTA AMAZONICA - 42(4) 2012: 547 – 556. 2011.

SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; LIMA LEITE, R. L.; DIM, V. P.; NEVES NETO, D. N.; SILVA, J. E. C. **Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu.** Biosci. J., Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p. 41-53, Mar. 2012.

SOUZA, E. C. B.; KRUEGER, C. P.; SLUTER, C. R. **Determinação das variações volumétricas no istmo da Ilha do Mel utilizando PDGPS.** Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 9, no 1, 2003. 53-74p.

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S. **Número de amostras e seus efeitos na análise geoestatística e krigagem de atributos do solo.** II Simpósio de Geoestatística em Ciências Agrárias, 2011.

TALAMINI NETO, E. **Caracterização geotécnica do subsolo de Curitiba para o planejamento de ocupação do espaço subterrâneo.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. 176p.

TRANGMAR, BB. YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G.; SUDJADI, M. **Application of geostatistics to spatial studies of soil properties.** Advances in Agronomy, Amsterdam, v.38, 1985, 45-94p.

VALENTE, J. M. G. P. **Geomática - lições de geoestatística.** Ouro Preto: Fundação Garceis, 1982.

VIEIRA, S. R. **Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP).** Bragantia, v. 56, n. 01, p. 181-190, 1997.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C. & REYNOLDS, W.D. **Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data.** In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, 2002. 1-45p.

VITTI, G. C. **Interpretação de análise de solo e de folha na citricultura.** Jaboticabal, FCAV, 1988, 32p.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. **Spatial variability of soil physical properties the soil.** In: HILL, D. (ed.). **Applications of soil physics.** New York: Academic Press, 1980. 319-344p.

WEBSTER, R. OLIVER, M.A. **Geostatistics for environmental scientists.** Wiley, Chichester. Hardbound, 271 p.2007.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. Vesper - **Spatial Prediction Software for Precision Agriculture.** In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE - ECPA, 3., 2001, Montpellier, France. Proceedings... Montpellier, 2001. 139-144p.

APÊNDICE

Apêndice A - Pós-Processamento dos Pontos Georreferenciados

Vale aqui ressaltar que a Manfra disponibiliza um Tutorial para processamento de dados GNSS que é encontrado na Internet para *download*, com todas as configurações necessárias em relação as etapas necessárias para o processamento.

As etapas descritas abaixo nesse Anexo são alguns detalhes em relação a esse processamento que não estão no tutorial da Manfra e que vem a complementar as etapas de pós-processamento.

No *Software Geo Office*, para que fosse possível efetuar o pós-processamento dos pontos georreferenciados, primeiramente foi criado novo projeto, para agregar os dados referentes aos pontos coletados em campo. Juntamente com a abertura dos pontos optou-se configurar o sistema de coordenadas. O receptor GPS Leica-SR 20 utiliza como padrão o sistema de coordenadas geográficas WGS 84, porém nesse estudo optou-se pelo Sistema UTM, aplicando a configuração apresentado na Figura 47.

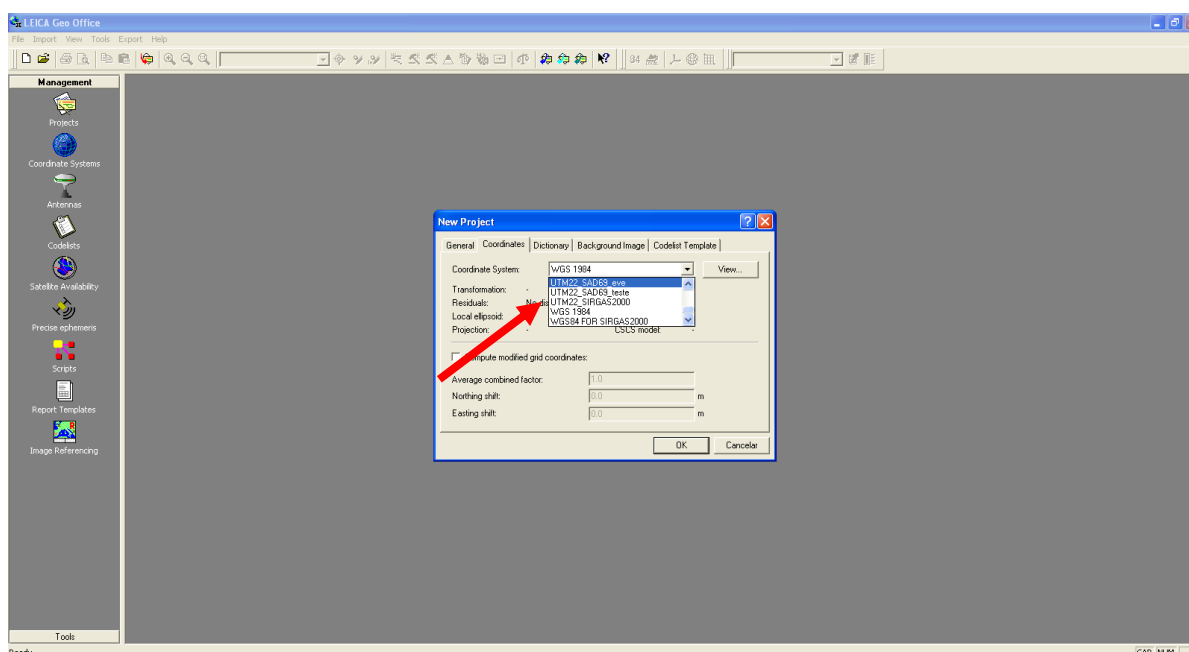


Figura 47 – Abertura dos dados no Geo Office e configuração do sistema de coordenadas geográficas.

Após a configuração do Datum e do sistema de coordenadas, importou-se os pontos advindos dos trabalhos de campo. Importando-se, também, para o pós-processamento a base RBMC. Para o reconhecimento do arquivo RBMC, o Geo

Office aponta seu formato *Rimex*. Outro fator é a seleção dos três arquivos simultaneamente que compõe a base. A Figura 48 ilustra a abertura da base de dados RBMC para o pós-processamento dos dados.

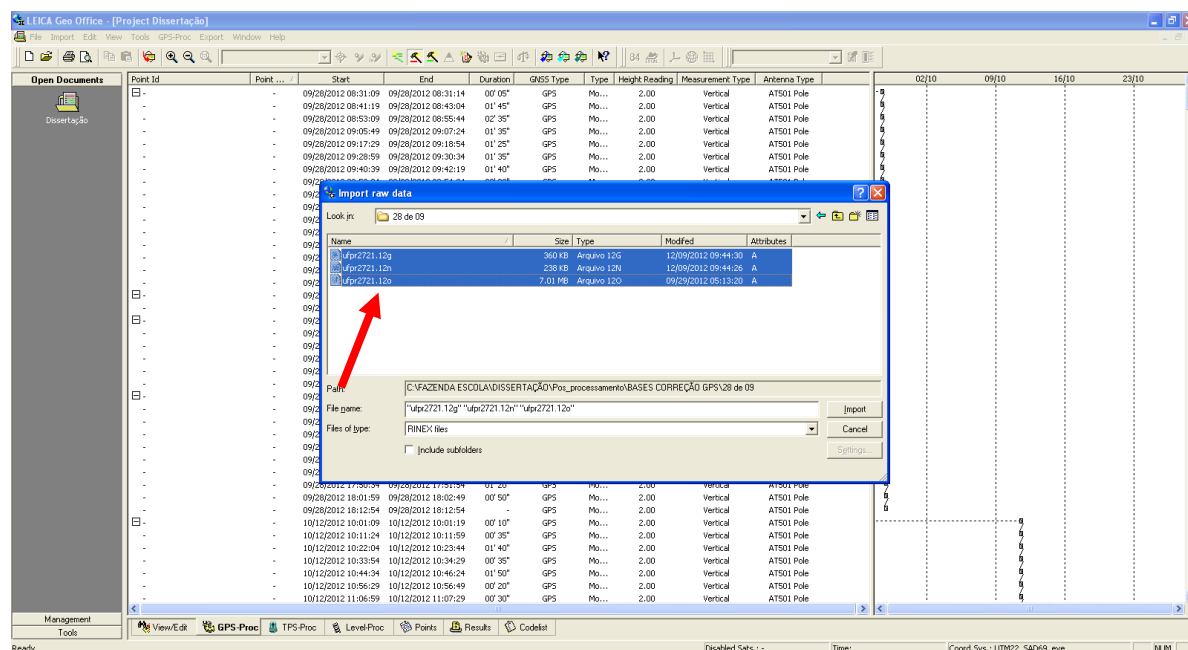


Figura 48 – Importação da base RBMC.

Como foi apresentado na Revisão de Literatura, o receptor GPS é passível de erros, os dados contidos na mensagem possuem precisão limitada, utilizou-se efemérides precisas, disponibilizadas pelo IGS (*International Geological Survey's*).

Com todos os arquivos, é necessário configurar RBMC como a base que será de controle no pós-processamento, ou seja, os pontos serão corrigidos por meio dessa referência. Para isso, com o botão direito do mouse, solicita-se a edição da base, efetua-se a alteração escolhendo a opção que esse arquivo será o responsável pelo controle do pós-processamento. A Figura 49 ilustra a seleção da base RBMC como base de controle no momento do pós-processamento.

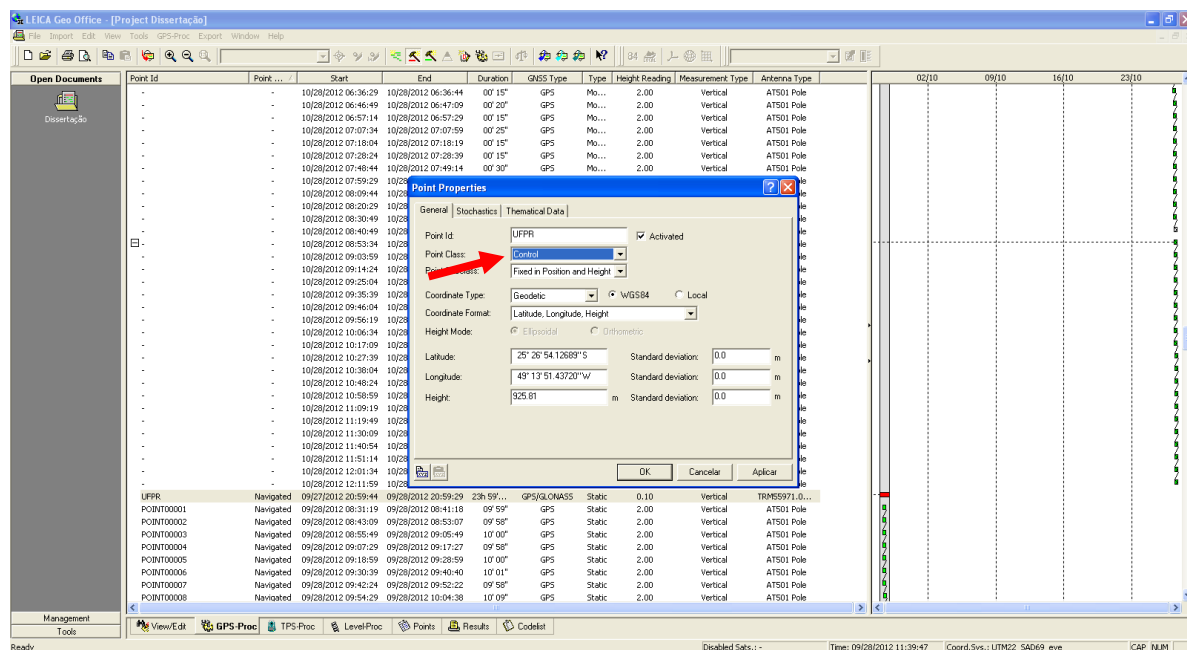


Figura 49 – Configuração da base RBMC.