

**ANDREA LOPES IESCHECK**

**REPRESENTAÇÃO E VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE DADOS  
ESPACIAIS PARA AVALIAÇÃO DE SOLOS**

**Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.**

**Orientadora: Profa. Dra. Claudia Robbi Sluter**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Renato Antônio  
Dedecek**

**CURITIBA**

**2006**

**"REPRESENTAÇÃO E VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE  
DADOS ESPACIAIS PARA AVALIAÇÃO DE SOLOS"**

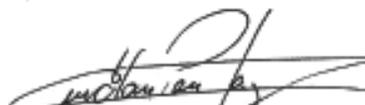
**POR**

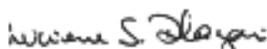
**ANDREA LOPES IESCHECK**

Tese nº 049 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no  
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade  
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 29 de agosto de 2006.

  
Prof. Dr. Claudia Robbi Slutet - Orientadora e Presidente (UFPR)

  
Prof. Dr. Luiz Cláudio de Paula Souza - Membro (UFPR)

  
Prof. Dr. Luciene Stamato Delazari - Membro (UFPR)

  
Prof. Dr. Selma Regina Aranha Ribeiro - Membro (UNIOESTE)

  
Prof. Dr. Henrique Firkowski - Membro (UFPR)

lescheck, Andrea Lopes

Representação e visualização volumétrica de dados espaciais para avaliação de solos./ Andrea Lopes lescheck. – Curitiba : UFPR, 2006.

[179]. il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná.  
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, PR - BR, 2006.

1. Visualização Volumétrica. 2. Interpolação Tridimensional. 3. Interpolação de Dados Qualitativos. 4. Sistema de Informações Geográficas Tridimensional (SIG-3D). I. Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca do Instituto de Geociências - UFRGS  
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

Ao meu filho Lucas

## AGRADECIMENTOS

Trabalhos acadêmicos são caracteristicamente solitários, pois o autor vive na companhia de suas idéias e angústias. Entretanto, não foi este o caso. Graças à colaboração fundamental de algumas pessoas, seus conhecimentos e amizade, minhas idéias e angústias se transformaram em *volumes de solos*. Portanto, gostaria de agradecer-las – sem responsabilizá-las – pela concretização desta pesquisa. Em especial ao professor Helio Olympio da Rocha, sem sua inteligência e dedicação este trabalho não teria acontecido. Da mesma forma, à minha orientadora e amiga, professora Cláudia Robbi Sluter que confiou na minha *tese* e atentamente mostrou o caminho.

Meu co-orientador, professor Renato Antônio Dedecek da Embrapa-Florestas, agradeço pelas análises das amostras. À fundação ABC que cedeu o espaço para realização do trabalho de campo. Sou grata, ainda, ao departamento de Geodésia-Instituto de Geociências da UFRGS, que viabilizou meu afastamento para os estudos de doutorado. Ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Também, ao departamento de Solos da UFPR, agradeço na pessoa do professor Luiz Cláudio de Paula Souza. À CAPES pela concessão da bolsa PICDT.

Aos colegas e amigos que comigo se aventuraram no campo: Selma Regina Aranha Ribeiro, Daniel Goldani, Rafael Santos Genro, Magal e Pardal. Aos pedólogos Alcides Cardoso e Acir pela coleta e descrição morfológica. Ao Guilherme Brenner Kraemer pela ajuda com as amostras e ao João Paulo Bueno de Prado pelo auxílio na transcrição dos dados e instalação dos programas.

Finalmente, agradeço a minha família, meus amigos e colegas de universidade, cuja alegria e solidariedade permitiram que eu chegasse até aqui.

Ao Lucas, meu filho, pelas horas roubadas da nossa convivência e por sua compreensão, meu muito obrigada.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 VISUALIZAÇÃO DE VOLUMES</b> .....	4
2.1 ESTRUTURAS DE DADOS TRIDIMENSIONAIS.....	7
2.1.1 Método Construtivo ou Paramétrico.....	10
2.1.2 Método de Representação de Fronteira.....	11
2.1.3 Método da Decomposição.....	13
2.2 VISUALIZAÇÃO DE DADOS VOLUMÉTRICOS.....	14
2.2.1 Extração de Superfície.....	16
2.2.2 <i>Rendering</i> Direto de Volume.....	17
2.3 ETAPAS DO PROCESSO DE VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	19
2.3.1 Formação do Volume.....	20
2.3.2 Classificação.....	21
2.3.3 Iluminação.....	22
2.3.4 Projeção.....	23
<b>3 DADOS ESPACIAIS E INTERPOLAÇÃO</b> .....	26
3.1 DIMENSÃO ESPACIAL.....	26
3.2 NATUREZA DOS DADOS.....	29
3.3 INTERPOLAÇÃO.....	30
3.3.1 Interpolação Qualitativa.....	32
3.3.2 Interpolação de Dados Quantitativos.....	35
3.3.2.1 Métodos Locais de Vizinhança.....	37

3.3.2.2 <i>Splines</i> .....	45
<b>4 REPRESENTAÇÃO E VISUALIZAÇÃO DOS VOLUMES DE SOLOS.</b>	<b>53</b>
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	57
4.1.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo.....	57
4.1.2 Levantamento Topográfico e Malha de Amostragem.....	59
4.1.3 Amostragem dos Monólitos.....	63
4.1.4 Descrição Morfológica e Coleta das Amostras.....	66
4.1.5 Análises das Amostras.....	70
4.2 ORGANIZAÇÃO E CODIFICAÇÃO DOS DADOS.....	72
4.3 INTERPOLAÇÃO E FORMAÇÃO DO VOLUME.....	81
4.4 VISUALIZAÇÃO DOS VOLUMES.....	92
<b>5 ANÁLISES DOS RESULTADOS</b> .....	<b>95</b>
5.1 DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA.....	95
5.1.1 Horizontes.....	96
5.1.2 Cores.....	105
5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	112
5.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS.....	129
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>136</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>141</b>
<b>ANEXO 1 – RESULTADOS DAS ANÁLISES LABORATORIAIS</b> .....	<b>145</b>
<b>ANEXO 2 – VISUALIZAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS: UMIDADE VOLUMÉTRICA (6 KPa, 10 KPa, 100 KPa E 1500 KPa), POROSIDADE TOTAL E POROSIDADE MACRO</b> .....	<b>152</b>
<b>ANEXO 3 – VISUALIZAÇÕES DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS: SOMA DE BASES E COEFICIENTE DE TROCA CATIÔNICA</b> .....	<b>163</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – EXEMPLOS DE VISUALIZAÇÃO DE VOLUMES.....	6
FIGURA 2.2 – CONCEITOS DE CÉLULA E <i>VOXEL</i> .....	8
FIGURA 2.3 – ESTRUTURAS DE DADOS TRIDIMENSIONAIS.....	9
FIGURA 2.4 – SÓLIDO PARAMÉTRICO.....	10
FIGURA 2.5 – OPERAÇÕES CONSTRUTIVAS ENTRE CUBOS.....	11
FIGURA 2.6 – POLIEDROS REGULARES.....	12
FIGURA 2.7 – SIMPLEX: 0, 1, 2 e 3 DIMENSÕES.....	12
FIGURA 2.8 – <i>OCTREE</i> .....	14
FIGURA 2.9 – <i>RENDERING</i> DE VOLUME.....	15
FIGURA 2.10 – EXTRAÇÃO DE SUPERFÍCIE.....	16
FIGURA 2.11 – <i>RENDERING</i> DIRETO DE VOLUME.....	18
FIGURA 2.12 – ETAPAS DO PROCESSO DE VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	19
FIGURA 2.13 – TIPOS DE DADOS VOLUMÉTRICOS.....	20
FIGURA 2.14 – ALGORITMOS DE PHONG E GOURAUD.....	23
FIGURA 2.15 – PROJEÇÃO DOS <i>VOXELS</i> .....	24
FIGURA 2.16 – PROJEÇÃO PARA VISUALIZAÇÃO DE VOLUMES.....	25
FIGURA 2.16 – PROJEÇÃO PARA VISUALIZAÇÃO DE VOLUMES.....	27
FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO DE FEIÇÃO VOLUMÉTRICA.....	28
FIGURA 3.3 – ANÁLISE DE DADOS.....	29
FIGURA 3.4 – POLÍGONOS DE VORONOI PARA TRÊS PONTOS.....	34
FIGURA 3.5 – MÉTODO DA PROJEÇÃO MODIFICADO.....	35
FIGURA 3.6 – VIZINHO MAIS PRÓXIMO.....	39
FIGURA 3.7 – POLÍGONOS DE VORONOI E TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY.....	40

FIGURA 3.8 – DIAGRAMA DE VORONOI PARA DOIS LOCAIS.....	41
FIGURA 3.9 – DIAGRAMA DE VORONOI PARA TRÊS LOCAIS.....	41
FIGURA 3.10 – DIAGRAMA DE VORONOI (12 LOCAIS).....	42
FIGURA 3.11 – EXEMPLOS DE POLIEDROS DE VORONOI.....	43
FIGURA 3.12 – CRITÉRIO DO CIRCUMCÍRCULO PARA GERAÇÃO DE TRIANGULAÇÕES DE DELAUNAY.....	44
FIGURA 3.13 – TETRAEDROS DE DELAUNAY.....	44
FIGURA 3.14 – INTERPOLADORES.....	49
FIGURA 4.1 – DESENVOLVIMENTO OPERACIONAL DO TRABALHO.....	56
FIGURA 4.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	57
FIGURA 4.3 – ÁREA EXPERIMENTAL – VISTA AÉREA.....	58
FIGURA 4.4 – ÁREA EXPERIMENTAL – VISTA DO TERRENO.....	58
FIGURA 4.5 – BASE TOPOGRÁFICA DIGITAL DO TALHÃO.....	61
FIGURA 4.6 – LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS (MALHA DE AMOSTRAGEM).....	62
FIGURA 4.7 – PREPARAÇÃO DOS TUBOS.....	63
FIGURA 4.8 – TRADO TUBULAR.....	64
FIGURA 4.9 – MONÓLITOS.....	64
FIGURA 4.10 – COLETA DOS MONÓLITOS.....	65
FIGURA 4.11 – TERRENO APÓS COLETA.....	66
FIGURA 4.12 – ABERTURA DOS TUBOS.....	68
FIGURA 4.13 – HORIZONTES E PROFUNDIDADES.....	69
FIGURA 4.14 – COR POR HORIZONTE.....	69
FIGURA 4.15 – COLETA DAS AMOSTRAS.....	70
FIGURA 4.16 – LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS.....	71
FIGURA 4.17 – HEXAEDRO ENVOLVENTE DA ÁREA DE ESTUDO.....	74

FIGURA 4.18 – HISTOGRAMA DE COR E OPACIDADE DO PROGRAMA Vis5D.....	75
FIGURA 4.19 – PROGRAMA PARA CONVERSÃO DE CORES: MUNSELL CONVERSION.....	77
FIGURA 4.20 – EXEMPLO DE CONSULTA DO ATRIBUTO COR SOBRE A REPRESENTAÇÃO BIDIMENSIONAL (HORIZONTE AB).....	79
FIGURA 4.21 – CLASSES DE CORES PARA VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	80
FIGURA 4.22 – ESTRUTURA DOS ARQUIVOS NO GRASS GIS.....	82
FIGURA 4.23 – ESTRUTURA DA BASE DE DADOS DO GRASS.....	83
FIGURA 4.24 – ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO.....	83
FIGURA 4.25 – MODELO NUMÉRICO DO TERRENO.....	86
FIGURA 4.26 – REPRESENTAÇÃO DA DECLIVIDADE.....	88
FIGURA 4.27 – REPRESENTAÇÃO DA CURVATURA MÉDIA.....	89
FIGURA 4.28 – <i>VOXELIZAÇÃO</i> .....	91
FIGURA 4.29 – <i>RENDERING</i> COMPLETO DO VOLUME: INTERPOLAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	92
FIGURA 4.30 – INTERFACE GRÁFICA DO MÓDULO DE VISUALIZAÇÃO NVIZ.....	93
FIGURA 4.31 – EXPORTAÇÃO DOS DADOS VOLUMÉTRICOS.....	94
FIGURA 4.32 – INTERFACE GRÁFICA DO PROGRAMA VIS5D.....	94
FIGURA 5.1 – MAPA DE SOLOS ORIGINAL.....	95
FIGURA 5.2 – MAPA DE SOLOS ATUAL.....	96
FIGURA 5.3 – OCORRÊNCIA DOS HORIZONTES Bi E Bw.....	97
FIGURA 5.4 – OCORRÊNCIA DOS HORIZONTES Cg E Io.....	98
FIGURA 5.5 – HORIZONTES DO SOLO (2D).....	99
FIGURA 5.6 – HORIZONTES DO SOLO (3D): VOLUME.....	100
FIGURA 5.7 – LOCALIZAÇÃO DOS CORTES VERTICAIS.....	101
FIGURA 5.8 – CORTES NO VOLUME PARA VISUALIZAÇÃO DOS HORIZONTES.....	102

FIGURA 5.9 – DIFERENTES VISUALIZAÇÕES DOS HORIZONTES: CORTE 4.....	103
FIGURA 5.10 – VISUALIZAÇÃO DOS HORIZONTES POR EXTRAÇÃO DE SUPERFÍCIES.....	104
FIGURA 5.11 – COR DOS SOLOS NO HORIZONTE Ap.....	106
FIGURA 5.12 – COR DOS SOLOS NO HORIZONTE AB.....	107
FIGURA 5.13 – COR DOS SOLOS NO HORIZONTE BA.....	108
FIGURA 5.14 – COR DOS SOLOS NOS HORIZONTES Bi E Bw.....	109
FIGURA 5.15 – VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DA COR DO SOLO.....	110
FIGURA 5.16 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CORES DOS SOLOS.....	111
FIGURA 5.17 – ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).....	113
FIGURA 5.18 – OCORRÊNCIA DE MAIOR QUANTIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO ( $0,080$ a $0,097 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ).....	114
FIGURA 5.19 – LOCALIZAÇÃO DO CORTE VERTICAL.....	115
FIGURA 5.20 – VISUALIZAÇÃO DO CORTE VERTICAL.....	116
FIGURA 5.21 – VISUALIZAÇÃO DO CORTE VERTICAL.....	117
FIGURA 5.22 – DENSIDADE DO SOLO ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ).....	118
FIGURA 5.23 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE $1,110 \text{ kg}/\text{dm}^3$ .....	119
FIGURA 5.24 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE $1,079 \text{ kg}/\text{dm}^3$ .....	119
FIGURA 5.25 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE $1,048 \text{ kg}/\text{dm}^3$ .....	120
FIGURA 5.26 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE $1,021 \text{ kg}/\text{dm}^3$ .....	120
FIGURA 5.27 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE $1,016 \text{ kg}/\text{dm}^3$ .....	121
FIGURA 5.28 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE $0,985 \text{ kg}/\text{dm}^3$ .....	121
FIGURA 5.29 – VISUALIZAÇÃO COM ISOSUPERFÍCIES E <i>RENDERING</i> DE VOLUME.....	122
FIGURA 5.30 – VISUALIZAÇÃO DAS MELHORES DENSIDADES DO SOLO: DETALHE ( $0,985 \text{ kg}/\text{dm}^3$ ).....	123
FIGURA 5.31 – TEXTURA DO SOLO ( $\text{g}/\text{kg}$ ): VISUALIZAÇÃO NO PLANO (2D).....	125

FIGURA 5.32 – TEXTURA DO SOLO (g/kg): VISUALIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE (2½D)	126
FIGURA 5.33 – TEXTURA DO SOLO (g/kg): VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA (3 D)..	127
FIGURA 5.34 – VISUALIZAÇÃO DAS MAIORES QUANTIDADES DE ARGILA (SOLOS MAIS ARGILOSOS).....	128
FIGURA 5.35 – pH DO SOLO.....	130
FIGURA 5.36 – CLASSIFICAÇÃO DO pH DO SOLO.....	131
FIGURA 5.37 – VISUALIZAÇÃO DO pH: ALTO, MÉDIO E MUITO BAIXO.....	132
FIGURA 5.38 – MATÉRIA ORGÂNICA (g/kg).....	133
FIGURA 5.39 – MAIOR QUANTIDADE DE MATÉRIA ORGÂNICA (g/kg).....	134
FIGURA 5.40 – CORTE VERTICAL PARA VISUALIZAÇÃO DO DETALHE.....	135

## RESUMO

A presente tese trata da representação e da visualização volumétrica de dados espaciais, através das quais novas possibilidades para visualizar tridimensionalmente as propriedades dos solos são apresentadas. O uso de volumes nos processos avaliativos dos solos permite ver e explorar a estrutura complexa do fenômeno como um corpo contínuo no espaço, incorporando dessa forma a terceira dimensão na cartografia de solos. A metodologia de trabalho adotada compreende a aquisição, organização e codificação dos dados, como também a interpolação, formação e visualização de volumes, através da utilização de um Sistema de Informações Geográficas Tridimensional em conjunto com um programa para visualização de volumes. Os dados de solos são de natureza qualitativa e quantitativa e foram interpolados para sua representação contínua no espaço tridimensional. Os resultados obtidos para as representações volumétricas das propriedades físicas, químicas e morfológicas são uma nova forma de visualizar os solos e se constituem em uma fonte de novos conhecimentos para o estudo deste fenômeno.

**Palavras-chave:** visualização volumétrica, interpolação tridimensional, interpolação de dados qualitativos, sistema de informações geográficas tridimensional (SIG-3D).

# **VOLUMETRIC REPRESENTATION AND VISUALIZATION OF SPATIAL DATA FOR SOILS ASSESSMENT**

## **ABSTRACT**

This dissertation is on volume representation and visualization of spatial data. It aims at showing new possibilities to visualize soil's properties on 3D. The use of volumes in soil's evaluation processes allows one to visualize and to explore the phenomenon as a continuous body in the space bringing third dimension to soil cartography. The methodology of this research entails the acquisition, organization and coding of data, as well as volume interpolation, formation and visualization by means of 3D-GIS environment. Soil's data are either qualitative or quantitative and they were interpolated in order to be continuously represented in 3D space. The outcome of volume representations of physical, chemical and morphological properties is a new way to visualize the soil and a new source of knowledge to the study of this phenomenon.

**Key-words:** volumetric visualization, three-dimensional interpolation, qualitative data interpolation, three-dimensional geographic information systems (3D-GIS).

## 1 INTRODUÇÃO

O escopo da presente tese é a visualização dos volumes de solo. Para tanto, o trabalho de pesquisa aqui desenvolvido trata da representação e visualização volumétrica de dados espaciais, através das quais novas possibilidades para visualizar tridimensionalmente as propriedades dos solos são apresentadas. O uso de volumes nos processos avaliativos dos solos permite ver e explorar o fenômeno como um corpo contínuo no espaço, incorporando dessa forma, a terceira dimensão na cartografia de solos.

O problema de pesquisa tratado nesta tese é como representar e visualizar volumes para avaliação de solos. Atualmente, as representações das informações dos solos são feitas na forma de mapas pedológicos, perfis de seqüências topográficas, cartas com curvas de isodiferenciação, superfícies representativas das variações dos atributos, bloco diagramas e gráficos. Portanto, para a solução do problema em questão, esta tese se desenvolve e é formulada a partir da seguinte linha de raciocínio:

A **visualização do volume** pressupõe a formação do volume;

Para a **formação do volume** são necessários dados volumétricos;

Os **dados volumétricos** são obtidos a partir de interpolação tridimensional;

O processo de **interpolação tridimensional** é feito a partir de **dados tridimensionais**.

Define-se, assim, como objetivo geral da tese, a representação e visualização volumétrica dos solos. Os procedimentos utilizados para representação e visualização de dados espaciais abrangem todo leque de atividades, desde a aquisição de dados à geração do produto final, as quais definem as etapas operacionais da metodologia adotada. Portanto, para a representação e visualização dos volumes dos solos são estabelecidos os seguintes objetivos específicos: aquisição de dados tridimensionais; proposição para o tratamento computacional dos dados qualitativos das propriedades dos solos; interpolação tridimensional qualitativa e quantitativa dos dados;

manipulação gráfica e interação com os volumes gerados para extração de informações.

Para a consecução dos objetivos elencados – do geral aos específicos – é necessária a utilização de sistemas computacionais. Ou seja, a representação e visualização de fenômenos espaciais não só requer, mas pressupõe um sistema de informações geográficas tridimensional que possa atender essa complexidade. Daí o grande desafio desta tese: do ponto de vista do seu conteúdo, bem representar e visualizar os volumes dos solos da área escolhida para aplicação da pesquisa, qual seja, a área piloto do centro de treinamento da Fundação ABC, município de Castro, a 140 km de Curitiba, no Estado do Paraná. Do ponto de vista da sua forma, viabilizar de maneira adequada esta visualização, através da utilização de um sistema de informações geográficas tridimensional em conjunto com programas para visualização de volumes.

Note-se que a exploração da informação não é fixa, para visualização adequada dos volumes de solo é necessário interagir com os dados e realizar as manipulações gráficas para a aplicação desejada. Ressalte-se que os avanços tecnológicos na área da informática, já tão inseridos no contexto atual de produção de conhecimento, superaram as limitações do processamento, análise e visualização de dados experimentadas algumas décadas atrás. Assim, diante do surgimento destas novas ferramentas para subsidiar os processos de investigação científica, há que se adequar às atividades desenvolvidas, de forma a incorporar tais avanços e as facilidades deles decorrentes às diversas áreas do conhecimento como neste caso, as ciências cartográficas e de solos.

É relevante notar que no contexto da avaliação de solos o conhecimento da estrutura complexa do fenômeno se dá a partir de dados de natureza qualitativa e quantitativa. Entretanto, as informações sobre suas propriedades são obtidas de maneira discreta, a partir de um número limitado de amostras pontuais medidas em campo. Estas amostras, por sua vez, devem ser usadas para representar toda a região de ocorrência. Isto pode ser feito através de modelos matemáticos que possibilitam, com base na localização espacial, a estimativa dos valores das respectivas

propriedades em locais não amostrados. A partir disso, faz-se a representação e visualização volumétrica do fenômeno, tarefa esta a que se destina esta tese e, para tanto, apresenta a estrutura que a seguir se expõe.

**Capítulo introdutório**, no qual o problema a ser enfrentado é apresentado, como também a sua forma de enfrentamento para atender os objetivos propostos. **Capítulo dois**, intitulado **Visualização de Volumes**, no qual são apresentados e discutidos os conceitos relativos às estruturas de dados tridimensionais, como também, a representação e visualização de dados volumétricos. A considerar a visualização de volumes, requer-se que os dados espaciais sejam interpolados. Daí o **capítulo três**, intitulado **Dados Espaciais e Interpolação**, no qual descrevem-se as características espaciais dos dados e os métodos para interpolação de dados qualitativos e quantitativos, com condicionantes baseados na sua localização e na sua tensão (*splines*). No **capítulo quatro**, intitulado **Representação e Visualização dos Volumes de Solos**, apresenta-se o desenvolvimento metodológico das etapas operacionais de aquisição, organização e codificação dos dados, como também da interpolação e geração dos volumes e da visualização destes. Demonstrada a metodologia utilizada para uma adequada visualização dos volumes de solo, segue o **capítulo cinco**, no qual apresentam-se os resultados obtidos para a referida visualização dos volumes, tendo em vista as propriedades morfológicas, físicas e químicas dos solos. Ainda neste capítulo, relativo às **Análises dos Resultados**, além dessa nova forma de se ver os solos, apresenta-se as representações tradicionais no plano e por superfícies. Por fim, no **capítulo seis**, apresentam-se as **Conclusões e Recomendações**, a respeito da representação e visualização volumétrica dos solos, com vistas também aos futuros trabalhos que possam ser realizados sobre este tema.

## 2 VISUALIZAÇÃO DE VOLUMES

Entende-se visualização como a criação de imagens gráficas que mostram dados para as interpretações visuais, buscando explorar a habilidade inata do ser humano de impor ordem, reconhecer padrões e construir um modelo mental. Assim, a visualização é um processo cognitivo relacionado à extração de informações a partir de estímulos visuais. Pode-se interpretar a visualização como um método computacional que incorpora coleta, organização, modelagem e representação de dados (PETERSON, 1995) e que, desta forma, combina a capacidade visual de análise com os recursos computacionais disponíveis.

Fundamental para a interpretação, a análise e a compreensão adequada dos dados, a visualização está diretamente relacionada com a forma de representação adotada e esta, por sua vez, depende do tipo de informação desejada e das diferentes características a serem abordadas, inclusive características intrínsecas do dado. Uma representação adequada é a chave para apreciação crítica e compreensiva do dado, beneficiando os processos de análise, processamento e tomada de decisão (ROBERTSON, 1991).

Segundo PAIVA et al. (1999) visualização é um termo relacionado aos métodos que permitem a extração de informações relevantes a partir de conjuntos de dados, utilizando técnicas de computação gráfica e processamento de imagens. Denomina-se visualização científica quando estes conjuntos de dados representam fenômenos complexos e o objetivo é a extração de informações científicas relevantes.

O avanço tecnológico notado ao longo das últimas décadas tornou possível a realização de simulações e processamentos com um grau de complexidade muito maior do que anteriormente. Como resultado de tais procedimentos se tem uma grande quantidade de dados e informações numéricos, na sua maioria, cujo entendimento e manipulação eficientes são prejudicados pela falta de uma representação adequada. Houve então, de acordo com BARTROLÍ (2001), a necessidade de explorar novos algoritmos e técnicas, uma vez que as técnicas existentes não eram suficientes para proporcionar a visualização dos resultados complexos. A visualização científica

tornou-se a união de processamentos complexos e computação gráfica, com o intuito de auxiliar os pesquisadores para melhor entender estruturas complexas (BARTROLÍ, 2001).

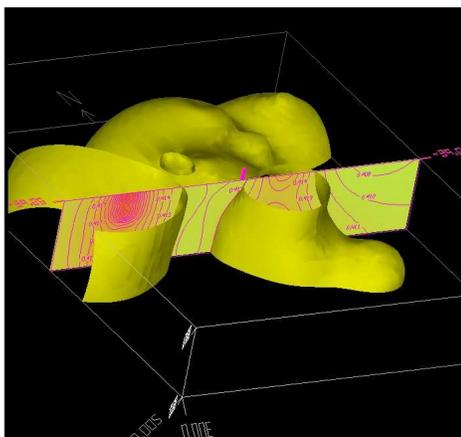
A visualização científica, também conhecida por análise visual de dados, é um método computacional que transforma o simbólico em geométrico, para possibilitar a observação dos processamentos e simulações realizados a partir de dados. Este método engloba o entendimento e a síntese da imagem, e atua como uma ferramenta tanto para interpretação de dados de imagem inseridos em um computador quanto para geração de imagens a partir de conjuntos de dados. A visualização científica está relacionada com a exploração de dados e informações na busca pelo entendimento e pela compreensão intuitiva do dado, objetivo fundamental das pesquisas científicas, e pode ser considerada como um processo gráfico análogo à análise numérica (EARNSHAW e WISEMAN, 1992).

Os sistemas de visualização científica são combinações de sistemas de *hardware*, *software* e procedimentos (EARNSHAW e WISEMAN, 1992) e envolvem conceitos de computação gráfica, processamento de imagem, sistemas, ciências cognitivas e outros. Através da visualização científica é possível ver e compreender, sobre uma tela bidimensional, dados multidimensionais e conjuntos de dados, o que de outra forma não seria possível (EARNSHAW e WISEMAN, 1992). A diferença entre apresentação gráfica e visualização científica é, basicamente, que com a primeira busca-se a comunicação dos resultados das análises e, com a segunda, busca-se o entendimento dos dados e das informações utilizados nas análises. De acordo com EARNSHAW e WISEMAN (1992), “visualização científica é um amálgama de ferramentas e técnicas que busca promover novas dimensões de discernimento para soluções de problemas utilizando a tecnologia atual.”

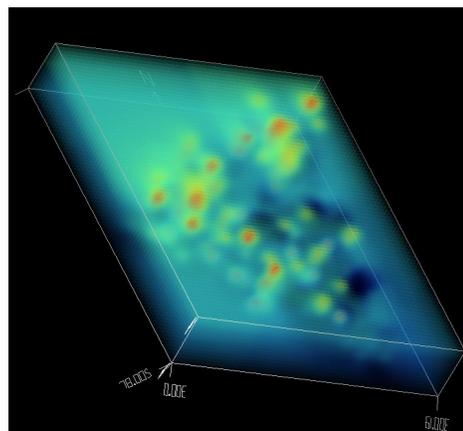
Uma área dentro da visualização científica que tem apresentado um rápido crescimento é a visualização de volumes (fig. 2.1). A visualização de volumes é usada para criar imagens a partir de um conjunto de dados vetoriais ou campos escalares definidos em grades multidimensionais, ou seja, é o processo de projetar um conjunto de dados multidimensionais, geralmente tridimensionais, sobre uma imagem plana

bidimensional, para obter o conhecimento da estrutura interna do dado (ELVINS, 1992). Um número associado a cada ponto de um volume é denominado de valor escalar nesse ponto. Campo escalar é o conjunto de todos os valores escalares do volume.

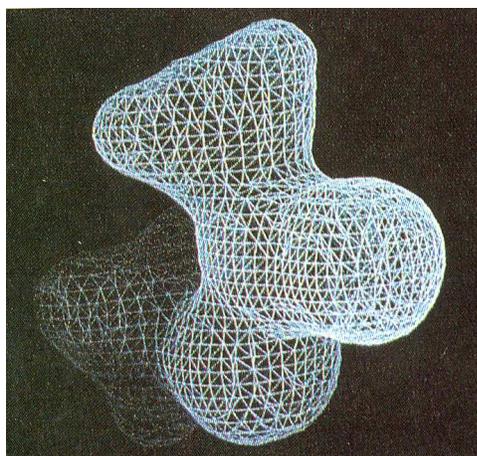
FIGURA 2.1 – EXEMPLOS DE VISUALIZAÇÃO DE VOLUMES



ISOSUPERFÍCIE E CORTE VERTICAL



RENDERING DE VOLUME



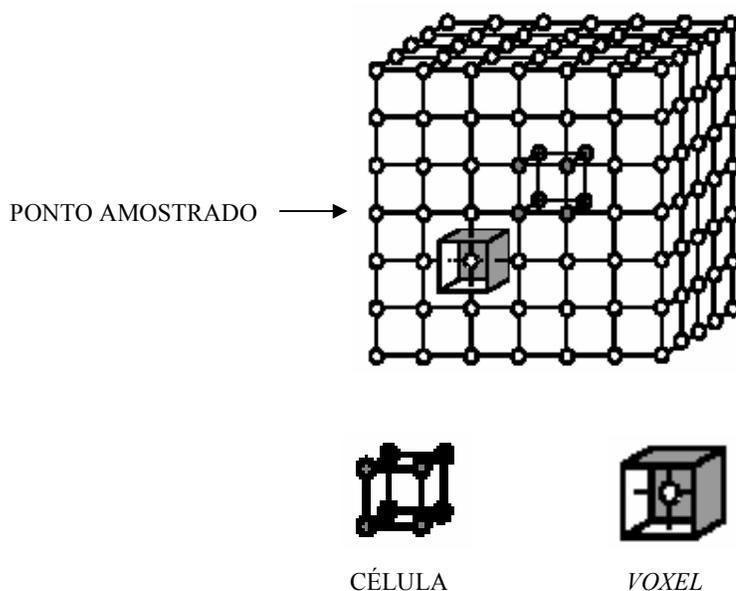
REDE DE VETORES (FONTE: EARNSHAW e WISEMAN, 1992)

VAN DRIEL (1989), reportado por SWANSON (1996), reconhece que a vantagem da visualização tridimensional está na forma como se vê a informação. Na visualização volumétrica simula-se a realidade espacial, para permitir ao usuário alcançar um reconhecimento e entendimento mais rápido, sem que haja a necessidade de construir um modelo mental prévio para fazer análises.

Segundo FUJISHIRO et al. (1996), a visualização de volumes é uma metodologia que objetiva explorar a estrutura interna e o comportamento complexo de objetos volumétricos tridimensionais. McCORMICK (1987), citado por PAIVA et al. (1999), define visualização volumétrica como o conjunto de técnicas utilizadas na visualização de dados associados a regiões de um volume, tendo como principal objetivo a exibição do interior de objetos volumétricos a fim de explorar sua estrutura e favorecer sua compreensão. A visualização de volumes é um método de extração de informações a partir de um conjunto de dados volumétricos, por meio de gráficos interativos e imageamento, e está relacionada com a representação, manipulação e *rendering* destes dados (GALLAGHER, 1995; KAUFMAN, 1991; e ROSENBLUM, 1994, citados por KAUFMAN, 1996).

## 2.1 ESTRUTURAS DE DADOS TRIDIMENSIONAIS

Dados volumétricos são entidades tridimensionais que encapsulam informações, não consistem de superfícies e bordas (*edges*), ou são muito volumosos para serem representados geometricamente (KAUFMAN, 1996). De acordo com este autor, dado volumétrico é um conjunto  $A$  de amostras  $(x, y, z, w)$ , que representam o valor  $w$  de algum atributo na posição tridimensional  $(x, y, z)$ . Os dados volumétricos são geralmente tratados como um conjunto ordenado de elementos de volume denominados *voxels* ou como um conjunto ordenado de células. Segundo BARTROLÍ (2001), o centro de um *voxel* corresponde à posição de um ponto amostrado e uma célula é definida como o cubóide cujos vértices são os pontos amostrais vizinhos (fig. 2.2).

FIGURA 2.2 – CONCEITOS DE CÉLULA E *VOXEL*

FONTE: ADAPTADO DE: BARTROLÍ, 2001.

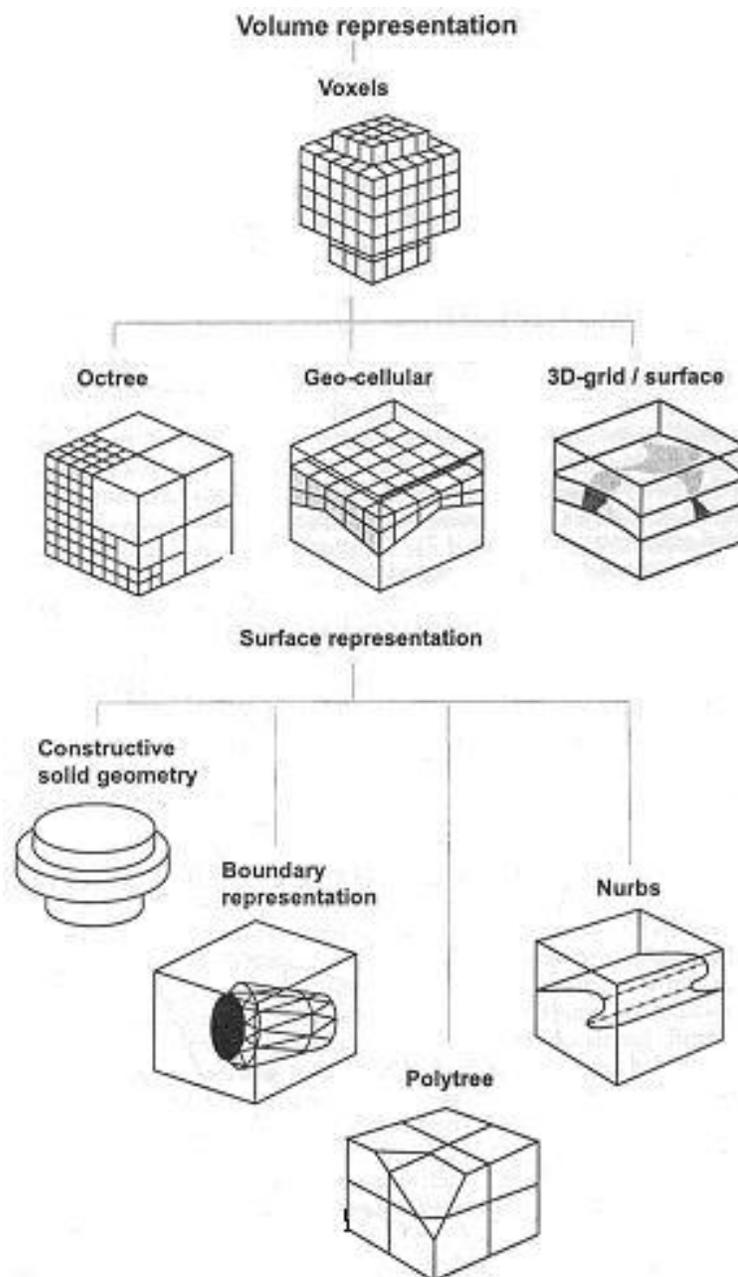
*Voxel* é o menor elemento de uma imagem tridimensional, porém a literatura não é consensual quanto à sua definição. Em determinadas publicações, *voxel* é o hexaedro definido em torno do valor amostrado e, em outras, o *voxel* é entendido como o hexaedro cujos vértices são os valores amostrados (PAIVA et al., 1999), neste caso a definição de *voxel* se confunde com a definição de célula.

Para KAUFMAN (1996), a região de valor constante no entorno de cada amostra é conhecida como *voxel*, sendo cada *voxel* um cubóide retangular com seis faces, doze lados e oito vértices. PAIVA et al. (1999) define *voxels* como paralelepípedos agrupados, formados pela divisão do espaço do objeto por um conjunto de planos paralelos aos eixos principais desse espaço.

Anteriormente às etapas de formação e visualização do volume, procede-se à definição da estrutura computacional para armazenamento e representação dos dados tridimensionais (fig. 2.3). Os modelos matriciais subdividem o universo tridimensional em elementos de volume (*voxels*), contrapondo-se ao modelo vetorial onde o volume é determinado pela superfície de entorno (fronteira) da feição (*feature's bounding*

*surface*) (SWANSON, 1996). De maneira geral, as técnicas de modelagem geométrica de sólidos podem ser divididas em três grupos: construtivo (*constructive*); de fronteira (*boundary*); e de decomposição (*decomposition*) (REQUICHA e VÖLCKER, 1983, e REQUICHA e ROSSIGNAC, 1992, citados por RAPER, 2000).

FIGURA 2.3 – ESTRUTURAS DE DADOS TRIDIMENSIONAIS



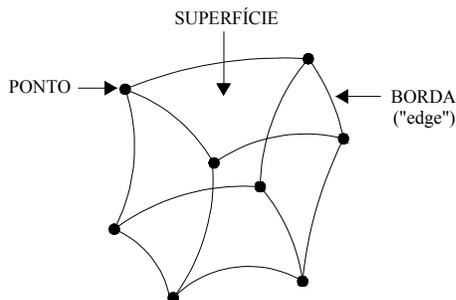
FONTE: RAPER, 2000.

### 2.1.1 Método Construtivo ou Paramétrico

Os métodos construtivos mais usuais para modelagem tridimensional são a NURBS (*non-uniform rational B-spline*) e a CSG (*constructive solid geometry – geometria construtiva de sólidos*). Estes métodos são baseados na representação de sólidos primitivos, por meio de equações paramétricas contínuas para as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e usam os métodos de Hermite ou *B-spline* (RAPER, 2000).

Os sólidos paramétricos primitivos como, por exemplo, os cubóides (fig. 2.4), são compostos por uma única célula e podem ser obtidos a partir de operações de redimensionamento (transformações de escala), ou pelo ajustamento de uma curva ou de uma superfície no espaço tridimensional (RAPER, 2000).

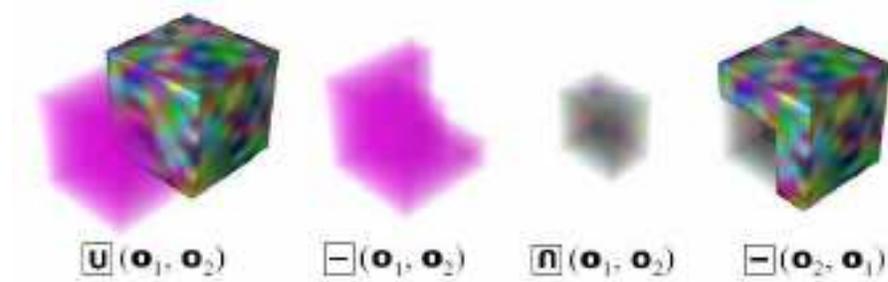
FIGURA 2.4 – SÓLIDO PARAMÉTRICO



FONTE: RAPER, 2000.

Sólidos de formas irregulares podem ser gerados pela combinação de sólidos primitivos, usando os métodos da geometria construtiva de sólidos. Nestes métodos, o objeto original é submetido a uma série de operações Booleanas de união, interseção e subtração até chegar à forma desejada (fig. 2.5). Nos métodos CSG os pontos no interior do objeto final são tratados de forma homogênea e, portanto, não representam adequadamente a estrutura interna de objetos complexos e nem modelam fenômenos amorfos como nuvens e gases (BARROCA, 2005).

FIGURA 2.5 – OPERAÇÕES CONSTRUTIVAS ENTRE CUBOS



FONTE: BARROCA, s/d.

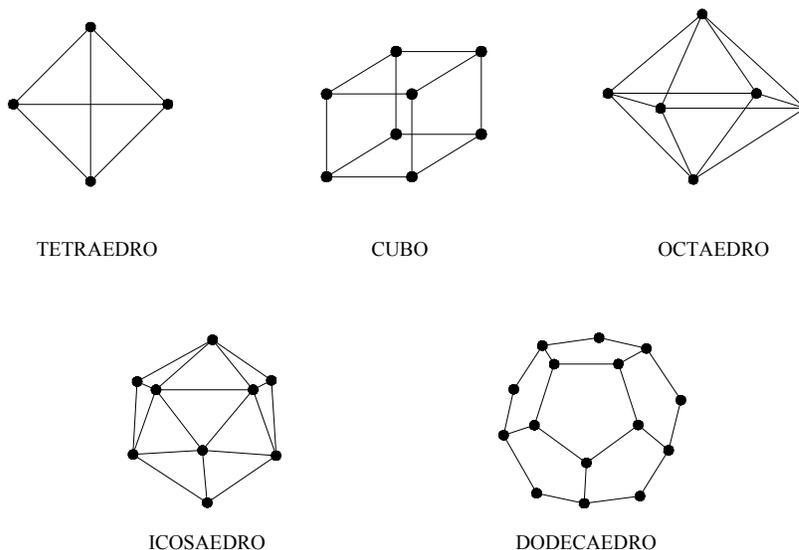
### 2.1.2 Método de Representação de Fronteira

A modelagem geométrica de sólidos por fronteira, conhecida como B-rep (“*boundary representation*”), baseia-se na decomposição do fenômeno a ser modelado em faces (facetas ou superfícies planas bidimensionais), que se encontram nas bordas (linhas ou curvas unidimensionais), unidas por vértices (pontos de dimensão zero) (RAPER, 2000). Cada face é identificada pela orientação de suas bordas, no sentido horário, em relação à faceta ou superfície normal. Para se obter uma representação adequada as B-reps devem ser fechadas, orientáveis, não se cruzar, limitadas (“*bounded*”) e conectadas topologicamente (RAPER, 2000).

Impondo a condição de que as faces são planas e limitadas por vértices unidos por linhas retas, a B-rep será um poliedro. Um poliedro simples obedece à fórmula de Euler:  $V - B + F = 2$ , que relaciona vértices ( $V$ ), bordas ( $B$ ) e faces ( $F$ ).

Esta fórmula pode ser usada para verificar a validade dos poliedros regulares como o cubo (8 cantos, 6 quadrados), octaedro (6 cantos, 8 triângulos), icosaedro (12 cantos, 20 triângulos), tetraedro (4 cantos, 4 triângulos) e dodecaedro (20 cantos, 12 pentágonos) (fig. 2.6).

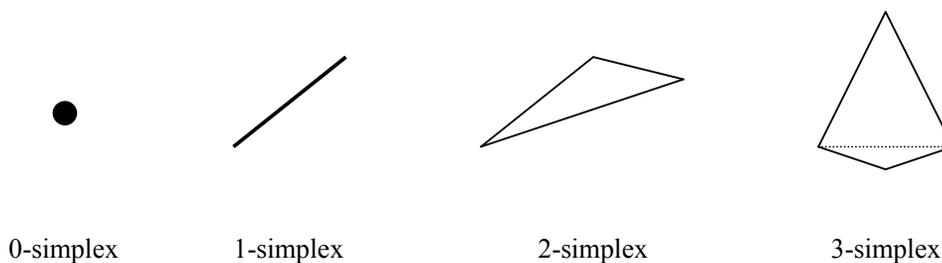
FIGURA 2.6 – POLIEDROS REGULARES



FONTE: ADAPTADO DE : RAPER, 2000.

Na topologia algébrica uma B-rep pode ser construída a partir de qualquer componente geométrico de 0, 1, 2 ou 3 dimensões, que esteja contido no espaço tridimensional. A maioria das estruturas de representação baseadas em B-rep emprega o conceito de simplex, que são primitivas geométricas equivalentes a um ponto (0-simplex), uma reta (1-simplex), um triângulo (2-simplex) e um tetraedro (3-simplex) (fig. 2.7) (CARLSON e FRANK, 1987, citados por RAPER, 2000). A partir destes elementos básicos é possível construir formas geométricas mais complexas.

FIGURA 2.7 – SIMPLEX: 0, 1, 2 e 3 DIMENSÕES



FONTE: RAPER, 2000.

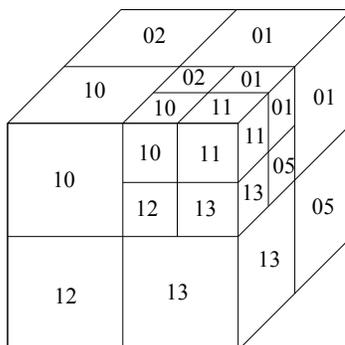
Um dos métodos mais usados na construção de B-reps é o 3-D TIN (rede triangular irregular tridimensional). Esta representação usa a triangulação de Delaunay tridimensional, tetraedros de Delaunay, na qual os pontos amostrados são os vértices dos tetraedros (FANG e PIEGL, 1995, citados por RAPER, 2000). O conjunto de pontos que formam um objeto é envolvido por uma superfície geométrica chamada de objeto convexo envolvente (*convex hull*).

### 2.1.3 Método da Decomposição

Os métodos de decomposição envolvem a quebra do objeto modelado em fatias horizontais, colunas prismáticas, primitivas volumétricas ou células cúbicas, como os *voxels* (RAPER, 2000). A discretização do volume através de *voxels* resulta em um aumento cúbico no tamanho do arquivo, uma vez que as dimensões do cubo são fixas e a resolução adotada é igual para todo o volume. A maior vantagem dos *voxels* é que sua estrutura interna é simples e tem topologia implícita, o que concorre para a diminuição da complexidade no gerenciamento dos dados. A resolução deve ser estabelecida antes do início do processo de modelagem e deve considerar a relação entre resolução ideal, aumento de necessidade de memória e capacidade de processamento, buscando um equilíbrio entre desempenho e acurácia (NETELER, 2001).

Cada *voxel* é armazenado explicitamente como uma matriz tridimensional, ordenada por camadas e linhas e com o valor do seu atributo associado (RAPER, 2000), porém isto requer uma grande capacidade de memória disponível. Para melhorar o desempenho deste modelo, devem-se utilizar métodos para compressão dos dados. O método mais utilizado no caso dos *voxels* é o *octree* (fig. 2.8), equivalente tridimensional da *quadtree*, no qual o espaço é sucessivamente dividido em oito partes até que cada parte seja homogênea. A codificação por *octree* permite a realização de operações Booleanas eficientes sobre os objetos mas demanda maior tempo para processamento (NETELER, 2001).

FIGURA 2.8 – OCTREE

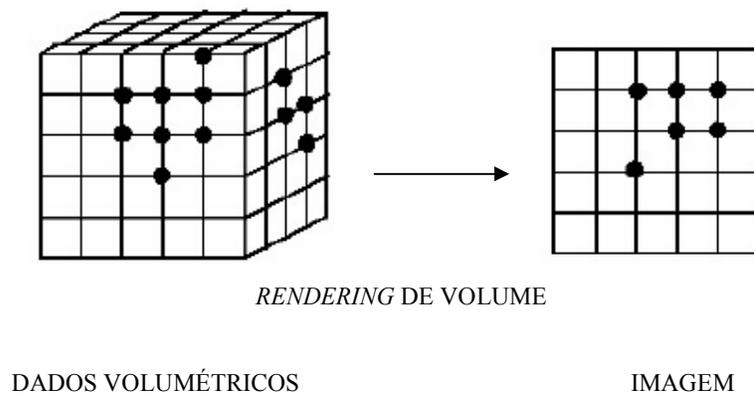


FONTE: ADAPTADO DE : RAPER, 2000.

A *polytree* é uma versão modificada da *octree* que permite identificar o conteúdo geométrico de cada *voxel*. No método *geo-cellular* são criados modelos da superfície superior e da superfície inferior, as quais são cortadas e truncadas para reproduzir a forma do fenômeno e manter a estrutura da grade.

## 2.2 VISUALIZAÇÃO DE DADOS VOLUMÉTRICOS

Os critérios para classificação das técnicas de visualização volumétrica são bastante variados. Pode-se, no entanto, destacar duas categorias principais: a extração de superfícies (*surface fitting*) e o *rendering* direto de volumes (*direct volume rendering*). No caso da extração de superfícies os dados volumétricos são convertidos para uma representação geométrica intermediária, geralmente polígonos, à qual são aplicados os métodos tradicionais de *rendering* de superfície para geração da imagem. Nas técnicas de *rendering* direto de volumes a projeção é feita a partir dos dados, ou seja, gera-se a imagem bidimensional diretamente a partir do dado volumétrico tridimensional, sem a necessidade de representações geométricas intermediárias (fig. 2.9).

FIGURA 2.9 – *RENDERING* DE VOLUME

FONTE: ADAPTADO DE: DREBIN et al., 1988.

Segundo KAUFMAN et al. (1993), a maioria dos métodos mais antigos usava a extração de uma superfície contida no dado, através de primitivas geométricas, pois os métodos de visualização de primitivas geométricas eram bem conhecidos. Para FUJISHIRO et al. (1996), a extração de superfícies permite a visualização somente de uma parte do objeto volumétrico por vez e o usuário deve saber que existem partes não visíveis para poder compreender corretamente a estrutura e comportamento do objeto.

Quando se usa o *rendering* de superfície uma dimensão da informação é perdida. O dado volumétrico é reduzido de tridimensional para bidimensional (superfície) antes de ser projetado para a imagem e esta redução implica em grande perda de informação (BARTROLÍ, 2001). Em resposta a isso, foram desenvolvidas técnicas de *rendering* direto de volume para capturar todo o dado tridimensional em uma única imagem bidimensional (KAUFMAN et al., 1993).

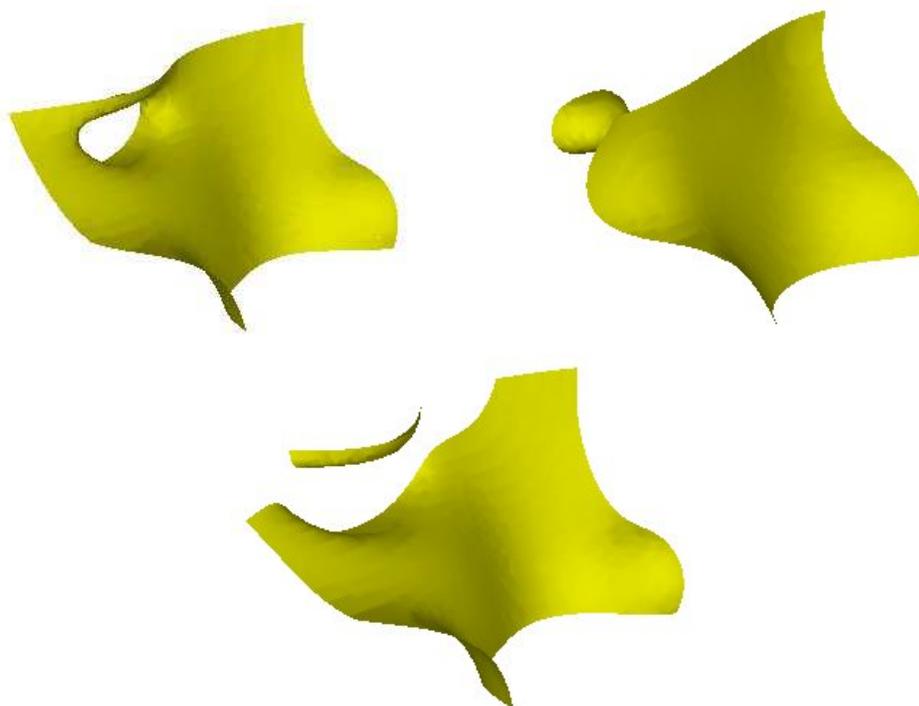
O processo de comunicação visual é mais completo no *rendering* direto de volume uma vez que possibilita a visualização e o entendimento do interior do objeto. Como forma de complementar a ação cognitiva deve se ter condições de manipular o volume, a partir de rotações, aproximações e cortes, bem como incorporar o movimento por meio da animação.

### 2.2.1 Extração de Superfície

Os métodos de extração de superfície ajustam primitivas de superfície, geralmente planas, como polígonos ou retalhos, a contornos de superfícies de valor constante em conjuntos de dados volumétricos (ELVINS, 1992). De uma maneira geral, o processo se inicia com a escolha de um valor de limiarização (*thresholding*) dentro do conjunto de dados para gerar a superfície. Após a definição da isosuperfície são utilizados os métodos de *rendering* de superfície para produzir a imagem (fig.2.10).

Os algoritmos de ajuste de superfícies podem atuar como complemento aos algoritmos de *rendering* direto de volumes (FUJISHIRO et al., 1996). O algoritmo de extração de superfície mais popular é o *marching cubes* (BARTROLÍ, 2001). Dentre os mais conhecidos pode-se também citar: *contour-connecting*, *opaque cube*, *marching tetrahedra*, *dividing cubes* (*cuperille*).

FIGURA 2.10 – EXTRAÇÃO DE SUPERFÍCIE

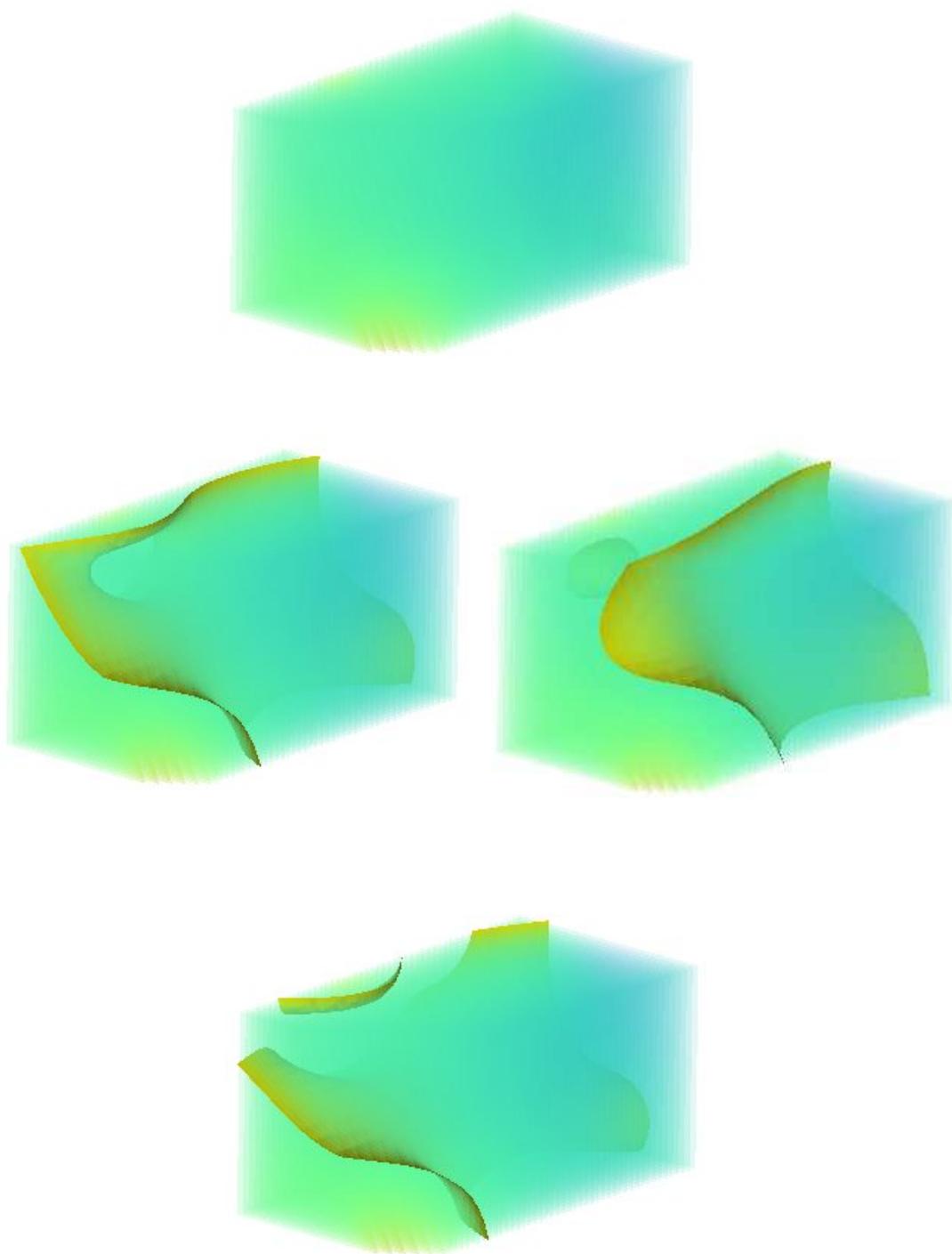


### 2.2.2 *Rendering* Direto de Volume

Nas técnicas de *rendering* direto de volume (fig. 2.11) os dados volumétricos são considerados como uma discretização de uma função contínua definida por  $f(x, y, z)$ . Por meio de interpolação esta função é reconstruída, a partir dos dados amostrados, para todos os pontos no espaço dentro do volume (BARTROLÍ, 2001).

Os métodos de *rendering* direto de volumes são apropriados para criação de imagens a partir de um conjunto de dados que contém feições amorfas como nuvens, fluídos e gases (ELVINS, 1992). Outra vantagem destes métodos é que as operações de classificação e de iluminação são realizadas separadamente, o que permite que a aparente orientação da superfície, obtida na iluminação, seja independente de erros de classificação (PAIVA et al., 1999). Entre as desvantagens destes algoritmos está a necessidade de percorrer todo o conjunto de dados a cada vez que uma imagem tiver que ser gerada (ELVINS, 1992).

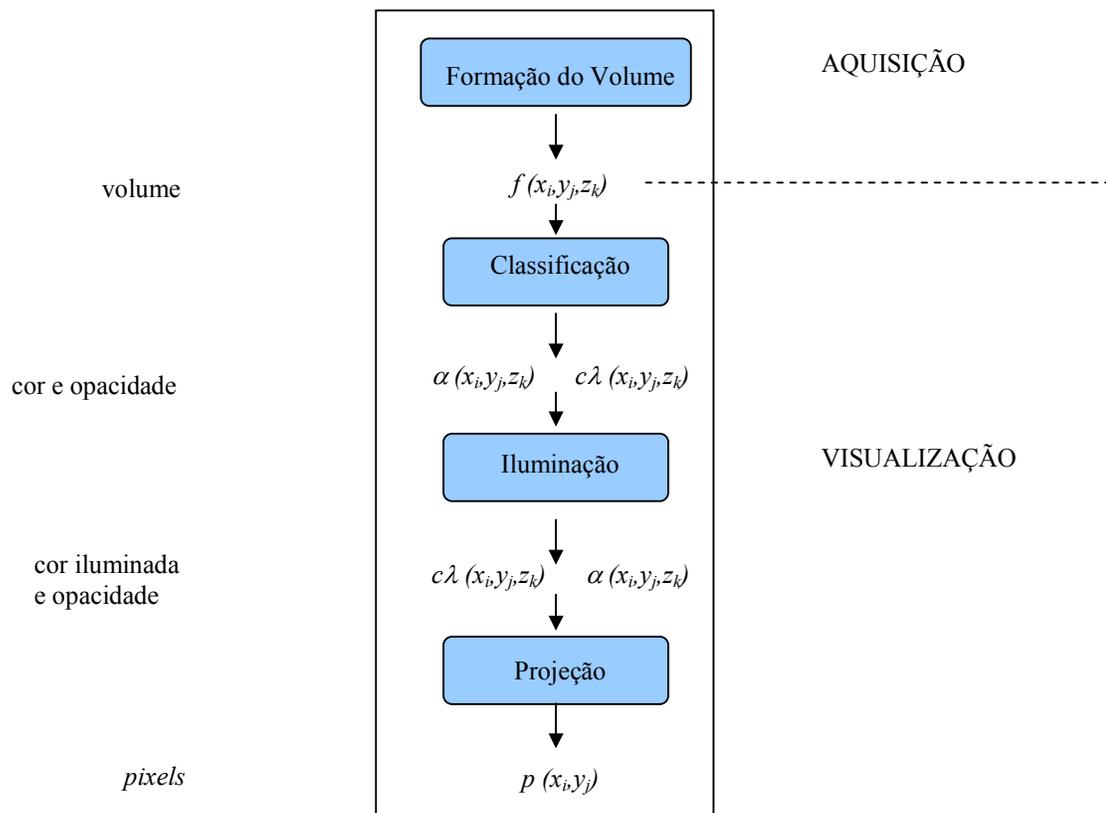
KAUFMAN et al. (1993) classifica os métodos de *rendering* de volumes, de acordo com o meio em que opera, em três grupos principais: espaço objeto, espaço imagem e métodos de domínio. Nos métodos do espaço objeto, os *voxels* são projetados diretamente na tela, ou seja, calcula-se a contribuição de cada *voxel* para o *pixel* da tela e a contribuição combinada gera a imagem final (um exemplo deste tipo de método é o *splatting*) (KAUFMAN et al., 1993). As técnicas do espaço imagem como, por exemplo, o *ray-casting*, traçam raios a partir do plano da imagem (*pixels* da tela) para o volume, e as contribuições dos *voxels* são calculadas ao longo de um feixe de raios e usadas para colorir o *pixel* correspondente (KAUFMAN et al., 1993). E, nos métodos de domínio, o dado espacial é transformado em um domínio alternativo, tal como o domínio de compressão (*compression*), comprimento de onda (*wavelet*) ou frequência (*frequency*), a partir do qual uma projeção é diretamente gerada (KAUFMAN et al., 1993).

FIGURA 2.11 – *RENDERING* DIRETO DE VOLUME

### 2.3 ETAPAS DO PROCESSO DE VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA

A visualização volumétrica envolve a execução de alguns procedimentos básicos. Os passos comuns nos algoritmos de visualização de volumes são: aquisição de dados, através de medidas empíricas ou simulações computacionais; transformação do dado para um formato que seja facilmente manipulável, o que pode exigir operações de mudança de escala, para melhor distribuição do dado, aumento de contraste, filtragem de ruídos e remoção de dados fora da área de alcance; representação do dado em primitivas geométricas ou de apresentação (*display*); e armazenamento, manipulação e visualização das primitivas (ELVINS, 1992). De acordo com PAIVA et al. (1999), as técnicas envolvidas no processo de visualização volumétrica podem ser resumidas na execução de quatro passos, que são a formação do volume, a classificação, a iluminação e a projeção (fig. 2.12).

FIGURA 2.12 – ETAPAS DO PROCESSO DE VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA



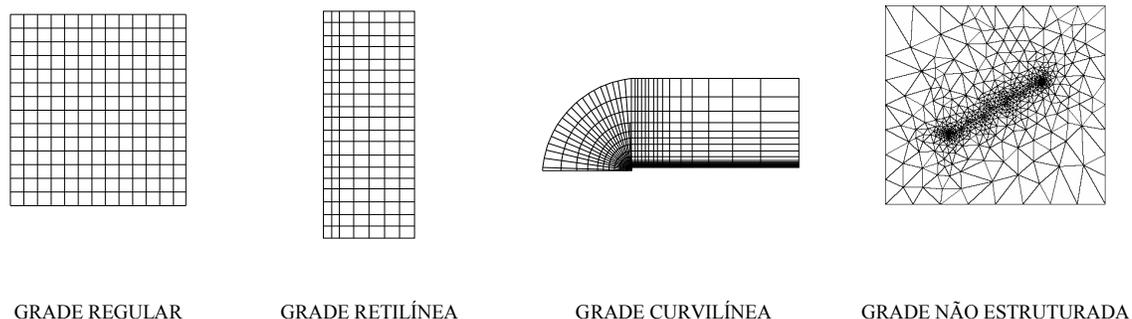
FONTE: ADAPTADO DE : PAIVA et al., 1999.

### 2.3.1 Formação do Volume

Esta etapa envolve a aquisição propriamente dita dos dados (PAIVA et al., 1999). Os dados volumétricos podem ser obtidos pela varredura ou amostragem direta dos objetos e fenômenos, como por exemplo no caso de dados oriundos da tomografia computadorizada, da ressonância magnética e de medições sísmicas; podem ser calculados a partir de modelos computacionais (simulação); ou podem ser gerados através de um modelo geométrico, ou seja, pela conversão de objetos geométricos em modelos de *voxels* (*voxelização*).

As amostras de dados volumétricos estão distribuídas em grades regulares (retilínea uniforme), grades retilíneas (retilínea não uniforme), grades curvilíneas (estruturadas) ou grades não estruturadas (fig. 2.13).

FIGURA 2.13 – TIPOS DE DADOS VOLUMÉTRICOS



FONTE: ADAPTADO DE: PARAVIEW, 2005.

Um conjunto de amostras  $A$ , definido em uma grade regular, é dito isotrópico e contém amostras obtidas em intervalos regularmente espaçados ao longo dos três eixos ortogonais (KAUFMAN et al. 1993). Neste caso  $A$  é o arranjo de valores  $w$  de  $A(x, y,$

$z$ ), definidos apenas nos pontos da grade, e armazenados em uma matriz tridimensional. Através de uma função de interpolação para  $A$ , pode-se estimar o valor de  $w$  na posição  $(x, y, z)$  do centro de cada *voxel*.

Na grade retilínea, as células são alinhadas com os eixos coordenados porém os espaçamentos não são necessariamente regulares (KAUFMAN et al. 1993). Neste tipo de grade a topologia é regular e a geometria é só parcialmente regular.

Quando os elementos da grade sofrem uma transformação não linear, preservando sua topologia, a grade se torna curvilínea e os seus elementos não são alinhados com os eixos (KAUFMAN et al. 1993). Uma grade curvilínea é um conjunto de dados com topologia regular e geometria irregular. A grade pode ter qualquer configuração desde que as células não se sobreponham ou se interceptem.

Na maioria das vezes os dados volumétricos estão na forma de grade não estruturada. Neste caso as células são formadas por poliedros como, por exemplo, tetraedros, hexaedros, pirâmides ou prismas, sem conectividade.

Após sua aquisição é necessário processar os dados e aplicar uma função de interpolação para calcular o valor dos atributos do objeto em todos os pontos no espaço por ele definido (PAIVA et al., 1999). Ao final do processo de formação do volume os dados são reconstruídos, gerando um volume com dimensões entre si proporcionais.

### 2.3.2 Classificação

A classificação está relacionada com a identificação do conteúdo representado em cada *voxel*. Através da classificação é possível identificar as estruturas existentes no conjunto de dados, definindo sua forma e extensão. Nesta etapa é feita a seleção dos atributos ou características dos dados que serão representados pelo volume.

Em técnicas de extração de superfícies, classificar significa definir o valor de limiarização (*threshold*) utilizado para definir a superfície que será poligonizada e posteriormente visualizada (PAIVA et al., 1999). Nas técnicas de *rendering* direto de volume, a etapa de classificação engloba a definição da relação entre os valores dos

dados volumétricos e os valores de cor e opacidade que serão utilizados no algoritmo de visualização, ou seja, envolve a definição das funções de transferência (PAIVA et al., 1999).

A função que transforma as propriedades dos dados volumétricos em propriedades óticas é denominada de função de transferência. A função de transferência mais comum transforma os valores escalares do volume, a partir do seu histograma, diretamente para os valores de cor e de opacidade (BARTROLÍ, 2001). A opacidade é uma medida da transparência de cada *voxel* e descreve a quantidade de luz incidente no *voxel* que é absorvida por ele (PAIVA et al., 1999).

### 2.3.3 Iluminação

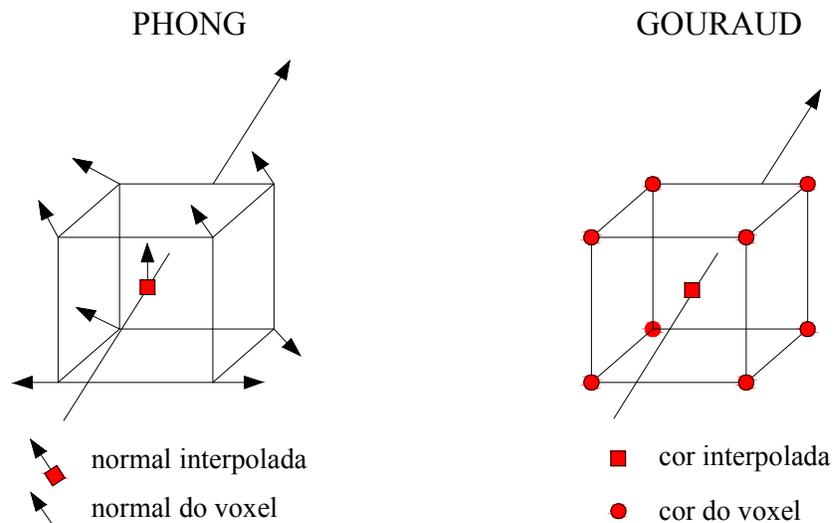
Após o processo de classificação, utiliza-se um modelo de iluminação para calcular o tom de cor em cada ponto do volume, com base nas propriedades do conteúdo de cada *voxel* e nas condições de iluminação externas. Para retratar a realidade é importante definir como a luz interage com o meio que será renderizado (BARTROLÍ, 2001). Nesta etapa a cor especificada para cada *voxel* é modificada pelo mapeamento da função de transferência, de modo a realçar a percepção tridimensional na imagem final (PAIVA et al., 1999).

Nos algoritmos de extração de superfície aplica-se um dos modelos de iluminação utilizados na computação gráfica, geralmente o modelo de Phong (PAIVA et al., 1999) ou Lambert (BARTROLÍ, 2001). E, para o *rendering* direto, é comum utilizar uma adaptação do modelo de Phong, substituindo as normais à superfície por gradientes do campo escalar no *voxel* (PAIVA et al., 1999).

Após a definição do modelo de iluminação, calcula-se a cor de cada *voxel* do volume. Isto é feito, normalmente, usando o algoritmo de Gouraud ou de Phong (fig. 2.14). O algoritmo de Gouraud fornece a intensidade de luz no centro de cada *voxel* do volume e então usa esse valor para interpolar a iluminação em pontos intermediários; e

o algoritmo de Phong interpola o valor da normal e calcula a iluminação nos pontos intermediários (PAIVA et al., 1999).

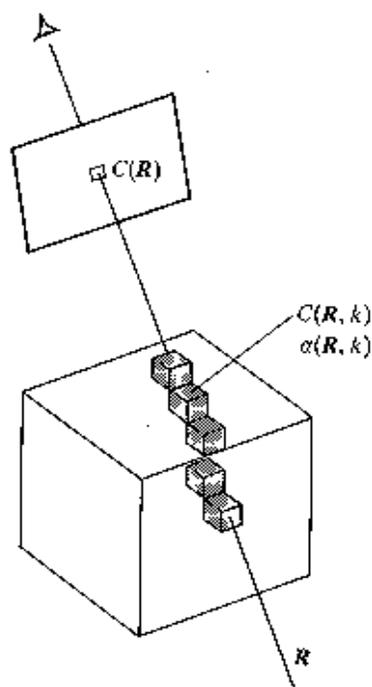
FIGURA 2.14 – ALGORITMOS DE PHONG E GOURAUD



FONTE: ADAPTADO DE : PAIVA et al., 1999.

#### 2.3.4 Projeção

Nesta etapa os *voxels*, ou polígonos mapeados, são projetados sobre a superfície de visualização. Verifica-se a contribuição de cada *voxel* para o valor dos *pixels* (fig. 2.15), sendo que este processo envolve o uso dos métodos de reconstrução volumétrica (interpolação) e a modelagem da forma como a imagem do volume será formada (PAIVA et al., 1999).

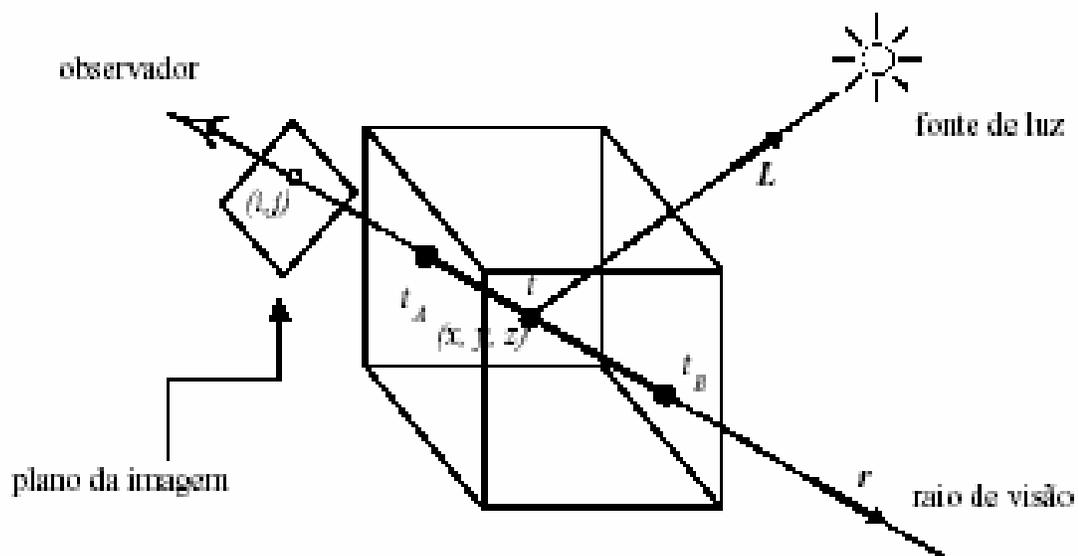
FIGURA 2.15 – PROJEÇÃO DOS *VOXELS*

FONTE: PAWASAUSKAS, 1997.

Nas técnicas de extração de superfícies, a visualização é feita com o auxílio de efeitos de iluminação e remoção de áreas escondidas e o usuário pode escolher o formato de visualização mais apropriado (corte, rotação e especificação do tipo de projeção, ortográfica ou perspectiva). Nos algoritmos de *rendering* direto faz-se a projeção e o cálculo da composição dos *voxels* sobre o plano da imagem (PAIVA et al., 1999).

Para gerar a imagem, devem-se integrar continuamente os efeitos das propriedades óticas ao longo de cada raio de visão (fig. 2.16). Na figura 2.16, o valor do *pixel*  $(i, j)$  é obtido pela integração dos efeitos de interação da luz com os *voxels* ao longo do raio de visão  $r$  (PAIVA et al., 1999).

FIGURA 2.16 – PROJEÇÃO PARA VISUALIZAÇÃO DE VOLUMES



FONTE: ADAPTADO DE : PAIVA et al., 1999.

### 3 DADOS ESPACIAIS E INTERPOLAÇÃO

A representação do conhecimento sobre o meio diz respeito à representação e ao raciocínio acerca dos ambientes dentro dos quais operam agentes inteligentes (GALTON e HOOD, 2004). Segundo estes autores, entender um ambiente é ter o domínio de um modelo estruturado no qual feições importantes são destacadas e suas inter-relações mútuas são disponibilizadas para realização de inferências.

O gerenciamento de recursos naturais depende de informações confiáveis e detalhadas que descrevam a distribuição espacial dos solos, geologia, topografia e uso do solo dentre outros (GRUNWALD e BARAK, 2003). Os fenômenos naturais se desenvolvem no domínio multidimensional. Em geral, tais fenômenos são contínuos, de caráter dinâmico (variam nas três dimensões do espaço e ao longo do tempo) e sua distribuição espacial não é uniforme.

As características dos fenômenos são definidas em função dos dados de que se dispõe para análise e representação destes fenômenos. Estes dados, provenientes de diversas fontes, com diferentes dimensionalidades e de naturezas distintas, devem ser processados, sintetizados e representados.

#### 3.1 DIMENSÃO ESPACIAL

A dimensionalidade dos fenômenos é definida em função das características espaciais que serão representadas. Com base nas suas dimensões o comportamento espacial dos fenômenos pode ser caracterizado como adimensional, no caso de feições pontuais; unidimensional, para feições lineares; bidimensional, quando se trata de feições de área; ou tridimensional, para feições volumétricas. O termo feição engloba todos os objetos ou conceitos que possuem uma localização específica em relação à superfície terrestre (ROBBI, 2000). A multidimensionalidade, representada no espaço

dito quadridimensional (4D), incorpora a noção de tempo para traduzir o dinamismo dos fenômenos (representação espaço-temporal tridimensional).

Na representação dos fenômenos, as feições pontuais são definidas por um par de coordenadas que definem suas posições, as feições lineares são definidas por dois ou mais pares de coordenadas, configurando linhas, e as feições de área apresentam comprimento e largura (fig. 3.1). As feições volumétricas podem ser representadas no plano bidimensional (fig. 3.2-a), considerando apenas as informações planimétricas; pelas suas superfícies (fig. 3.2-b), onde a terceira coordenada atua como atributo; ou pelo seu volume, que apresenta três coordenadas posicionais e mais um atributo (fig. 3.2-c). Associando-se a referência temporal às feições volumétricas se tem a representação 4D.

FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO DE FEIÇÕES PONTUAL, LINEAR E DE ÁREA

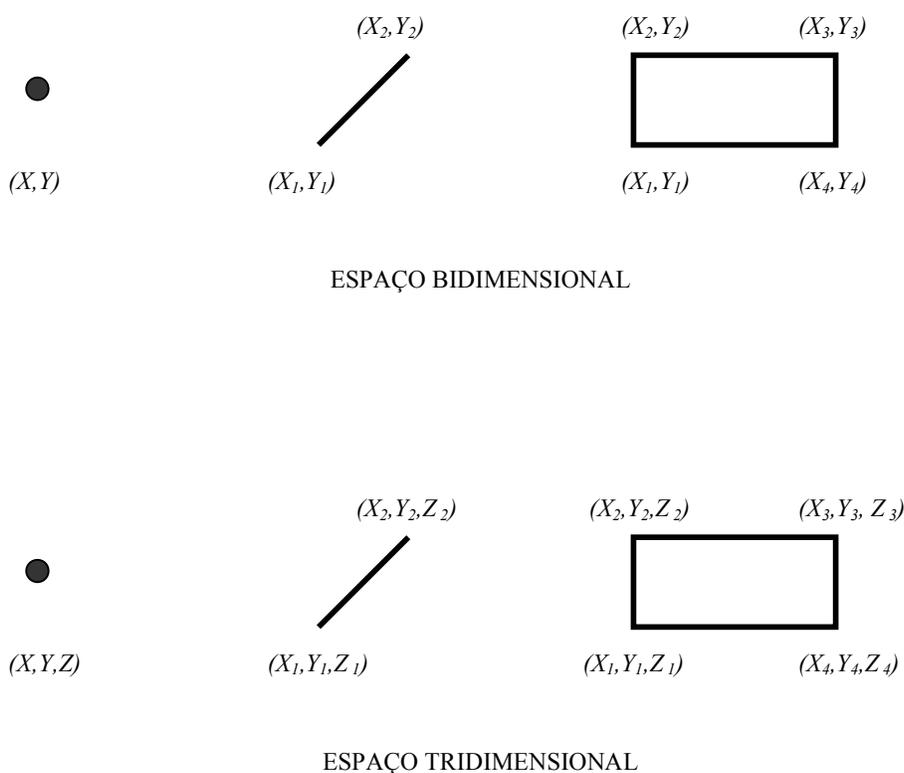
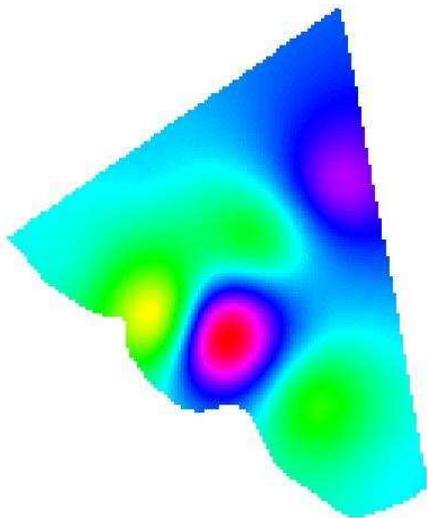
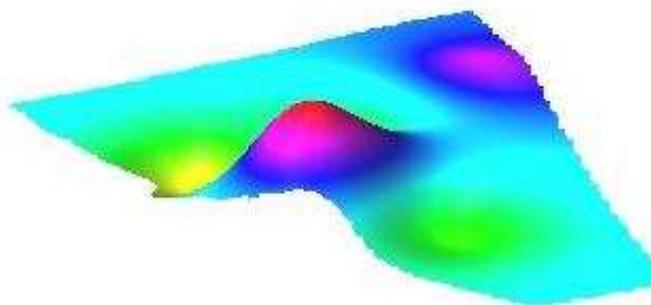


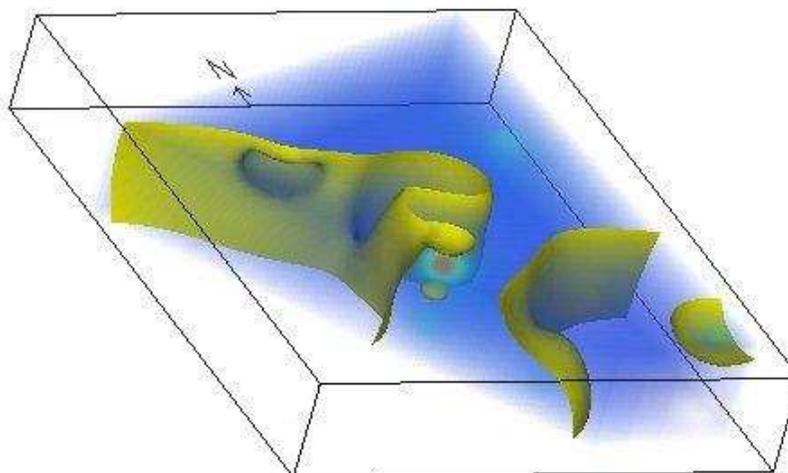
FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO DE FEIÇÃO VOLUMÉTRICA



(a) PLANO - 2D



(b) SUPERFÍCIE - 2 ½ D



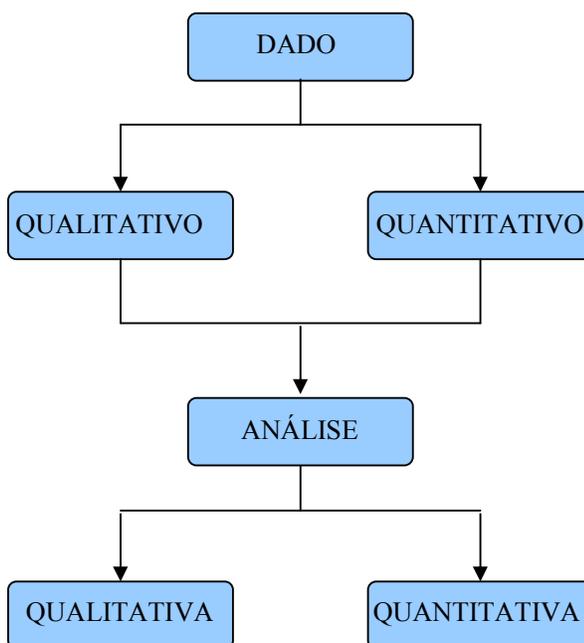
(c) VOLUME - 3D

### 3.2 NATUREZA DOS DADOS

No que tange a natureza dos dados, estes podem ser classificados como quantitativos ou qualitativos. Dados quantitativos medem **o quanto** de alguma coisa, ou seja, são valores numéricos que representam quantidades ou grandezas. Os dados qualitativos definem **o quê**, fornecem nomes ou identificações para categorias de itens similares, servindo apenas para diferenciá-los.

Para agregar significado e valor ao processo de conhecimento do fenômeno em estudo, os dados devem ser traduzidos para um formato que possibilite sua manipulação e processamento. Dados qualitativos (texto) e quantitativos (números) podem ser analisados por métodos qualitativos e quantitativos (BERNARD, 1996) (fig. 3.3).

FIGURA 3.3 – ANÁLISE DE DADOS



A análise quantitativa de dados quantitativos abrange todos os tipos de análises numéricas e matemáticas como, por exemplo, a análise estatística. A análise qualitativa de dados quantitativos é a etapa posterior à análise quantitativa, e envolve a busca por significados para os resultados do processamento quantitativo e a apresentação destes significados (BERNARD, 1996).

Na análise qualitativa de dados qualitativos se faz a transformação de “palavras em outras palavras”. Este processo interpretativo ocorre com base no domínio do conhecimento, entendimento do significado, intuição e experiência do especialista que realiza a análise (BERNARD, 1996).

A análise quantitativa de dados qualitativos pressupõe a transformação do dado de “palavras em números”, ou seja, é necessário codificar o dado para que seja passível de tratamento matemático. De acordo com BERNARD (1996), a decisão sobre os temas ou códigos é um ato qualitativo na condução de um estudo particular, guiado por intuição e experiência sobre o que é importante e o que não é. Uma vez codificado o dado, conforme este autor, o tratamento matemático é uma questão de processamento de dados seguida por ações futuras de análises de dados. Em rigor, portanto, não existe a análise quantitativa de dados qualitativos (BERNARD, 1996).

### 3.3 INTERPOLAÇÃO

Os fenômenos de natureza tridimensional e contínua, como os solos, têm propriedades que variam em todas as dimensões do espaço. Atualmente, a tecnologia para aquisição de informações sobre a superfície terrestre é bastante desenvolvida, porém, para informações contidas na subsuperfície isto não ocorre (GRUNWALD e BARAK, 2003). Assim, as informações sobre as propriedades destes fenômenos são obtidas de maneira discreta, a partir de um número limitado de amostras pontuais medidas em campo. Os dados resultantes destas amostras, após análises e descrições, devem ser estendidos por toda a região para representar a geometria espacial contínua das estruturas e as características morfológicas, físicas, químicas, biológicas e mineralógicas que configuram o fenômeno. Isto pode ser feito através de modelos

matemáticos, com base na localização espacial das amostras, pelo processo de interpolação.

Partindo-se de uma visão ampla e geral, o conceito que norteia a base teórica da interpolação espacial é a similaridade. Nessa linha de raciocínio, os valores de pontos próximos no espaço têm maior probabilidade de serem parecidos do que os pontos que estão mais afastados (*Tobler's Law of Geography*).

A interpolação é necessária quando a superfície discretizada tem nível de resolução, tamanho de célula ou orientação diferente daquele desejado como, por exemplo, tamanho ou orientação de uma grade; quando a superfície contínua é representada por uma estrutura de dados diferente da requerida (transformação de estrutura vetorial em estrutura matricial); ou quando os dados disponíveis não cobrem completamente o domínio de interesse, ou seja, são amostras (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

A interpolação de dados quantitativos é usual e existem diversos métodos desenvolvidos para diferentes tipos de aplicação. Para dados qualitativos, a interpolação é um procedimento mais complexo pela própria natureza do dado. A dificuldade está no estabelecimento de um modelo matemático que descreva o comportamento do fenômeno ou variável qualitativa em questão.

Nos itens subseqüentes apresenta-se o embasamento teórico dos métodos de interpolação que subsidiaram o desenvolvimento desta tese. Ressalta-se, no entanto, a escassez de publicações referentes à interpolação de dados qualitativos. O único trabalho encontrado na literatura, relacionado a esse assunto, foi o artigo de GALTON e HOOD (2004) intitulado “*Qualitative Interpolation for Environmental Knowledge Representation*”.

### 3.3.1 Interpolação Qualitativa

De acordo com GALTON e HOOD (2004), o conhecimento do meio ambiente é amplamente qualitativo e, para seu entendimento, não é essencial e nem suficiente ter o conhecimento detalhado dos valores das variáveis numéricas em localizações espaciais precisamente especificadas. No contexto da Inteligência Artificial, algumas características do meio podem ser representadas por fluentes espaciais, ou seja, funções que relacionam valores com localizações no espaço (*from locations to values*).

Os processos de interpolação e extrapolação são formas de raciocínio não monotônico e os princípios reguladores de tal raciocínio no domínio espacial são a continuidade e a pertinência, aplicados a fenômenos contínuos e discretos, respectivamente. Para fluentes contínuos sobre o espaço contínuo existem técnicas bem pesquisadas, porém, para o entendimento qualitativo do meio, onde os fluentes são tipicamente discretos, são necessários outros métodos (GALTON e HOOD, 2004).

O raciocínio não monotônico faz uso de axiomas e regras de inferência para permitir o raciocínio de conhecimentos incompletos. O raciocínio monotônico ocorre quando se processa informações estáticas, ou seja, durante o processo de resolução do problema o estado dos fatos (verdadeiro ou falso) permanece constante (em: <[www.biocomputer.vilabol.uol.com.br/inteligenciaartificial.html](http://www.biocomputer.vilabol.uol.com.br/inteligenciaartificial.html)>).

Segundo ARAGÃO (2000), as principais características do raciocínio não monotônico são o advento de conclusões contraditórias e a possibilidade da eliminação de conclusões já obtidas. Para o autor, ambas se devem ao tipo de interferência que os argumentos não monotônicos exercem uns sobre os outros, pois, no curso do raciocínio, tais argumentos podem entrar em conflito e até mesmo invalidar o que já fora parcialmente concluído. Isso acontece, por exemplo, quando o conhecimento disponível não basta para solucionar os conflitos encontrados, e o ocasional conhecimento recém adquirido seja tal que cause a eliminação de conclusões anteriormente obtidas.

A interpolação para fluentes espaciais discretos, de acordo com GALTON e HOOD (2004), pode ser formulada da seguinte maneira:

- dado um fluente espacial discreto  $f$ , ou seja, uma função que define a localização espacial de pontos discretos que representam um conjunto  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  de  $n$  valores qualitativos de um determinado fenômeno;
- impondo-se a condição de adjacência mútua a  $f$ , isto é, para qualquer valor  $w_i, w_j \in W$ , uma região sobre a qual  $f = w_i$  deve ser adjacente a outra região na qual  $f = w_j$ .

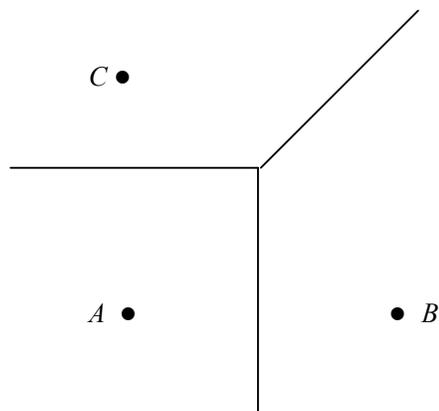
Para aplicar o raciocínio não monotônico a esta função utiliza-se o princípio da pertinência espacial. Assim, supondo que o valor de  $w$  na posição  $r_1$  é conhecido,  $f(r_1) = w$ , e  $r_2$  é uma outra localização. Então, a não ser que se conheça alguma barreira que impeça a propagação do valor de  $w$  entre  $r_1$  e  $r_2$ , assume-se que  $f(r_2) = w$  por *default* (GALTON e HOOD, 2004).

Este procedimento, no entanto, leva a resultados ambíguos, uma vez que  $f$  pode assumir mais do que um valor para o mesmo ponto. Por exemplo, seja  $f(r_1) = w_1$  e  $f(r_2) = w_2 \neq w_1$ , deseja-se conhecer o valor de  $f$  em  $r_3$ . Aplicando a regra da pertinência espacial para  $w_1$  e  $w_2$  e considerando que não há barreiras,  $f$  assume estes dois valores em  $r_3$  (GALTON e HOOD, 2004).

Como forma de evitar esse tipo de conflito é necessário refinar o processo de pertinência espacial. GALTON e HOOD (2004) indicam o método da projeção modificado para realizar o refinamento. Esse método é uma modificação do método da projeção, sugerido por LANG e ASHER (1995), citados em GALTON e HOOD (2004). Os dois métodos utilizam regras baseadas na localização para estabelecer a pertinência espacial. Em outras palavras, usam a interpolação por métodos locais de vizinhança para definir qual fluente, de posição  $r$ , irá contribuir com o valor  $w$  para o fluente adjacente.

No método da projeção o valor a ser estimado é dado pelo vizinho mais próximo. Assim, o valor do fenômeno em um ponto  $r$ ,  $f(r)$ , é dado pelo valor do ponto mais próximo a ele. No plano Euclidiano, este método divide a região em polígonos de Voronoi, com um único ponto contribuindo com o valor qualitativo a ser atribuído para cada polígono (fig. 3.4).

FIGURA 3.4 – POLÍGONOS DE VORONOI PARA TRÊS PONTOS

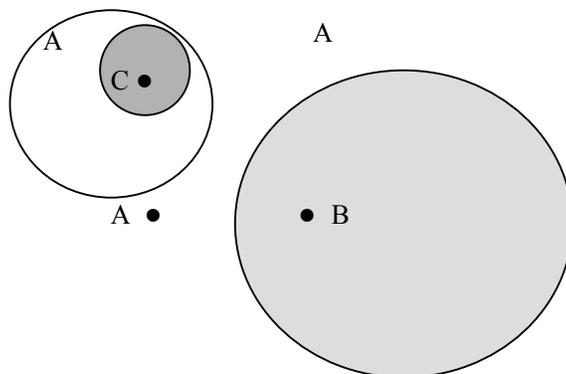


FONTE: ADAPTADO DE: GALTON e HOOD, 2004.

No método da projeção modificado o valor a ser estimado também é dado pelo vizinho mais próximo, porém a distância entre os pontos é ponderada ( $k > 1$ ) em função do grau de importância, previamente definido, que o atributo qualitativo possui. Supondo  $f(r_1) = w_1$  e  $f(r_2) = w_2$  em  $R^2$ , a linha divisória entre o ponto de atributo  $w_1$  e o ponto de atributo  $w_2$ , é o lugar geométrico dos pontos cujas distâncias até  $r_1$  são  $k$  vezes as suas distâncias até  $r_2$  (fig. 3.5), ou seja, um círculo que contém  $r_1$  mas não contém  $r_2$  (GALTON e HOOD, 2004). Dentro do círculo  $f = w_2$  e fora  $f = w_1$ .

A figura 3.5 exemplifica este método. Atribuindo os pesos 3, 2 e 1 para os valores  $A$ ,  $B$  e  $C$  do fenômeno, respectivamente, o círculo mais escuro (menor) corresponde ao valor do atributo  $C$  e consiste dos pontos que estão exatamente três vezes mais longe de  $A$  do que de  $C$ . Da mesma forma, o círculo branco que contém  $C$  consiste de pontos que estão exatamente duas vezes tão longe de  $B$  quanto de  $C$  e corresponde ao valor do atributo  $A$ , pois este tem preferência sobre  $C$  (GALTON e HOOD, 2004). No interior do círculo mais claro (maior) os pontos têm o valor do atributo  $B$  e nos demais lugares o valor do atributo é  $A$ .

FIGURA 3.5 – MÉTODO DA PROJEÇÃO MODIFICADO



FONTE: ADAPTADO DE: GALTON e HOOD, 2004.

### 3.3.2 Interpolação de Dados Quantitativos

A formulação geral do problema da interpolação espacial, segundo MITAS e MITASOVA (1999), pode ser definida da seguinte maneira: dados  $n$  valores de um fenômeno em estudo  $z_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , medidos em pontos discretos  $r_j = (x_j^{[1]}, x_j^{[2]}, \dots, x_j^{[d]})$ ,  $j = 1, \dots, n$ , dentro de uma determinada região do espaço  $d$ -dimensional, encontrar a função  $F(r)$  com  $d$  variáveis que passa pelos pontos dados, ou seja, que atenda a condição:

$$F(r_j) = z_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

A partir da definição matemática estabelecida na equação (1), verifica-se que a designação da dimensão dos interpoladores é feita com uma dimensão a mais do que realmente ocorre. Ou seja, enquanto se pensa em interpolação bidimensional, na realidade está se procedendo a uma interpolação unidimensional, pois o eixo

horizontal é linear. Assim, sucessivamente ocorre para dimensões maiores, como se pode observar nos exemplos subseqüentes:

Para o caso bidimensional, onde são geradas linhas (retas ou curvas) no plano Euclidiano,  $d$  em  $R^1$ , da equação (1) se tem:

$$\begin{aligned} r_j = (x_j^{[1]}) & \Rightarrow r_j = (x_j) \\ F(r_j) = z_j & \Rightarrow F(x_j) = z_j \end{aligned} \tag{2}$$

No caso tridimensional, onde são geradas superfícies no espaço Euclidiano, tem-se  $d$  em  $R^2$ , assim:

$$\begin{aligned} r_j = (x_j^{[1]}, x_j^{[2]}) & \Rightarrow r_j = (x_j, y_j) \\ F(r_j) = z_j & \Rightarrow F(x_j, y_j) = z_j \end{aligned} \tag{3}$$

E, para o caso 4-dimensional, onde são gerados volumes, tem-se  $d$  em  $R^3$ , portanto:

$$\begin{aligned} r_j = (x_j^{[1]}, x_j^{[2]}, x_j^{[3]}) & \Rightarrow r_j = (x_j, y_j, w_i) \\ F(r_j) = z_j & \Rightarrow F(x_j, y_j, w_i) = z_j \end{aligned} \tag{4}$$

Existem diversas funções que atendem aos requisitos estabelecidos pela formulação geral do problema da interpolação espacial (equação 1). Por isso, devem-se impor algumas condições adicionais para definir qual método de interpolação adotar. A escolha destas condições adicionais depende da característica do fenômeno a ser modelado e do tipo de aplicação. Algumas condições podem ser baseadas em

conceitos geoestatísticos (*krigagem*), na localização (vizinho mais próximo), na suavidade e tensão (*splines*), ou em funções (polinomiais, multi-quádricas) (MITAS e MITASOVA, 1999).

Os métodos para interpolação podem ser divididos em grupos ditos globais ou locais. De acordo com BURROUGH e McDONNELL (1998), os interpoladores globais usam todos os dados disponíveis para realizar estimativas para toda a área de interesse; os interpoladores locais operam dentro de uma região menor no entorno do ponto a ser estimado, de forma a garantir que as estimativas sejam feitas somente com os dados de sua vizinhança próxima; e os métodos geoestatísticos se baseiam na autocorrelação espacial.

### 3.3.2.1 Métodos Locais de Vizinhança

Nos métodos locais, o valor do fenômeno nos pontos não amostrados é calculado por funções cujos coeficientes são definidos a partir de pontos situados dentro de uma região local de interesse (MITAS e MITASOVA, 1999). O valor da superfície  $F(r)$  em um determinado ponto é representado como uma função linear, ponderada em relação aos valores dos dados próximos a este ponto. Assim:

$$F(r) = w_i \cdot z_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

Onde:

$n$  é o número de pontos próximos;

$w_i$  peso atribuído aos pontos

A diferença entre os diversos interpoladores locais está na maneira como se selecionam os pontos para o cálculo da função, e na forma como são atribuídos os pesos aos valores dos dados nestes pontos (OKABE et al., 1998).

a) Interpolação pelo inverso da distância ponderada

Este método baseia-se na suposição de que o valor do fenômeno em um ponto não amostrado pode ser o valor da média ponderada, em função das distâncias aos pontos situados dentro de um raio definido, ou a partir de um determinado número de pontos. Os pesos são inversamente proporcionais à distância entre o ponto a ser amostrado e as amostras (MITAS e MITASOVA, 1999). Portanto, para um determinado ponto não amostrado na posição  $r$ , tem-se:

$$F(r) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z(r_i)}{n} \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

sendo:

$$w_i = \frac{1}{(d_i)^k} \quad (7)$$

onde:

$k$  expoente da distância

$w_i$  pesos dos pontos próximos;

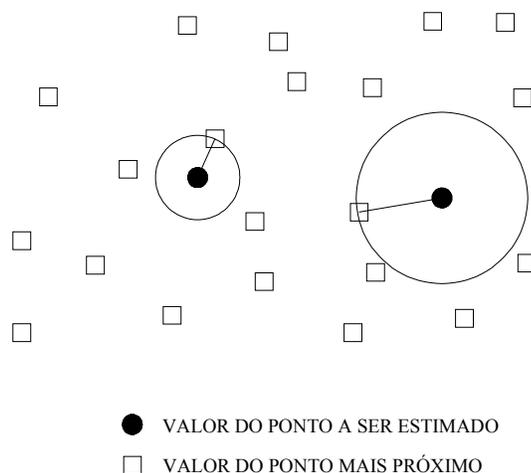
$z(r_i)$  observação no ponto dado;

$d_i$  distância do ponto dado ao ponto que será estimado (calculado).

b) Interpolação pelo vizinho mais próximo

Nesta interpolação, a seleção do ponto que será utilizado para estimar o valor do fenômeno no ponto não amostrado é feita com base no vizinho mais próximo, ou seja, para cada ponto é atribuído o valor da amostra mais próxima a este ponto (fig. 3.6). Este método deve ser usado quando se deseja manter os valores das amostras sem gerar valores intermediários.

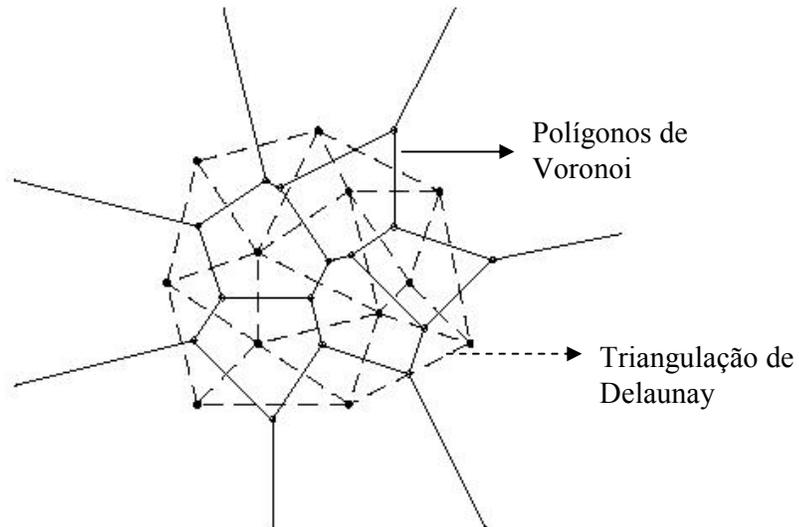
FIGURA 3.6 – VIZINHO MAIS PRÓXIMO



A extensão dos dados pontuais discretos para as regiões representativas do domínio espacial de cada ponto pode ser realizada por meio de polígonos de Voronoi, para o plano bidimensional, e poliedros de Voronoi, no caso tridimensional.

Os polígonos de Voronoi dividem a região de forma que esta fique totalmente definida pela distribuição dos pontos amostrados, com um ponto para cada polígono. Em torno de cada ponto é construído um polígono convexo, de modo que dois polígonos contíguos possuam somente uma aresta em comum. As linhas que unem os pontos representam a triangulação de Delaunay. Os nós do polígono de Voronoi são coincidentes com os circuncentros dos triângulos de Delaunay e as bissetrizes perpendiculares às arestas dos triângulos de Delaunay formam as arestas dos polígonos de Voronoi (fig. 3.7). Esta dualidade possibilita obter polígonos de Voronoi a partir da triangulação de Delaunay e vice-versa. No caso de pontos regularmente espaçados, os polígonos têm lados iguais ao espaçamento da malha de pontos e, quando os pontos são irregularmente espaçados, resulta em uma malha de polígonos irregulares (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

FIGURA 3.7 - POLÍGONOS DE VORONOI E TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY



FONTE: INPE, 2001.

Matematicamente o polígono de Voronoi pode ser definido da seguinte maneira: seja um número finito de  $n$  pontos  $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ , no plano Euclidiano, com  $2 \leq n < \infty$ . O plano pode ser particionado de modo que cada ponto esteja associado ao elemento de  $P$  mais próximo de si. O conjunto dos pontos associados ao local  $p_i$  constitui o polígono de Voronoi de  $p_i$ , denotado  $V(p_i)$ . Este polígono é, portanto, o lugar geométrico dos pontos no plano que estão mais próximos de  $p_i$  do que de qualquer outro elemento de  $P$  (INPE, 2001), ou seja:

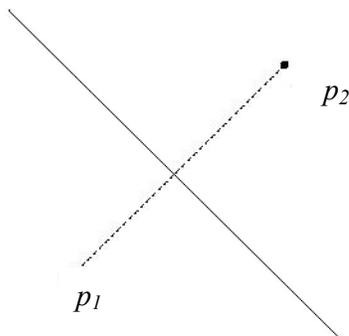
$$V(p_i) = \{x \mid d(p_i - x) \leq d(p_j - x) \text{ para } j \neq i\} \quad (8)$$

O conjunto destes polígonos é denominado de diagrama de Voronoi de  $P$ , e é dado por:

$$V' = \{V(p_1), V(p_2), \dots, V(p_n)\} \quad (9)$$

Considerando dois locais,  $p_1$  e  $p_2$ , o diagrama de Voronoi consiste na mediatriz do segmento  $p_1 p_2$  (fig. 3.8). O polígono de Voronoi correspondente a  $p_1$  é constituído pelos pontos no semiplano que contém  $p_1$  e o polígono de Voronoi correspondente a  $p_2$  é constituído pelos pontos no semiplano que contém  $p_2$ .

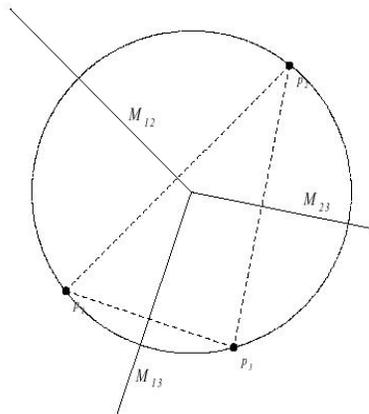
FIGURA 3.8 – DIAGRAMA DE VORONOI PARA DOIS LOCAIS



FONTE: INPE, 2001.

Considerando três locais,  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ , o diagrama de Voronoi será formado pelas mediatrizes das arestas  $p_1 p_2$ ,  $p_1 p_3$  e  $p_2 p_3$ , partindo do circuncentro do triângulo (fig. 3.9). O circuncentro é o centro do círculo definido pelos vértices do triângulo (FELGUEIRAS, 2001).

FIGURA 3.9 – DIAGRAMA DE VORONOI PARA TRÊS LOCAIS

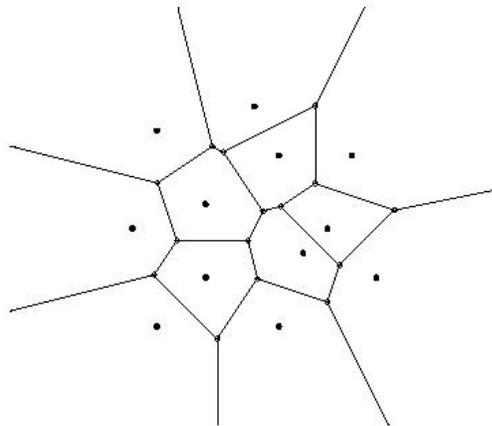


FONTE: INPE, 2001.

Para um número maior de locais (fig. 3.10), deve-se considerar as mediatrizes dos segmentos definidos entre cada par de locais: seja a mediatriz ( $M_{ij}$ ) entre os locais  $p_i$  e  $p_j$  e o semiplano ( $S_{ij}$ ) definido por  $M_{ij}$  e que contém  $p_i$ . Então,  $S_{ij}$  contém todos os pontos do plano que estão mais próximos de  $p_i$  do que de  $p_j$ . O polígono de Voronoi de  $p_i$  é obtido pela combinação de todos os semiplanos  $S_{ij}$ , com  $i \neq j$ , logo:

$$V(p_i) = \bigcap_{i \neq j} S_{ij} \quad (10)$$

FIGURA 3.10 – DIAGRAMA DE VORONOI (12 LOCAIS)



FONTE: INPE, 2001.

Considerando  $m$  dimensões do espaço ( $R^m$ ), a região é dividida em poliedros de Voronoi (fig. 3.11). Assim, estendendo a definição para o espaço Euclidiano  $m$ -dimensional, tem-se:  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \subset R^m$ , onde  $2 \leq n < \infty$ . O poliedro  $m$ -dimensional de Voronoi associado a  $p_i$  é a região dada por:

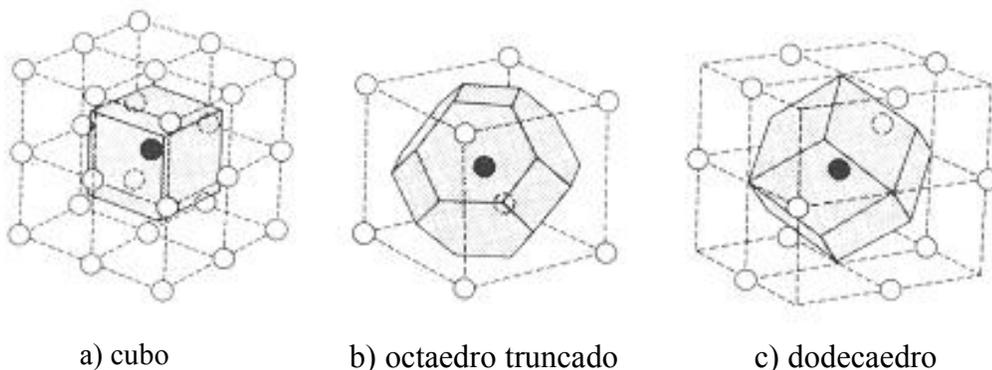
$$V(p_i) = \{x \mid d(p_i - x) \leq d(p_j - x) \text{ para } j \neq i\} = \bigcap_{i \neq j} S_{ij}, \quad (11)$$

sendo que  $p_i$  e  $p_j \in R^m$ .

O conjunto destes poliedros é o diagrama  $m$ -dimensional de Voronoi gerado por  $P$ , e é dado por:

$$V'(P) = \{V(p_1), V(p_2), \dots, V(p_n)\} \quad (12)$$

FIGURA 3.11 – EXEMPLOS DE POLIEDROS DE VORONOI



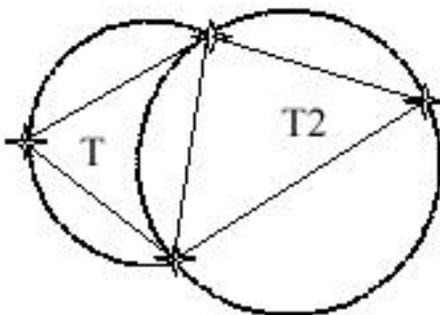
FONTE: OKABE et al., 1998.

Na triangulação de Delaunay, os triângulos irregulares são formados a partir da conexão de três entre quatro pontos amostrais vizinhos. Como é possível gerar duas malhas triangulares a partir de quatro pontos, deve-se adotar um critério de seleção para se obter uma solução única. O critério utilizado na triangulação de Delaunay é o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo, ou seja, a malha final deve conter triângulos os mais próximos possíveis de equiláteros (FELGUEIRAS, 2001). Uma forma equivalente de se implementar a triangulação de Delaunay utiliza o critério do circuncírculo, no qual o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo não pode conter qualquer outro ponto além dos vértices do triângulo em questão (fig. 3.12). A estimativa de valores em pontos não amostrados é feita por uma função derivada do mosaico triangular dos pontos amostrados (MITAS e MITASOVA, 1999).

A triangulação de Delaunay pode ser obtida a partir dos polígonos de Voronoi. Da mesma forma, pode-se gerar tetraedros de Delaunay a partir dos poliedros de Voronoi (fig. 3.13).

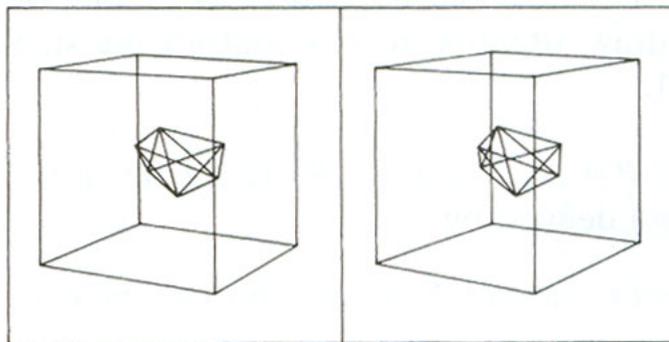
FIGURA 3.12 - CRITÉRIO DO CIRCUMCÍRCULO PARA GERAÇÃO DE TRIANGULAÇÕES DE DELAUNAY

T e T2 são triângulos de Delaunay.



FONTE: ADAPTADO DE: FELGUEIRAS, 2001.

FIGURA 3.13 – TETRAEDROS DE DELAUNAY



FONTE: OKABE et al., 1998.

### 3.3.2.2 Splines

Originalmente, *spline* é o termo inglês utilizado para denominar as antigas réguas flexíveis, muito usadas no desenho de curvas que contêm pontos pré-determinados (BURROUGH e McDONNELL, 1998). A *spline* se baseia na condição de que a função de interpolação deve passar pelos pontos amostrados ou próximos a eles e, ao mesmo tempo, deve ser o mais suave possível. Estes dois requisitos são combinados em uma única condição de minimização da soma dos desvios, a partir dos pontos amostrados, e suavização da seminorma da função *spline* (MITAS e MITASOVA, 1999).

A representação de uma curva normal tridimensional é dada por:

$$x = x, y = f(x), z = g(x) \quad (13)$$

Ou, na forma paramétrica:

$$P(t) = x(t), y(t), z(t), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (14)$$

Desta maneira, o ponto inicial do segmento de curva corresponde a  $t = 0$  e o ponto final corresponde a  $t = 1$ . Portanto, uma curva paramétrica cúbica é aquela onde cada  $x$ ,  $y$  e  $z$ , são representados como um polinômio cúbico (polinômio de 3º grau) em  $t$ :

$$\begin{aligned} x(t) &= a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x \\ y(t) &= a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y \\ z(t) &= a_z t^3 + b_z t^2 + c_z t + d_z \end{aligned} \quad \text{com } 0 \leq t \leq 1 \quad (15)$$

Derivando as funções (15) em relação a  $t$ , obtém-se o vetor tangente à curva no valor  $t$ :

$$\begin{aligned}x'(t) &= \frac{dx}{dt} = 3a_x t^2 + 2b_x t + c_x \\y'(t) &= \frac{dy}{dt} = 3a_y t^2 + 2b_y t + c_y \\z'(t) &= \frac{dz}{dt} = 3a_z t^2 + 2b_z t + c_z\end{aligned}\tag{16}$$

As inclinações da curva são obtidas pelas razões entre componentes do vetor tangente ( $dy/dx$ , por exemplo). Como se trabalha com mais de um segmento de curva, é necessário que haja continuidade entre os segmentos adjacentes, ou seja, o ponto de encontro de duas curvas deve ter a mesma posição ( $C^0$  – 0ª ordem de continuidade) e a mesma inclinação ( $C^1$  – 1ª ordem de continuidade).

O termo *spline* denota qualquer conjunto de polinômios de grau  $n$  que são contínuos em até pelo menos a primeira derivada. Os *splines* natural e forçado (com tensão) são contínuos até a segunda derivada, mas diferem na especificação das injunções nos pontos terminais. A *spline* natural cúbica aplica a injunção de que a segunda derivada nos pontos terminais é nula ( $C^2$  - 2ª ordem de continuidade) e, para as *splines* com tensão, assume-se que os valores da primeira derivada nos pontos terminais são explicitamente definidos (MENEZES, 1992).

A *spline* natural cúbica é matematicamente equivalente à régua flexível. A *spline* natural cúbica é um polinômio cúbico, contínuo em  $C^0$ ,  $C^1$  e  $C^2$ , que passa pelos pontos de controle. Os coeficientes polinomiais para as *splines* naturais cúbicas dependem de todos os pontos de controle, portanto, o movimento de um ponto afeta toda a curva e, conseqüentemente, demanda um tempo computacional maior para redesenhar esta curva (FOLEY et al., 1992).

Existem vários tipos de *splines* que diferem nas especificações das injunções, ou seja, são definidos pelas injunções nos pontos terminais (inicial e final) de um segmento de curva *spline*, pelos vetores tangentes nestes pontos e pela continuidade entre os segmentos de curvas adjacentes.

As *B-splines* são compostas por segmentos de curva cujos coeficientes polinomiais dependem apenas de alguns pontos de controle (controle local). Desta forma, a alteração da posição de um ponto de controle afeta apenas uma pequena parte da curva, o que reduz o tempo para recalcular os coeficientes. Um segmento de curva não precisa passar, necessariamente, por seus pontos de controle. As duas condições de continuidade de um segmento vêm dos segmentos adjacentes.

As *B-splines* cúbicas aproximam uma série de  $m+1$  pontos de controle  $P_0, P_1, \dots, P_m$ ,  $m \geq 3$ , através de uma curva composta por  $m - 2$  segmentos  $C_3, C_4, \dots, C_m$ . Cada uma destas curvas é definida em seu próprio domínio  $0 \leq t < 1$ , porém pode-se ajustar o parâmetro de forma que o domínio para os vários segmentos de curva seja seqüencial. Então, o alcance do parâmetro no qual  $C_i$  é definido é  $t_i \leq t < t_{i+1}$ , para  $3 \leq i \leq m$ . No caso de  $m = 3$ , há somente um segmento de curva  $C_3$  definido no intervalo  $t_3 \leq t < t_4$  por quatro pontos de controle ( $P_0$  a  $P_3$ ).

Para cada  $i \geq 4$ , existe um ponto de junção (nó) entre  $C_{i-1}$  e  $C_i$  no valor do parâmetro  $t_i$  (valor do nó). Os pontos inicial e final em  $t_3$  e  $t_{m+1}$  também são chamados nós, existindo assim um total de  $m-1$  nós.

Cada segmento de curva de uma *B-spline* é definido por quatro pontos de controle. O segmento  $C_i$  é definido pelos pontos  $P_{i-3}, P_{i-2}, P_{i-1}$  e  $P_i$ . Então, o vetor geométrico *B-spline* ( $G_{bsi}$ ) para o segmento  $P_i$  é:

$$G_{bsi} = \begin{bmatrix} P_{i-3} \\ P_{i-2} \\ P_{i-1} \\ P_i \end{bmatrix}, \quad 3 \leq i \leq m \quad (17)$$

Sendo o vetor linha  $T_i = [(t-t_i)^3 \quad (t-t_i)^2 \quad (t-t_i) \quad 1]$ , a fórmula que define a *B-spline* para o segmento  $i$  é:

$$C_i(t) = T_i \cdot M_{bs} \cdot G_{bsi}, \quad t_i \leq t < t_{i+1} \quad (18)$$

onde:

$G_{bsi}$  vetor geométrico B-spline

$M_{bs}$  matriz B-spline

Para gerar a curva inteira, aplica-se a equação (18) para  $3 \leq i \leq m$ .

A matriz B-spline relaciona as injunções geométricas das funções de base com os coeficientes dos polinômios é dada por:

$$M_{bs} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

As funções de base B-spline são dadas pela fórmula:

$$B_{bs} = T_i \cdot M_{bs} \quad (19)$$

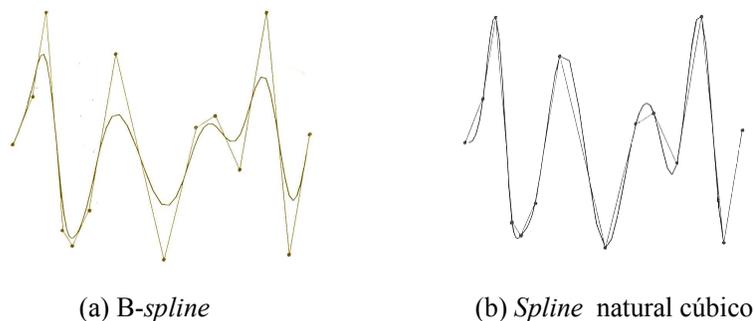
Como as funções são as mesmas para todos os segmentos, tem-se:

$$B_{bs} = T \cdot M_{bs} = [B_{bs-3} \quad B_{bs-2} \quad B_{bs-1} \quad B_{bs0}]$$

$$B_{bs} = \frac{1}{6} [(1-t)^3 \quad 3t^3 - 6t^2 + 4 \quad -3t^3 + 2t^2 + 3t + 1 \quad t^3], \quad 0 \leq t < 1 \quad (20)$$

A figura 3.14 ilustra os resultados obtidos para um mesmo conjunto de dados, utilizando-se os interpoladores B-spline e spline natural cúbico.

FIGURA 3.14 – INTERPOLADORES



FONTE: MENEZES, 1992.

As B-Splines ditas não racionais uniformes (*uniform nonrational B-splines*) são aquelas cujos nós estão espaçados em intervalos iguais do parâmetro  $t$ . Quando o espaçamento é não uniforme entre os nós se têm as B-splines não racionais não uniformes (*nonuniform nonrational B-splines*). O termo não racional é usado para distinguir este tipo de *splines* das curvas polinomiais cúbicas racionais, onde  $x(t)$ ,  $y(t)$  e  $z(t)$  são definidos como a razão de dois polinômios cúbicos.

Os métodos B-spline que utilizam funções capazes de representar tanto os sólidos paramétricos primitivos como os de formas irregulares (*free form*) são conhecidos por B-splines racionais não uniformes (NURBS – *non-uniform rational B-splines*) (RAPER, 2000).

Uma curva B-spline não uniforme é definida por:

$$C_i(t) = P_{i-3} \cdot B_{i-3}(t) + P_{i-2} \cdot B_{i-2}(t) + P_{i-1} \cdot B_{i-1}(t) + P_i \cdot B_i(t) \quad 3 \leq i \leq m, \quad t_i \leq t < t_{i+1} \quad (21)$$

onde:

- $t$  parametriza a posição do ponto ao longo da curva
- $P_i$  pontos de controle definidos para valores dados de  $t$ , denominados nós ( $t_i$ )
- $t_i$  nós
- $B_i$  funções de base que atribuem peso aos pontos de controle

As funções de base são encontradas recursivamente por:

$$B_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & (t_i \leq t < t_{i+1}) \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad (22)$$

$$B_{i,2}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} B_{i,1}(t) + \frac{t_{i+2}-t}{t_{i+2}-t_{i+1}} B_{i+1,1}(t) \quad (23)$$

$$B_{i,3}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+2}-t_i} B_{i,2}(t) + \frac{t_{i+3}-t}{t_{i+3}-t_{i+1}} B_{i+1,2}(t) \quad (24)$$

$$B_i(t) \equiv B_{i,4}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+3}-t_i} B_{i,3}(t) + \frac{t_{i+4}-t}{t_{i+4}-t_{i+1}} B_{i+1,3}(t) \quad (25)$$

A equação (22) iguala as funções de base a zero, exceto nos intervalos onde os nós estão crescendo. A interpolação linear entre estas constantes é feita pela equação (23). Os polinômios quadráticos são fornecidos pela equação (24), que faz a interpolação linear entre as funções lineares e, na equação (25) é feita outra interpolação linear para obter os polinômios cúbicos finais.

Esta hierarquia da interpolação linear preserva a normalização original, de forma que em cada intervalo as funções de base somam 1. Isto significa que a curva fica limitada por um polígono cujos vértices são pontos de controle, com as funções de base controlando o espaçamento entre eles. As repetições forçam a curva a passar pelo primeiro e último pontos de controle, sendo que os dois pontos de controle intermediários estabelecem as inclinações dos contornos (*boundaries*) (GERSHENFELD, 1999).

As *B-splines* podem ser generalizadas para n-dimensões e parametrizadas para mais de um grau de liberdade. Dividindo os polinômios por um polinômio de

estabelecimento de escala para cada coordenada se têm as NURBS. Seja a forma geral de um segmento de curva cúbico racional:

$$x(t) = \frac{X(t)}{W(t)}, y(t) = \frac{Y(t)}{W(t)}, z(t) = \frac{Z(t)}{W(t)} \quad (26)$$

A curva é dada por:

$$C(t) = [X(t) \ Y(t) \ Z(t) \ W(t)] \quad (27)$$

Quando  $W(t)=1$ , e os polinômios na curva são do tipo *B-spline*, têm-se as NURBS. As curvas racionais não variam mediante rotação, translação, mudança de escala e transformação perspectiva.

Ao se trabalhar com dados amostrados em duas ou três dimensões, os efeitos das variações naturais e erros de medição podem ocasionar picos e depressões no ajuste da *spline*. Estes efeitos podem ser removidos através das *splines* de lâmina fina (*thin plate splines*), que substituem a superfície da *spline* por uma outra superfície, suavizada pela média local. Os métodos para interpolação de superfície, como no caso linear, também pressupõem que a função passe o mais próximo e suavemente possível dos pontos amostrados (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

No caso dos dados conterem uma fonte de erros aleatórios, tem-se:

$$y(x_i) = z(x_i) + \varepsilon(x_i) \quad (28)$$

onde:

$z$  é o valor medido de um atributo no ponto  $x_i$

$\varepsilon$  está associado ao erro aleatório.

A *spline*  $p(x)$  deve passar próxima dos valores amostrados, portanto a *spline* suavizada é a função  $f$  que minimiza a soma dos desvios, ou seja, minimiza a curvatura da superfície:

$$z_i = A(f) + \sum w_i^2 [f(x_i) - y(x_i)]^2 \quad (29)$$

Nesta equação, o primeiro termo representa a suavidade da função  $f$  e o segundo termo representa a sua proximidade ou fidelidade ao dado. Os pesos são inversamente proporcionais ao erro da variância, refletindo a importância de cada característica:

$$w_i^2 = p / \text{var} [\varepsilon(x_i)] = p / s_i^2 \quad (30)$$

Como forma de sintetizar todas as propriedades desejadas em uma única função, MITAS e MITASOVA (1999) propõem a *spline* regularizada com tensão (*regularized spline with tension* – RST). Esta função inclui a soma de todas as derivadas até o infinito, com os pesos decrescendo rapidamente. A superfície resultante possui derivadas regulares de todas as ordens (similar à Gaussiana), sendo assim apropriada para análise diferencial e cálculo de curvaturas. Pode também ser generalizada para qualquer dimensão.

A *spline* regularizada com tensão utiliza funções de interpolação que minimizam a curvatura da superfície com derivadas de  $n$ -ordens. A ponderação das derivadas permite determinar as funções de base para o domínio bi e tridimensional. As funções têm derivadas regulares e incorporam um parâmetro de tensão que define a característica da superfície ou volume resultante, ou seja, através desse parâmetro a *spline* se aproxima ou se distancia dos valores amostrados. Como as funções de interpolação da RST se baseiam apenas nas distâncias, estas funções não variam mediante rotação, mas variam com a mudança de escala (MITASOVA e MITAS, 1993).

#### 4 REPRESENTAÇÃO E VISUALIZAÇÃO DOS VOLUMES DE SOLOS

O problema de pesquisa tratado nesta tese é como representar e visualizar volumes para avaliação de solos. A metodologia proposta para o desenvolvimento das atividades necessárias à solução do problema em questão, de forma a atingir os objetivos propostos, é formulada a partir das seguintes premissas:

A **visualização do volume** pressupõe a formação do volume;

Para a **formação do volume** são necessários dados volumétricos;

Os **dados volumétricos** são obtidos a partir de interpolação tridimensional;

O processo de **interpolação tridimensional** é feito a partir de **dados tridimensionais**.

Do ponto de vista científico, um dos principais problemas para se trabalhar com volumes é a disponibilidade de dados tridimensionais (NETELER, 2001). As características dos fenômenos são definidas em função dos dados que se dispõem para análise e representação destes fenômenos.

O fenômeno em estudo nesta tese é o solo. O solo é uma feição volumétrica, portanto seu comportamento espacial é caracterizado como tridimensional. Os dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho são tridimensionais. Estes dados, oriundos do levantamento de campo, das análises laboratoriais e da descrição morfológica são de natureza qualitativa e quantitativa.

De acordo com McSWEENEY et al. (1994), reportados por GRUNWALD e BARAK (2003), os solos são sistemas tridimensionais e devem ser representados usando tecnologia de informação geográfica. Apesar dos avanços na área de visualização tridimensional, pouco tem sido implementado em termos práticos nos Sistemas de Informações Geográficas 3D (SIG 3D). A maioria dos programas SIG tem a capacidade de manipular dados no contexto denominado 2 ½ D, ou seja, a representação de superfícies. Para ser considerado como tridimensional, o sistema deve dispor de ferramentas para manipulação e análise de dados tridimensionais

integradas no ambiente SIG (SWANSON, 1996). Este trabalho, portanto, foi desenvolvido em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas 3D.

Adotou-se a estrutura matricial para armazenamento e representação computacional dos dados. O formato matricial é adequado para representar fenômenos que se desenvolvem de maneira continuada no espaço, como é o caso dos solos. Os modelos matriciais são representações geométricas na forma de grades numéricas, que subdividem o espaço bidimensional em elementos de imagem (*pixels*) e o espaço tridimensional em elementos de volume (*voxels*).

As informações sobre as propriedades dos solos foram obtidas de maneira discreta, a partir de amostras pontuais medidas em campo. Estas informações são usadas para representar toda a região de estudo. Os dados tridimensionais representativos das diferentes propriedades do fenômeno devem ser interpolados para que se conheçam os valores dessas propriedades em locais não amostrados. A interpolação possibilita a estimativa dos valores de atributos a partir dos valores medidos em pontos situados numa mesma área ou região.

A representação das características do fenômeno no domínio espacial, com base nos dados de natureza qualitativa e quantitativa, é condição fundamental para formação e visualização volumétrica das propriedades dos solos. Existem diversos métodos já consagrados para interpolação de dados quantitativos, porém, para dados de natureza qualitativa, a interpolação é um procedimento mais complexo, conforme enfatizado anteriormente. Apresenta-se no decorrer do capítulo, figurando como um dos objetivos específicos da tese, uma proposição para realizar o tratamento computacional dos dados qualitativos das propriedades dos solos.

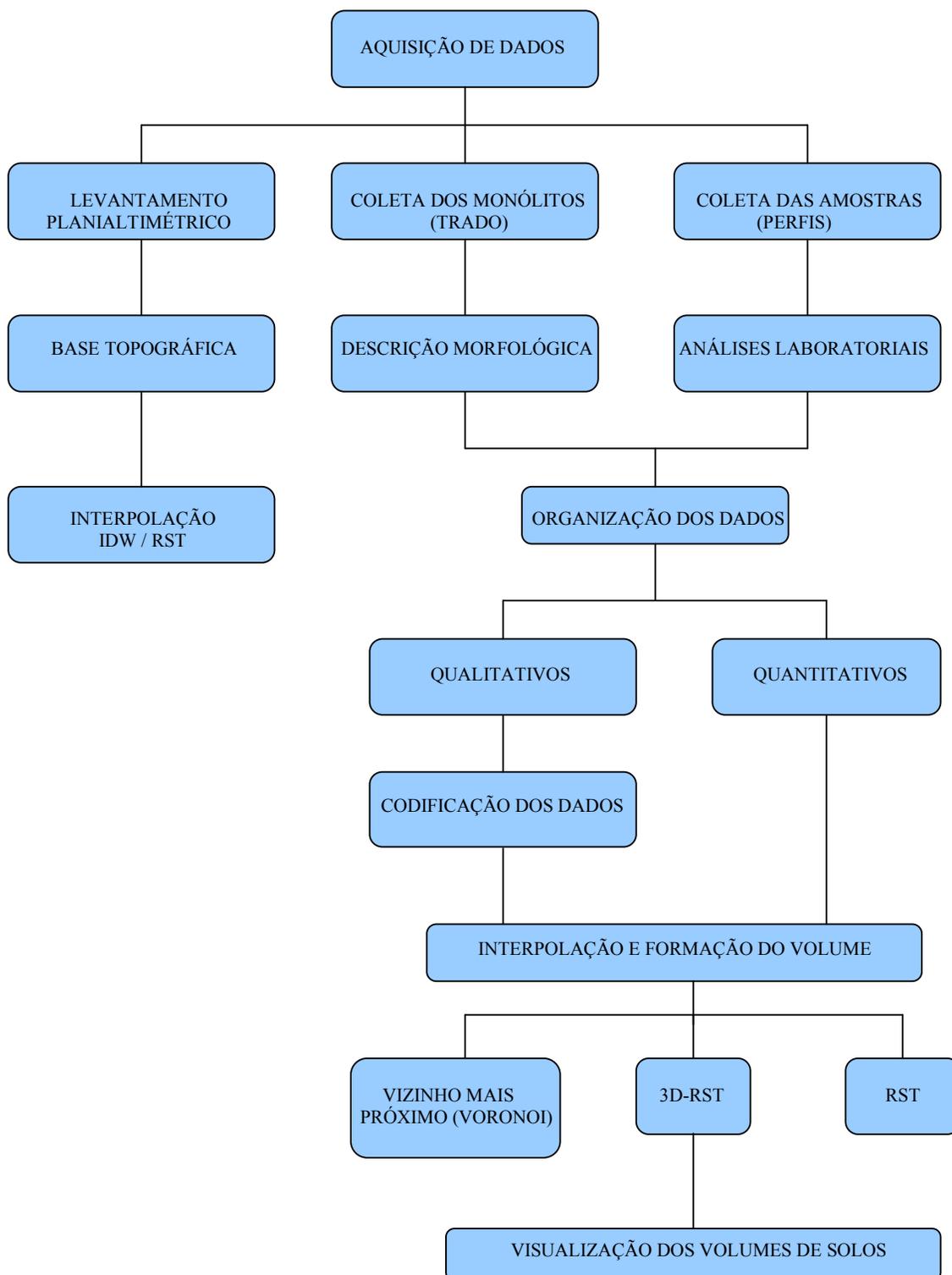
Para dados quantitativos, a interpolação dos dados é feita a partir da formulação geral do problema da interpolação espacial, usando as condições baseadas na localização e na suavidade e tensão (*splines*). Foram utilizados os algoritmos de interpolação de superfícies e interpolação tridimensional implementados no programa GRASS GIS (versão 6.1 cvs, para o ambiente Linux). Para interpolação de superfícies foram usados os algoritmos do método do inverso da distância ponderada (IDW) e do método da *spline* regularizada com tensão (RST). Para a interpolação tridimensional

foi usado o método implementado no programa que utiliza o algoritmo das *splines* regularizadas com tensão em três dimensões (3D-RST). O GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) é um programa computacional para Sistemas de Informações Geográficas, é de domínio público e de código aberto, documentado e organizado como bibliotecas de funções, e a estrutura de dados também é aberta.

Como o objetivo é visualizar os volumes (3D) dos solos, deve-se utilizar o método do *rendering* direto de volumes (*voxels*). Para visualização volumétrica das propriedades dos solos através do *rendering* de volumes foi utilizado o programa Vis5D. O Vis5D é um programa de domínio público, oferecido nos termos do GNU (*General Public License*), tem código aberto e é disponibilizado para os ambientes UNIX e Linux. Esse programa permite a visualização interativa de dados volumétricos em cinco dimensões (três dimensões espaciais ( $x, y, z$ ), uma dimensão referente ao atributo ( $w$ ) e uma dimensão temporal ( $t$ )).

Os procedimentos realizados para visualização dos volumes das propriedades dos solos, referentes à parte operacional do projeto, estão esquematizados na figura 4.1. A primeira etapa do trabalho trata da aquisição de dados e envolve o levantamento planialtimétrico para geração da base topográfica da área de estudo, a coleta e descrição morfológica dos monólitos e a coleta das amostras dos perfis para análises laboratoriais. De posse dos dados ocorre a segunda fase relativa à organização e à codificação dos dados. Após esta etapa, realiza-se a interpolação bidimensional e tridimensional destes dados para representação de superfícies e do volume, respectivamente. No último item, procede-se à visualização volumétrica das propriedades dos solos.

FIGURA 4.1 – DESENVOLVIMENTO OPERACIONAL DO TRABALHO



## 4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

### 4.1.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo

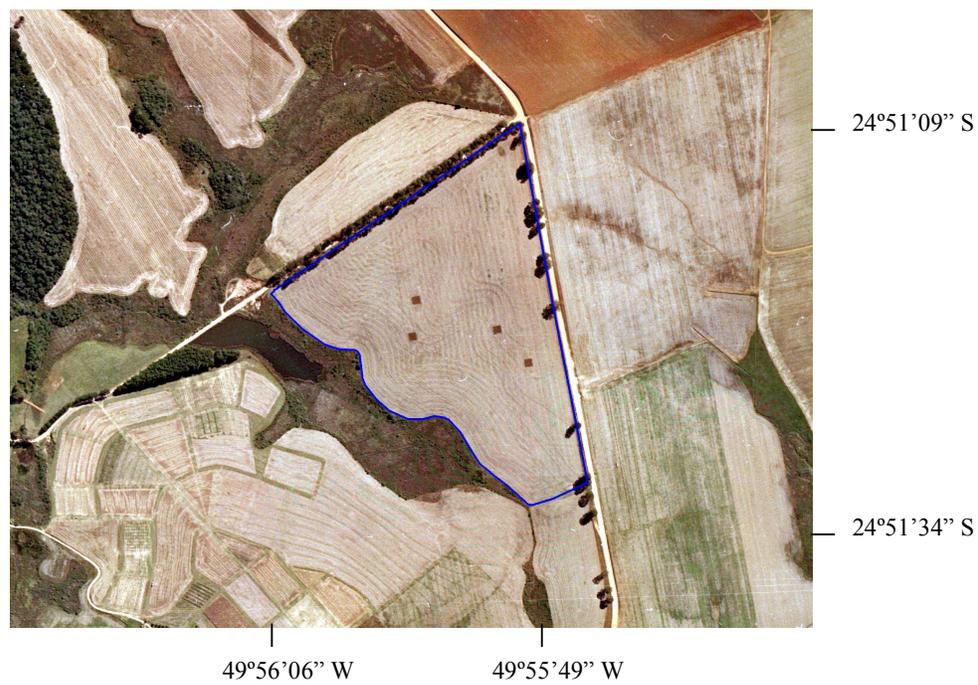
A área utilizada para o desenvolvimento desta tese localiza-se no município de Castro, Estado do Paraná, na região do Segundo Planalto Paranaense (fig. 4.2). O talhão selecionado para condução dos trabalhos está situado no Centro de Treinamento (CDT) da Fundação ABC (fig. 4.3 e fig. 4.4), abrange uma área de 21,5 hectares e apresenta um relevo suave ondulado. O talhão é caracterizado por diferentes tipos de solos, fato este que motivou sua escolha como área piloto para condução dos trabalhos. O uso do solo é para atividade agrícola com plantio direto.

FIGURA 4.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA



FONTE: ADAPTADO DE: <http://www.guianet.com.br/pr/mapapr.htm>, 2006.

FIGURA 4.3 – ÁREA EXPERIMENTAL – VISTA AÉREA



FONTE: FUNDAÇÃO ABC, 2001.

FIGURA 4.4 – ÁREA EXPERIMENTAL – VISTA DO TERRENO



#### 4.1.2 Levantamento Topográfico e Malha de Amostragem

MILNE (1934) foi o primeiro a mostrar, a partir da noção de catena, que a distribuição ordenada dos solos na paisagem está relacionada diretamente ao relevo (SANTOS, 2000). QUEIROZ NETO (2002), transcreve a definição dada por MILNE em 1934: “*catena* é uma unidade prática de mapeamento [...] que agrupa solos que, a despeito de estarem colocados em pontos diferentes de um sistema natural de classificação, tendo em vista suas diferenças morfológicas e fundamentais, estão, no entanto relacionados na sua ocorrência por condições topográficas e se repetem nas mesmas posições uns em relação aos outros, sempre que aquelas condições estão presentes”.

O solo está diretamente relacionado com o relevo, o regime hídrico e com a cobertura vegetal. O relevo condiciona o regime hídrico e influencia a formação do solo pelo movimento da água no sentido vertical, por infiltração, e no sentido lateral, por escoamento (SANTOS, 2000).

A superfície física da Terra é o referencial espacial para as medições de solos, visto que o solo é caracterizado por uma série de camadas dispostas horizontalmente (horizontes) que acompanham a configuração da superfície. Então, pode-se dizer que a superfície física é o ponto de partida para os levantamentos de solos. A representação inadequada desta superfície compromete a qualidade dos trabalhos pedológicos.

A etapa fundamental para subsidiar as atividades desenvolvidas no trabalho foi a da geração da base topográfica digital planialtimétrica da área de estudo. Esta base foi elaborada a partir de levantamento topográfico, utilizando estação total Leica TC403 (precisão angular de 10”). Para caracterização detalhada do relevo local, o levantamento foi executado com precisão e grau de detalhamento compatível à representação de curvas de nível eqüidistantes de 20 cm (fig. 4.5).

Tendo em vista a compatibilização deste novo levantamento com a base digital já existente no sistema da Fundação ABC, as coordenadas foram associadas ao SAD-69 (*South American Datum* – 1969). Este procedimento foi feito por rastreamento de satélites do sistema GPS. Os dados do rastreamento foram processados tendo por base

o ponto da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) da UFPR, em Curitiba. A ausência de RN (referência de nível) próxima ao local levantado inviabilizou o transporte da altimetria por nivelamento. Para adequação da referência altimétrica ao SAD-69, fez-se a correção da ondulação do geóide nos pontos provenientes do rastreamento. Utilizou-se para tanto o Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal desenvolvido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e pela EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), MAPGEO2004, versão 2.0. Tal sistema permite obter a ondulação geoidal ( $N$ ) em um ponto, ou conjunto de pontos, referida aos sistemas SIRGAS-2000 e SAD-69, a partir do Modelo de Ondulação Geoidal (IBGE - EPUSP), com resolução de 10' de arco.

Em etapa subsequente do trabalho de campo, fez-se a implantação da malha de pontos para coleta dos monólitos. A malha de amostragem foi distribuída regularmente sobre a área, com espaçamento de 30 em 30 metros. Pontos adicionais, com espaçamento menor e variado, foram locados nos limites do talhão. Esta malha foi materializada em campo com estacas de madeira devidamente identificadas, totalizando 261 pontos. Todos os pontos tiveram suas coordenadas tridimensionais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) medidas, calculadas e associadas ao levantamento topográfico (georreferenciados). Dos 261 pontos materializados foram coletados 255 monólitos, dos quais foram aproveitados 231 monólitos (fig. 4.6), sendo os demais descartados por problemas de identificação.

FIGURA 4.5 – BASE TOPOGRÁFICA DIGITAL DO TALHÃO

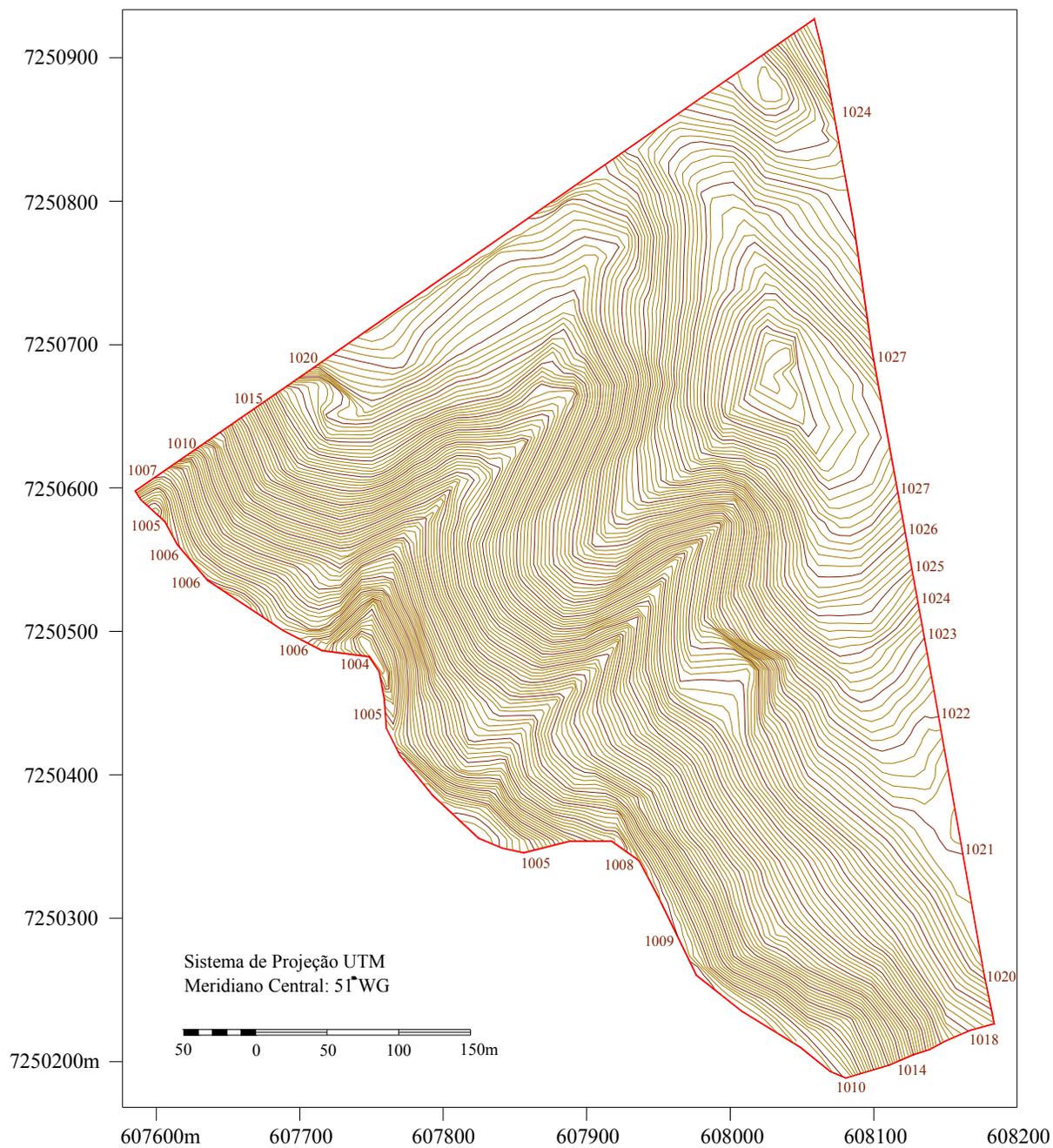
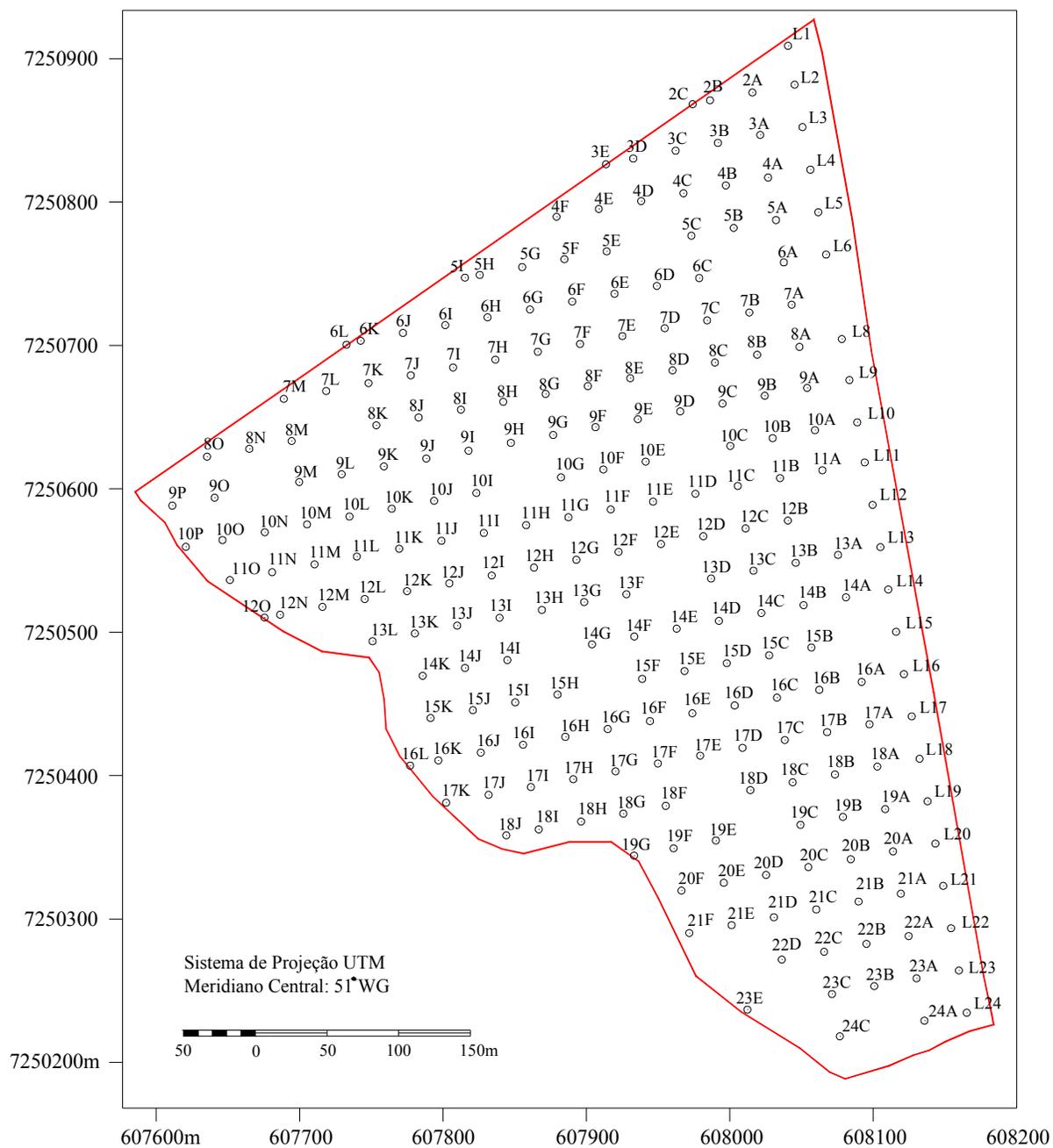


FIGURA 4.6 – LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS (MALHA DE AMOSTRAGEM)



### 4.1.3 Amostragem dos Monólitos

Esta fase do trabalho foi realizada pelos pedólogos, desde o projeto e construção do equipamento, até a definição da metodologia e a execução das coletas em campo. Nesta etapa do projeto fez-se a coleta em campo dos monólitos nos pontos da malha previamente definidos e estaqueados. Para coleta dos monólitos foram utilizados tubos de PVC (fig. 4.7-a) com 10 cm de diâmetro e 120 cm de comprimento. Nas laterais dos tubos foram feitas ranhuras para facilitar sua posterior abertura na etapa de descrição e coleta de amostras (fig. 4.7-b).

FIGURA 4.7 – PREPARAÇÃO DOS TUBOS



(a) CORTE (1,20 cm)



(b) RANHURA

A amostragem dos monólitos foi executada com trado tubular acoplado a um trator (fig. 4.8), na qual foram coletados 255 monólitos em uma seção de 120 cm de profundidade. Após a coleta os tubos foram fechados, para não haver perda de material e de água, e identificados de acordo com a numeração registrada nas estacas correspondentes aos pontos (fig. 4.9).

FIGURA 4.8 – TRADO TUBULAR



FIGURA 4.9 – MONÓLITOS



A figura 4.10 ilustra as fases de coleta dos monólitos com o trado tubular e a figura 4.11 mostra o terreno após a retirada do material.

FIGURA 4.10 – COLETA DOS MONÓLITOS



COLOCAÇÃO DO TUBO



PERFURAÇÃO



RETIRADA DO TUBO (MONÓLITO)

FIGURA 4.11 – TERRENO APÓS COLETA



VISTA EXTERNA



VISTA DO INTERIOR

#### 4.1.4 Descrição Morfológica e Coleta das Amostras

O método adotado para o estudo dos solos neste trabalho é baseado na análise estrutural da cobertura pedológica. A concepção do solo como um corpo contínuo tridimensional começou na década de 70 a partir de estudos desenvolvidos por pedólogos franceses (SANTOS, 2000). Segundo SANTOS (2000), para se estudar a gênese e a evolução da cobertura pedológica é necessário observar em detalhe a sucessão vertical e lateral dos horizontes, seus limites e suas transições, além de suas características morfológicas internas, na perspectiva de uma filiação genética entre horizontes.

O procedimento da análise estrutural da cobertura pedológica, introduzida por BOULET em 1978, chegou ao Brasil no início da década de 1980. A análise estrutural da cobertura pedológica é uma abordagem morfológica das estruturas do solo que visa identificar e estabelecer seu papel no funcionamento do solo (QUEIROZ NETO, 2002). Segundo QUEIROZ NETO (2002), os solos são corpos contínuos, organizados e estruturados como cobertura pedológica, que apresentam diferenciações verticais e laterais nos horizontes.

De acordo com BOULET et al. (1982), reportado por QUEIROZ NETO (2002), alguns dos aspectos que servem de embasamento para a análise estrutural da cobertura pedológica são:

- o solo é um meio organizado e estruturado, constituindo uma cobertura contínua ao longo das vertentes;
- as organizações pedológicas e suas estruturas apresentam, assim, três dimensões espaciais, donde seu caráter de tridimensionalidade e uma dimensão temporal; as características dessa organização e das estruturas devem estar presentes em todas as escalas de observação, desde a da paisagem até a do microscópio;
- como decorrência, e independentemente das aplicações, o estudo dos solos deve se basear no reconhecimento dessas organizações e estruturas pedológicas, em todas as escalas, das suas características e propriedades, de seu funcionamento e de sua história.

A visão do solo, por meio da análise estrutural da cobertura pedológica, integra diferentes escalas de observação: macromorfológica (paisagem); micromorfológica (microscopia óptica); e ultramicroscópica (distribuição dos elementos) (QUEIROZ NETO, 2002). Além disso, o estudo é completado por análises laboratoriais para determinação das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e biológicas (QUEIROZ NETO, 2002).

Conforme exposto por KIEHL (1979), os solos se apresentam com horizontes diferenciados pelas suas características e propriedades. A sucessão dos horizontes de um solo da superfície até a rocha é denominada de perfil do solo. A partir da caracterização morfológica do perfil do solo e das amostras dos horizontes (análises físicas e químicas), pode-se identificar e classificar os solos. Na descrição morfológica de um perfil se observa: espessura, arranjo e número de horizontes; transição entre horizontes; cor; textura; estrutura, dentre outros elementos (LEMOS e SANTOS, 1984).

Nesta etapa do trabalho, fez-se a caracterização morfológica da cobertura pedológica da área de estudo. Este procedimento envolveu a descrição morfológica dos monólitos coletados em campo e a coleta de amostras por horizonte para que fossem realizadas as análises físicas e químicas em laboratório. Após abertura dos tubos PVC contendo os monólitos (fig. 4.12), procedeu-se à descrição morfológica do material, correspondente a 231 monólitos. Esta descrição foi realizada por um

pedólogo. As características morfológicas observadas foram: horizontes, cor e estrutura (tipo, classe e grau).

FIGURA 4.12 – ABERTURA DOS TUBOS



Inicialmente, fez-se a identificação dos horizontes e suas subdivisões, e foram medidas as profundidades de cada subdivisão (fig. 4.13). Após medir as profundidades, fez-se a determinação da cor utilizando o sistema de Munsell. A definição da cor é feita por comparação entre a amostra e a referência padronizada na carta de Munsell (fig. 4.14). A cor correspondente à amostra é anotada na seqüência matiz, valor da cor e saturação. Por exemplo, a notação 5YR 4/4 significa que 5YR é o matiz, 4 é o valor da cor e 4 a sua saturação.

FIGURA 4.13 – HORIZONTES E PROFUNDIDADES

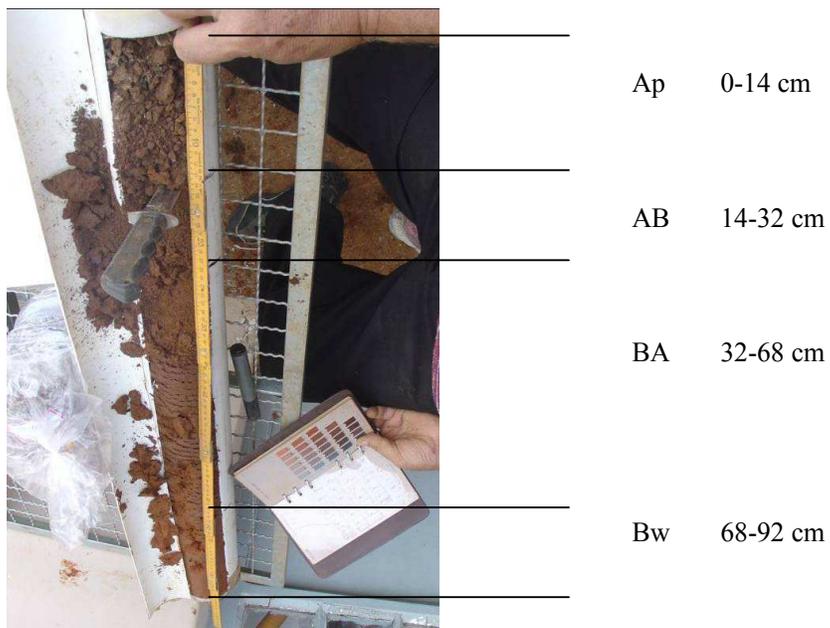
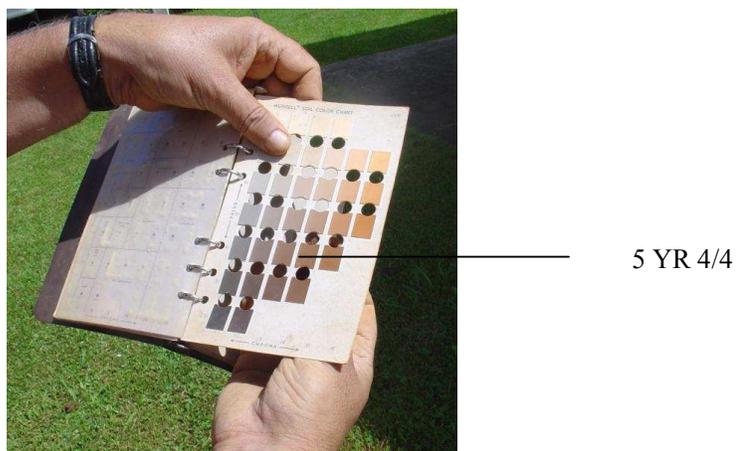


FIGURA 4.14 – COR POR HORIZONTE



Em seguida foi descrita a estrutura quanto ao seu tipo, classe e grau, para cada horizonte individualmente. Todas as características observadas e medidas foram

transcritas para uma caderneta, com identificação do ponto correspondente. Após os procedimentos descritivos, as amostras foram coletadas e identificadas com o número do ponto, profundidade e horizonte (fig. 4.15).

FIGURA 4.15 – COLETA DAS AMOSTRAS



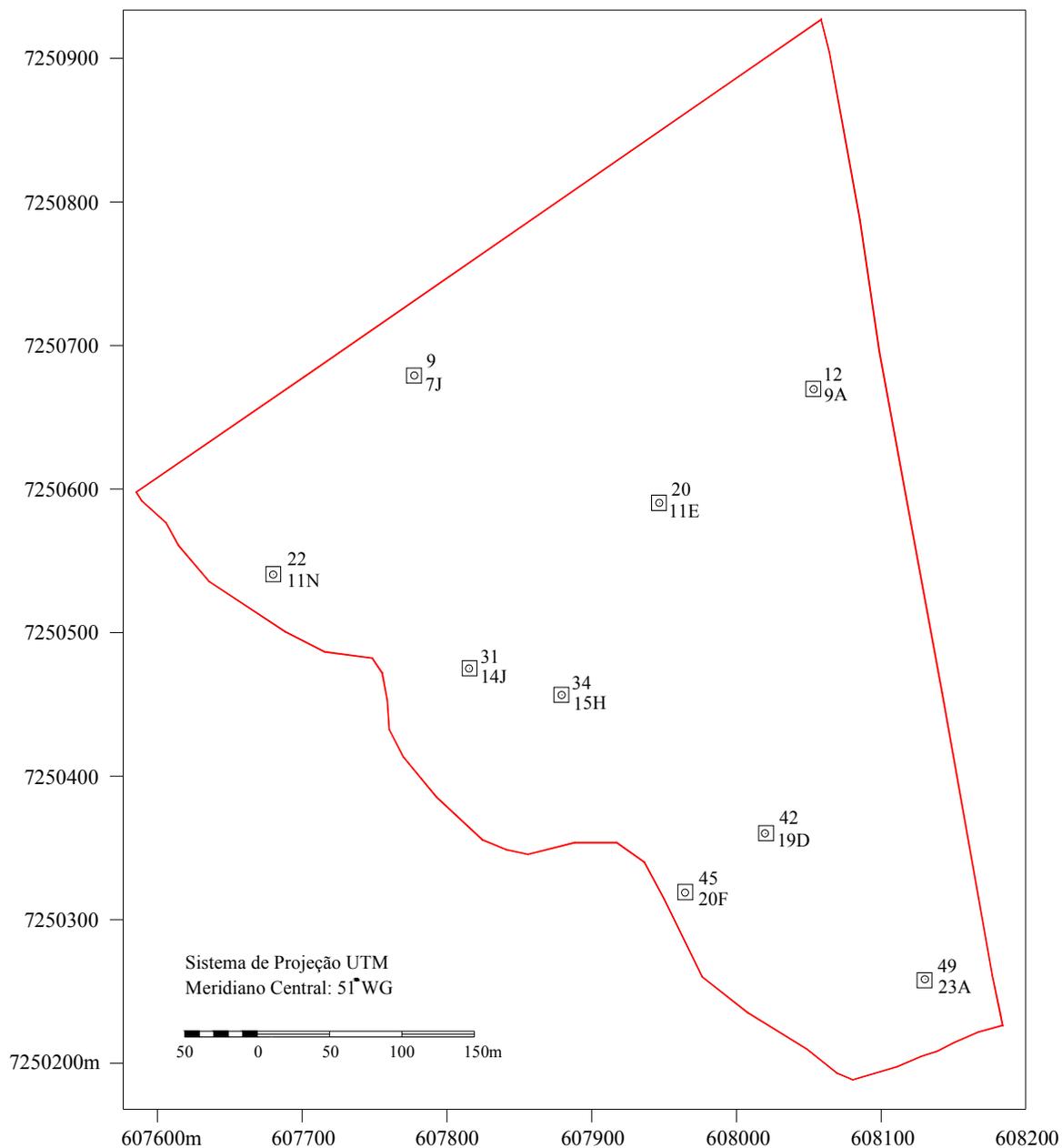
#### 4.1.5 Análises das Amostras

O período de tempo transcorrido entre a coleta dos monólitos em campo e a separação das amostras para envio ao laboratório foi de aproximadamente seis meses. Em virtude de mudanças ocorridas nas políticas de administração dos laboratórios inicialmente comprometidos com a realização das análises, as amostras representativas dos 231 monólitos não foram analisadas.

Para caracterização analítica dos solos foi necessário realizar nova coleta em campo, da qual obtiveram-se amostras para expressar as propriedades físicas e químicas da área. Esta nova coleta de amostras dos perfis foi feita a partir da abertura de nove trincheiras, com um metro de largura, um metro de comprimento e um metro e meio de profundidade, localizadas em pontos característicos do terreno (fig. 4.16). A localização destes pontos foi definida pelos pedólogos, a partir da análise da base topográfica e do mapa de solos, na escala 1:10.000, da área de estudo. As análises

físicas e químicas foram realizadas nos laboratórios da Embrapa Florestas, localizada no município de Colombo, na região metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná (ANEXO 1).

FIGURA 4.16 – LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS



## 4.2 ORGANIZAÇÃO E CODIFICAÇÃO DOS DADOS

Os dados oriundos das atividades de campo, da descrição morfológica e das análises laboratoriais foram, inicialmente, transcritos para o meio digital na forma de planilhas. A adoção de planilhas viabiliza a manipulação e a edição dos dados, bem como a exportação para outros formatos e programas.

Para utilização nos algoritmos de interpolação implementados no programa GRASS GIS, a representação dos dados para modelagem de superfícies em  $R^2$  (espaço Euclidiano), é feita a partir de duas coordenadas espaciais ( $x$ ,  $y$ ) e um terceiro dado ( $w$ ), referente ao atributo a ser interpolado, que pode ser a altitude do ponto ou qualquer propriedade do solo. Para modelagem volumétrica os dados devem ser tridimensionais. A representação dos dados no espaço tridimensional ( $R^3$ ) é feita pelas três coordenadas espaciais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) e um ou mais dados referentes aos atributos ( $w_i$ ).

Os arquivos para entrada de dados no programa GRASS foram organizados com esta estrutura. O formato de entrada de dados vetoriais pontuais, tanto para registro direto em um arquivo existente quanto para importação de arquivos *dbf* ou *ascii*, deve ter a seguinte estrutura:

*cabeçalho (“header”)*

...

*# comentários*

*nome|amostras*

*desc|amostras dos horizontes*

*data|10 de março de 2005*

....

*cat|coordenada x|coordenada y|coordenada z|atributo  $w_1$ |atributo  $w_2$  ... ”texto”*

*1|607777.5100|7250679.1501|1017.9671|2749320.8499|0.0624681619049005... “Ap”*

*2|608053.8976|7250670.3427|1026.4293|2749329.6573|0.0559962352210596.. “AB”*

*3|607946.4813|7250591.0542|1020.5587|2749408.9458|0.0669994808874398... “Ap”*

```
4|607680.8530|7250541.8169|1005.6407|2749458.1831|0.0476467705862091... "Bw"
...
```

As linhas que contêm o cabeçalho e os comentários são opcionais. Os dados podem ser dos seguintes tipos: números inteiros (*int*); números reais de dupla precisão (*dbl*) ou pontos flutuantes (*floating points - flt*); textos (*varchar*); ou nomes de cores (@brown). Os valores das altitudes podem ser inseridos como uma terceira coordenada espacial ou como um atributo do dado.

Do levantamento planialtimétrico foram armazenadas as coordenadas ( $x, y, z$ ) dos pontos do terreno. Além da elaboração da base topográfica digital do talhão, estas coordenadas serviram para geração do modelo numérico do terreno (DTM) e cálculo dos parâmetros geométricos relativos à declividade, ao aspecto (direção do gradiente definido pelos ângulos horizontal e vertical) e à curvatura média (mudança de gradiente). Apresenta-se, como exemplo, parte do arquivo *ascii* com os dados do levantamento planialtimétrico:

```
cat|coordenada x|coordenada y| coordenada z (altitude)
1|608024.4613|7250675.9315|1029.7956
2|607858.5338|7250539.1737|1017.5413
3|607587.3626|7250599.9780|1007.2086
4|607592.7509|7250594.6843|1005.8868
...
```

Para cada monólito foram armazenadas as coordenadas tridimensionais ( $x, y, z$ ), que identificam a posição de cada amostra no espaço tridimensional, e os atributos ( $w_1, w_2, \dots, w_n$ ) oriundos da descrição morfológica dos horizontes. Estes atributos são a identificação dos tipos de horizontes, a espessura de cada horizonte e a cor no sistema de Munsell.

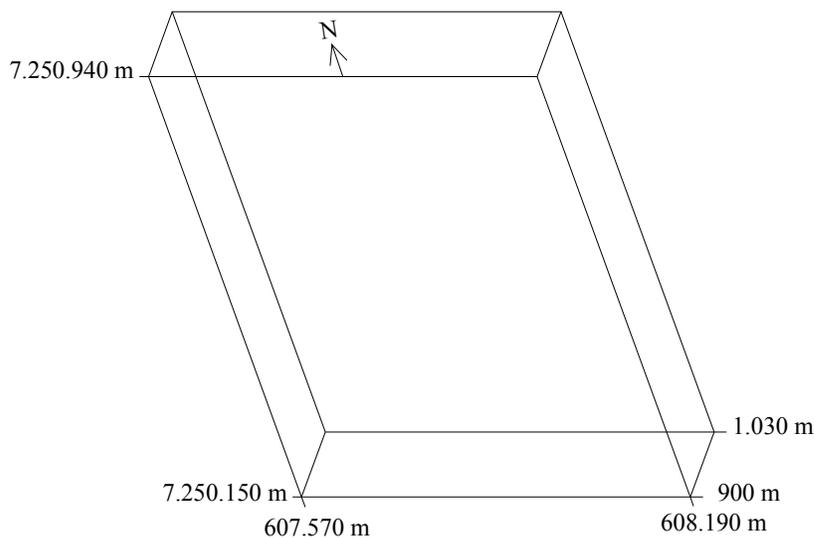
A partir dos dados das espessuras de cada horizonte foram calculadas as altitudes dos pontos limítrofes dos horizontes. Como as espessuras dos horizontes são

da ordem de centímetros e a área de estudo é da ordem de milhares de metros quadrados, a representação da variação vertical das propriedades dos solos foi realizada com um exagero de escala de cem vezes.

Além da definição dos limites dos horizontes foram representados os diferentes tipos de horizontes. Para codificação numérica dos tipos de horizontes (dados qualitativos) foram considerados os seguintes fatores:

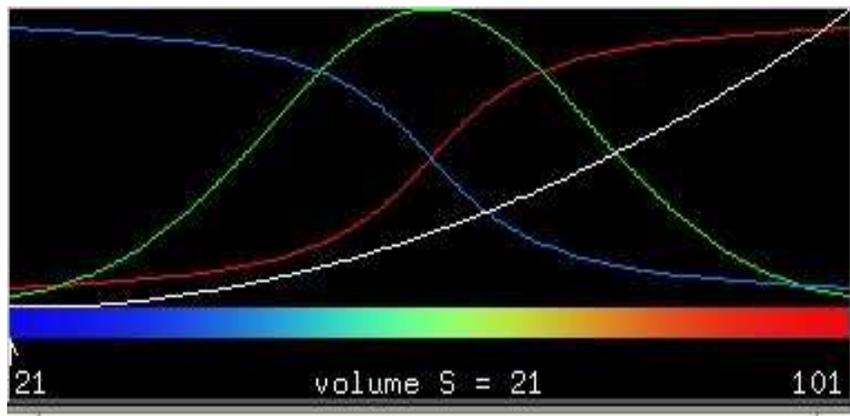
a) a ocorrência dos horizontes no espaço tridimensional se dá entre as altitudes de 900 m e 1030 m, valores estes que representam os limites inferior e superior do hexaedro que limita a área de estudo (fig. 4.17);

FIGURA 4.17 – HEXAEDRO ENVOLVENTE DA ÁREA DE ESTUDO



b) o histograma de cor e opacidade *default* do programa utilizado para visualização dos volumes por meio de *voxels* (Vis5D) abrange a faixa do espectro eletromagnético do azul até o vermelho (fig. 4.18) e a modificação das cores é feita manualmente sobre o próprio histograma, alterando-se, separadamente, a curva de cada uma das três cores.

FIGURA 4.18 – HISTOGRAMA DE COR E OPACIDADE DO PROGRAMA Vis5D



A codificação para representação dos horizontes foi feita com uma seqüência numérica crescente, da superfície até o último horizonte (50, 60, 70, 80 ...). Dessa forma, os horizontes superiores ficaram com menor opacidade (maior transparência) e os inferiores com opacidade maior. Como os valores são interpolados para todo o hexaedro envolvente foi estabelecido um valor para a cota 1.030m e outro para a cota 900 m, de maneira que os limites do volume representado sejam coincidentes com a superfície física da Terra e com a superfície inferior do último horizonte. Os horizontes Bi e Bw foram agrupados e receberam uma única codificação. Apresenta-se a seguir parte do arquivo *ascii* com a codificação dos tipos de horizontes e suas altitudes, já considerando o exagero vertical adotado:

*coordenada x|coordenada y|coordenada z|atributo  $w_1$  (código)*

608040.6104|7250908.9424|1030|50|"*lim\_sup\_hexaedro*"

608045.2255|7250881.8230|1030|50|"*lim\_sup\_hexaedro*"

608050.7146|7250852.2104|1030|50|"*lim\_sup\_hexaedro*"

...

608040.6104|7250908.9424|1024.4592|60|"*superficie*"

608045.2255|7250881.8230|1023.3712|60|"*superficie*"

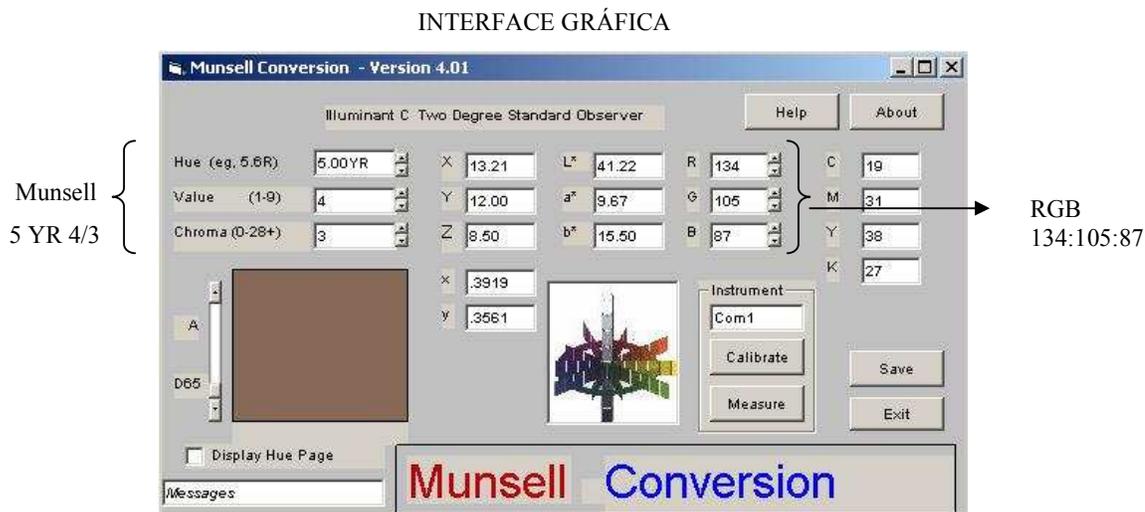
608050.7146|7250852.2104|1023.7693|60|"*superficie*"

...

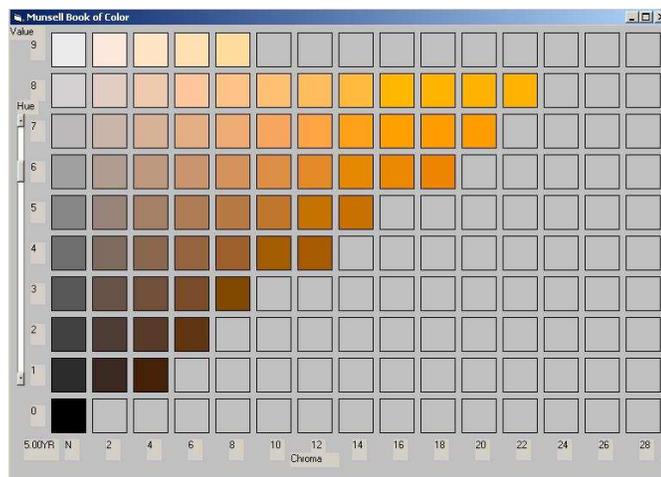
608040.6104|7250908.9424|1011.4592|70|”Ap”  
 608045.2255|7250881.8230|1012.3712|70|”Ap”  
 608050.7146|7250852.2104|1013.7693|70|”Ap”  
 ...  
 608040.6104|7250908.9424|983.4592|80|”AB”  
 608045.2255|7250881.8230|983.3712|80|”AB”  
 608050.7146|7250852.2104|988.7693|80|”AB”  
 ...  
 608040.6104|7250908.9424|954.4592|90|”BA”  
 608045.2255|7250881.8230|951.3712|90|”BA”  
 608050.7146|7250852.2104|938.7693|90|”BA”  
 ...  
 608040.6104|7250908.9424|924.4592|100|”Bwi”  
 608045.2255|7250881.8230|923.3712|100|”Bwi”  
 608050.7146|7250852.2104|923.7693|100|”Bwi”  
 ...  
 608040.6104|7250908.9424|900|110|”lim\_inf\_hexaedro”  
 608045.2254|7250881.8230|900|110|”lim\_inf\_hexaedro”  
 608050.7145|7250852.2104|900|110|”lim\_inf\_hexaedro”  
 ...

As cores dos horizontes foram transformadas do sistema de Munsell, que é um modelo orientado ao usuário, baseado em como se percebe a cor, para o sistema RGB, que é um modelo orientado ao hardware, relacionado com a produção de cores das telas de computadores (SLOCUM, 1999). No sistema RGB a cor é definida por um triplete, por exemplo 104:82:75, que corresponde ao comprimento de onda de cada uma das três cores primárias da luz (vermelho, verde e azul). Para transformação do sistema de Munsell para o sistema RGB, utilizou-se o programa Munsell Conversion, versão 4.01 (fig. 4.19), disponível em [www.munsell.com](http://www.munsell.com).

FIGURA 4.19 – PROGRAMA PARA CONVERSÃO DE CORES: MUNSELL CONVERSION



FOLHA DA CARTA DE MUNSELL PARA O MATIZ 5 YR



Para as cores foi criada uma codificação mnemônica de forma que, ao se consultar o atributo diretamente sobre o *pixel* (na representação bidimensional) ou *voxel* (na representação volumétrica), identifica-se, por associação, a designação da cor no sistema de Munsell (fig. 4.20). Nessa codificação, a identificação do matiz por letras foi eliminada, uma vez que todos os pontos têm matiz YR, e os valores do matiz, do valor e da saturação foram multiplicados por dez. Assim, por exemplo, 10YR3/3 foi

codificado como 100,3030; 7,5YR4/2 como 75,4020; 5YR2/5 como 50,2050; e 2,5YR5/4 como 25,5040. O arquivo *ascii* com o atributo cor foi estruturado da seguinte maneira:

```
cat|coordenada x|coordenada y| coordenada z|atributo w (cor)
1|608124.754301|7250288.081|1003.4565|75.5040
2|608130.222001|7250258.5835|1005.7101|50.3030
3|608135.689701|7250229.086|1003.4773|100.5040
4|608003.366001|7250448.8653|1002.7661|50.4020
5|608008.836901|7250419.351|1005.7442|75.4030
...
```

Os códigos das cores dos pontos no sistema de Munsell foram associados aos tripletos de cores correspondentes no sistema RGB. O arquivo criado com esta associação foi utilizado como arquivo de cores no programa GRASS, de forma que cada ponto, para cada horizonte, é representado pela sua cor medida em campo. O arquivo de cores utilizado na representação bidimensional está estruturado da seguinte maneira:

```
% 25 101
25.302:104:82:75
25.303:111:80:69
25.3035:113:79:66
...
50.201:73:63:59
50.251:84:74:69
50.252:91:72:62
...
75.302:102:84:71
75.303:107:82:63
```

75.3035:109:82:59

...

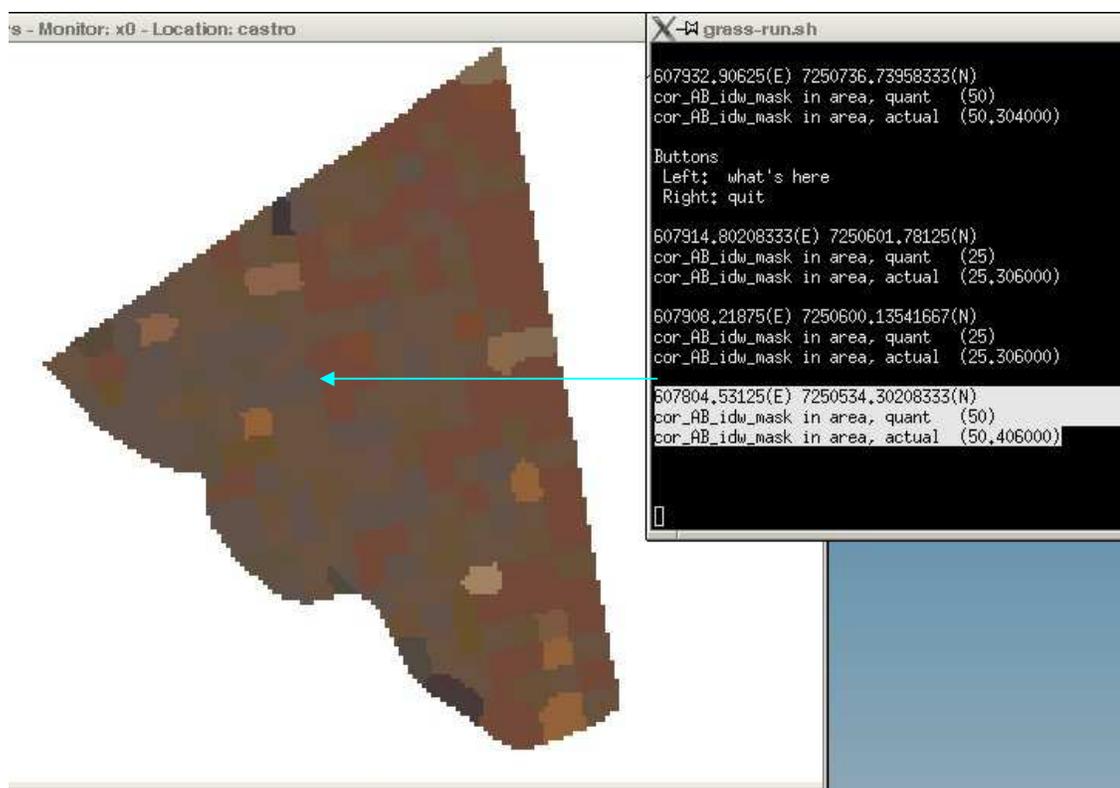
100.201:71:63:57

100.302:99:85:69

100.303:104:84:60

...

FIGURA 4.20 – EXEMPLO DE CONSULTA DO ATRIBUTO COR SOBRE A REPRESENTAÇÃO BIDIMENSIONAL (HORIZONTE AB)



Com o objetivo de reduzir a quantidade de cores para visualização dos volumes, os valores foram agrupados considerando apenas os matizes e, desse modo, resultaram nas seguintes classes de cores:

Classe dos pontos com matiz 2,5YR, codificados com o valor 25.

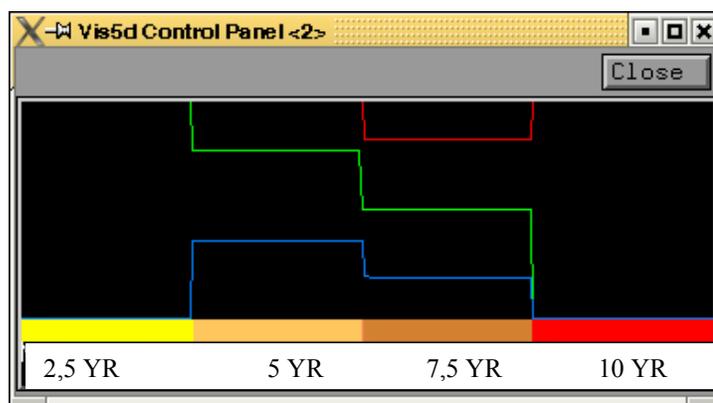
Classe dos pontos com matiz 5YR, codificados com o valor 50.

Classe dos pontos com matiz 7,5YR, codificados com o valor 75.

Classe dos pontos com matiz 10YR, codificados com o valor 100.

Esta classificação foi usada para visualização dos volumes das cores no programa Vis5D, por interação direta no histograma de cor e opacidade para definir as cores das classes (fig. 4.21).

FIGURA 4.21 – CLASSES DE CORES PARA VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA



Os resultados das análises laboratoriais das amostras coletadas nos nove perfis foram entregues em meio digital. Para cada perfil foi registrada a identificação do ponto, suas coordenadas  $(x, y, z)$ , que definem as posições das amostras no espaço tridimensional, e os valores dos atributos  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$  para cada horizonte.

Como os dados provenientes das análises laboratoriais são de natureza quantitativa e representam as grandezas medidas das propriedades físicas e químicas dos solos, não houve necessidade de codificação. Os arquivos com os valores das propriedades foram diretamente exportados para o formato *ascii*, com a seguinte estrutura:

```
coordenada x|coordenada y|coordenada z|atributo w1|atributo w2 ...
607777.5100|7250679.1501|1017.9671|0.987|0.0624681619049005...
608053.8976|7250670.3427|1026.4293|0.943|0.0559962352210596...
607946.4813|7250591.0542|1020.5587|0.998|0.0669994808874398...
607680.8530|7250541.8169|1005.6407|0.925|0.0476467705862091...
...
```

Das análises físicas foram utilizados os dados das seguintes propriedades: densidade do solo; umidade volumétrica a 6 kPa, umidade volumétrica a 10 kPa, umidade volumétrica a 100 kPa e umidade volumétrica a 1500 kPa; porosidade total e porosidade macro; água disponível; e as frações granulométricas correspondentes aos percentuais de areia (areia grossa e areia fina somadas), silte e argila. Das análises químicas os dados utilizados no trabalho foram: pH (CaCl<sub>2</sub>); matéria orgânica; soma de bases; e capacidade de troca catiônica (CTC).

#### 4.3 INTERPOLAÇÃO E FORMAÇÃO DO VOLUME

Após a organização e codificação dos dados, iniciou-se a etapa de processamento das informações para formação do volume. Esta fase do trabalho, que envolve a interpolação bidimensional e tridimensional dos dados, foi realizada no programa GRASS GIS.

Nesse programa, os dados de cada projeto são armazenados em um diretório que representa a base de dados (“GISDBASE”). No diretório da base de dados os projetos são organizados por áreas em subdiretórios denominados de “*locations*”. Uma área (“*location*”) é definida por seu sistema geodésico de referência, sistema de projeção, limites geográficos e resolução. Os subdiretórios e arquivos que definem a área são automaticamente criados quando se inicia o programa, pela primeira vez, para essa área.

Cada sessão do GRASS é iniciada com a seleção de um “*mapset*”. “*Mapsets*” são subdiretórios onde são armazenados os dados do projeto. As informações técnicas ficam registradas em arquivos no “*mapset*” *default*, denominado *PERMANENT*, e os mapas criados no projeto são armazenados nos subdiretórios do “*mapset*” criado pelo usuário. A figura 4.22 mostra a estrutura dos arquivos no programa GRASS; a figura 4.23 ilustra a estrutura da base de dados do GRASS; e na figura 4.24 estão as especificações para a região *default*.

FIGURA 4.22 – ESTRUTURA DOS ARQUIVOS NO GRASS GIS

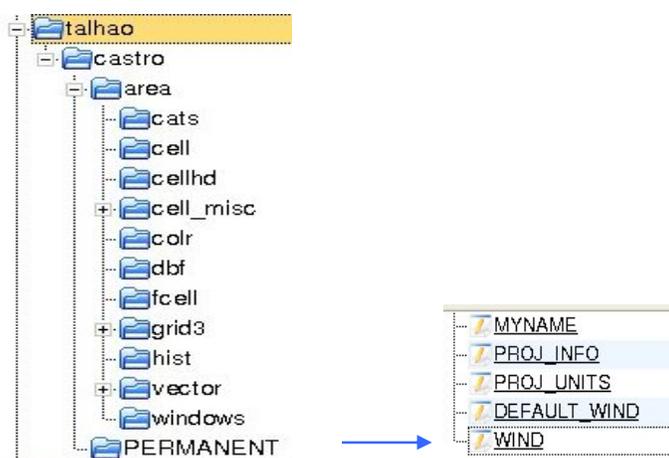


FIGURA 4.23 – ESTRUTURA DA BASE DE DADOS DO GRASS

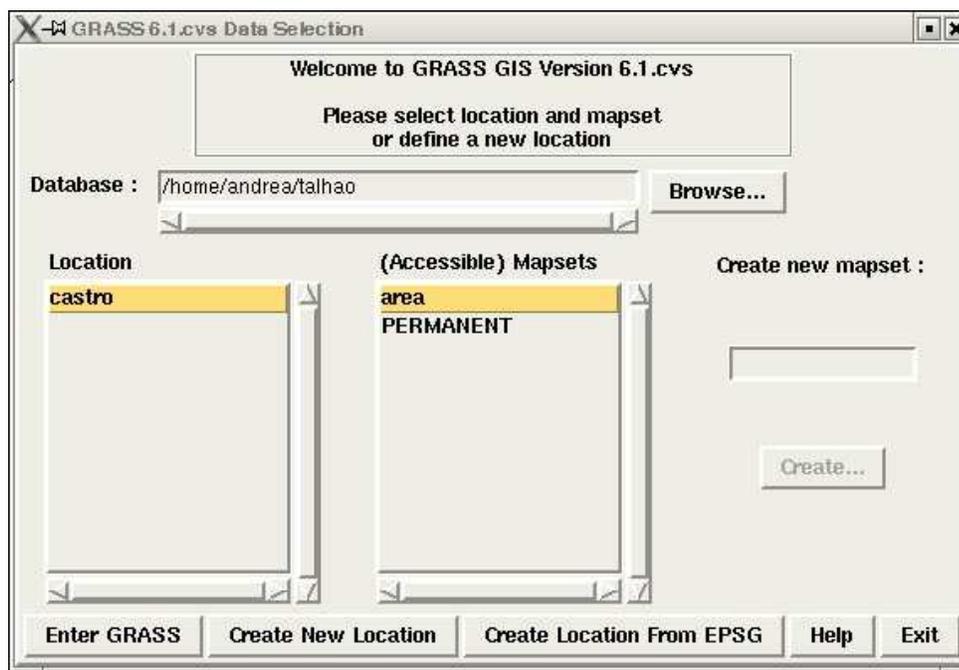
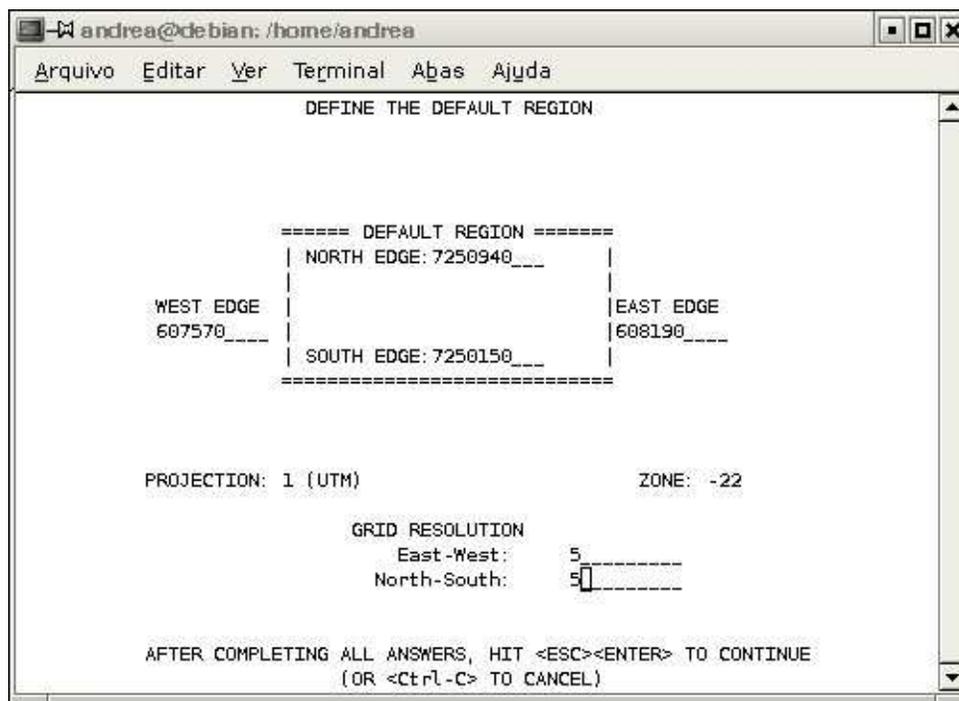


FIGURA 4.24 – ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO





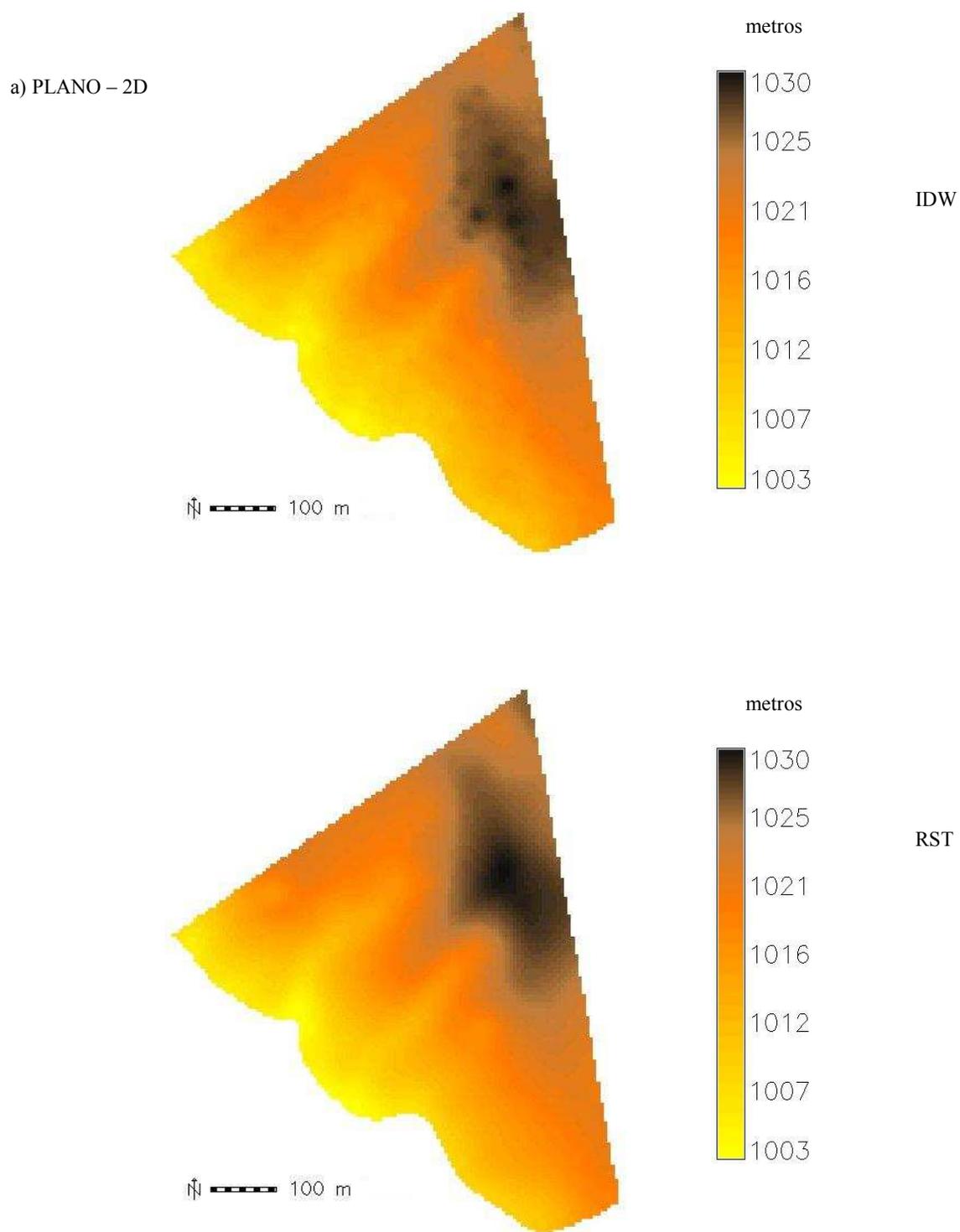
Adotando-se o critério da área mínima mapeável para levantamento de solos, que corresponde a  $0,4 \text{ cm}^2$  na escala da carta, têm-se para representação na escala 1:1.000 a área mínima de  $40 \text{ m}^2$  e para representação na escala 1:2.000 a área mínima de  $160 \text{ m}^2$ . A resolução de 5 m corresponde a uma área de  $25 \text{ m}^2$ , suficiente portanto para sua utilização na escala 1:1.000, e a resolução de 10 m corresponde à área de  $100 \text{ m}^2$ , adequada à representação na escala 1:2.000. Os processamentos foram realizados para ambas as resoluções.

A inserção dos dados no programa foi feita pela importação dos arquivos vetoriais dos pontos no formato *ascii*. Para a determinação dos valores do fenômeno no domínio espacial, utilizaram-se os algoritmos de interpolação de superfícies e de interpolação tridimensional implementados no programa GRASS.

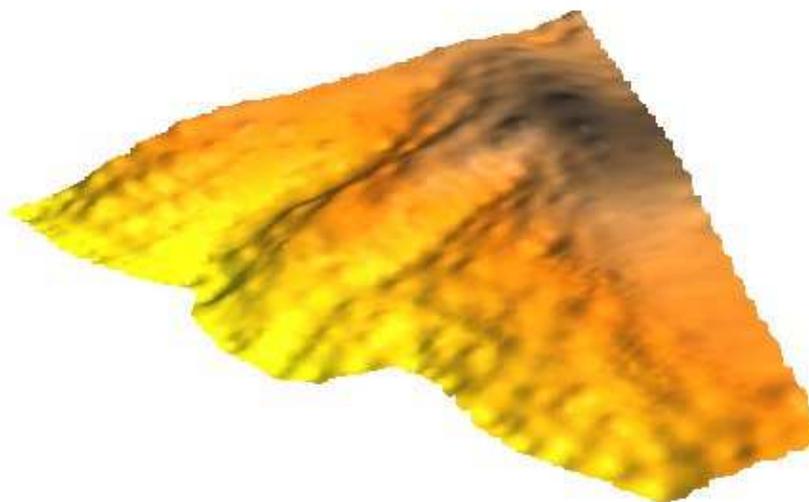
No algoritmo do inverso da distância ponderada (IDW), implementado para geração de superfícies por interpolação, o valor do fenômeno em um ponto não amostrado é dado pela média ponderada em função do quadrado das distâncias, em relação a um determinado número de pontos. O algoritmo da *spline* regularizada com tensão (RST) é usado tanto para geração de superfícies como para formação dos volumes. O algoritmo da RST implementado no programa GRASS permite estabelecer parâmetros para suavização das curvas e tem um procedimento de segmentação por *oct-trees* que melhora sua eficiência para grandes conjuntos de dados.

Os dados do levantamento planialtimétrico foram interpolados pelos métodos do inverso da distância ponderada e da *spline* regularizada com tensão. Dessa interpolação resultaram as representações bidimensionais (fig. 4.25-a) e de superfícies (fig. 4.25-b) do modelo numérico do terreno. As representações da declividade (fig. 4.26-a,b) e da curvatura média (fig. 4.27-a,b) foram obtidas pelo método da *spline* regularizada com tensão. A distribuição dos solos na paisagem está relacionada diretamente com o relevo (MILNE, 1934, citado por SANTOS, 2000). O modelo numérico do terreno reflete a estrutura do terreno (MITASOVA e HOFIERKA, 1993) e o conhecimento da geometria da superfície, através de parâmetros topográficos como declividade, aspecto, perfil de curvatura e plano de curvatura, pode auxiliar no reconhecimento da distribuição da cobertura pedológica.

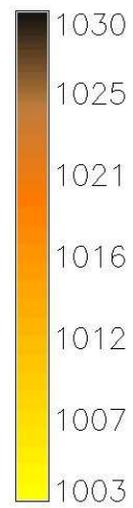
FIGURA 4.25 – MODELO NUMÉRICO DO TERRENO



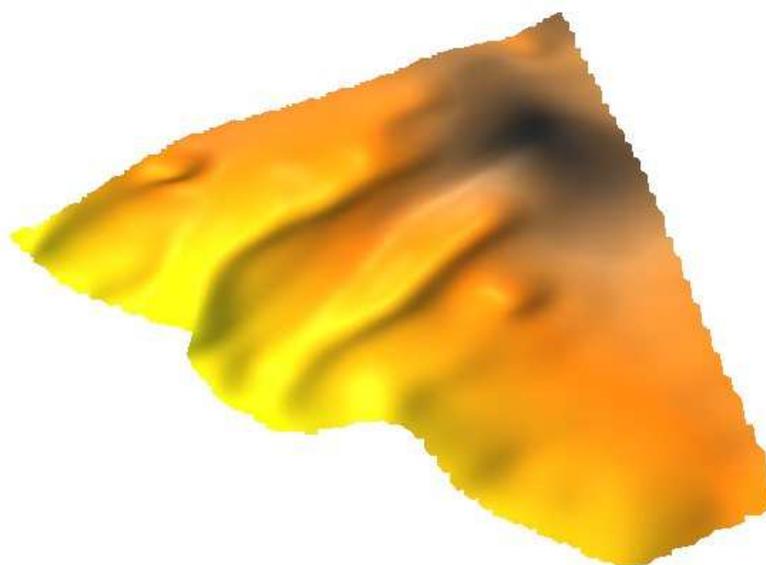
b) SUPERFÍCIE – 2 ½ D



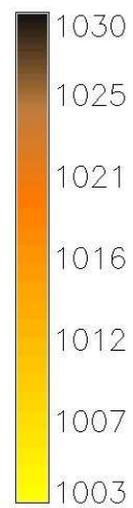
metros



IDW



metros



RST

FIGURA 4.26 – REPRESENTAÇÃO DA DECLIVIDADE

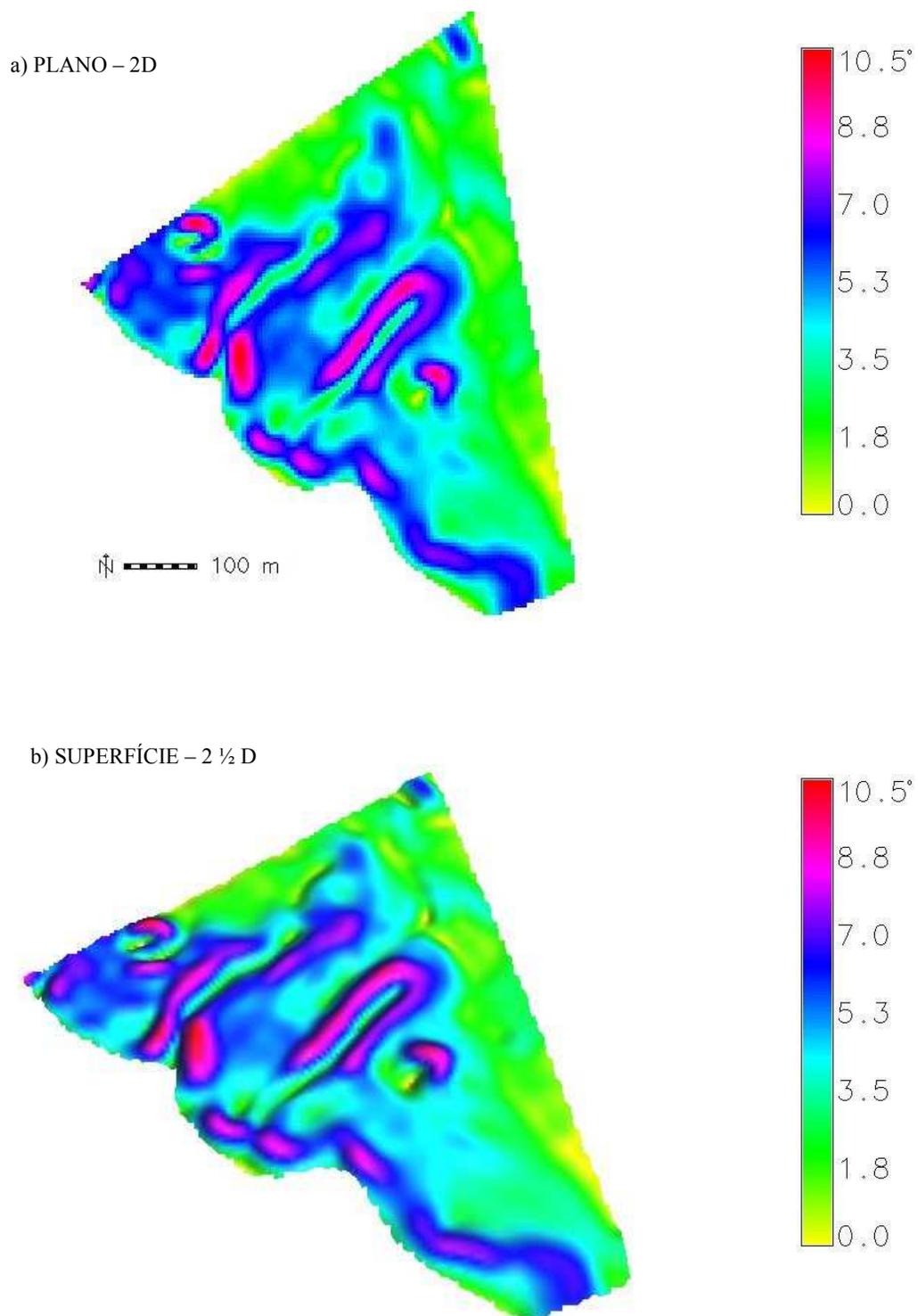
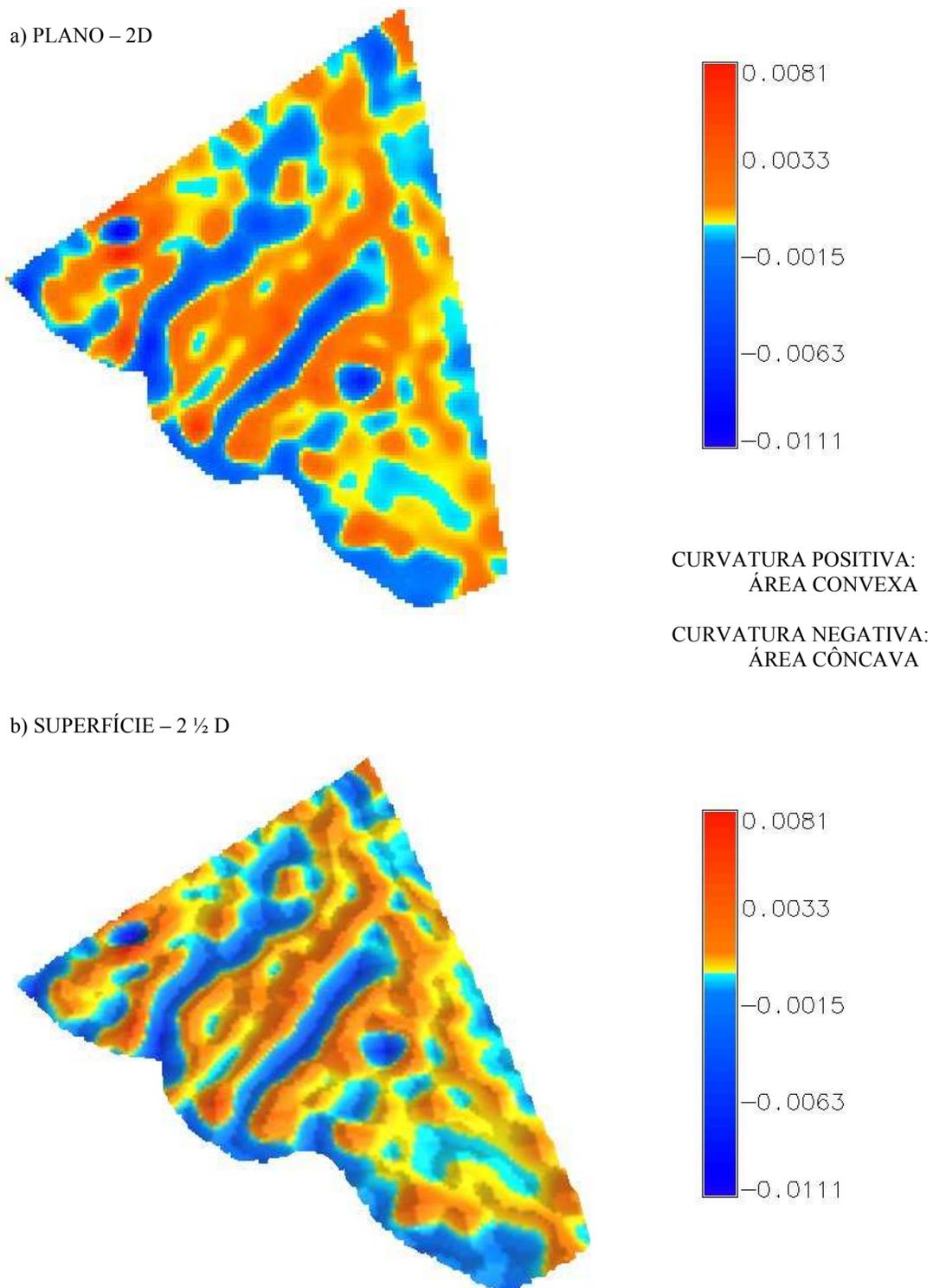


FIGURA 4.27 – REPRESENTAÇÃO DA CURVATURA MÉDIA



Para formação do volume, ou seja, para transformar dados pontuais tridimensionais em dados volumétricos, o programa GRASS disponibiliza dois métodos. No primeiro método é feita a conversão direta dos pontos para as suas respectivas representações tridimensionais por *voxels* (*voxelização*) (fig. 4.28). Esse método fica restrito aos valores dos dados existentes e não gera novos valores por interpolação. O segundo processo realiza a interpolação tridimensional dos dados (3D-RST), com estimativa de valores para toda a área e gera dados volumétricos distribuídos em grades regulares tridimensionais. Nesse método se tem o *rendering* completo do volume (fig.4.29).

Os dados de solos de natureza quantitativa, provenientes das análises laboratoriais, foram interpolados com os algoritmos das *splines* regularizadas com tensão em duas e três dimensões. Deste procedimento resultaram os arquivos para visualização das propriedades dos solos no contexto bidimensional, 2½ dimensional e tridimensional.

Para cada tipo de horizonte, individualmente, foram criados os modelos numéricos representativos das respectivas superfícies, através do algoritmo da *spline* regularizada com tensão. A formação do volume, considerando todos os tipos de horizontes, foi feita pelo processo direto de *voxelização* e por interpolação tridimensional (3D-RST). Como o processo de *voxelização* não interpola os valores não amostrados o resultado permite a visualização das posições das amostras e a diferença entre horizontes é percebida, pontualmente, pelo tom de cor.

A extensão do atributo cor para toda a área de ocorrência em cada horizonte, para visualização no plano bidimensional, foi realizada através da transformação dos dados pontuais discretos em polígonos representativos do domínio espacial de cada ponto. Para isso, fez-se a interpolação pelo vizinho mais próximo dividindo a área em polígonos de Voronoi. Cada polígono recebeu o valor do código da cor referente ao único ponto em seu interior. Associando os arquivos dos polígonos com o arquivo de cores que relaciona os códigos aos tripletos RGB, as representações das cores para cada horizonte apresentam a cor de Munsell medida em campo. Para formação do

volume, os dados das cores para todos os horizontes foram interpolados usando a *spline* regularizada com tensão tridimensional.

FIGURA 4.28 – VOXELIZAÇÃO

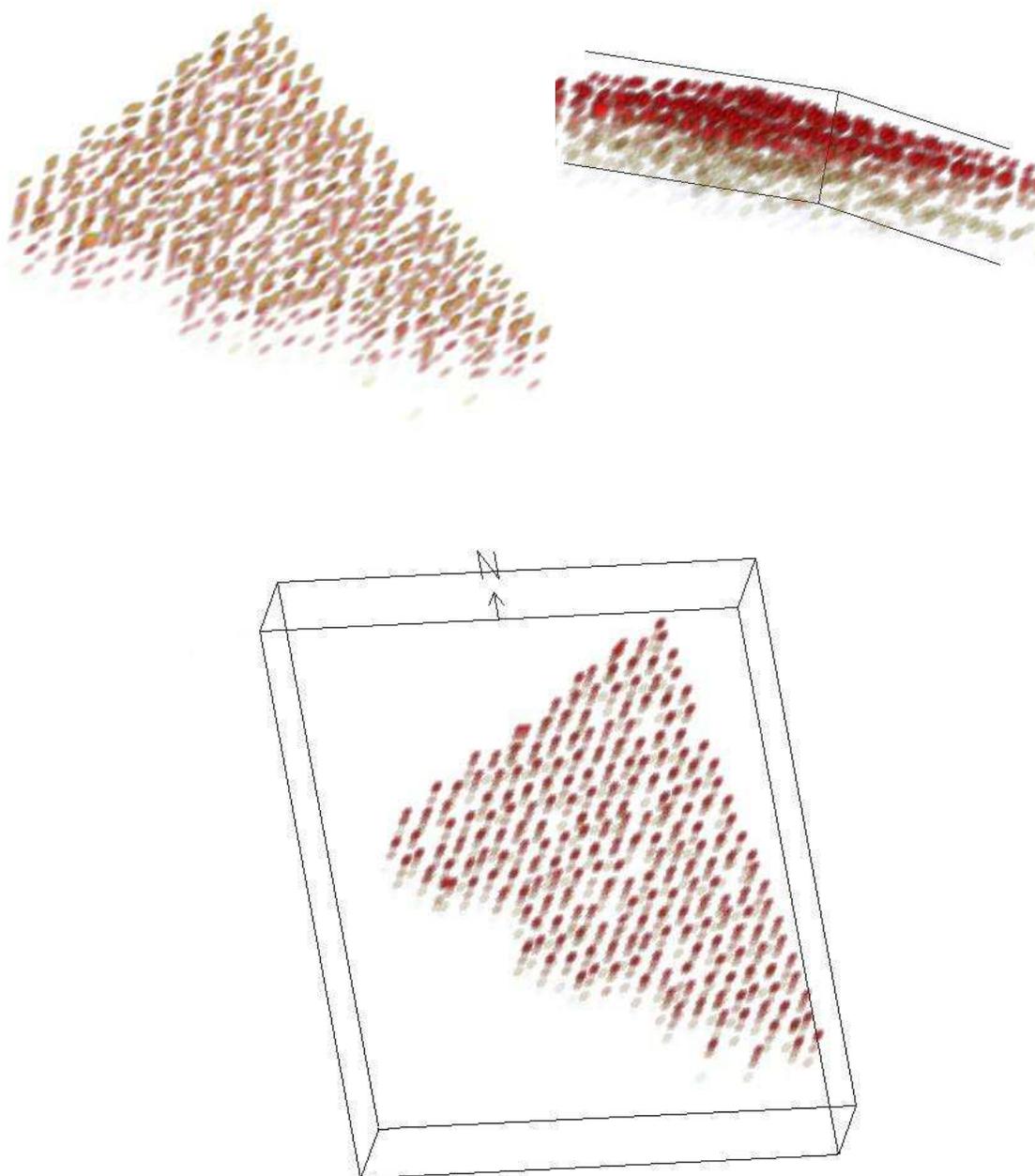
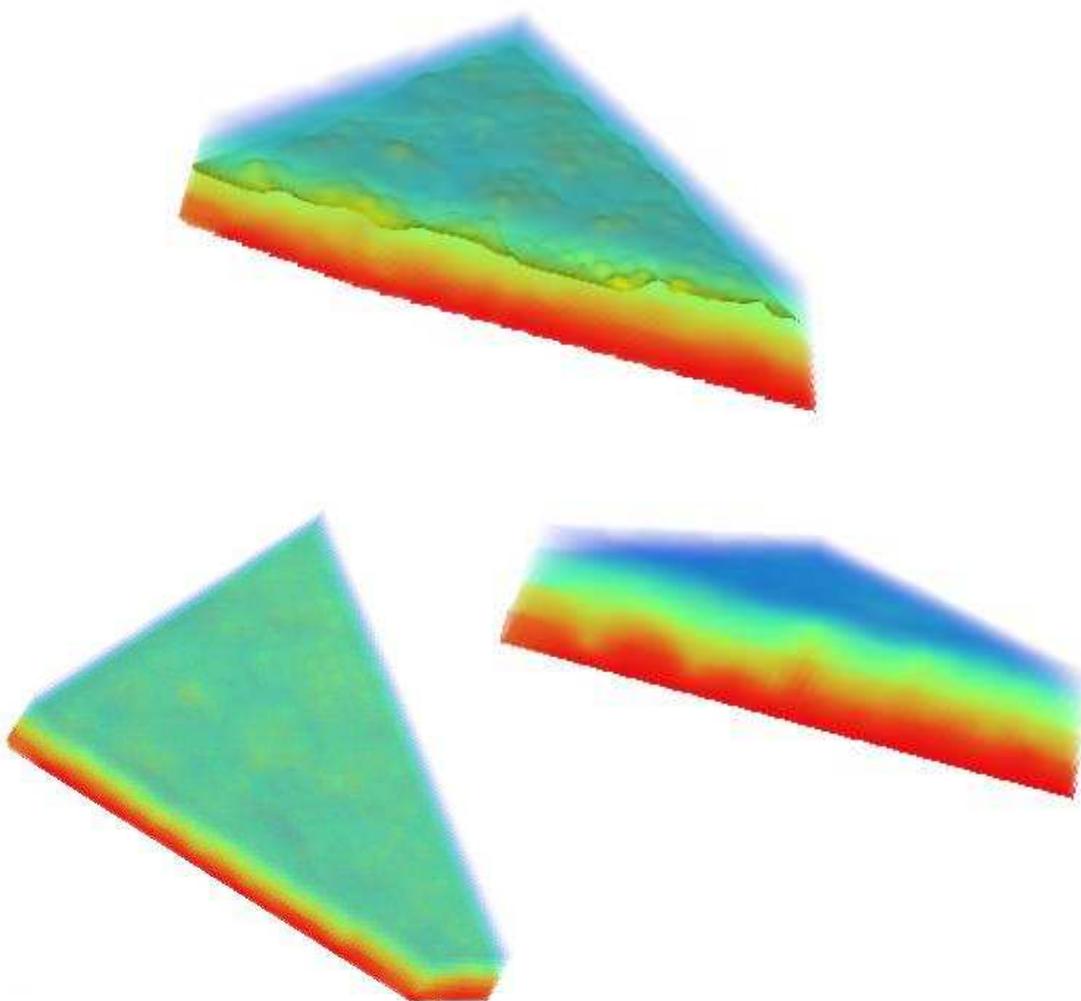


FIGURA 4.29 – *RENDERING* COMPLETO DO VOLUME: INTERPOLAÇÃO TRIDIMENSIONAL

#### 4.4 VISUALIZAÇÃO DOS VOLUMES

A visualização das representações no plano bidimensional foi realizada diretamente no programa GRASS. A visualização das representações 2½ dimensional foi feita usando o módulo NVIZ do GRASS, o qual possibilita, também, a visualização de isosuperfícies representativas dos dados volumétricos (fig. 4.30).

Para visualização dos volumes dos solos, objetivo desta tese, utilizou-se o método do *rendering* direto de volumes. Para isto, foi necessário exportar os arquivos de dados volumétricos referentes às propriedades dos solos (fig. 4.31), para o programa Vis5D (fig. 4.32). Além do *rendering* de volumes, o programa permite extrair isosuperfícies no espaço tridimensional, realizar cortes horizontais e verticais, e visualizar estes cortes utilizando cores e isolinhas.

Os resultados obtidos para visualização dos solos no plano, por superfícies e através dos volumes verdadeiros são mostrados no capítulo 5. Assim, a partir de uma análise comparativa, pode-se verificar a validade da visualização volumétrica como fonte de novos conhecimentos para avaliação dos solos.

FIGURA 4.30 – INTERFACE GRÁFICA DO MÓDULO DE VISUALIZAÇÃO NVIZ

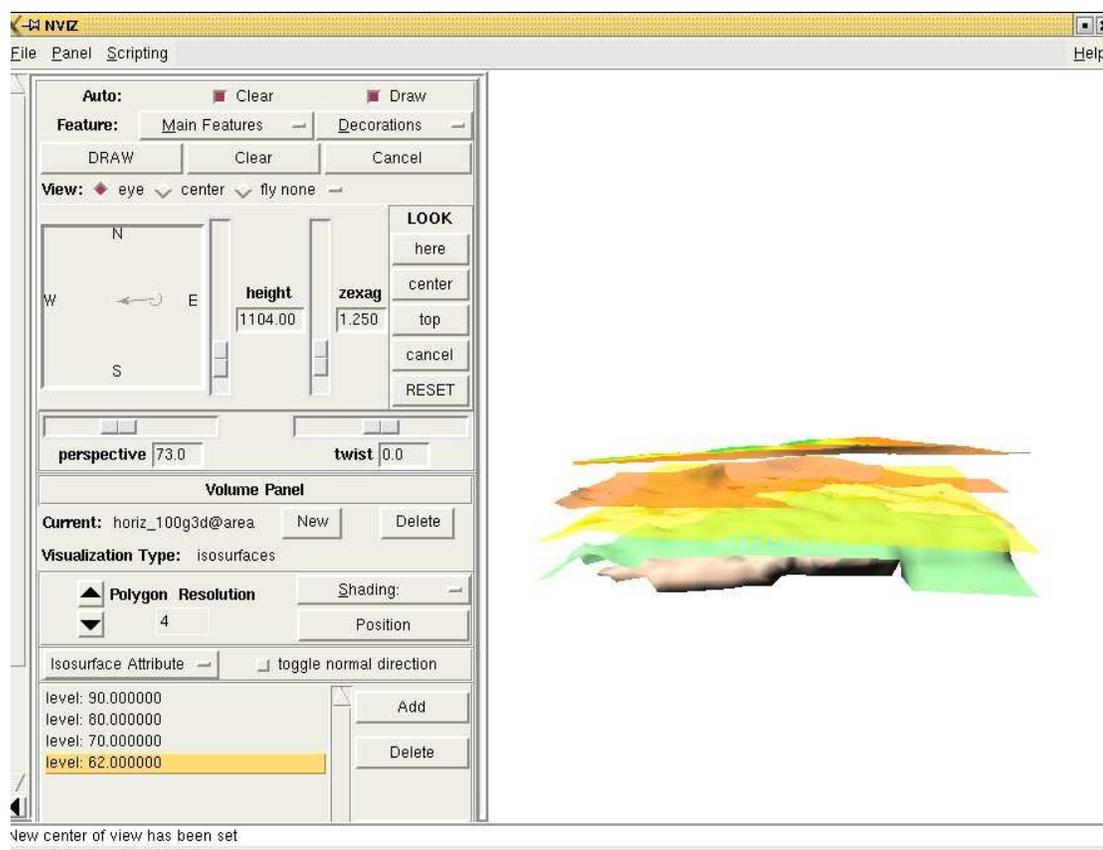


FIGURA 4.31 – EXPORTAÇÃO DOS DADOS VOLUMÉTRICOS

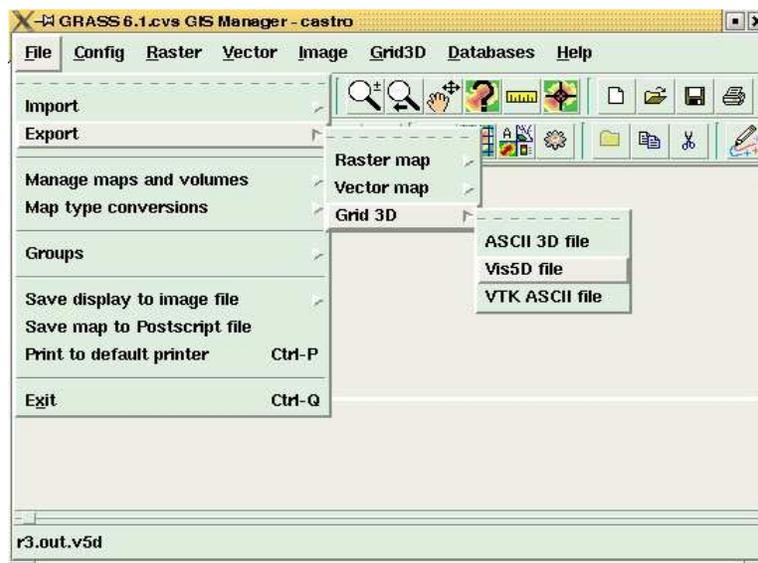
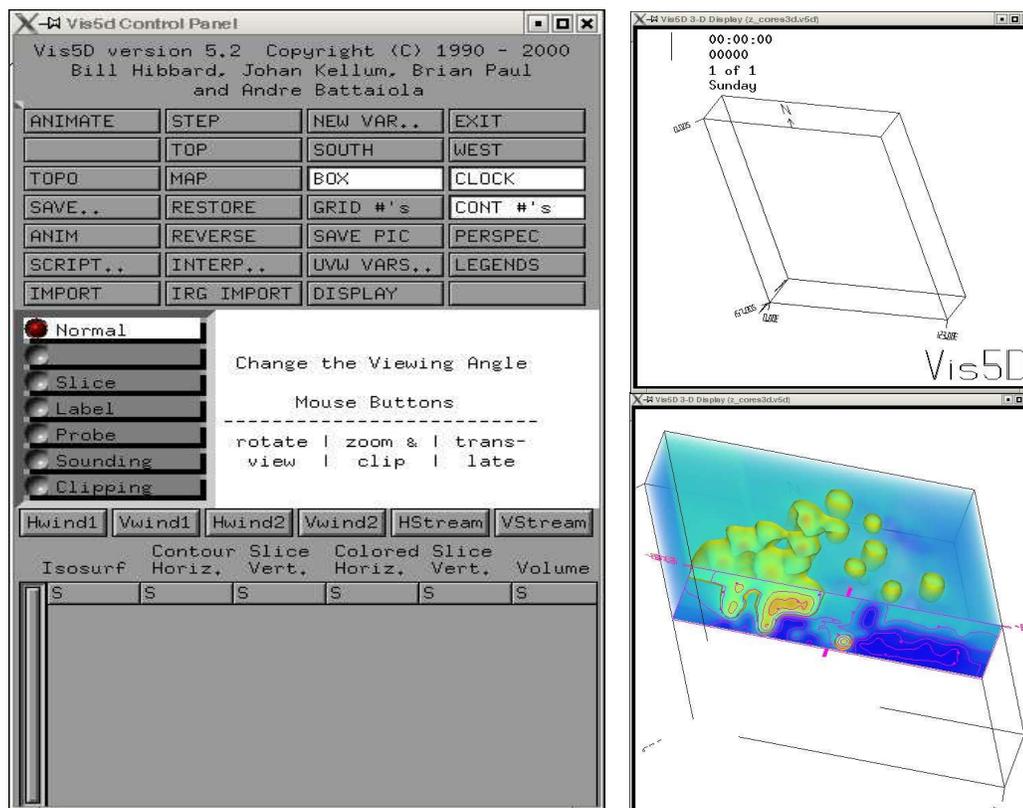


FIGURA 4.32 – INTERFACE GRÁFICA DO PROGRAMA Vis5D

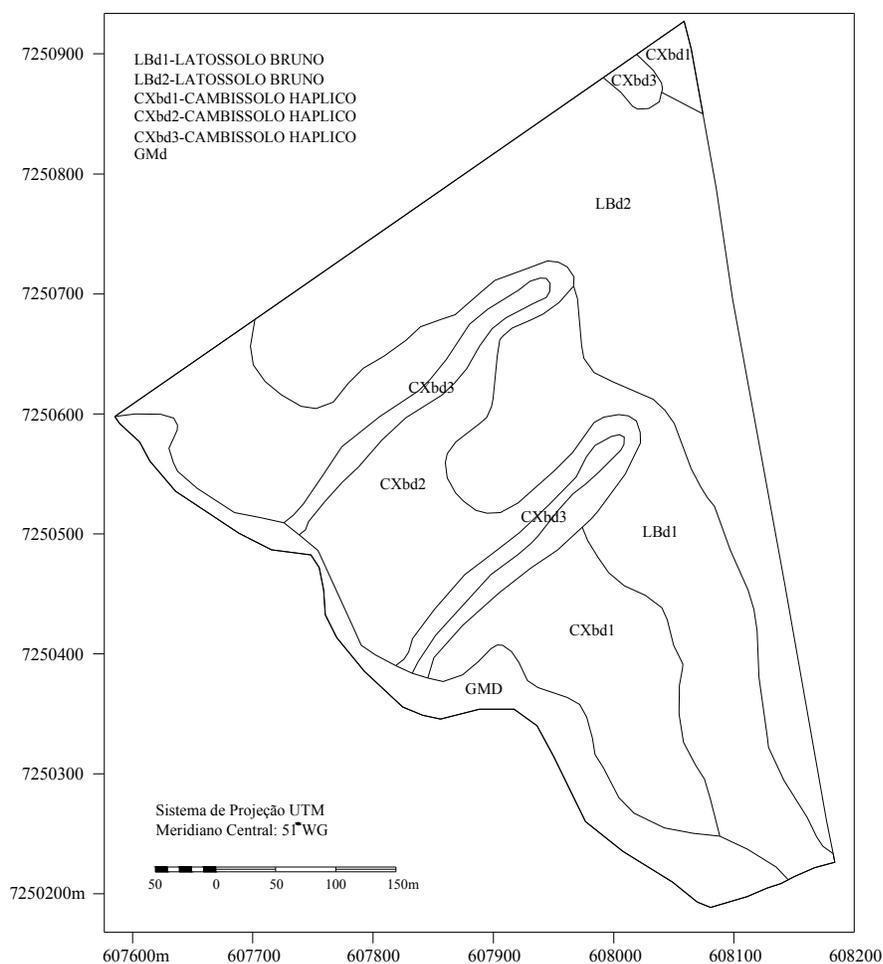


## 5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

### 5.1 DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

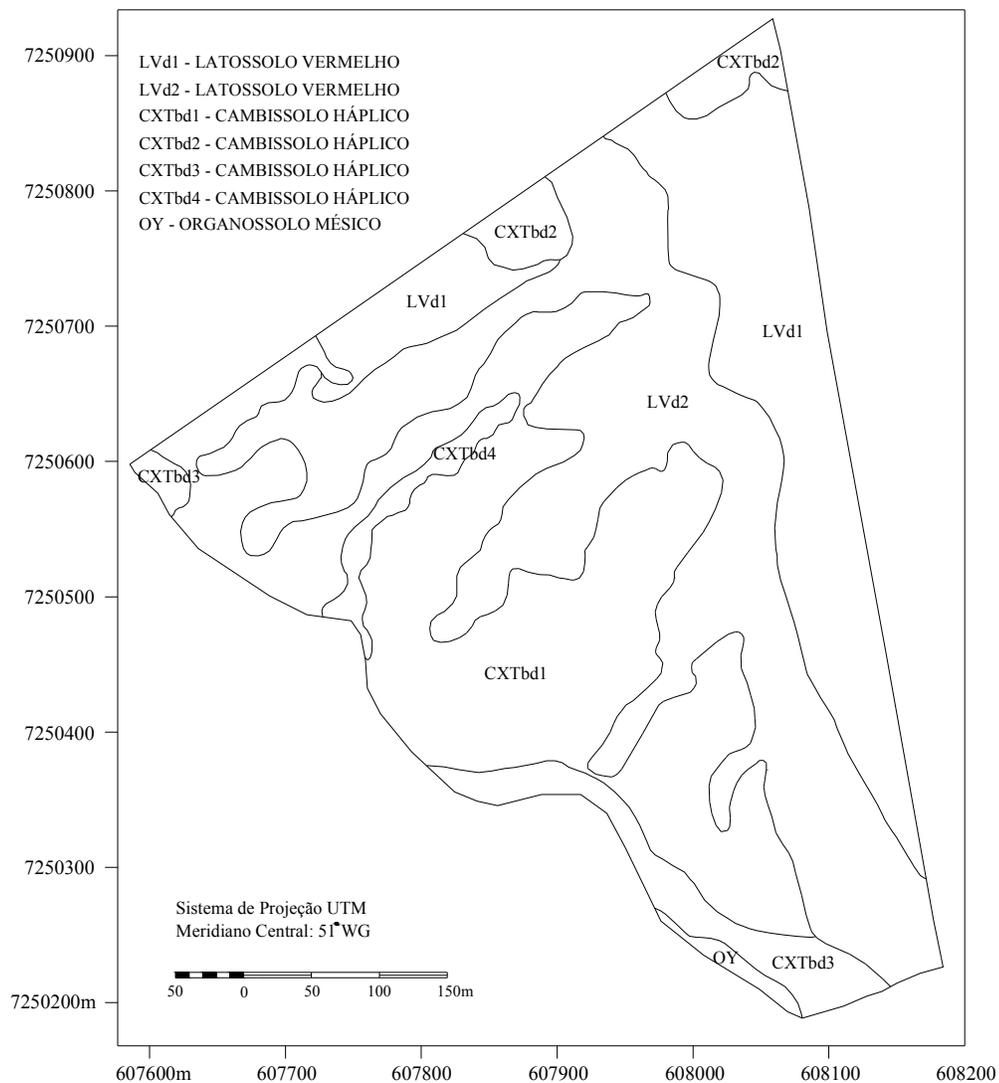
A caracterização morfológica da cobertura pedológica da área foi realizada com base na descrição morfológica dos 231 monólitos, obtidos com trado tubular, e dos 9 perfis. Esta descrição, em conjunto com a representação detalhada do relevo, permitiu aos pedólogos realizar uma nova classificação dos tipos de solos da área de estudo. A figura 5.1 apresenta o mapa de solos na escala 1:10.000, fornecido pela Fundação ABC, e a figura 5.2 apresenta o mapa de solos gerado após a realização da nova coleta e descrição dos dados.

FIGURA 5.1 – MAPA DE SOLOS ORIGINAL



FONTE: FUNDAÇÃO ABC, 2001.

FIGURA 5.2 – MAPA DE SOLOS ATUAL



### 5.1.1 Horizontes

Informações acerca dos horizontes são fundamentais para o estudo dos solos, pois as características e a disposição dos horizontes diagnósticos em relação à superfície terrestre resultam da ação dos processos de formação do solo. A

representação cartográfica dos horizontes deve mostrar, portanto, as transições laterais e verticais entre os diferentes tipos de horizontes.

Os tipos de horizontes e suas subdivisões foram delimitados na descrição morfológica dos 231 monólitos. Os horizontes Ap, AB e BA apareceram, sucessivamente sobrepostos, em toda a área de estudo. Abaixo do horizonte AB observou-se o aparecimento dos horizontes Bw e Bi e a ocorrência pontual dos horizontes Io e Cg. A figura 5.3 mostra a distribuição dos horizontes Bw e Bi no plano bidimensional, e a figura 5.4 apresenta a ocorrência dos horizontes Io e Cg, bem como suas respectivas cores.

FIGURA 5.3 – OCORRÊNCIA DOS HORIZONTES Bi E Bw

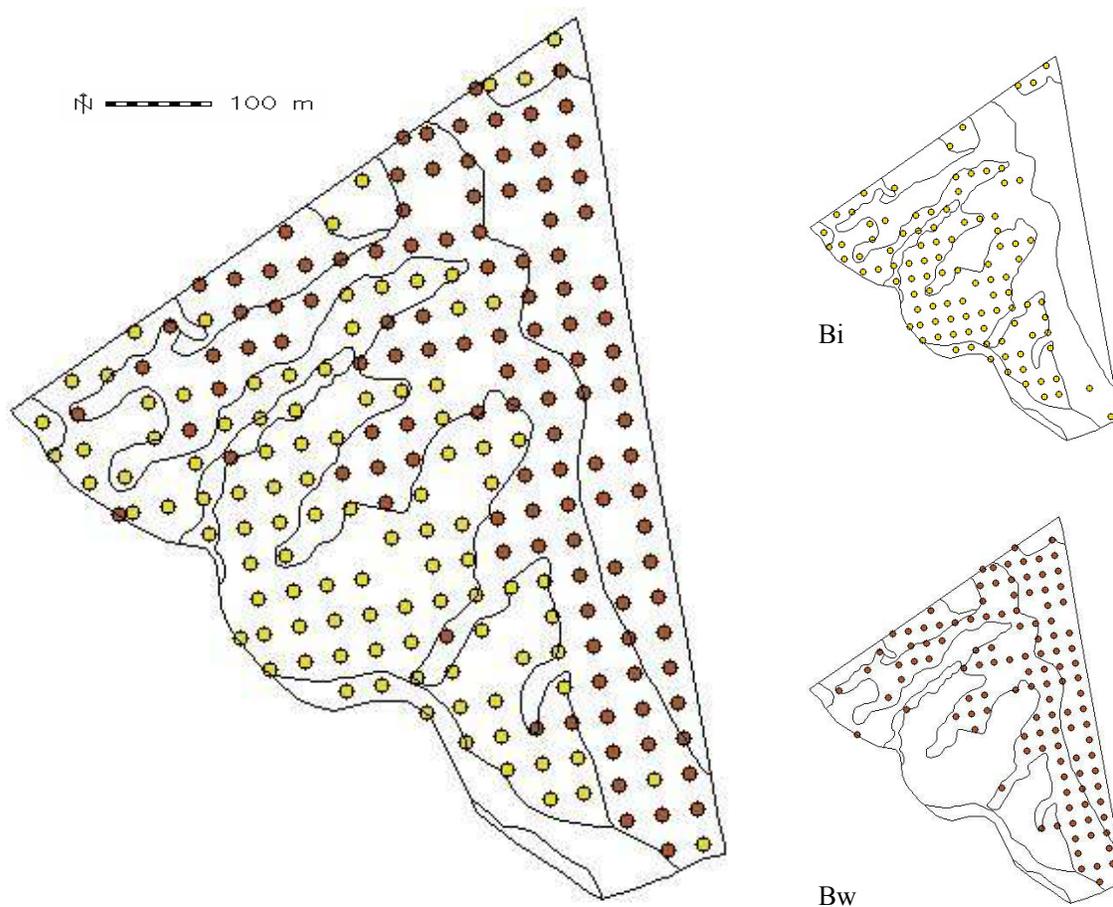
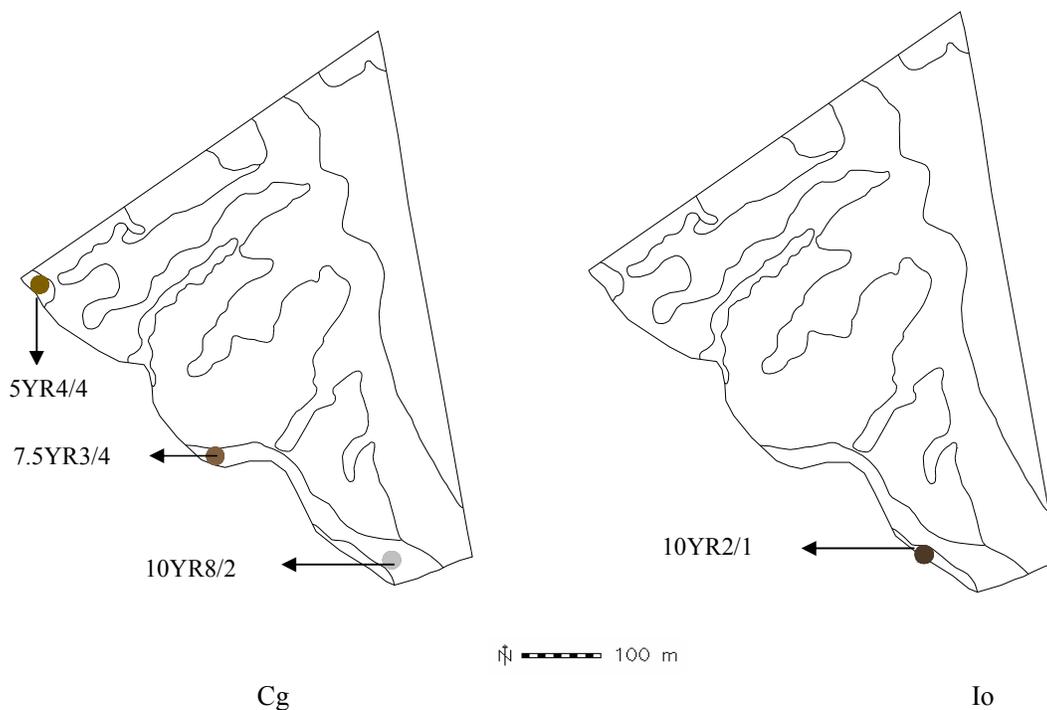
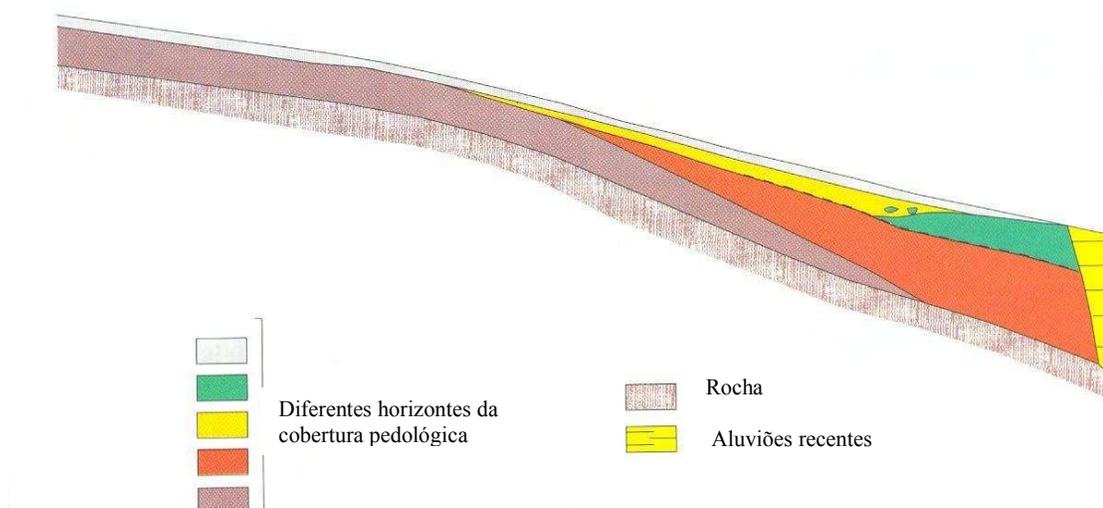


FIGURA 5.4 – OCORRÊNCIA DOS HORIZONTES Cg E Io



A representação usual dos horizontes de solos é feita por meio de cortes verticais, como exemplificado na figura 5.5. Este tipo de representação no plano bidimensional é incompleto, pois apresenta as variações da feição apenas no sentido vertical (FERNANDES DE BARROS, 1985, citado por SANTOS, 2000). Através da visualização volumétrica, é possível incorporar na representação a característica tridimensional da feição. Por meio de interação e manipulação gráfica do volume, pode-se visualizar em detalhe pontos específicos de interesse, sob diferentes ângulos, e obter a informação desejada utilizando várias formas de visualização como, por exemplo, isosuperfícies, isolinhas verticais e horizontais, cortes em todas as direções e perfis.

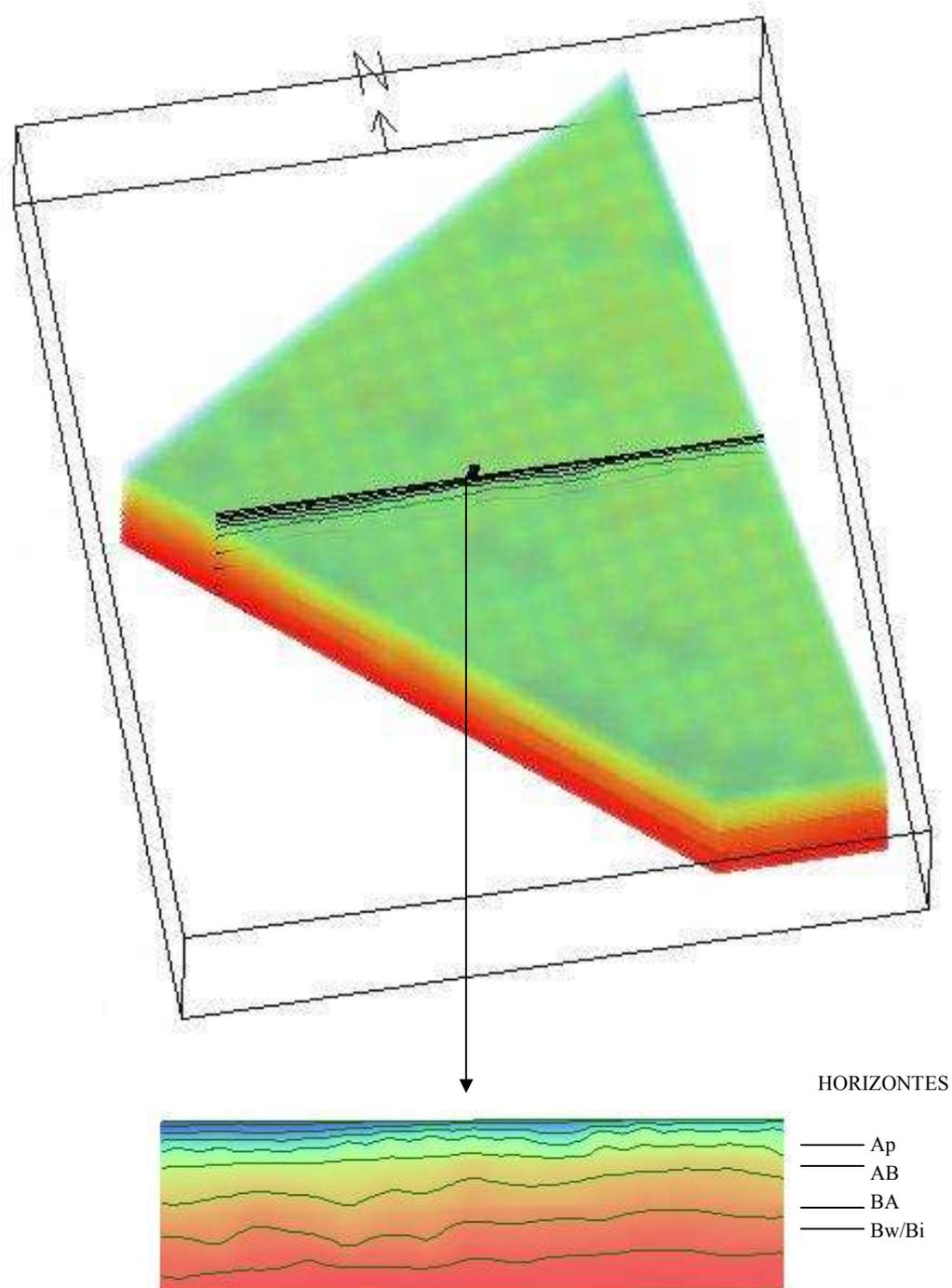
FIGURA 5.5 – HORIZONTES DO SOLO (2D)



FONTE: ADAPTADO DE: RUELLAN & DOSSO. 1993

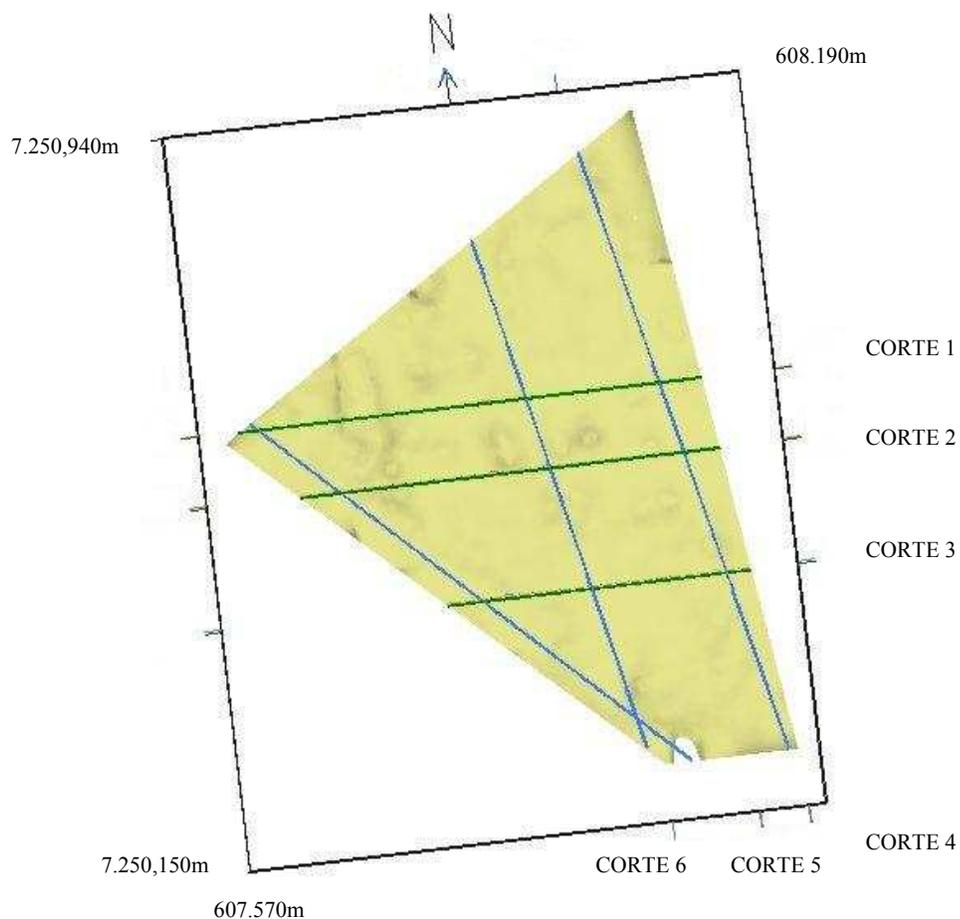
A figura 5.6 mostra a visualização volumétrica dos horizontes dos solos para toda a área de estudo. Para diferenciação entre os tipos de horizontes utilizou-se a variável visual tom de cor, adequada à representação cartográfica de diferenças qualitativas.

FIGURA 5.6 – HORIZONTES DO SOLO (3D): VOLUME



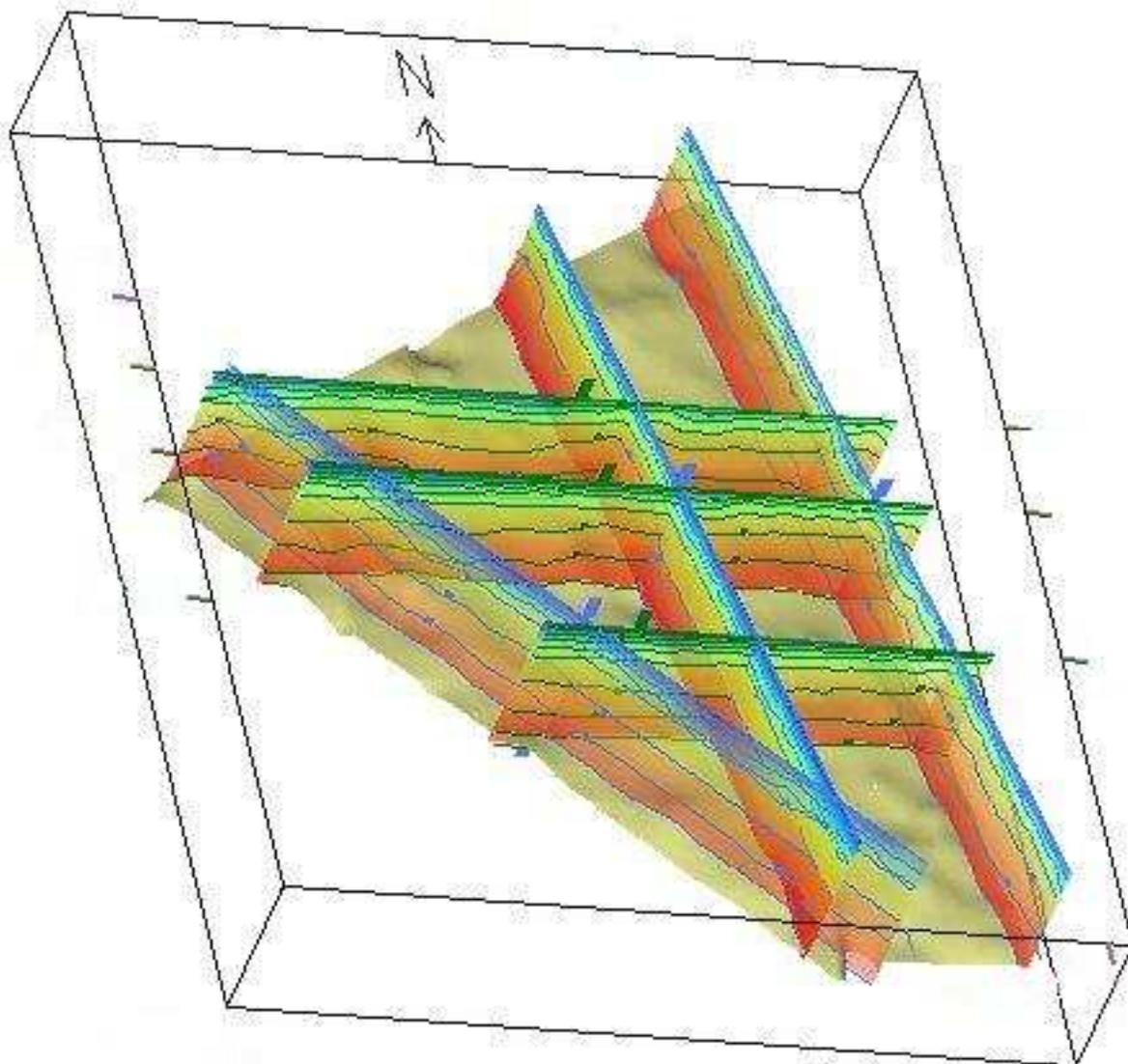
A fim de perceber as transições verticais e laterais da ocorrência dos diferentes tipos de horizontes de maneira contínua, deve-se interagir com o volume. As figuras seqüentes apresentam diferentes formas de interação realizadas com os volumes dos horizontes. A figura 5.7 apresenta a localização dos cortes verticais no volume, em diferentes direções, para visualização detalhada da informação.

FIGURA 5.7 – LOCALIZAÇÃO DOS CORTES VERTICAIS



Na figura 5.8, a isosuperfície representa o limite inferior do horizonte Bw/Bi, as cores apresentadas nos cortes diferenciam os tipos de horizontes e as isolinhas estão espaçadas de 10 em 10 metros, de acordo com a codificação utilizada para estes dados, para coincidir com os limites dos horizontes. Aplicou-se, também, 25% de transparência nas cores dos cortes verticais.

FIGURA 5.8 – CORTES NO VOLUME PARA VISUALIZAÇÃO DOS HORIZONTES



A figura 5.9 apresenta diferentes formas para visualizar em detalhe o corte vertical 4. A representação bidimensional do corte se visualiza as transições verticais dos horizontes (fig. 5.9-a), as isosuperfícies representam os limites inferiores dos horizontes Ap, AB, BA e Bw/Bi (fig. 5.9-b) e o *rendering* de volume mostra a distribuição espacial de maneira contínua (fig. 5.9-c). A visualização dos horizontes por extração de superfícies é apresentada na figura 5.10.

FIGURA 5.9 – DIFERENTES VISUALIZAÇÕES DOS HORIZONTES: CORTE 4

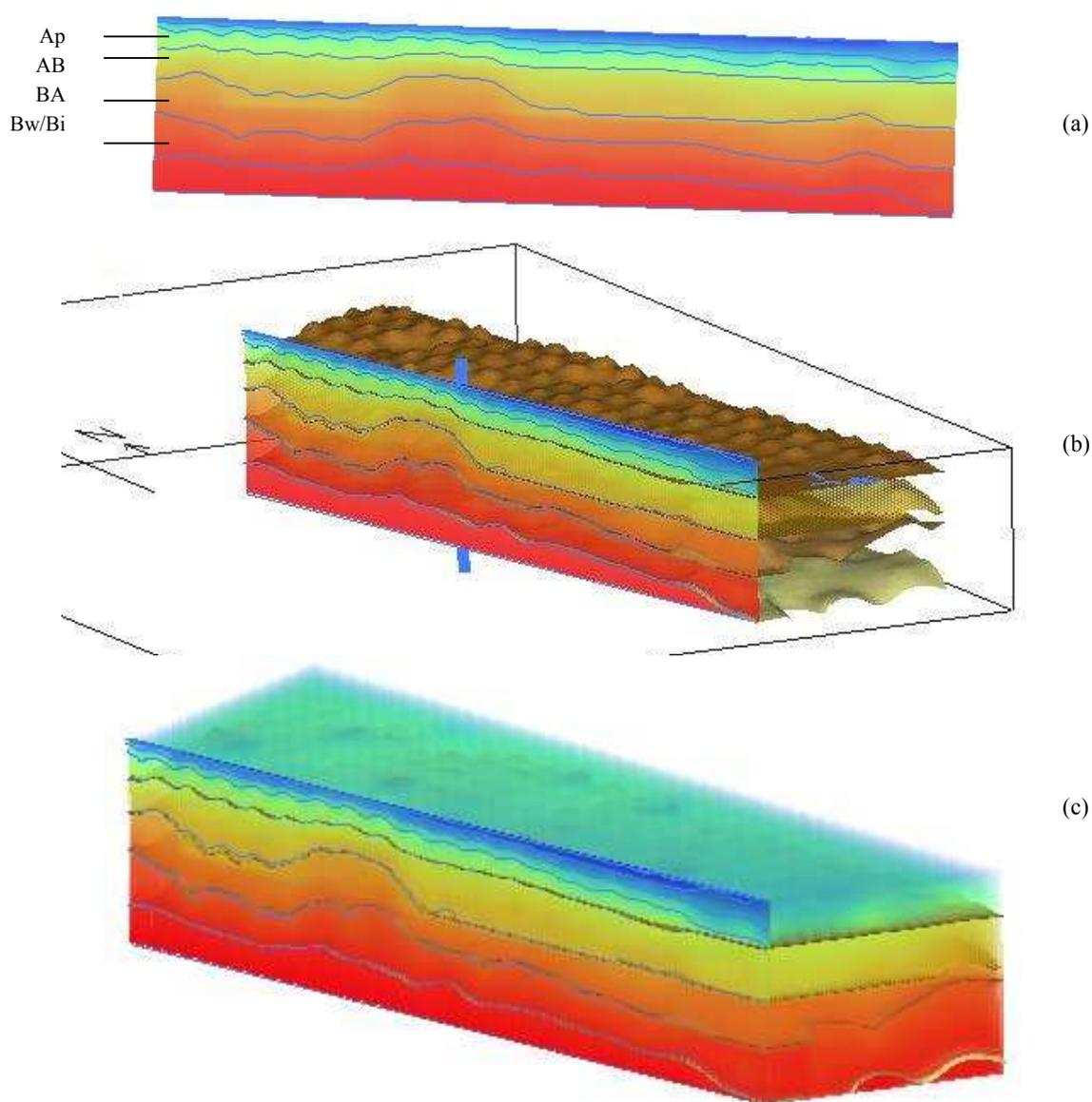
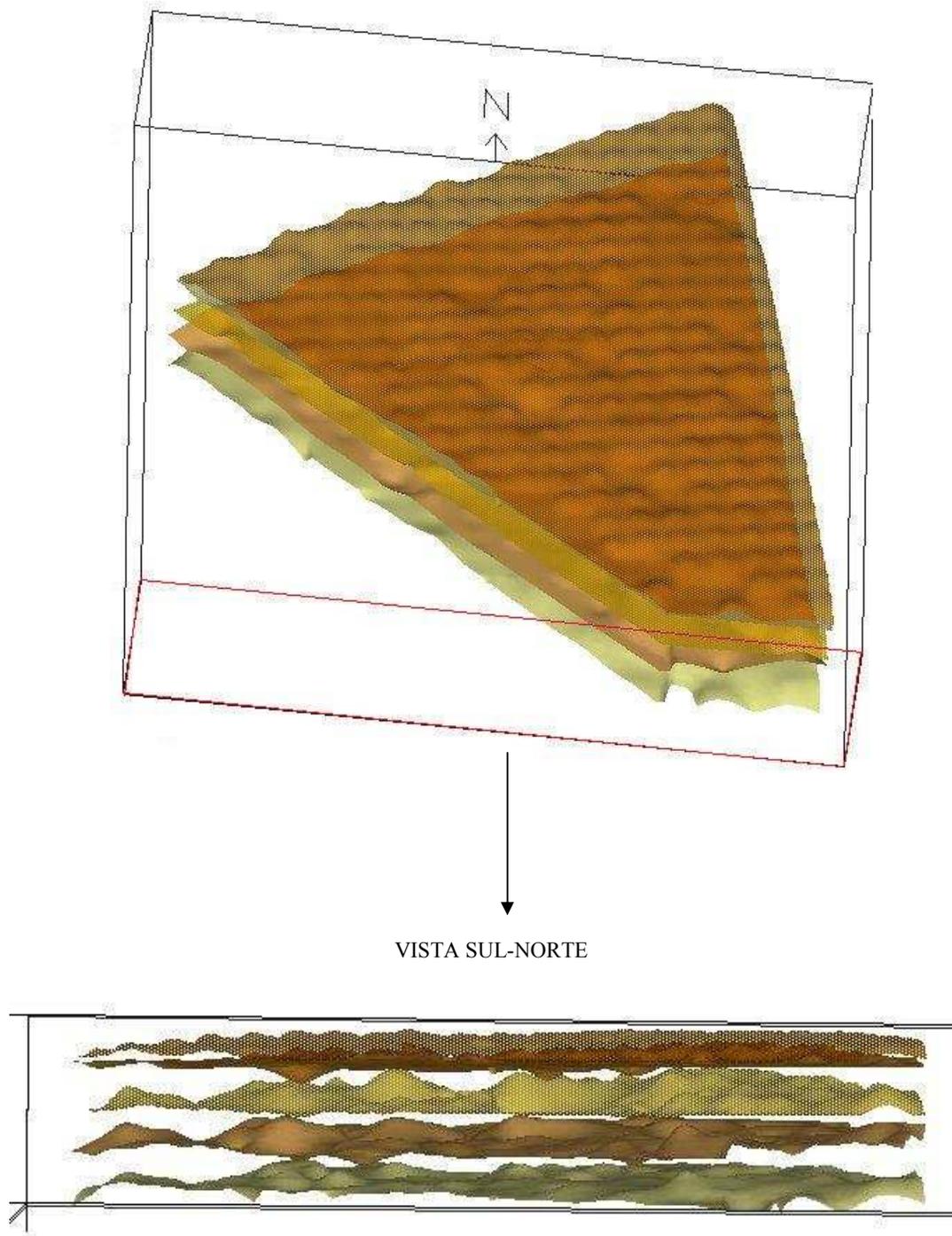


FIGURA 5.10 – VISUALIZAÇÃO DOS HORIZONTES POR EXTRAÇÃO DE SUPERFÍCIES



### 5.1.2 Cores

Em cartografia de solos a cor é usada como uma variável visual para representação taxonômica dos solos em mapas pedológicos bidimensionais. As cores são dados de natureza qualitativa, obtidos na descrição morfológica das amostras, que caracterizam a composição do solo.

Considerando a cor do solo como um atributo e não como uma variável visual, na representação bidimensional proposta utiliza-se os polígonos de Voronoi para definir a extensão desta propriedade, de maneira contínua, para toda a região de estudo. Dessa forma, para cada horizonte individualmente, a área foi dividida em polígonos de Voronoi e cada polígono recebeu o valor correspondente ao valor do ponto em seu interior. A cor representada corresponde à cor do solo no sistema de Munsell. Os mapas resultantes representam a variação lateral das cores dos solos nos horizontes. As figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam as cores dos solos para os horizontes Ap, AB, BA e Bw/Bi, respectivamente.

A visualização volumétrica mostra a expressão das cores dentro do solo, em todas as direções. Com este tipo de representação é possível perceber a distribuição espacial do atributo por todo o corpo do solo. A partir da classificação dos dados pelos matizes e do uso de ferramentas de manipulação gráfica do programa Vis5D, a figura 5.15 apresenta a visualização volumétrica das classes do atributo cor.

FIGURA 5.11 – COR DOS SOLOS NO HORIZONTE Ap

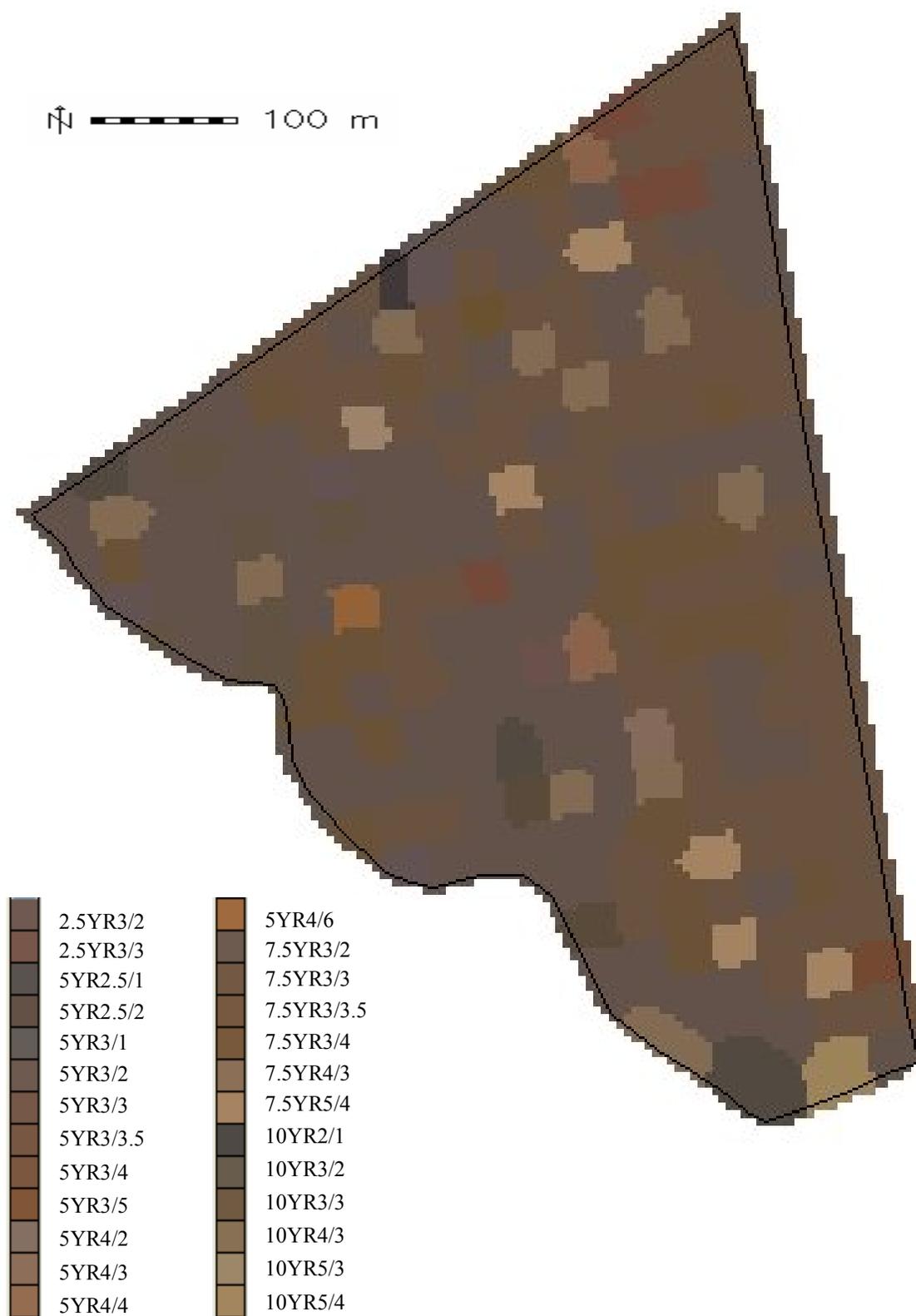


FIGURA 5.12 – COR DOS SOLOS NO HORIZONTE AB

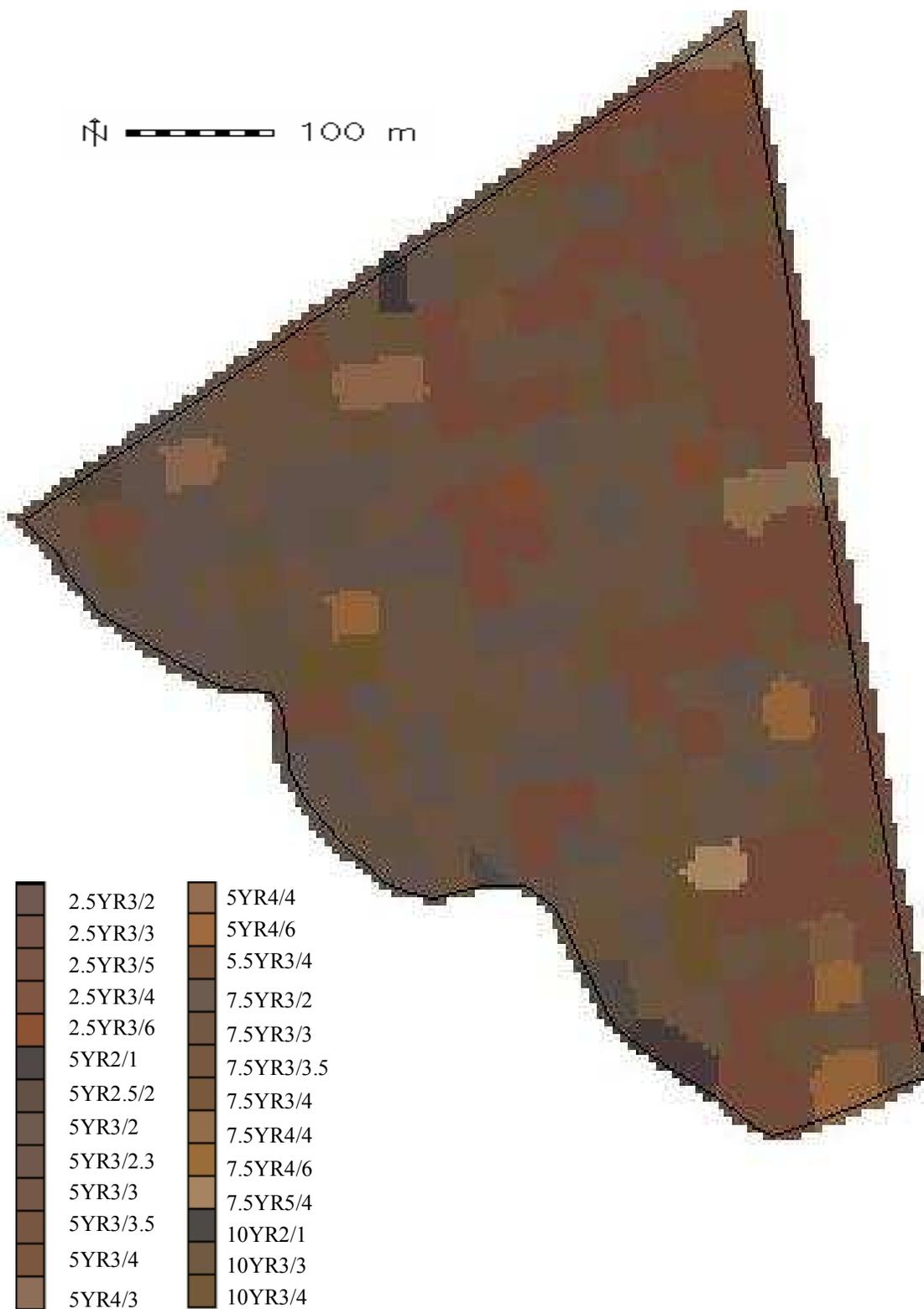


FIGURA 5.13 – COR DOS SOLOS NO HORIZONTE BA

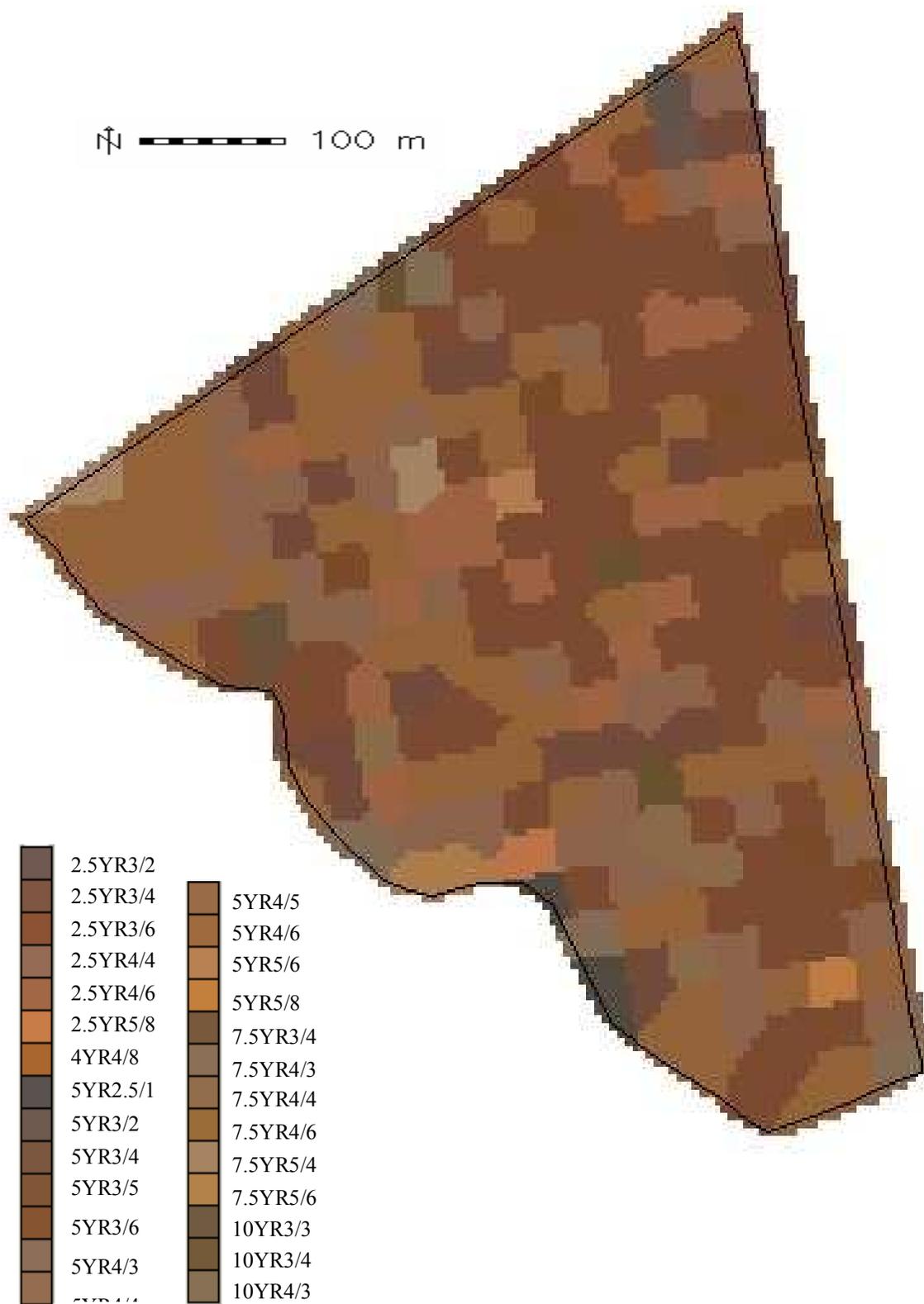


FIGURA 5.14 – COR DOS SOLOS NOS HORIZONTES Bi E Bw

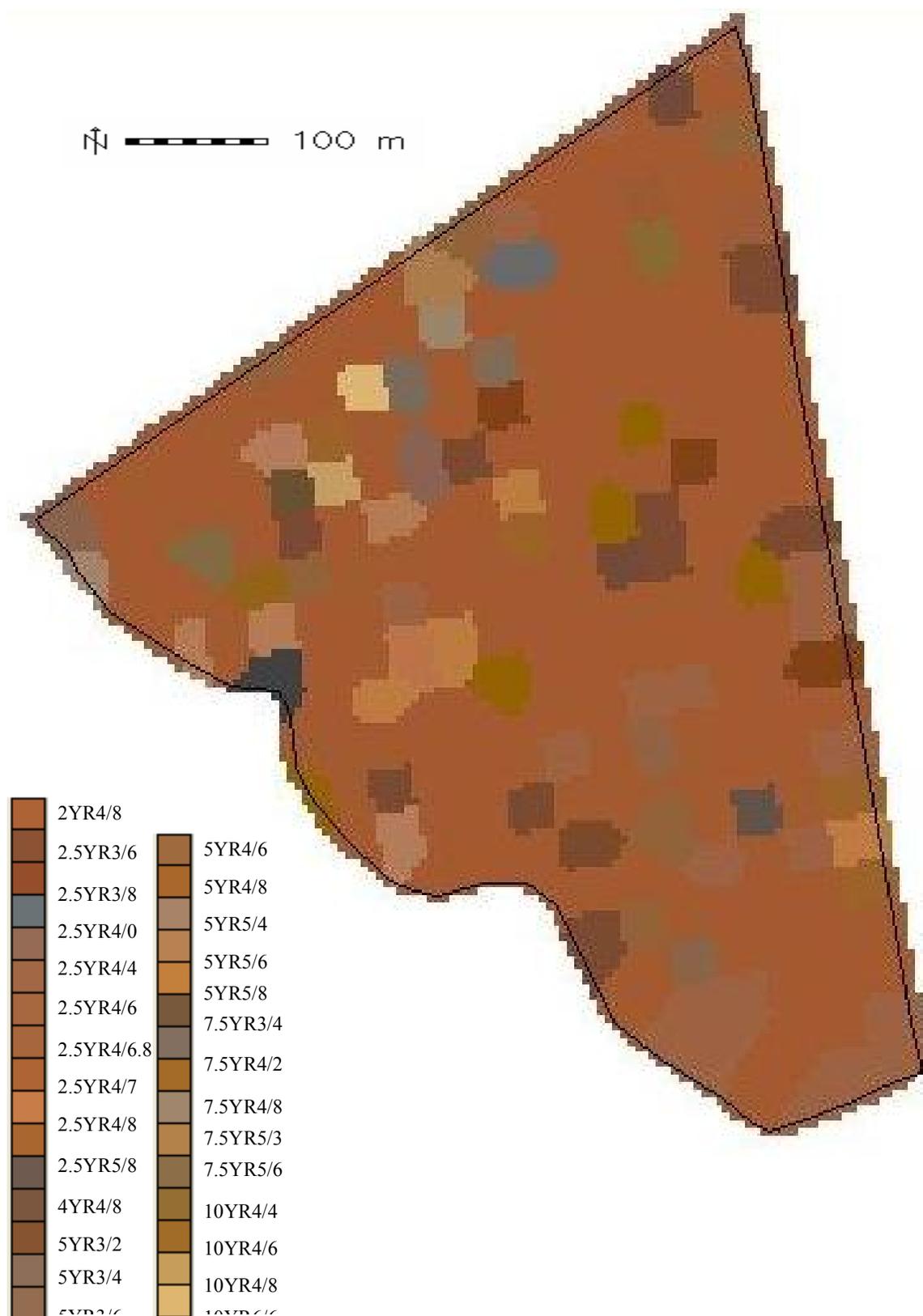
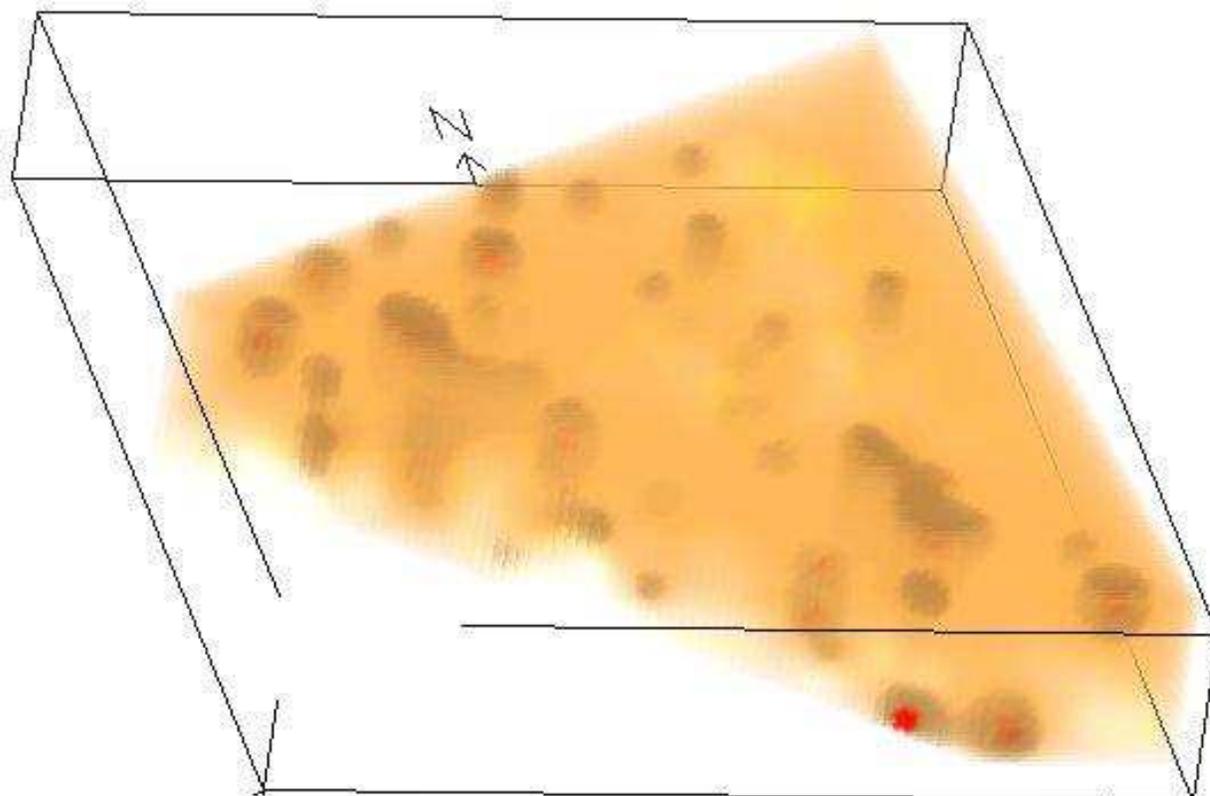


FIGURA 5.15 – VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DA COR DO SOLO

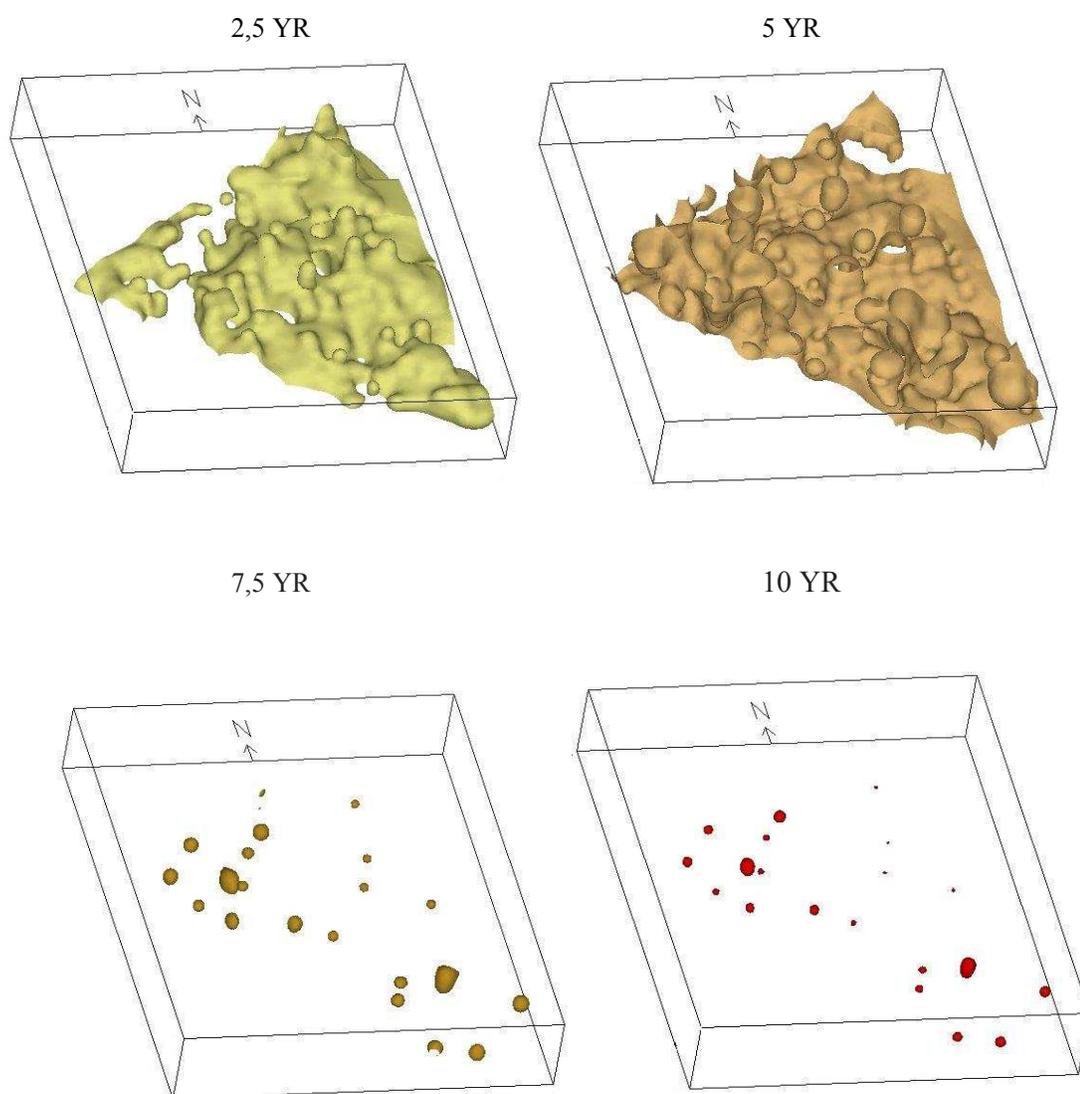


CLASSIFICAÇÃO POR MATIZES



Observando os dados da descrição morfológica dos monólitos, nota-se a predominância das cores correspondentes ao matiz 5YR em todos os horizontes. Na figura 5.16, apresentam-se as isosuperfícies representativas das classes de cores referentes aos matizes 2,5YR, 5YR, 7,5YR e 10YR, respectivamente. Com esta visualização, pode-se verificar a extensão e a distribuição espacial destes matizes no solo.

FIGURA 5.16 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CORES DOS SOLOS



## 5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

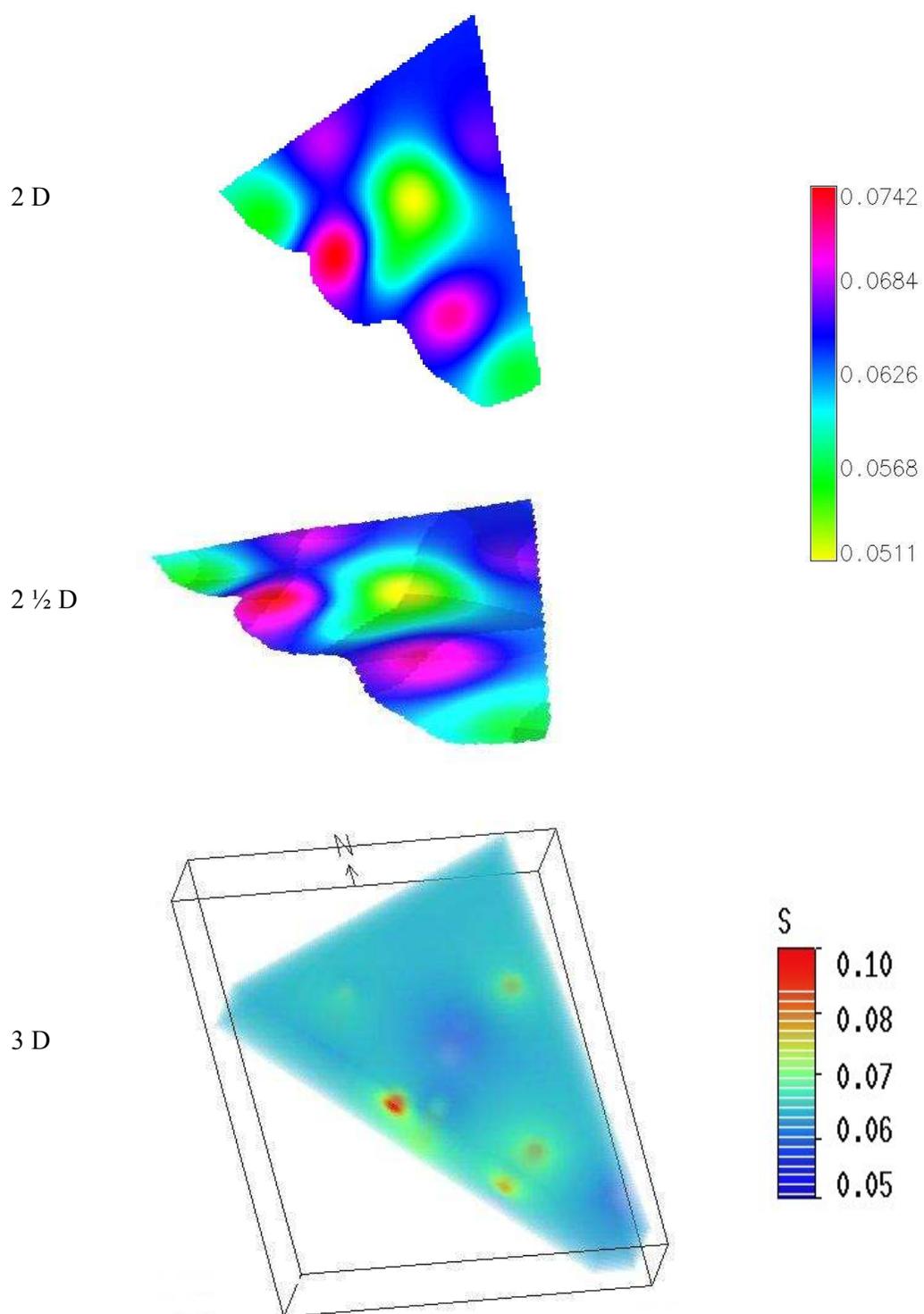
Os dados provenientes das análises físicas, referentes às amostras coletadas nos 9 perfis, são de natureza quantitativa. A estimativa dos valores dos atributos para toda a área de ocorrência foi feita usando os algoritmos da *spline* regularizada com tensão para interpolação de superfícies e da *spline* regularizada com tensão tridimensional para formação dos volumes.

Com os dados das propriedades físicas foram geradas representações que mostram a distribuição dos atributos da subsuperfície no plano bidimensional, as superfícies de variação destes atributos, isto é, seus padrões sobre superfícies bidimensionais, e a distribuição espacial dos atributos através de volumes. Explorando as ferramentas de interação e de manipulação gráfica do programa Vis5D, a informação volumétrica é mostrada de diferentes maneiras e pontos de vista.

As visualizações foram criadas para as seguintes propriedades: densidade do solo; umidade volumétrica a 6 kPa, umidade volumétrica a 10 kPa, umidade volumétrica a 100 kPa e umidade volumétrica a 1500 kPa; porosidade total e porosidade macro; água disponível; e frações granulométricas correspondentes aos percentuais de areia, silte e argila (textura). Aqui são apresentadas as visualizações da água disponível, textura e densidade do solo. As visualizações das demais propriedades físicas encontram-se no ANEXO 2.

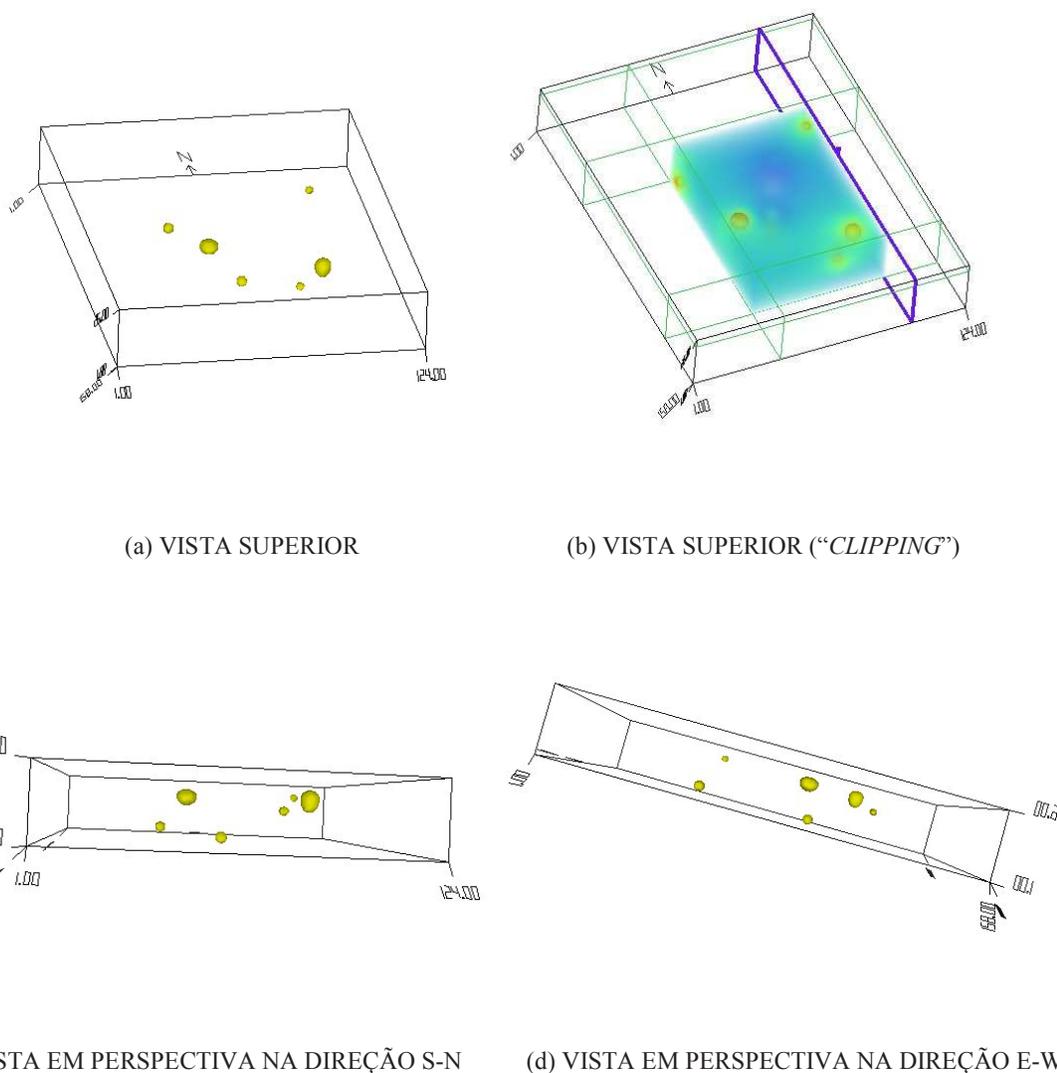
### **Água Disponível**

A figura 5.17 mostra as representações no plano, de superfície e volumétrica da água disponível no solo. A superfície e o plano mostram a variação da quantidade de água disponível para a porção do solo até um metro de profundidade, através da representação hipsométrica desses isovalores. E, o volume mostra o padrão de distribuição da quantidade de água disponível para cada ponto dentro do solo.

FIGURA 5.17 – ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

Na figura 5.18, podem-se visualizar os lugares de maior quantidade de água disponível no corpo do solo, a partir de diferentes pontos de vista. A mudança do ponto de vista permite conhecer a distribuição espacial destas ocorrências em todas as direções dentro do volume. Comparando as figuras 5.18-a com 5.18-c e d, observa-se na figura 5.18-a a distribuição horizontal do atributo e, nas figuras 5.18-c e d, vê-se sua distribuição vertical.

FIGURA 5.18 – OCORRÊNCIA DE MAIOR QUANTIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO (0,080 a 0,097 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)



A figura 5.19 apresenta a localização do corte vertical no volume, para interação e visualização detalhada desta porção do solo. Na figura 5.20, as isolinhas representam valores com intervalo de  $0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e os diferentes tons de cor representam os isovalores de água disponível no solo. Na figura 5.21, as isosuperfícies representam a quantidade de  $0,080 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  de água disponível no solo e o *rendering* de volume mostra a distribuição espacial e contínua desta propriedade.

FIGURA 5.19 – LOCALIZAÇÃO DO CORTE VERTICAL

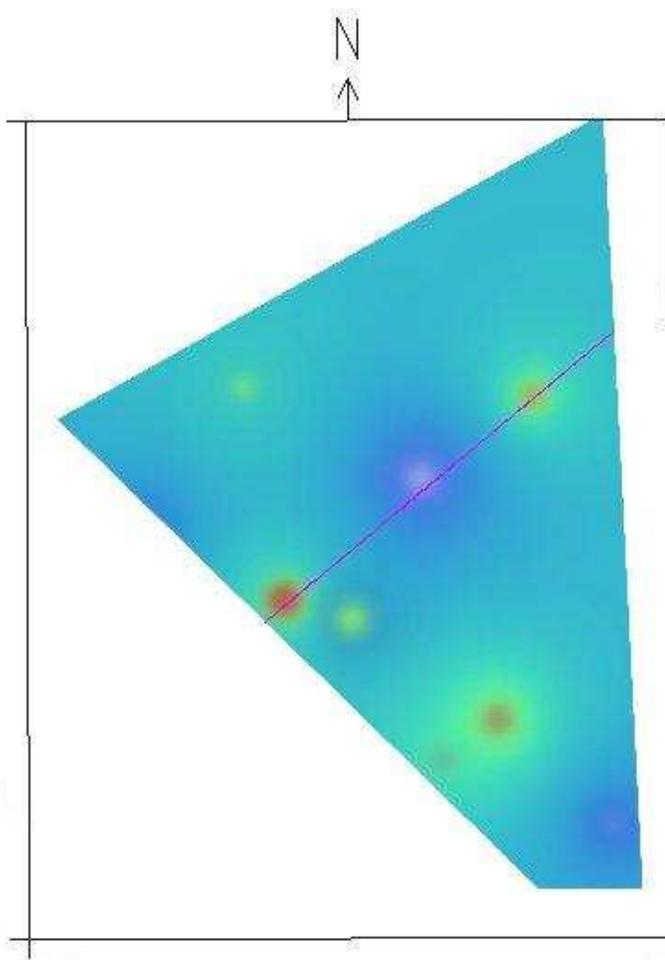


FIGURA 5.20 – VISUALIZAÇÃO DO CORTE VERTICAL

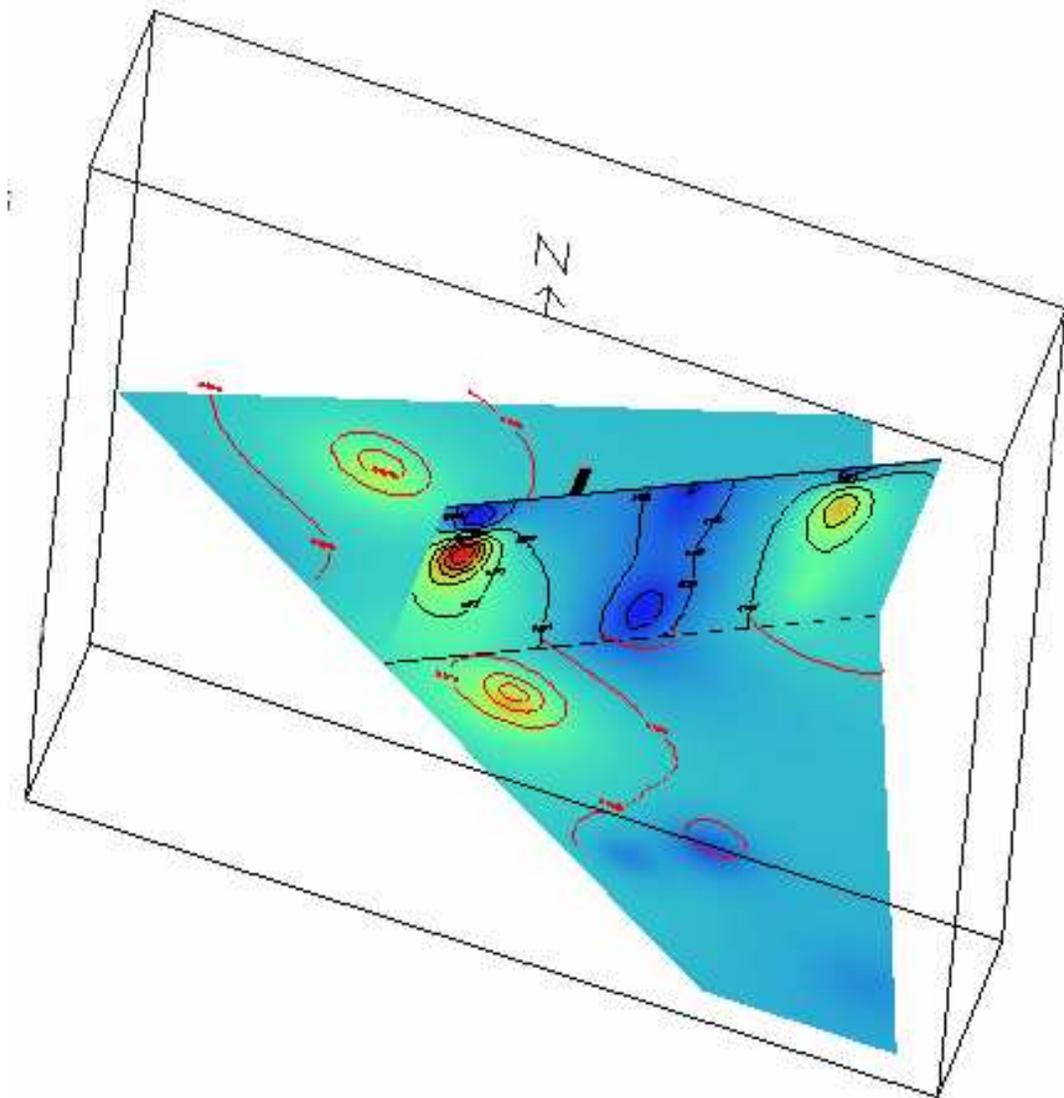
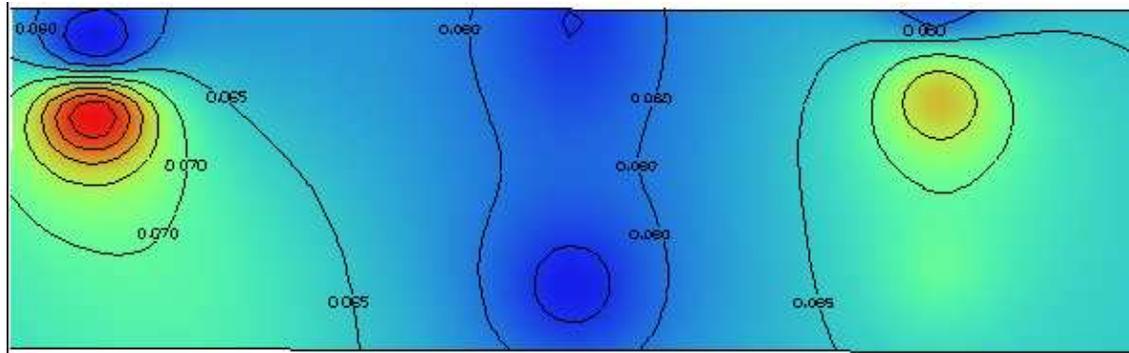
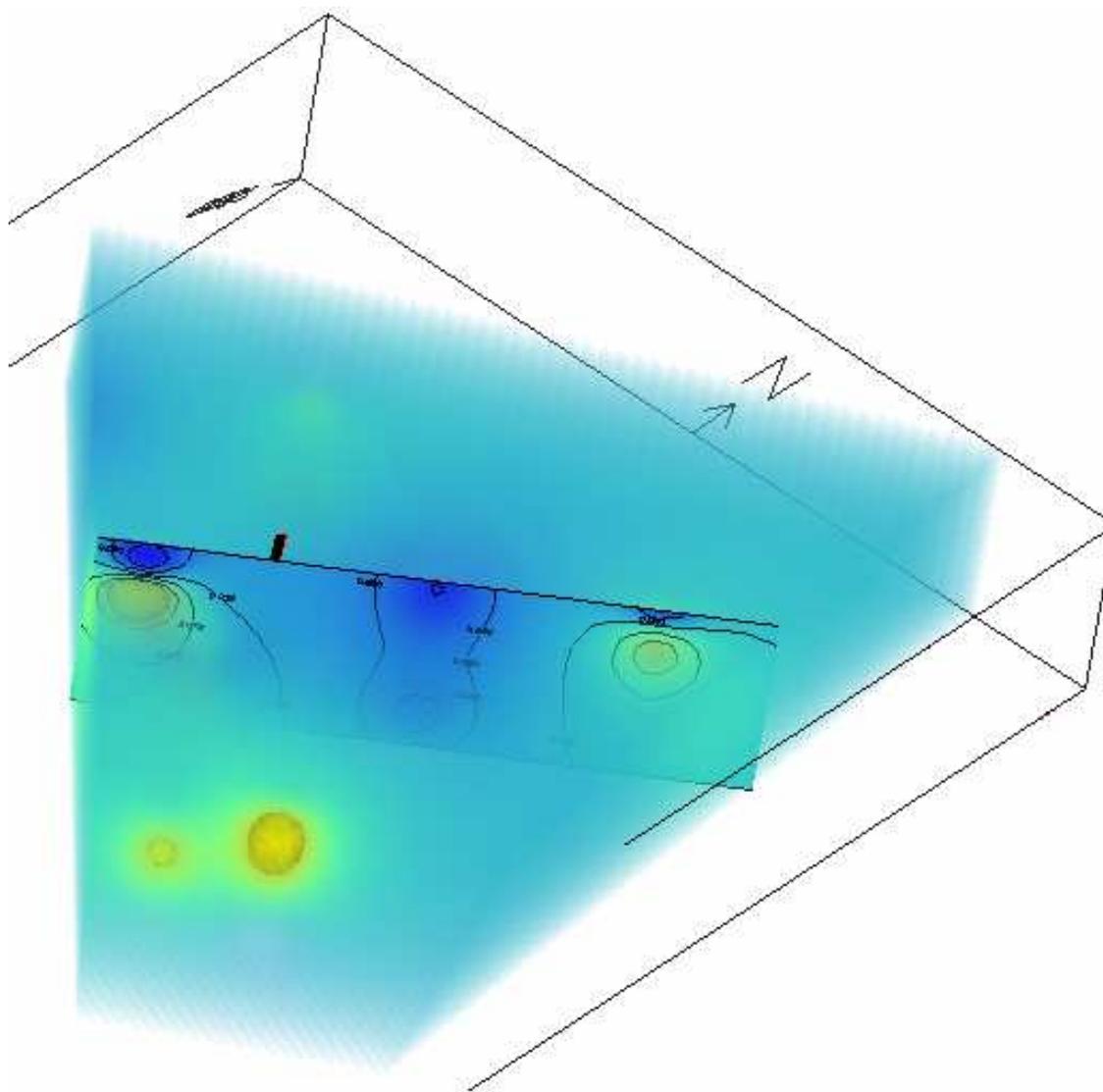
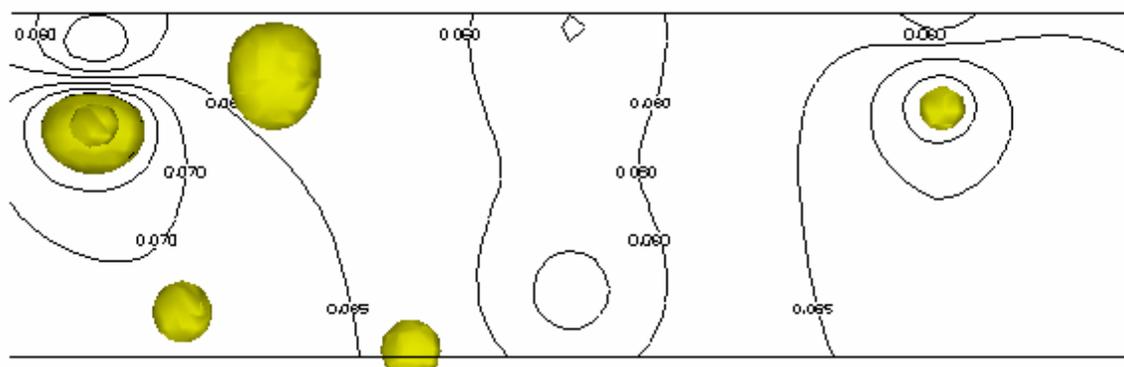


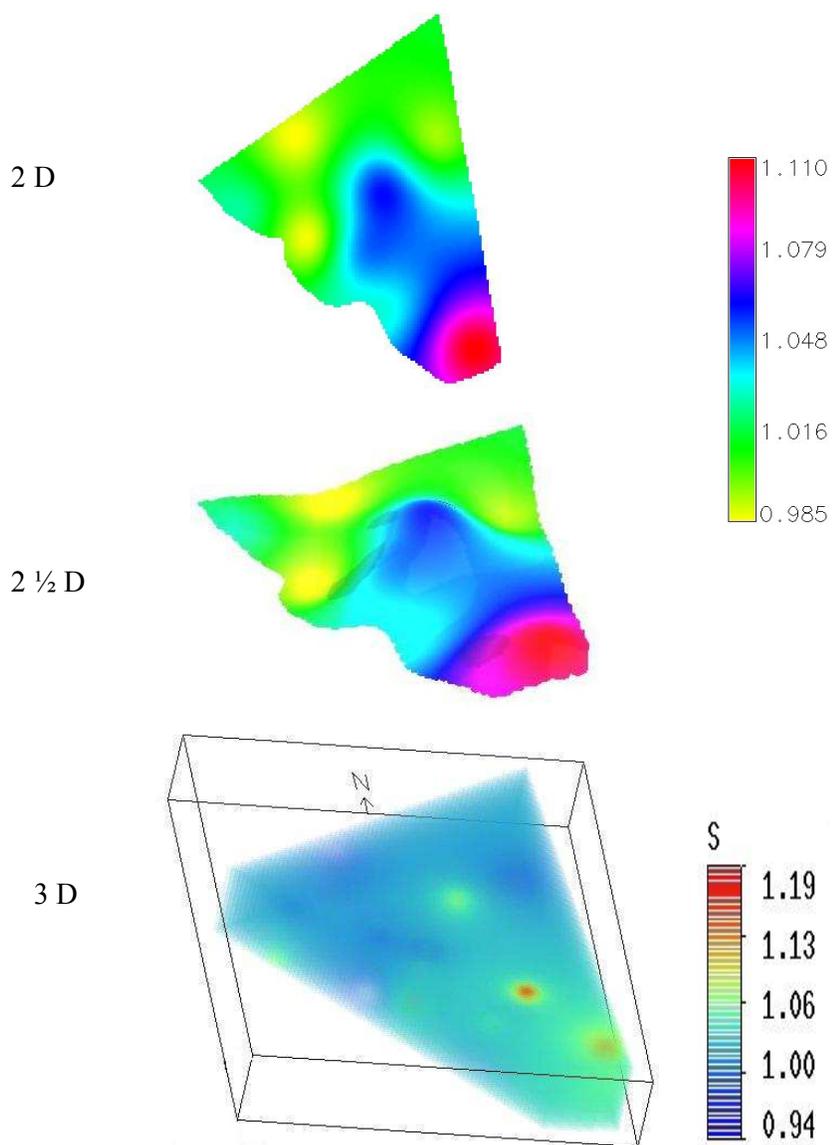
FIGURA 5.21 – VISUALIZAÇÃO DO CORTE VERTICAL



## Densidade do Solo

Como no caso da água disponível, a densidade do solo para a área de estudo pode ser visualizada na figura 5.22. As representações no plano e de superfície mostram a variação da densidade correspondente à faixa de um metro de profundidade do solo. Com o volume é possível visualizar a distribuição espacial desta propriedade na subsuperfície.

FIGURA 5.22 – DENSIDADE DO SOLO ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )



Foram geradas isosuperfícies em diferentes tons de cor, as quais representam os valores de: 1,110 (fig. 5.23); 1,079 (fig. 5.24); 1,048 (fig. 5.25); 1,021 (fig. 5.26); 1,016 (fig. 5.27) e 0,985 kg/dm<sup>3</sup> (fig. 5.28). Na figura 5.29 essas isosuperfícies são apresentadas juntamente com o *rendering* de volume.

FIGURA 5.23 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE 1,110 kg/dm<sup>3</sup>

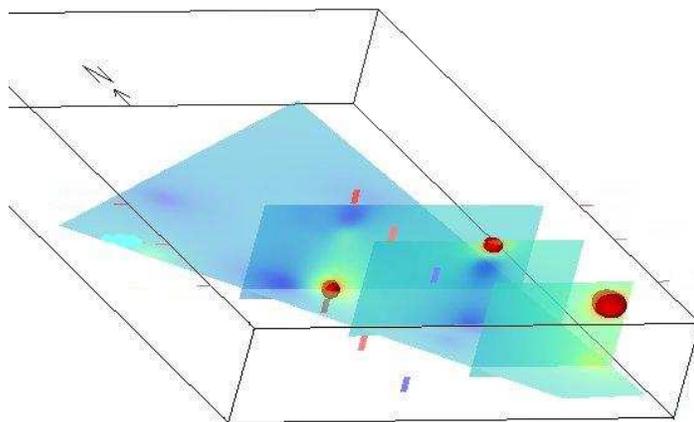


FIGURA 5.24 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE 1,079 kg/dm<sup>3</sup>

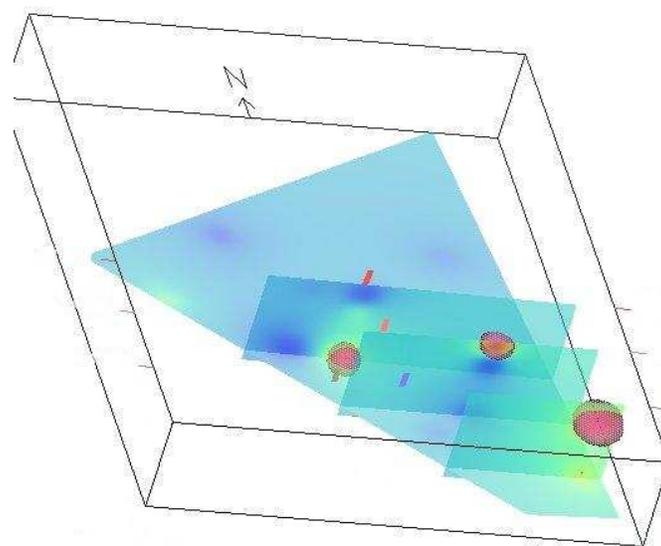


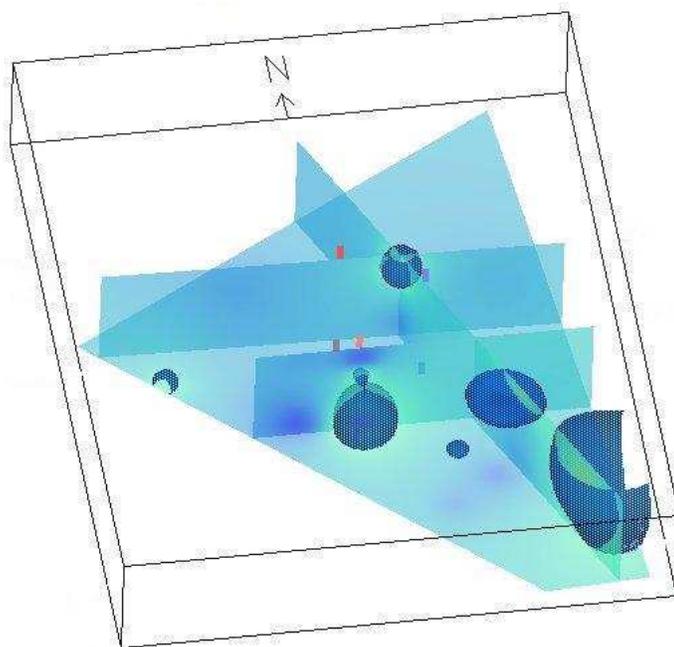
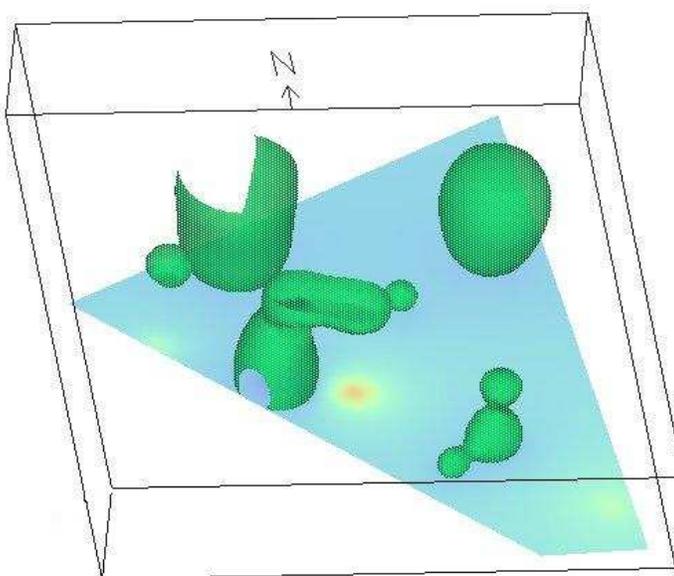
FIGURA 5.25 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE 1,048 kg/dm<sup>3</sup>FIGURA 5.26 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE 1,021 kg/dm<sup>3</sup>

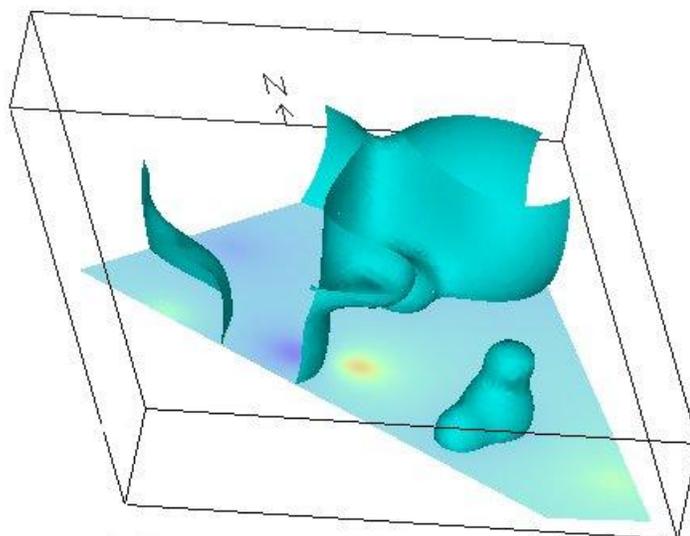
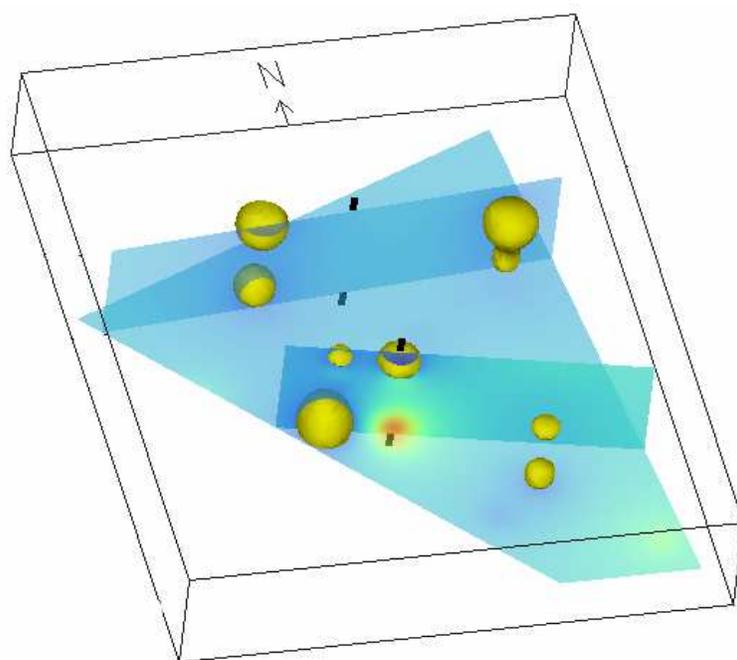
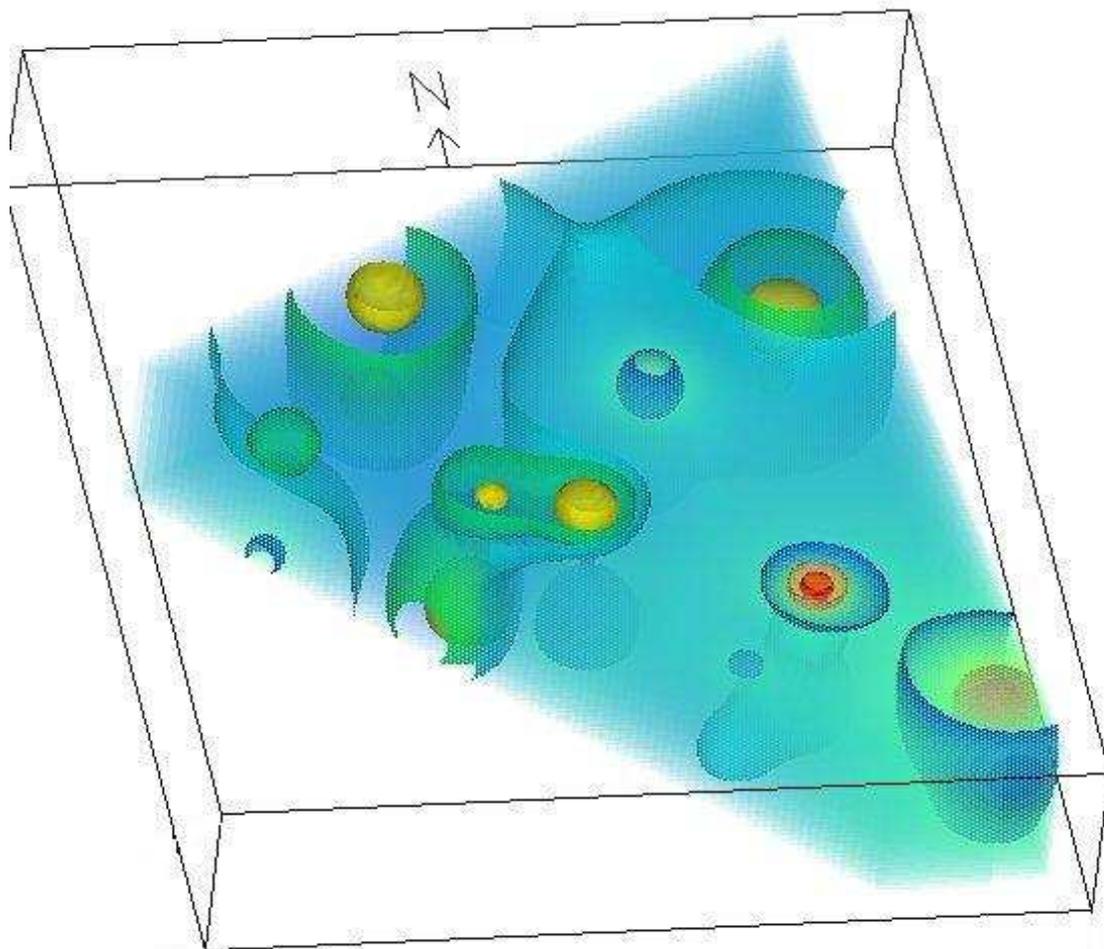
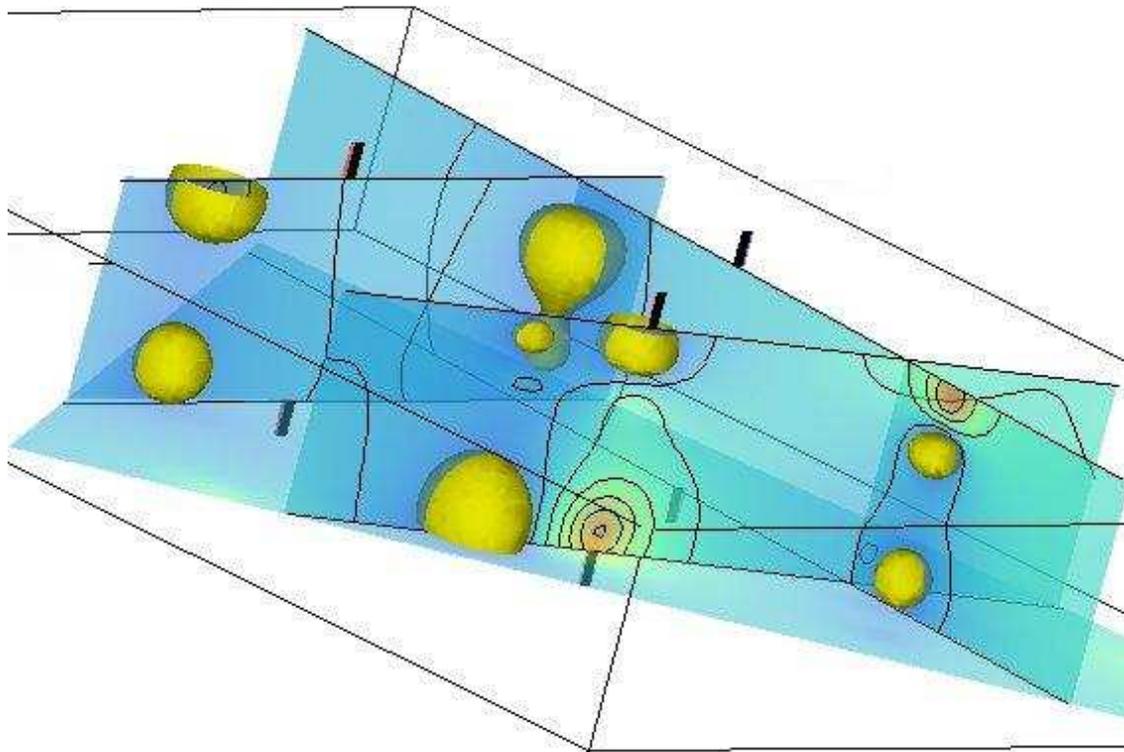
FIGURA 5.27 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE  $1,016 \text{ kg/dm}^3$ FIGURA 5.28 – ISOSUPERFÍCIE DE DENSIDADE  $0,985 \text{ kg/dm}^3$ 

FIGURA 5.29 – VISUALIZAÇÃO COM ISOSUPERFÍCIES E *RENDERING* DE VOLUME

Analisando o volume gerado, percebe-se que as menores densidades (melhor) ocorrem em diferentes profundidades. Este tipo de informação é mais facilmente obtido na visualização volumétrica do que nas outras representações, onde se visualiza apenas a variação da densidade na superfície horizontal. A figura 5.30 apresenta a distribuição espacial das melhores densidades no solo. Nessa figura as isosuperfícies representam a quantidade de  $0,985 \text{ kg/dm}^3$ , as isolinhas representam valores com intervalo de  $0,02 \text{ kg/dm}^3$  e os diferentes tons de cor representam os isovalores de densidade do solo. Utilizou-se 35% de transparência nos cortes verticais.

FIGURA 5.30 – VISUALIZAÇÃO DAS MELHORES DENSIDADES DO SOLO: DETALHE  
(0,985 kg/dm<sup>3</sup>)



## **Textura**

A textura refere-se à proporção relativa entre as frações de areia, silte e argila no solo. Esta propriedade, por se tratar da proporção relativa de três elementos é, normalmente, apresentada na forma de gráfico circular ou gráfico triangular.

As quantidades relativas das frações de silte, areia e argila foram interpoladas individualmente. Da interpolação resultaram as representações planas, de superfícies e volumétricas para cada fração. As visualizações provenientes deste procedimento são apresentadas nas figuras 5.31, 5.32 e 5.33. Os planos e superfícies resultantes representam as superfícies de variação de cada uma das frações e os volumes apresentam o comportamento espacial das frações no interior dos solos.

O elemento predominante na área de estudo é a argila. Na figura 5.34, apresenta-se, por meio de isosuperfícies, a distribuição espacial das maiores quantidades de argila nos solos.

FIGURA 5.31 – TEXTURA DO SOLO (g/kg): VISUALIZAÇÃO NO PLANO (2D)

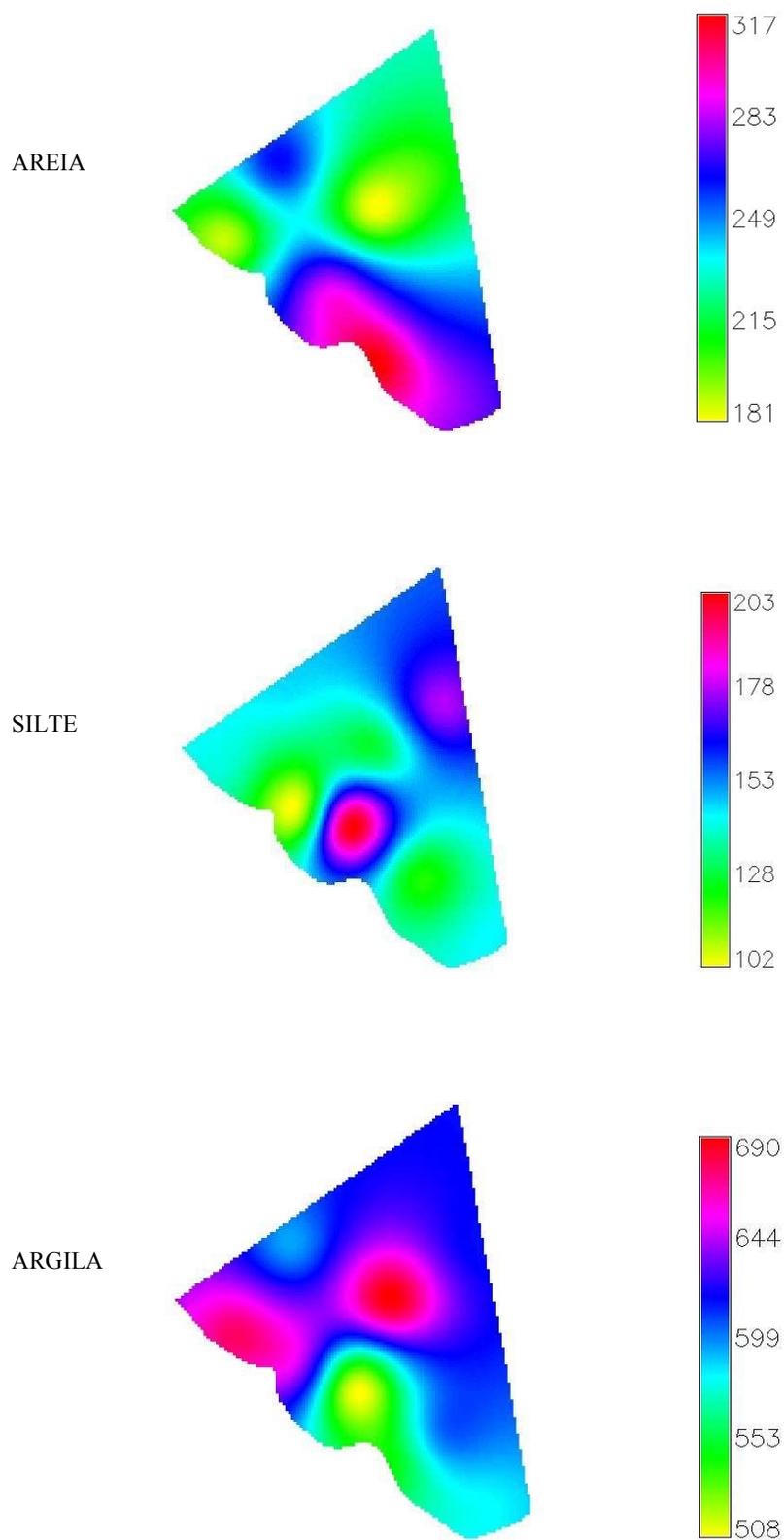


FIGURA 5.32 – TEXTURA DO SOLO (g/kg): VISUALIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE (2½D)

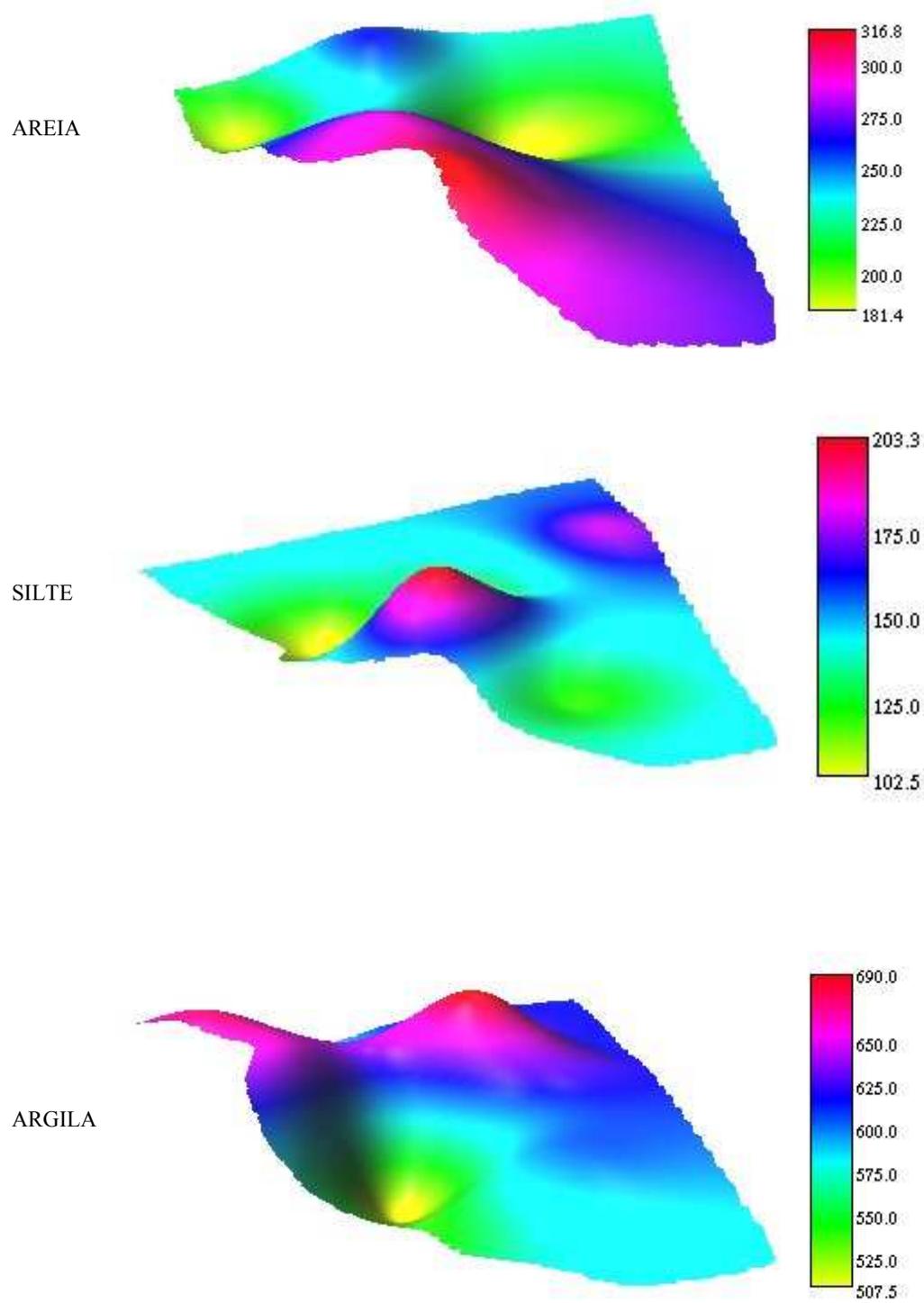


FIGURA 5.33 – TEXTURA DO SOLO (g/kg): VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA (3 D)

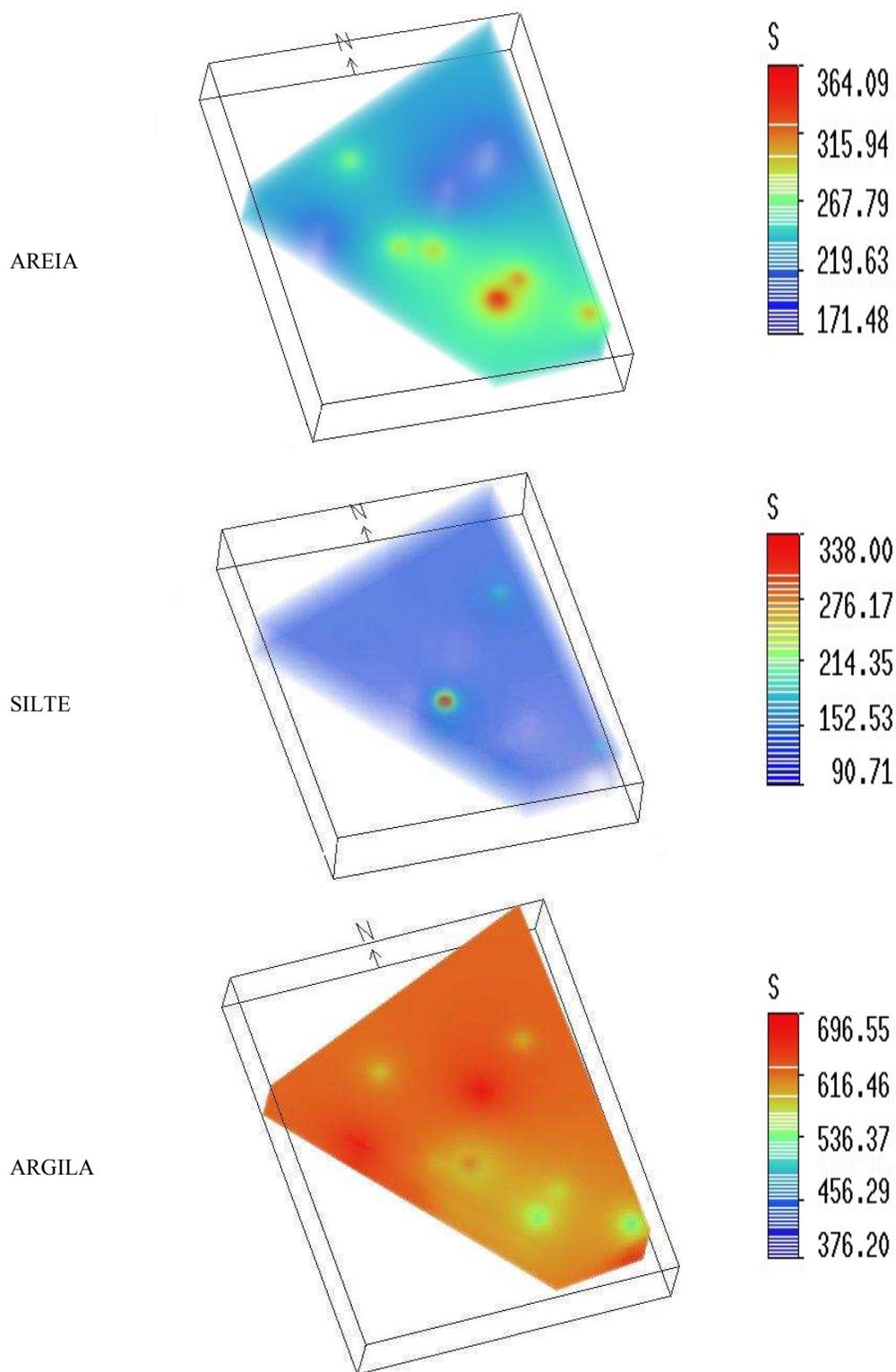
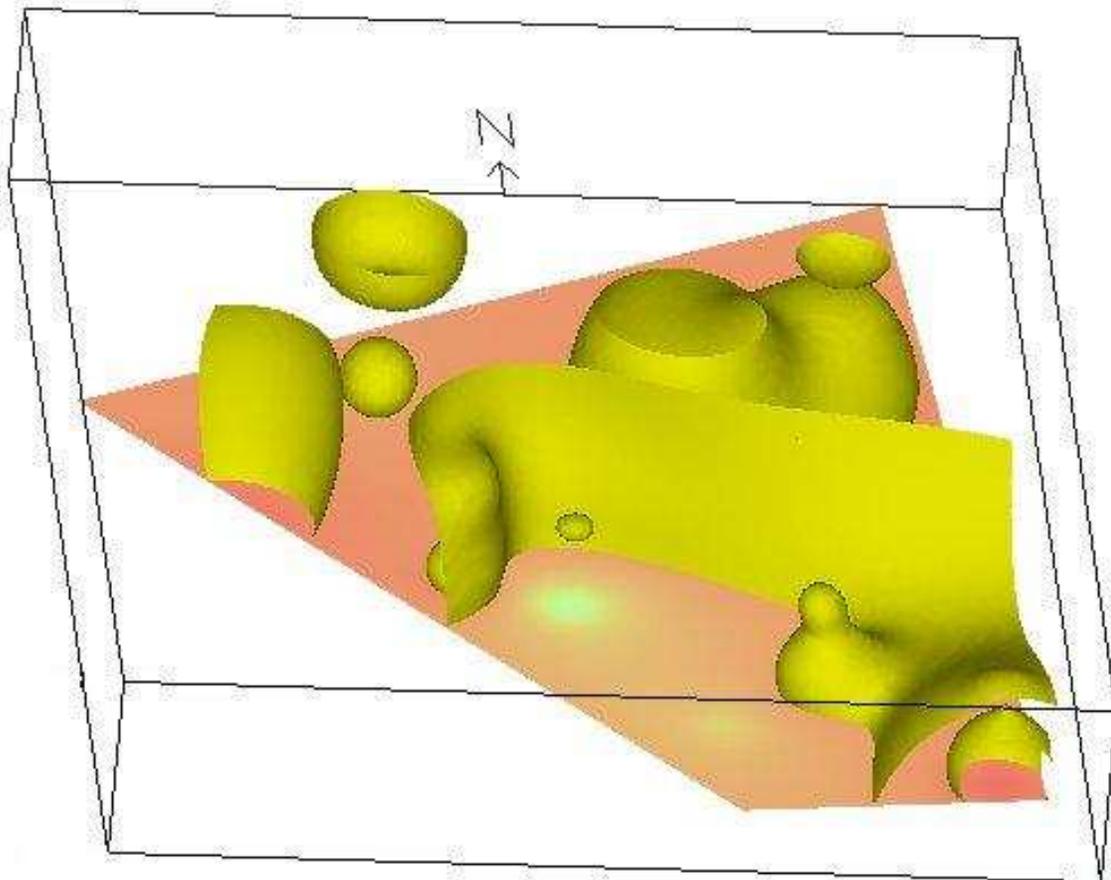


FIGURA 5.34 - VISUALIZAÇÃO DAS MAIORES QUANTIDADES DE ARGILA (SOLOS MAIS ARGILOSOS)



### 5.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS

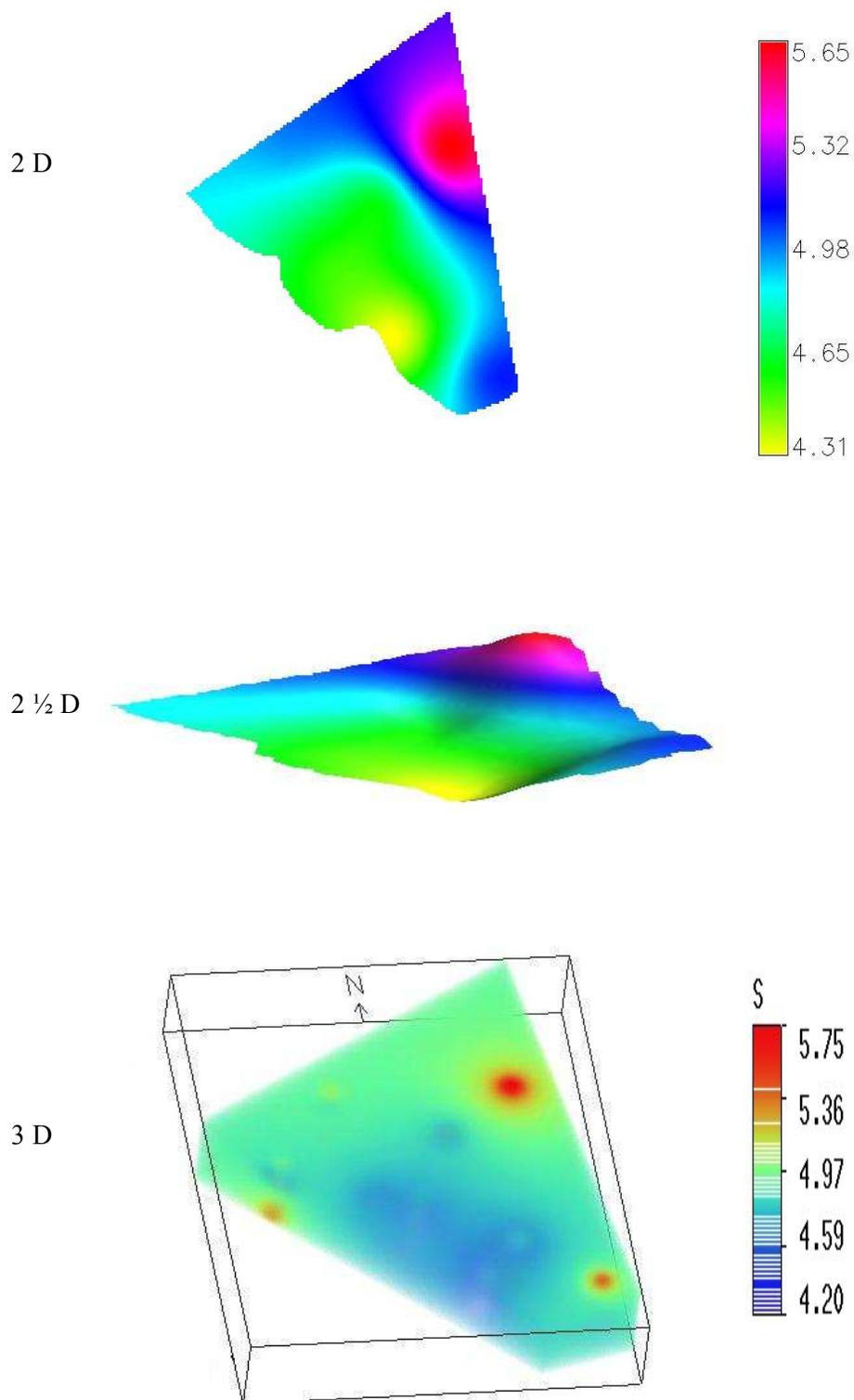
Tal como os dados das análises físicas, os dados provenientes das análises químicas, referentes às amostras coletadas nos 9 perfis, são de natureza quantitativa. A interpolação, para estimativa dos valores dos atributos em toda a área de estudo, foi feita usando os algoritmos da *spline* regularizada com tensão para superfícies e da *spline* regularizada com tensão tridimensional para formação dos volumes. A partir dos dados das propriedades químicas foram geradas representações que mostram a distribuição dos atributos no plano bidimensional, as superfícies de variação destes atributos e a distribuição espacial dos atributos por meio de volumes.

Os dados das análises químicas foram utilizados para visualização das seguintes propriedades dos solos: pH, soma de bases, quantidade de matéria orgânica e coeficiente de troca catiônica. As visualizações do pH e quantidade de matéria orgânica são aqui apresentadas, e as demais estão no ANEXO 3.

#### **pH – CaCl<sub>2</sub>**

As visualizações no plano e na superfície mostram a variação do pH do solo, até um metro de profundidade, por meio de isovalores apresentados por diferentes cores,. A visualização do volume mostra a distribuição espacial dos valores de pH dentro do solo (fig. 5.35).

FIGURA 5.35 – pH DO SOLO

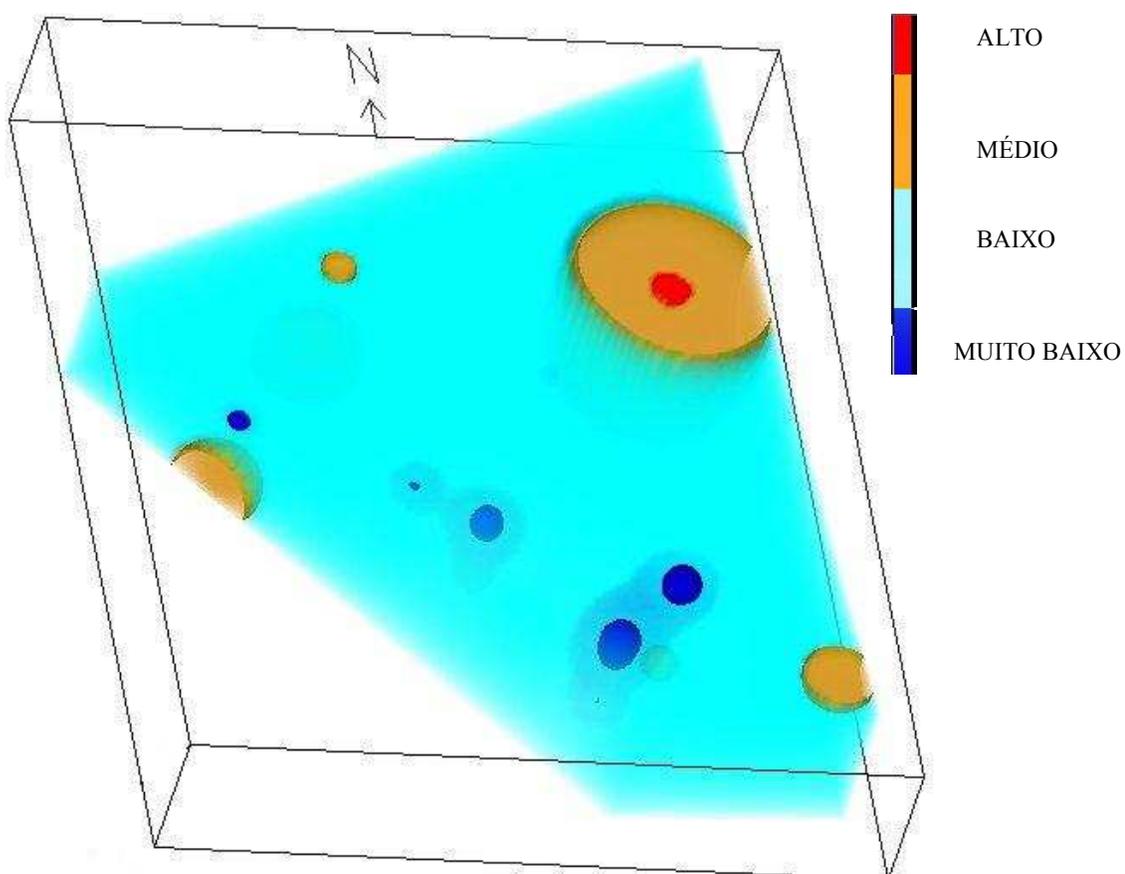


Pela manipulação do histograma de cor e opacidade, os valores do pH do solo foram agrupados em quatro classes que representam os seguintes valores:

pH alto:	5,6 a 5,75
pH médio:	5,0 a 5,5
pH baixo:	4,4 a 4,9
pH muito baixo:	< 4,3

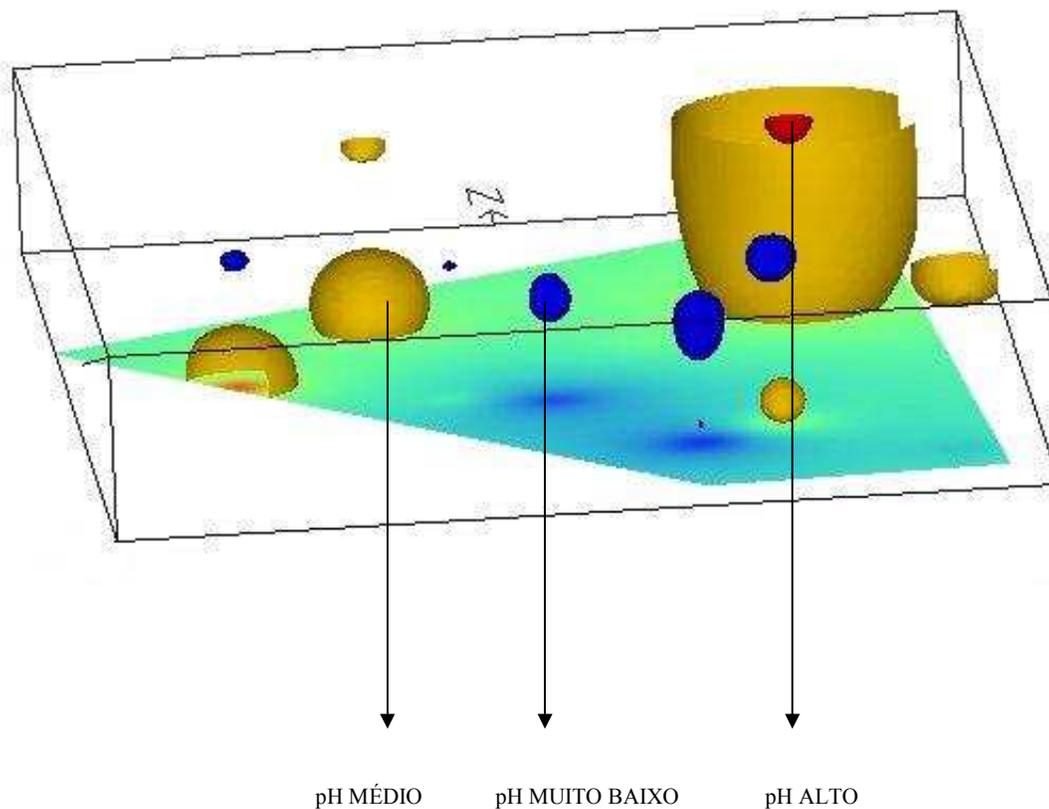
O volume resultante desta classificação é mostrado na figura 5.36, a partir da qual pode se observar uma predominância de pH baixo na área de estudo.

FIGURA 5.36 – CLASSIFICAÇÃO DO pH DO SOLO



A figura 5.37 apresenta as isosuperfícies representativas das classes de pH alto, médio e muito baixo.

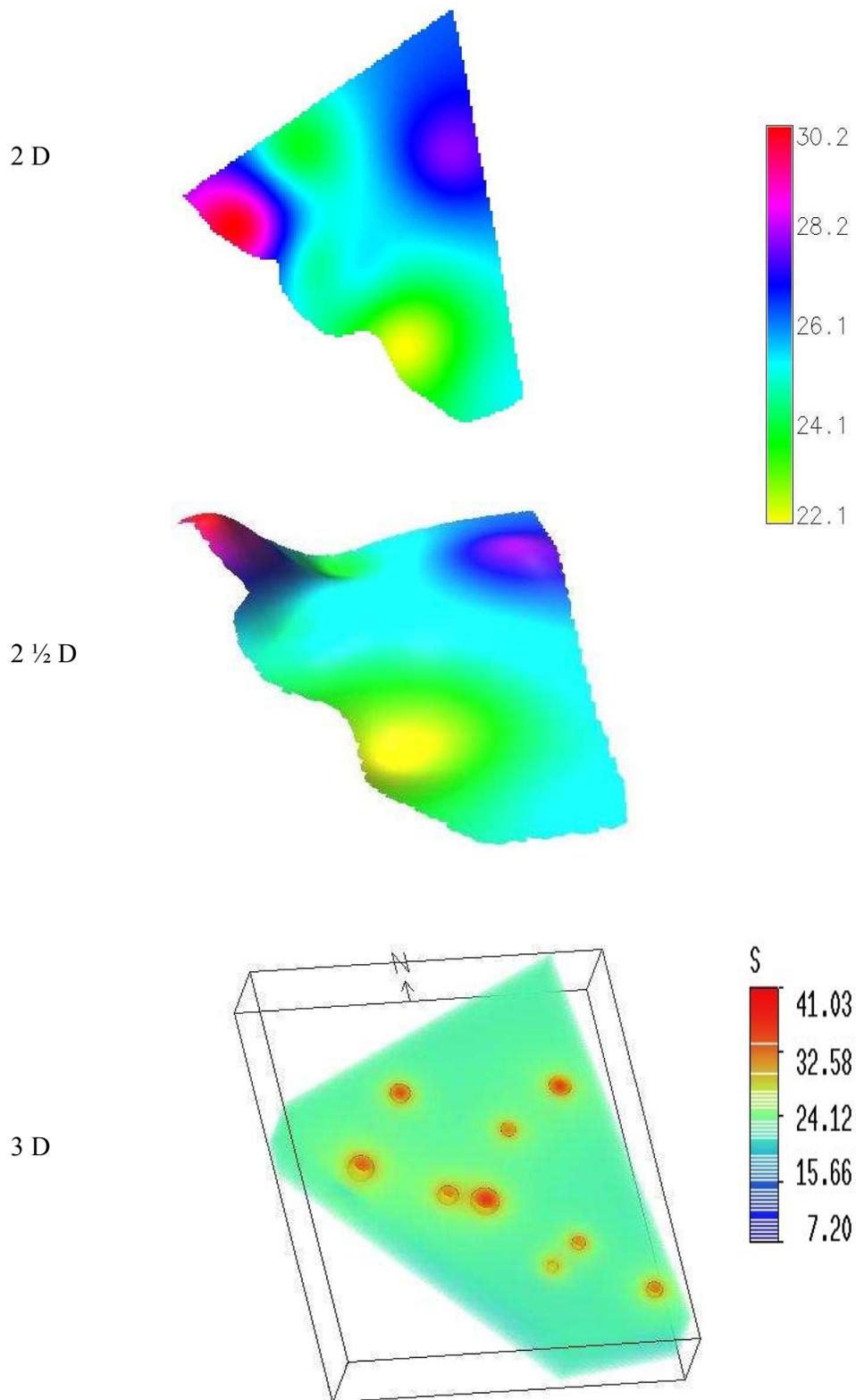
FIGURA 5.37 – VISUALIZAÇÃO DO pH: ALTO, MÉDIO E MUITO BAIXO



### Matéria Orgânica

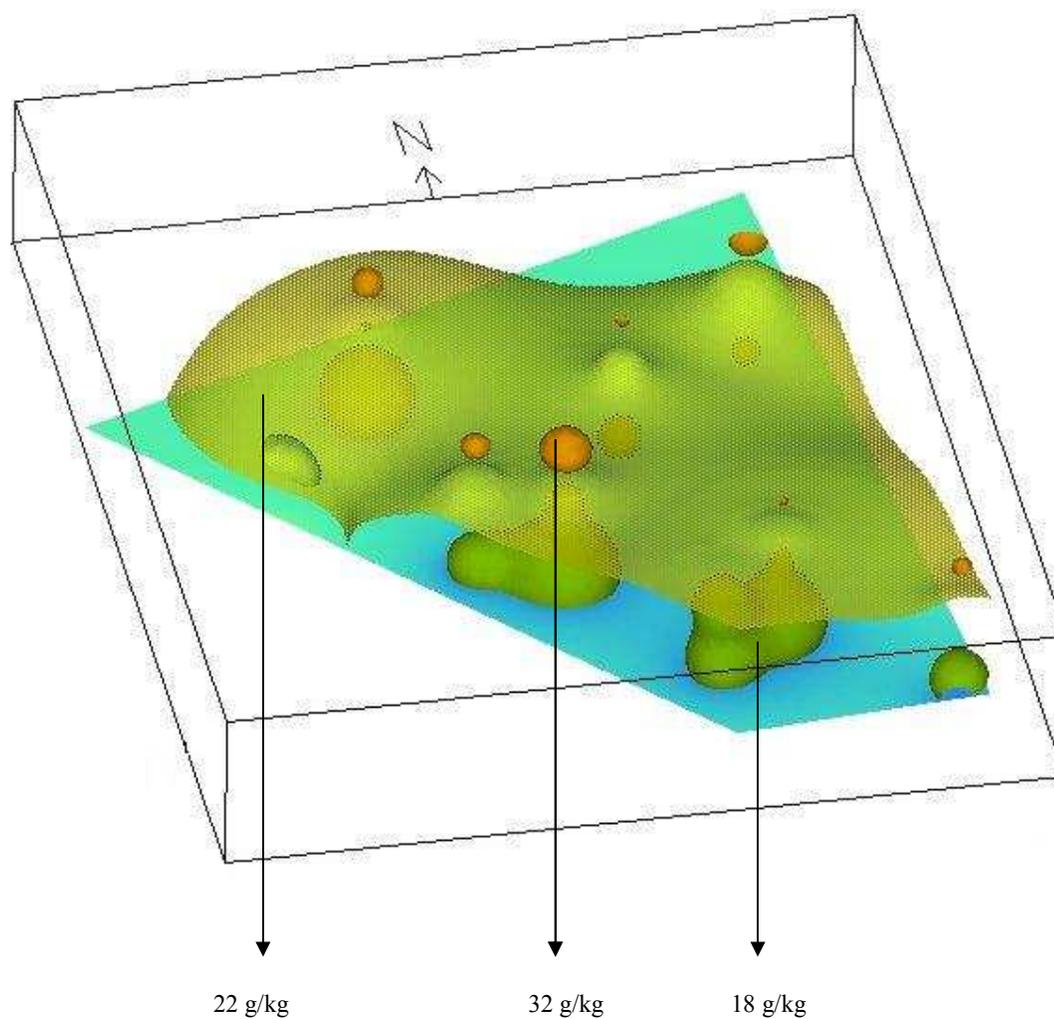
A matéria orgânica é uma partícula primária do solo que influencia na variação da cor do solo. Pode-se perceber a degradação do solo quando há diminuição na quantidade de matéria orgânica. A figura 5.38 apresenta a distribuição da matéria orgânica no plano bidimensional, as superfícies de variação desta propriedade e a distribuição espacial da quantidade de matéria orgânica no solo.

FIGURA 5.38 – MATÉRIA ORGÂNICA (g/kg)



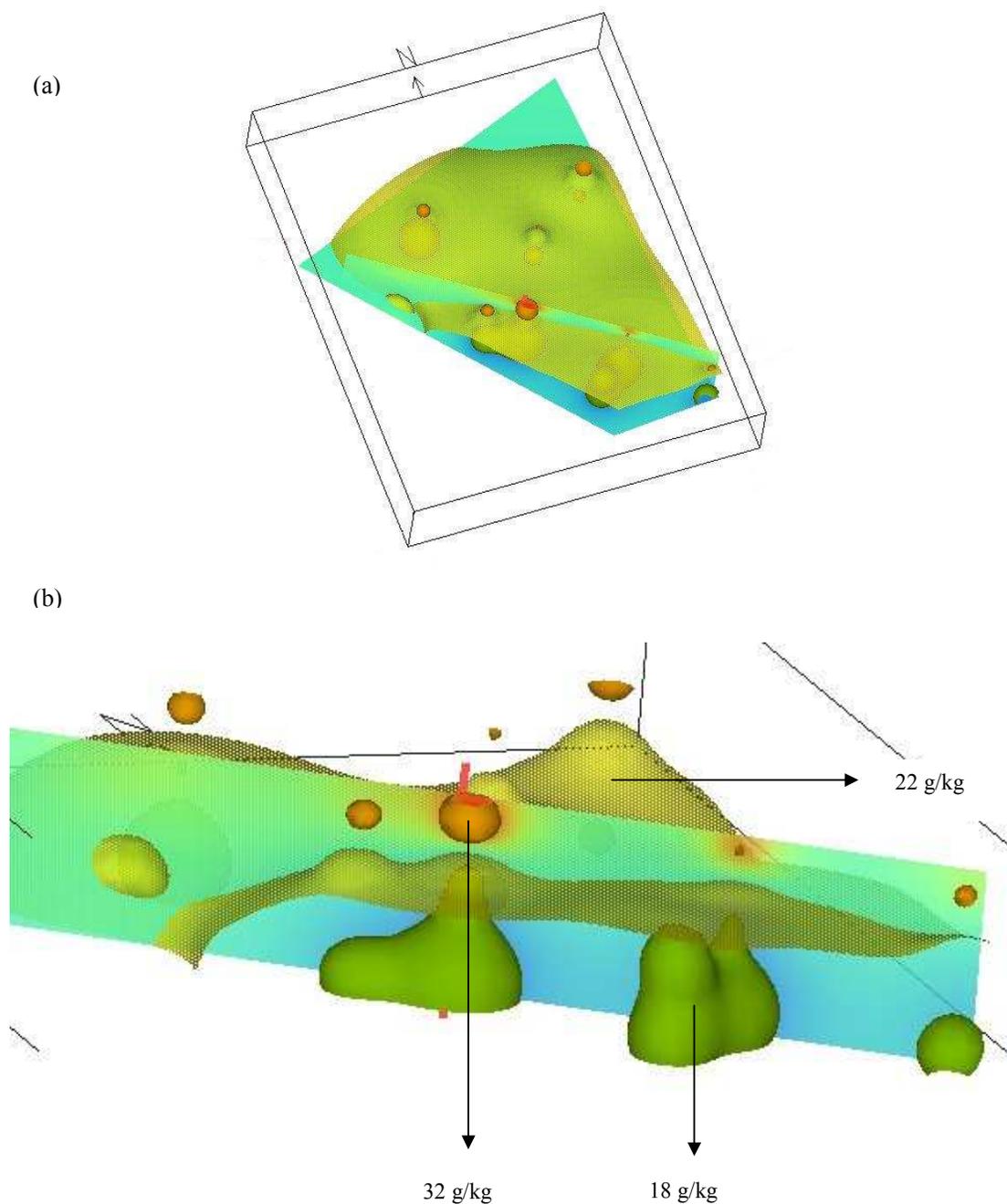
Na figura 5.39 as isosuperfícies, representadas por diferentes cores, mostram as quantidades de 18 g/kg, 22 g/kg e 32 g/kg de matéria orgânica no solo. Através desta figura pode-se visualizar que a matéria orgânica se deposita em maior quantidade nas camadas mais superficiais.

FIGURA 5.39 – MAIOR QUANTIDADE DE MATÉRIA ORGÂNICA (g/kg)



A figura 5.40-a apresenta a localização do corte vertical no volume para visualização detalhada desta porção do solo. Na figura 5.40-b os diferentes tons de cor representam os isovalores de matéria orgânica no solo e as isosuperfícies representam as quantidades de 18 g/kg, 22 g/kg e 32 g/kg.

FIGURA 5.40 – CORTE VERTICAL PARA VISUALIZAÇÃO DO DETALHE



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento da tese cujo objetivo é a representação e visualização volumétrica de dados espaciais para avaliação de solos, é alcançado a partir dos procedimentos que englobam as atividades de aquisição de dados; organização e codificação dos dados; interpolação; formação do volume; e visualização do volume. A demanda que rege a visualização dos volumes dos solos surge com a necessidade de ter o domínio do conhecimento da distribuição e comportamento espacial do fenômeno, visto que se caracteriza por ser uma feição tridimensional e contínua. O trabalho realizado na área de representação e visualização volumétrica de dados espaciais, conduziu a soluções que consistem em uma nova maneira de visualizar o fenômeno, incorporando a terceira dimensão na cartografia de solos.

Considerando que o solo é caracterizado por uma sucessão de camadas dispostas horizontalmente que acompanham a configuração do relevo, a eficiência das avaliações de solos depende de informações confiáveis da superfície física da Terra e de dados acerca das suas propriedades físicas, químicas e morfológicas. O problema inicial referente à disponibilidade de dados tridimensionais e de qualidade, foi superado através de levantamento e coleta em campo. A representação detalhada do relevo local, por curvas de nível de 20 em 20 cm, estabelece a referência espacial para as medições de solos. Com a malha de amostragem espaçada em 30 m para coleta dos monólitos, fica definido o mapeamento detalhado das propriedades dos solos na escala 1:10.000. A descrição dos monólitos caracteriza morfológicamente a área de estudo e os dados das análises laboratoriais completam o conjunto de informações tridimensionais para visualização dos volumes.

Os dados espaciais acerca das propriedades dos solos são de natureza qualitativa e quantitativa e foram obtidos de maneira discreta. Da natureza qualitativa vem a necessidade de codificação do dado e a forma discretizada de sua aquisição estabelece a necessidade de interpolação como um condicionante para a representação contínua do fenômeno no domínio espacial.

A codificação dos horizontes, para interpolação tridimensional e formação do volume, foi eficiente no que diz respeito à identificação dos tipos de horizontes e dos seus limites na visualização do volume, ressaltando a relação de diversidade/similaridade entre objetos. O volume dos horizontes dos solos da área de estudo permite visualizar os diferentes horizontes de maneira contínua em todas as direções. Entretanto, a codificação unificada para os horizontes diagnósticos Bi e Bw, não se mostrou adequada, pois impossibilitou a visualização volumétrica desta informação que é de grande importância na análise estrutural da cobertura pedológica.

O procedimento proposto para interpolação do atributo cor foi um resultado importante do trabalho. Tal procedimento permite que essa propriedade morfológica seja representada de maneira contínua no plano, com sua cor medida no sistema de Munsell. A transformação dos dados pontuais em polígonos representativos do domínio espacial de cada ponto, utilizando os polígonos de Voronoi, delimitou a área de abrangência de cada cor.

Também importante foi o resultado obtido na visualização volumétrica das cores do solo. A distribuição espacial desse atributo por todo o corpo do solo é percebida e esta forma de tratar a cor se apresenta como uma ferramenta de apoio às avaliações de solos.

O critério mnemônico adotado na codificação das cores foi eficiente para realizar a interpolação tridimensional destes dados. Além disso, tal codificação permite a recuperação do dado, ou seja, a designação da cor no sistema de Munsell, através da consulta direta sobre a imagem e volume resultantes. A classificação das cores por matizes facilitou a visualização volumétrica do atributo. Na área de estudo foram descritas 65 cores e, por uma limitação inata do ser humano, a percepção visual das diferenças entre estas cores é difícil.

Considerando que a estrutura matricial para armazenamento e representação computacional dos dados é adequada à representação de fenômenos contínuos, o formato matricial foi adotado. Para a representação no plano e de superfícies a resolução de 5 m apresentou imagens mais suavizadas e, para visualização e manipulação dos volumes, a resolução de 10 m se mostrou mais adequada em virtude

do tamanho dos arquivos gerados e da capacidade de processamento computacional dos equipamentos utilizados (microcomputadores).

A eficiência da interpolação das propriedades físicas e químicas dos solos pelo método da *spline* regularizada com tensão 2D e 3D não pôde ser avaliada. O fato de não terem sido realizadas as análises laboratoriais das amostras referentes aos 231 monólitos, fez com que o universo constituído pelas análises das amostras dos 9 perfis que, em princípio, serviria para validação dos resultados, fosse utilizado para a representação do fenômeno em toda a área de estudo.

A visualização tridimensional das propriedades morfológicas, físicas e químicas dos solos permite reconhecer a distribuição espacial dos atributos através de volumes. A exploração das ferramentas de interação auxilia no exame detalhado de características específicas destas propriedades. A eficiência dos resultados, no entanto, depende da ação integrada dos especialistas nas áreas de visualização cartográfica e de solos.

A visualização volumétrica pressupõe a interação para exploração da informação. Deve-se, portanto, interagir com a imagem através de rotação, aproximação, cortes e outras formas de manipulação gráfica, explorando a informação de maneira completa. Dessa forma, as análises ocorrem dinamicamente, ou seja, a visualização de volumes passa a ser um processo dinâmico na busca do conhecimento do fenômeno. A interatividade e a dinâmica do processo ficam, aqui, limitadas pelo meio. As imagens estáticas e as palavras são insuficientes para mostrar o que é dado a conhecer através da visualização volumétrica das propriedades dos solos.

Os resultados obtidos nessa tese confirmam a hipótese inicial de que a representação e visualização volumétrica dos solos, e de qualquer fenômeno caracterizado por ser tridimensional e contínuo, é de grande valia para os cientistas de solos. Constitui-se, portanto, em uma ferramenta de apoio à avaliação dos solos. A utilização de um sistema de informações geográficas tridimensional, em conjunto com programas de visualização volumétrica, pode contribuir para a tomada de decisões no âmbito agrícola e da agricultura de precisão, aumentando dessa forma o potencial de utilização dos dados disponíveis.

Apresentada como uma nova forma de visualizar o fenômeno, a representação e visualização volumétrica de dados espaciais constituem uma fonte de novos conhecimentos tanto para as ciências de solos como para as ciências cartográficas.

A partir das conclusões alcançadas nessa tese e tendo em vista a continuidade da pesquisa aqui desenvolvida, recomenda-se, para futuros trabalhos, o que a seguir se expõe:

- Investigar uma nova codificação para os horizontes que possibilite a representação e visualização volumétrica dos horizontes diagnósticos;
- Verificar a validade da visualização volumétrica em outras aplicações caracterizadas por fenômenos tridimensionais;
- Realizar pesquisas voltadas ao estudo dos interpoladores e de suas adequabilidades à representação dos solos;
- Realizar pesquisas que avaliem a densidade de amostragem ideal para caracterização dos volumes das diferentes propriedades dos solos;
- Verificar a validade do uso das representações e visualizações volumétricas nas tarefas práticas do planejamento agrícola;
- Verificar as capacidades das ferramentas para manipulação gráfica das cores, disponíveis no programa de visualização volumétrica;
- Estudar a codificação, interpolação e representação volumétrica da estrutura do solo quanto ao seu tipo, classe e grau;
- Utilizar a classificação de cores agrupadas pelos seus nomes, a partir de diversas combinações de valor e saturação, conforme tabela apresentada por DE HOOGH (1960):

Matiz 2,5YR	classe 1: 3/2 e 3/3
	classe 2: 4/4
	classe 3: 3/3,5 e 3/4
	classe 4: 5/6, 5/8, 4/6, 4/7 e 4/8
	classe 5: 3/6 e 3/8

Matiz 5YR	classe 6: $2/1$ e $2,5/1$ classe 7: $3/1$ classe 8: $5/4$ , $4/3$ e $4/4$ classe 9: $3/2$ , $3/3$ , $3/4$ e $2,5/2$ classe 10: $5/6$ , $5/8$ , $4/6$ e $4/8$
Matiz 7,5YR	classe 11: $5/4$ e $5/3$ classe 12: $4/2$ , $4/3$ , $4/4$ , $3/2$ , $3/3$ , $3/3,5$ e $3/4$ classe 13: $5/6$ , $4/6$ e $4/8$ classe 14: $2/0$
Matiz 10YR	classe 15: $8/2$ classe 16: $2/1$ classe 17: $7/6$ classe 18: $6/6$ classe 19: $5/3$ , $3/3$ , $4/3$ e $3/4$ classe 20: $5/4$ classe 21: $4/4$ , $4/6$ e $4/8$ classe 22: $3/2$

## REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, F. E. F. **Raciocínio e decisão usando LEI**. Fortaleza. 97 p. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Ciência da Computação, Universidade Federal do Ceará, 2000.
- BAILEY-KELLOGG, C.; RAMAKRISHNAN, N. Active data mining of correspondence for qualitative assessment of scientific computations. In: International Workshop on Qualitative Reasoning, 17., 2003. **Proceedings**. 2003. p. 23-30.
- BARROCA, B. F. **Geometria construtiva de volumes**. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. s/d.
- BARTROLÍ, A. V. **Visualization techniques for virtual endoscopy**. PhD Thesis. Viena. 2001. 93 p.
- BERNARD, H. R. Qualitative data, quantitative analysis. **CAM, The Cultural Anthropology Methods Journal**, v. 8, n. 1. Florida. 1996.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. New York: Oxford, Clarendon Press, 1987. 194p.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford University Press, 1998. 333 p.
- DE HOOGH. **Soil classification**: a comprehensive system. Soil Survey Staff. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture. 7. apr. 1960. p.250-253.
- DREBIN, R. A. et al. Volume rendering. In: SIGGRAPH '88, 15., v.22, 1988. **Proceedings**. 1988. p. 65-74.
- EARNSHAW, R. A.; WISEMAN, N. **An introductory guide to scientific visualization**. Alemanha: Spring-Verlag, 1992. 156 p.
- ELVINS, T. T. **Volume visualization and rendering**. p. 194-201. 1992. Disponível em: <<http://www.siggraph.org/education/materials/HyperVis/vistech/volume/volum.htm>>. Acesso em: 20 Fev. 2006.
- FELGUEIRAS, C. A. Modelagem numérica de terreno. In: Fundamentos de geoprocessamento. **INPE**. Livro on-line. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br>>. Acesso em: 19 Mar. 2001.

- FERNÁNDEZ, R. A. **Identificação dos atributos do solo determinantes da qualidade de sítio para araucária angustifolia (BERT) O. Ktze., com apoio na metodologia da análise estrutural.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 1989.
- FOLEY, J. D. et al. **Computer graphics: principles and practice.** 2 ed. Readings, MS: Addison-Wesley Publishing Company, 1992. 1174p.
- FOURNIER, J. **Caracterisation et inventaire de l'érodibilité des sols dans le secteur de Palmeira.** Approche méthodologique en vue de l'utilisation de la télédétection. Curitiba. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, I.N.R.A. Montpellier, França. 1989.
- FUJISHIRO, I. et al. Volumetric data exploration using interval volume. 144 **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 2, n. 2, p. 144-155, 1996.
- GALTON, A.; HOOD, J. Qualitative interpolation for environmental knowledge representation. **ECAI 2004**. R. López de Mántaras and L. Saitta Eds., IOS Press, p. 1017-1018, 2004.
- GERSHENFELD, N. **The nature of mathematical modeling.** Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 344 p.
- GRUNWALD, S.; BARAK, P. 3D geographic reconstruction and visualization techniques applied to land resource management. **Transactions in GIS**, vol. 7, n. 2, p. 231-241, 2003.
- INPE. Fundamentos de geoprocessamento. Livro on-line. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br>>. Acesso em: 19 Mar. 2001.
- KAUFMAN, A. E. Volume visualization. **ACM Computing Surveys**, v. 28, n. 1, p. 165-167, 1996.
- KAUFMAN, A. E. et al. Volume graphics. **Computer**, IEEE Computer Society Press. Los Alamitos, CA, USA, v. 26, n.7, p. 51-64, 1993.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia.** Relações solo-planta. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 1979. 262 p.
- LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Comissão de Método de Trabalho de Campo. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. 2 ed. Campinas, 1984. 46 p.

- McCORMICK, B. et al. Visualization in scientific computing. **Computer Graphics**, v. 21, n. 6. 1987.
- MENEZES, J. C. **Interpolação de modelos digitais de terreno a partir de isolinhas**. Curitiba, 170 p. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 1992.
- MITAS, L.; MITASOVA, H. Spatial interpolation. In: **Geographical information systems: principles, techniques, management and applications**. Eds. P. Longley et al., Wiley, 1999. p. 481-492.
- MITASOVA, H. et al. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. **International Journal of Geographic Information Systems**, vol. 10, p. 629-641, 1996.
- MITASOVA, H.; HOFIERKA, J. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. **Mathematical Geology**, vol. 25, p. 657-667, 1993.
- MITASOVA, H.; MITAS, L. Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. **Mathematical Geology**, vol. 25, p. 641-655, 1993.
- NELSON, T. R.; ELVINS, T.T. Visualization of 3D ultrasound data. **IEEE Computer Graphics & Applications**, p. 50-57, 1993.
- NETELER, M. Volume modeling of soils using GRASS GIS 3D-tools. In: Second Italian GRASS Users Meeting, 2001, Trento. **Proceedings**.
- OKABE, A. et al. **Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams**. West Sussex, England: John Wiley & Sons. 2. ed. 1998. 671 p.
- PAIVA, A. C. et al. **Introdução à visualização volumétrica**. PUC-RioInf.MCC03/99. Rio de Janeiro, 1999. 106 p.
- PARAVIEW**: the paraview guide. Disponível em: <<http://www.paraview.org>>. Acesso em: 15 Dez. 2005.
- PAWASASKAS, J. **Volume visualization with ray casting**. Disponível em: <<http://web.cs.wpi.edu/~matt/courses/cs563/talks/powwie/p1/ray-ast.htm>>. 1997. Acesso em: 12 Mar. 2004.
- PETERSON, M. P. **Interactive and animated cartography**. University of Nebraska at Omaha. Englewood Cliffs, Nova Jersey: Prentice Hall. 1995. 183 p.

- QUEIROZ NETO, J. P. Análise estrutural da cobertura pedológica: uma experiência de ensino e pesquisa. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, São Paulo, n.15, p. 77-90, 2002.
- RAPER, J. **Multidimensional geographic information science**. Londres: Taylor & Francis, 2000. 300 p.
- ROBBI, C. **Sistema para visualização de informações cartográficas para planejamento urbano**. São José dos Campos. 369 p. Tese de Doutorado. Doutorado em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
- ROBERTSON, P. K. A methodology for choosing data representations. **IEEE Computer Graphics & Applications**, vol. 11, n. 3, p. 56-67, 1991.
- RUELLAN, A.; DOSSO, M. **Regards sur le sol**. Foucher, Paris: Universités Francophones, 1993. 192 p.
- SANTOS, L. J. C. Contribuição da análise estrutural da cobertura pedológica ao desenvolvimento da ciência do solo. **Revista RA'E GA** – Departamento de Geografia da UFPR. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, n. 4, p. 131-138, 2000. Disponível em: <<http://calvados.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/raega/article/viewFile/3344/2680>>. Acesso em: 12 Fev. 2006.
- SLOCUM, T. A. **Thematic cartography and visualization**. Upper-Saddle River, Nova Jersey: Prentice-Hall, 1999. 293p.
- SWANSON, J. **The three dimensional visualization & analysis of geographic data**. 1996. Disponível em: <[http://maps.unomaha.edu/Peterson/gis/Final\\_Projects/1996/Swanson/GIS\\_Paper.html](http://maps.unomaha.edu/Peterson/gis/Final_Projects/1996/Swanson/GIS_Paper.html)>. Acesso em: 17 Ago. 2002.

## **ANEXO 1 – RESULTADOS DAS ANÁLISES LABORATORIAIS**

FONTE: EMBRAPA FLORESTAS – COLOMBO-PR  
 AMOSTRAS COLETADAS EM 12/08/2005

### RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS (VALORES MÉDIOS)

PERFIL	Profund. cm	Densidade do solo kg/dm <sup>3</sup>	Umidade Volumétrica				Porosidade		Água dispon.	
			atual	6	10	100	1500	total		macro
			cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>							
9	2.5	0.976	0.441	0.446	0.443	0.406	0.384	0.623	0.176	0.062
	7.5	0.967	0.744	0.437	0.429	0.401	0.393	0.622	0.184	0.045
	22	1.000	0.757	0.462	0.450	0.412	0.384	0.596	0.134	0.079
	30	1.001	0.761	0.451	0.441	0.406	0.380	0.599	0.148	0.070
	100	0.980	0.783	0.447	0.432	0.393	0.360	0.591	0.145	0.087
12	2.5	0.892	0.352	0.388	0.387	0.346	0.332	0.639	0.251	0.056
	7.5	1.113	0.415	0.430	0.428	0.395	0.380	0.560	0.130	0.049
	13	1.030	0.452	0.458	0.457	0.408	0.390	0.567	0.109	0.068
	35	0.952	0.449	0.451	0.447	0.387	0.365	0.591	0.139	0.086
	100	0.993	0.469	0.468	0.466	0.428	0.396	0.620	0.152	0.072
20	2.5	0.985	0.470	0.487	0.483	0.445	0.420	0.621	0.135	0.067
	7.5	1.133	0.443	0.453	0.451	0.432	0.420	0.550	0.096	0.034
	13	1.078	0.451	0.451	0.450	0.419	0.395	0.555	0.104	0.056
	22	1.085	0.450	0.454	0.452	0.415	0.400	0.566	0.112	0.053
	100	1.005	0.448	0.452	0.451	0.429	0.407	0.596	0.144	0.045
22	2.5	0.926	0.757	0.461	0.453	0.435	0.414	0.656	0.195	0.048
	7.5	1.082	0.740	0.448	0.441	0.417	0.404	0.588	0.140	0.045
	18	1.014	0.771	0.474	0.466	0.432	0.412	0.579	0.106	0.062
	35	1.026	0.803	0.467	0.457	0.422	0.401	0.579	0.113	0.066
	100	1.066	0.769	0.465	0.460	0.433	0.405	0.569	0.105	0.059
31	2.5	0.877	0.784	0.458	0.450	0.420	0.399	0.659	0.201	0.059
	7.5	1.111	0.751	0.460	0.455	0.432	0.418	0.568	0.107	0.042
	18	1.033	0.752	0.458	0.426	0.385	0.349	0.593	0.135	0.110
	35	1.009	0.785	0.460	0.434	0.400	0.373	0.602	0.142	0.088
	100	0.919	0.754	0.428	0.407	0.378	0.359	0.608	0.180	0.068
34	2.5	0.859	0.703	0.376	0.363	0.341	0.323	0.666	0.290	0.053
	7.5	1.067	0.735	0.425	0.414	0.398	0.383	0.590	0.165	0.043
	18	1.051	0.816	0.460	0.451	0.432	0.418	0.606	0.146	0.042
	45	1.050	0.830	0.472	0.466	0.437	0.397	0.600	0.127	0.075
	100	1.156	0.716	0.494	0.481	0.454	0.408	0.578	0.084	0.086
42	2.5	1.092	0.728	0.435	0.430	0.381	0.363	0.562	0.127	0.071
	7.5	1.210	0.734	0.428	0.422	0.391	0.375	0.532	0.103	0.054
	15	0.942	0.751	0.450	0.442	0.366	0.356	0.607	0.157	0.094
	45	1.005	0.794	0.469	0.465	0.417	0.382	0.598	0.129	0.087
	100	0.979	0.784	0.458	0.453	0.415	0.407	0.601	0.142	0.052

45	2.5	0.990	0.775	0.452	0.437	0.405	0.388	0.625	0.173	0.065
	7.5	1.074	0.695	0.403	0.389	0.358	0.339	0.578	0.176	0.063
	18	1.068	0.809	0.478	0.468	0.432	0.412	0.582	0.104	0.066
	45	1.028	0.791	0.476	0.462	0.416	0.390	0.601	0.125	0.086
	100	1.005	0.821	0.471	0.468	0.439	0.412	0.589	0.118	0.059
49	2.5	0.964	0.763	0.442	0.438	0.387	0.371	0.638	0.196	0.071
	7.5	1.179	0.714	0.412	0.419	0.386	0.367	0.537	0.124	0.045
	18	1.252	0.698	0.386	0.383	0.355	0.337	0.503	0.118	0.049
	45	1.069	0.746	0.458	0.454	0.414	0.399	0.594	0.136	0.059
	100	1.087	0.790	0.473	0.469	0.438	0.414	0.579	0.106	0.059

## RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS: TEXTURA (VALORES MÉDIOS)

Perfil	Horiz	Areia			
		Grossa	Fina	Silte	Argila
		g/kg			
9	A1	187	91	142	580
	AB	162	99	149	590
	BA	152	95	132	621
	BW	131	113	152	604
12	A1	120	117	185	578
	A2	101	104	186	609
	BA	81	81	171	667
	BW1	75	86	152	687
	BW2	83	85	161	671
20	A1	110	88	134	668
	AB	107	77	123	693
	BA	93	78	124	705
	BW1	84	83	122	711
	BW2	65	69	114	752
22	A1	87	82	135	697
	AB	142	78	139	642
	BA	112	71	140	676
	BW1	107	92	131	669
	BW2	107	92	131	669
31	A1	199	96	117	588
	BA	187	85	112	616
	BW1	150	89	117	644
	BW2	131	96	121	652
	BW3	125	107	107	662
34	A1	193	108	107	592
	A2	208	86	450	256
	BA	157	89	120	634
	BI	198	91	201	511
	BC	180	130	275	415
42	A1	205	109	121	565
	A2	197	109	112	582
	AB	168	89	117	626
	BW1	138	94	135	633

	BW2	153	118	78	651
45	A1	270	113	115	502
	A2	258	109	113	520
	AB	208	96	117	579
	B1	181	89	158	572
	BI2	161	94	168	577
49	A1	198	109	183	510
	A2	190	100	143	567
	BA	156	96	115	632
	BW1	128	100	81	691
	BW2	122	109	117	653

## RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS (VALORES MÉDIOS)

Perfil	Horiz	CaCl <sub>2</sub>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	M.O	P	Na	Soma bases	CTC	Satur. Bases	Satur. Al <sup>3+</sup>
		pH	cmolc/dm <sup>3</sup>					g/kg	mg/dm <sup>3</sup>		cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>		%		
9	A1	5.10	0.27	4.17	2.24	6.41	0.16	6.21	36.55	15.50	4.00	6.68	12.89	51.8	2.3
	AB	4.47	0.12	1.94	0.98	2.92	0.52	6.94	25.15	1.60	2.00	3.04	9.98	30.5	14.6
	BA	4.70	0.04	1.32	0.63	1.95	0.25	5.15	17.21	0.20	1.00	1.99	7.14	27.9	11.2
	BW	5.42	0.01	0.34	0.58	0.92	0.00	2.74	4.14	0.00	1.00	0.93	3.67	25.3	0.0
12	A1	5.86	0.51	5.38	2.42	7.80	0.02	3.69	39.62	30.60	6.00	8.31	12.00	69.3	0.2
	A2	5.43	0.29	3.36	1.50	4.86	0.05	4.44	27.15	10.80	4.00	5.15	9.59	53.7	1.0
	BA	5.47	0.17	2.11	1.05	3.16	0.02	4.12	17.41	1.20	3.00	3.33	7.45	44.7	0.6
	BW1	5.52	0.06	0.98	0.75	1.73	0.00	3.55	15.41	0.10	1.00	1.79	5.34	33.5	0.0
	BW2	6.23	0.02	0.65	0.50	1.15	0.00	2.54	5.94	0.00	3.00	1.17	3.71	31.5	0.0
20	A1	4.69	0.27	2.94	0.79	3.73	0.30	6.69	34.22	12.90	5.00	4	10.69	37.4	7.0
	AB	4.41	0.18	1.73	0.32	2.05	0.62	6.44	24.35	2.40	2.00	2.23	8.67	25.7	21.8
	BA	4.52	0.17	1.15	0.30	1.45	0.43	5.98	21.61	0.20	1.00	1.62	7.60	21.3	21.0
	BW1	4.99	0.07	0.95	0.36	1.31	0.15	4.12	14.27	0.00	0.00	1.38	5.50	25.1	9.8
	BW2	5.34	0.02	1.13	0.02	1.15	0.07	2.84	3.87	0.00	0.00	1.17	4.01	29.2	5.6
22	A1	4.95	0.32	4.21	1.89	6.10	0.17	7.20	41.29	5.50	3.00	6.42	13.62	47.1	2.6
	AB	3.86	0.13	1.30	0.68	1.98	0.69	7.76	29.88	1.00	2.00	2.11	9.87	21.4	24.6
	BA	4.65	0.04	0.74	1.16	1.90	0.21	4.44	11.47	0.20	0.00	1.94	6.38	30.4	9.8
	BW1	5.57	0.01	0.48	0.53	1.01	0.06	2.74	26.68	0.00	0.00	1.02	3.76	27.1	5.6
31	A1	4.57	0.21	2.60	2.20	4.80	0.19	6.44	35.88	3.70	2.00	5.01	11.45	43.8	3.7
	BA	4.20	0.09	0.64	0.91	1.55	0.38	5.75	19.81	0.60	1.00	1.64	7.39	22.2	18.8
	BW1	4.57	0.05	0.86	0.80	1.66	0.16	4.78	18.74	0.10	1.00	1.71	6.49	26.3	8.6
	BW2	4.87	0.03	0.80	0.38	1.18	0.05	3.42	13.47	0.00	0.00	1.21	4.63	26.1	4.0
	BW3	5.86	0.02	0.43	0.35	0.78	0.03	2.74	7.14	0.00	0.00	0.8	3.54	22.6	3.6
34	A1	4.76	0.34	4.21	2.24	6.45	0.12	5.35	42.82	8.30	3.00	6.79	12.14	55.9	1.7
	A2	4.40	0.14	2.24	1.01	3.25	0.47	5.98	19.48	1.10	0.00	3.39	9.37	36.2	12.2
	BA	4.19	0.04	1.04	0.96	2.00	0.39	5.15	15.54	0.20	0.00	2.04	7.19	28.4	16.0
	BI	4.42	0.02	1.14	0.93	2.07	0.22	3.55	5.80	0.00	0.00	2.09	5.64	37.1	9.5
	BC	3.89	0.02	0.58	0.74	1.32	1.95	3.42	3.74	0.10	0.00	1.34	4.76	28.2	59.3
42	A1	4.16	0.11	2.25	1.31	3.56	0.45	6.21	39.09	3.40	1.00	3.67	9.88	37.1	10.9
	A2	4.14	0.18	1.42	0.51	1.93	0.50	6.44	28.95	2.20	2.00	2.11	8.55	24.7	19.2
	AB	4.33	0.04	1.03	0.49	1.52	0.20	4.61	19.81	0.20	1.00	1.56	6.17	25.3	11.4
	BW1	4.64	0.01	1.09	0.47	1.56	0.14	3.97	16.74	0.00	0.00	1.57	5.54	28.3	8.2
	BW2	5.23	0.01	0.68	0.00	0.68	0.05	2.74	9.20	0.00	0.00	0.69	3.43	20.1	6.8

45	A1	4.61	0.28	4.33	1.73	6.06	0.14	6.21	34.95	4.20	3.00	6.34	12.55	50.5	2.2
	A2	4.29	0.13	2.71	1.50	4.21	0.53	7.48	30.68	1.50	1.00	4.34	11.82	36.7	10.9
	AB	4.14	0.02	0.85	0.97	1.82	0.80	6.44	18.54	0.20	0.00	1.84	8.28	22.2	30.3
	B1	4.25	0.02	0.88	0.79	1.67	0.29	5.15	12.81	0.00	0.00	1.69	6.84	24.7	14.6
	BI2	4.31	0.02	0.61	0.38	0.99	0.13	4.28	13.47	0.00	0.00	1.01	5.29	19.1	11.4
49	A1	5.53	0.26	4.40	2.20	6.60	0.07	3.30	34.88	9.60	3.00	6.86	10.16	67.5	1.0
	A2	4.91	0.17	2.68	1.82	4.50	0.15	4.12	24.55	2.30	3.00	4.67	8.79	53.1	3.1
	BA	4.60	0.05	1.49	0.81	2.30	0.14	4.44	18.01	0.30	1.00	2.35	6.79	34.6	5.6
	BW1	4.71	0.02	1.11	0.66	1.77	0.14	3.55	12.61	0.00	1.00	1.79	5.34	33.5	7.3
	BW2	5.33	0.01	0.94	0.12	1.06	0.05	2.74	13.94	0.00	1.00	1.07	3.81	28.1	4.5

**ANEXO 2 – VISUALIZAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS: UMIDADE  
VOLUMÉTRICA (6 KPa, 10 KPa, 100 KPa E 1500 KPa),  
POROSIDADE TOTAL E POROSIDADE MACRO**

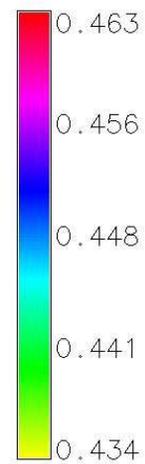
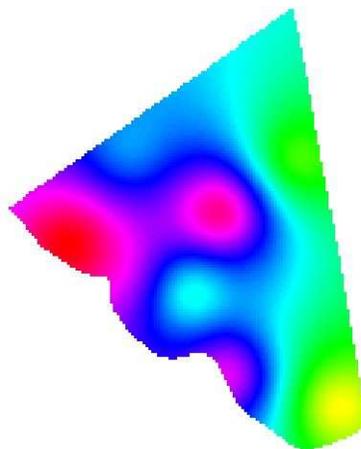
## **Umidade Volumétrica do Solo**

As figuras A-2.1, A-2.2, A-2.3 e A-2.4 mostram as visualizações geradas para os estados de umidade do solo, quando submetido às forças de 6 kPa, 10 kPa, 100 kPa e 1500 kPa, respectivamente. Na representação plana e de superfície, o que se vê é a variação da umidade volumétrica por meio de diferentes cores em áreas limitadas por isovalores, para a faixa de um metro de profundidade de solo onde as amostras foram obtidas. A visualização volumétrica mostra os valores da umidade volumétrica dentro do solo, nas diferentes profundidades, e permite observar, além da quantidade, a distribuição espacial desta propriedade.

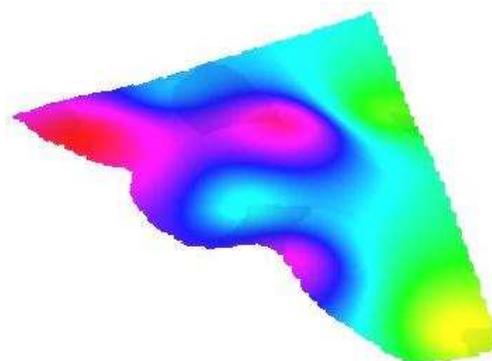
Com o uso das ferramentas de interação do programa de visualização, verificou-se a distribuição espacial dos maiores valores de umidade. Na figura A-2.5, apresenta-se um corte vertical feito ao longo de uma linha que, quando visualizada no plano ou na superfície, passa por pontos que representam valores de umidade baixa e média. Na visualização do detalhe, observa-se que próximo à superfície a umidade é baixa, porém, abaixo desse ponto, há incidência de grande valor de umidade. Isso, por exemplo, pode ser importante para indicar que as raízes das plantas são mais profundas, pois buscam água para se desenvolver.

A-2.1 – UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO A 6KPa ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

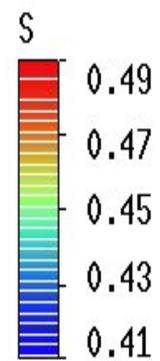
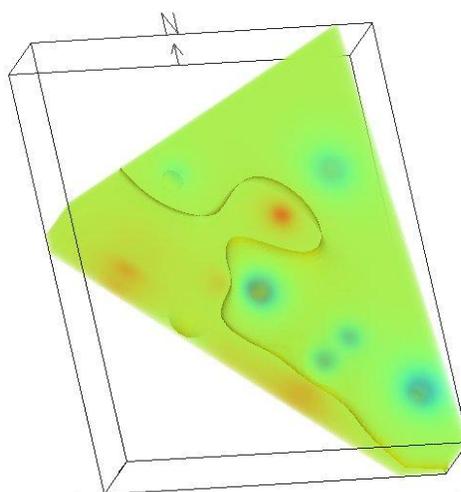
2 D

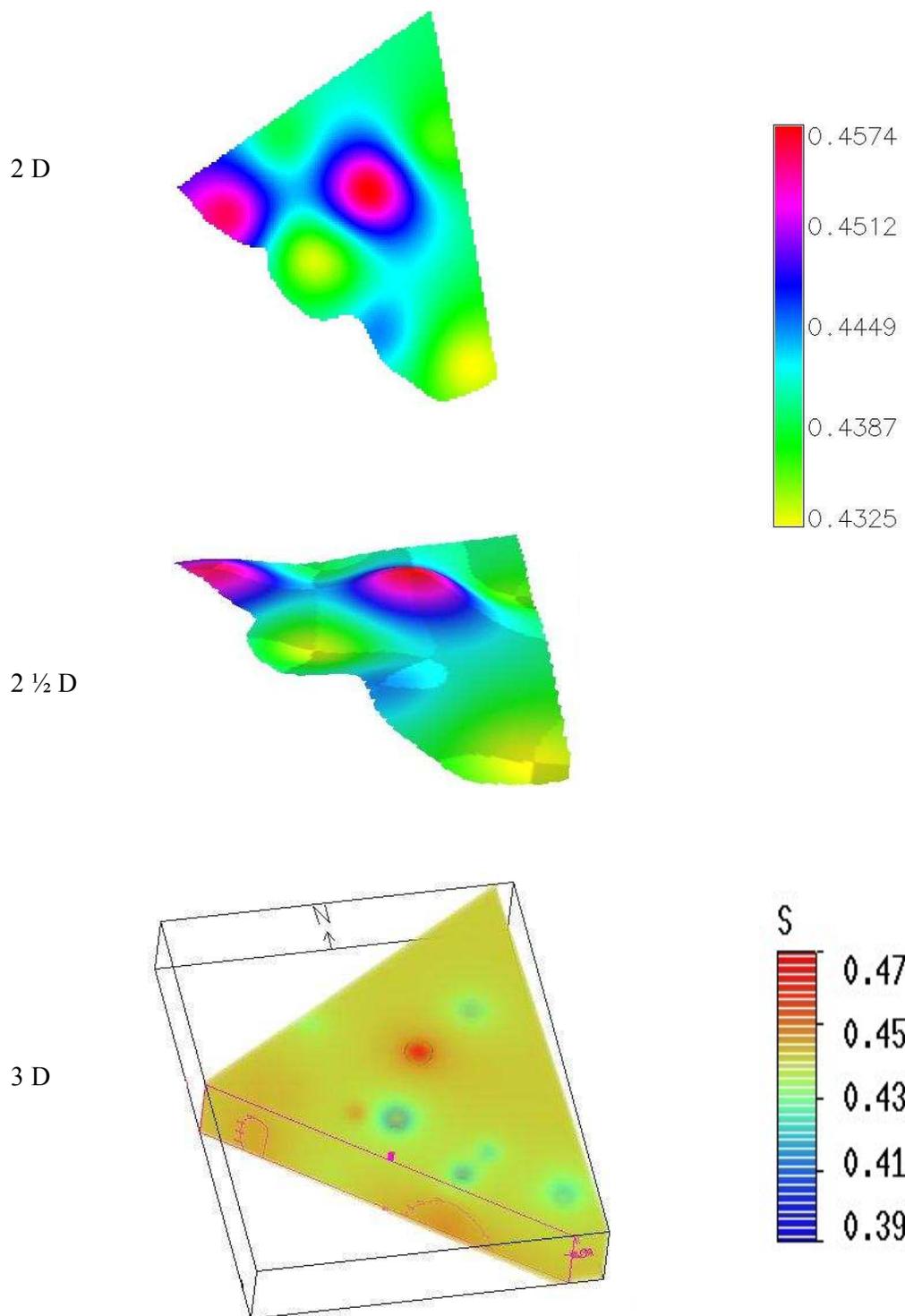


2 ½ D



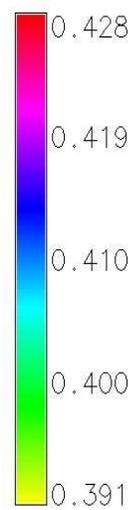
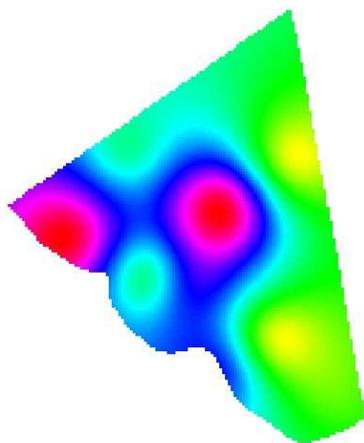
3 D



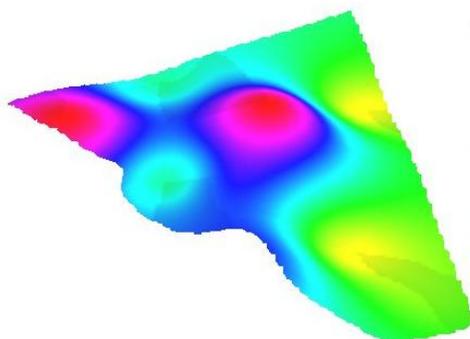
A-2.2 – UMIDADE DO SOLO A 10KPa ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

A-2.3 – UMIDADE DO SOLO A 100KPa ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

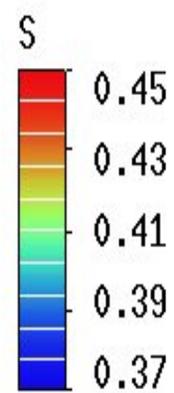
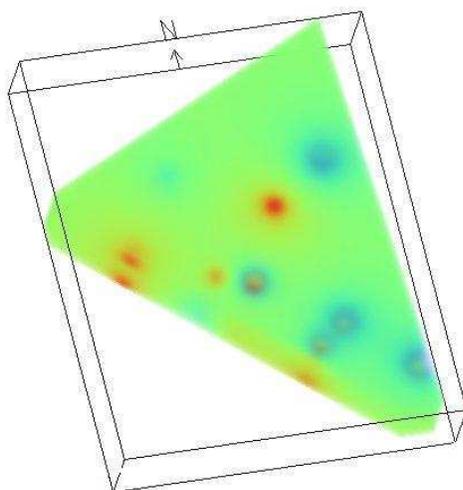
2 D



2 ½ D

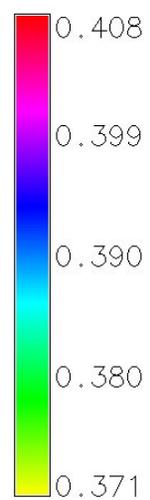
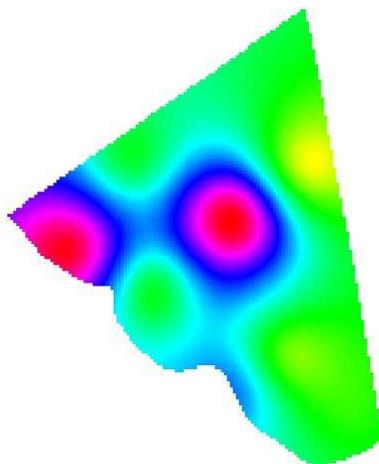


3 D

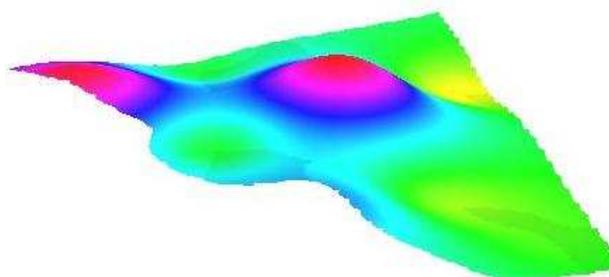


A-2.4 – UMIDADE O SOLO A 1500KPa ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

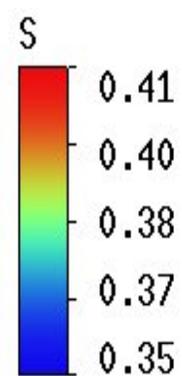
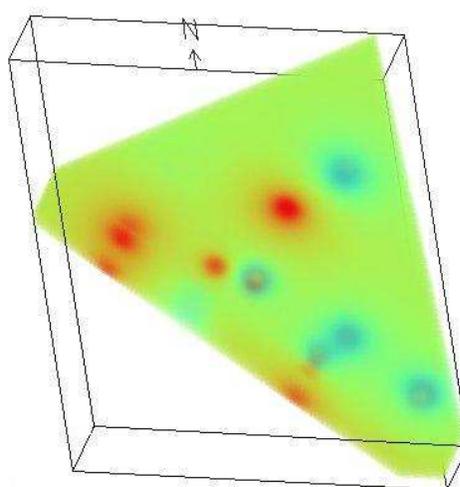
2 D

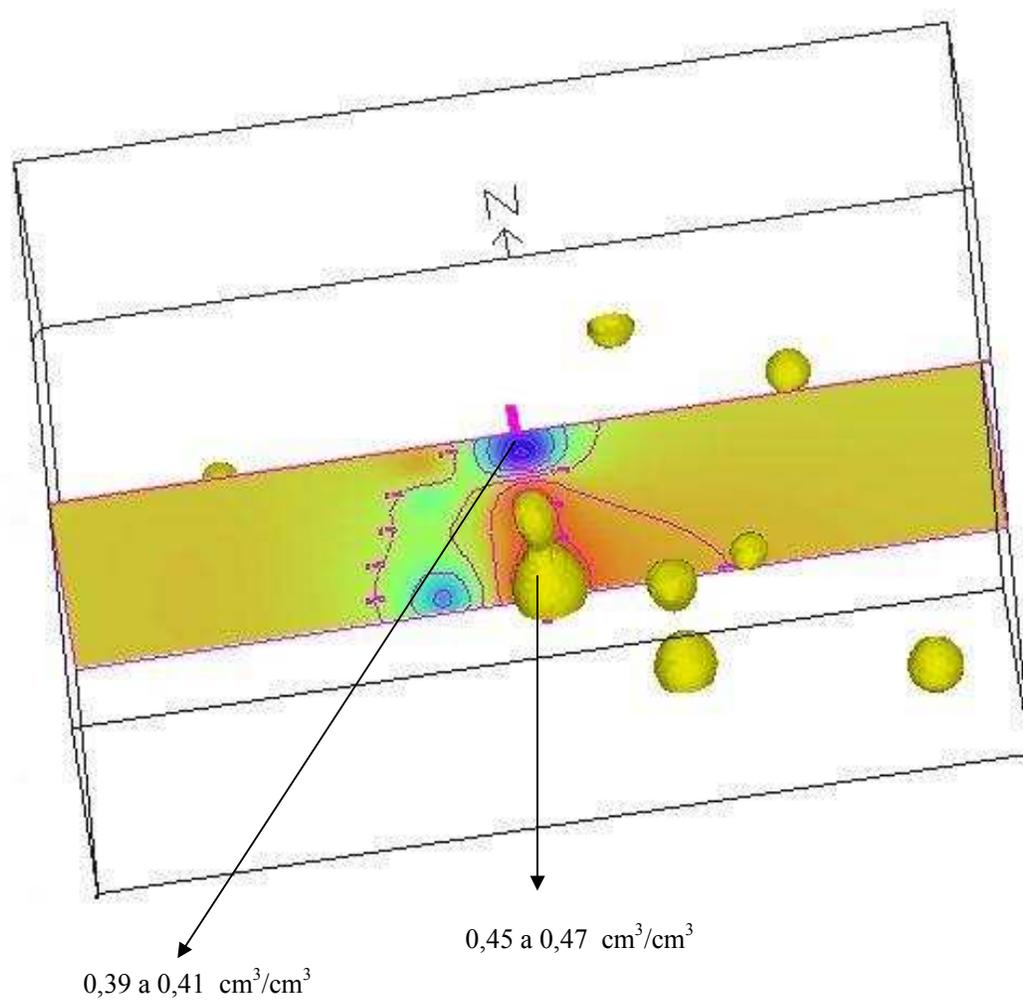
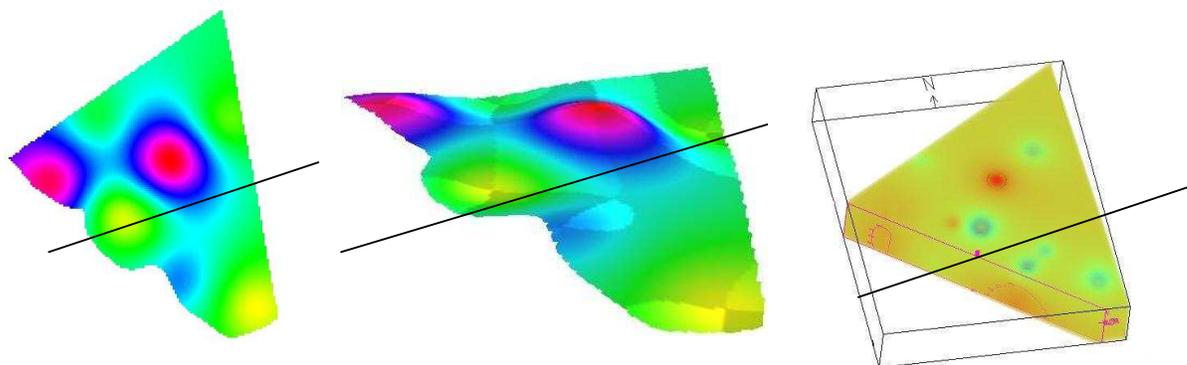


2 ½ D



3 D



A-2.5 – VISUALIZAÇÃO DA UMIDADE A 10KPa ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ): CORTE VERTICAL

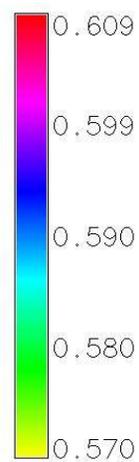
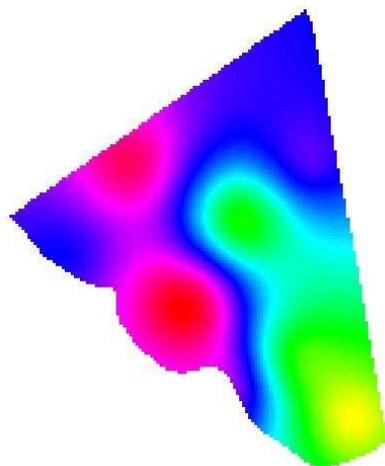
## **Porosidade do Solo**

A porosidade é a porção do solo que é ocupada por líquidos (água) e gases (ar). Os poros menores (microporos) retêm a água e nos poros maiores (macroporos) circula o ar. A figura A-2.6 mostra a distribuição da porosidade total do solo no plano bidimensional, as superfícies de variação desta propriedade e a sua distribuição espacial através do volume do solo. Na figura A-2.7, representa-se os lugares de maior porosidade no solo por meio de isosuperfícies que correspondem aos valores de 0,600 a 0,630  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

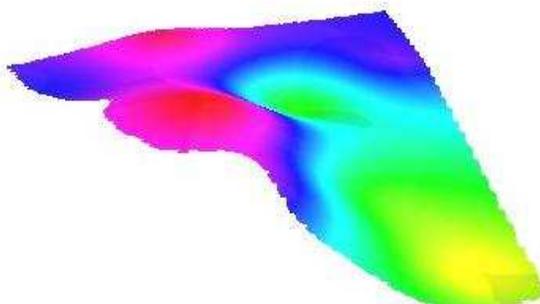
A figura A-2.8 ilustra os resultados das análises referentes à macroporosidade do solo. No plano e na superfície os isovalores representados pelos diferentes tons de cor mostram a variação do atributo. No volume se tem o padrão de distribuição espacial da porosidade macro do solo.

A-2.6 – POROSIDADE TOTAL DO SOLO ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

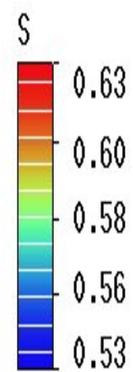
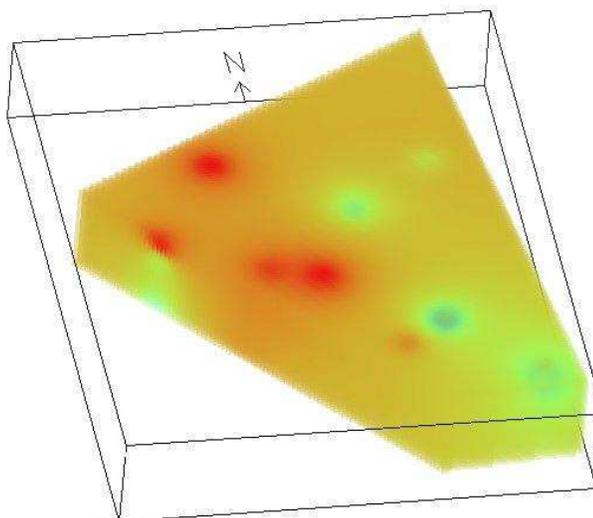
2 D

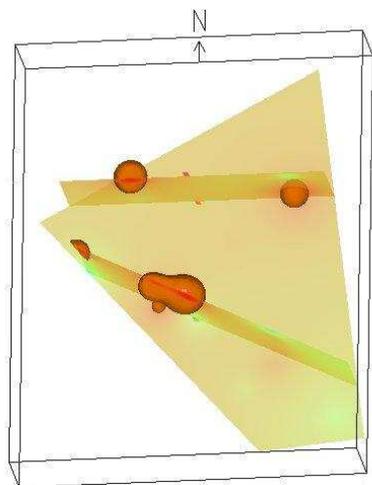


2 ½ D

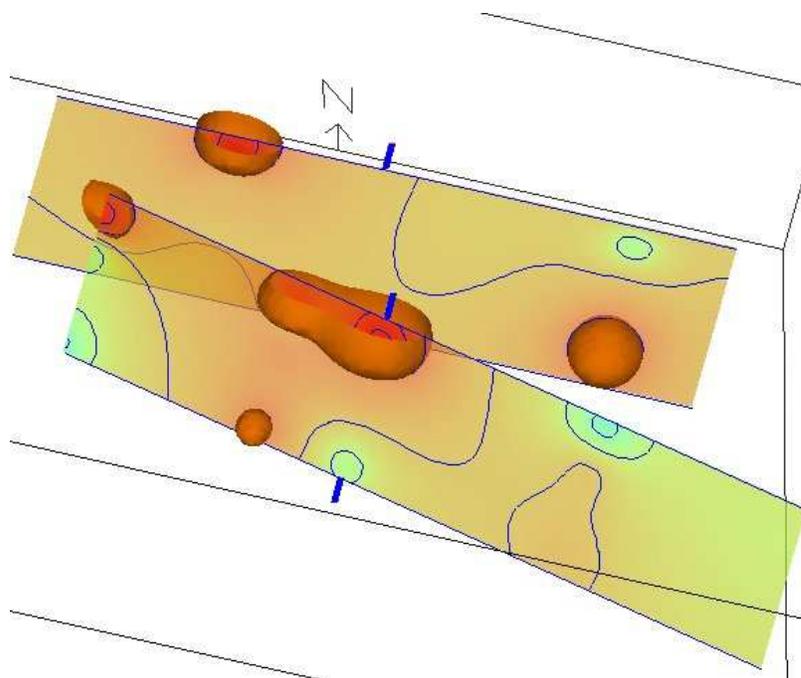
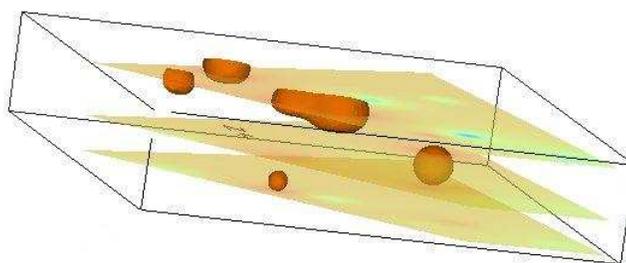


3 D



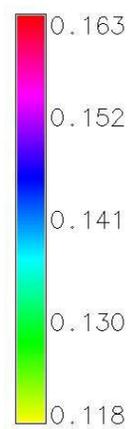
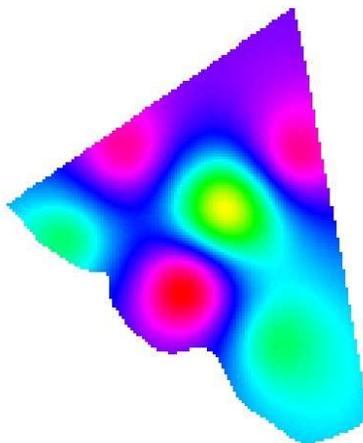
A-2.7 – OCORRÊNCIA DE SOLOS MAIS POROSOS:  $0,600$  a  $0,630 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 

isosuperfícies representativas dos valores de  $0,600$  a  $0,630 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

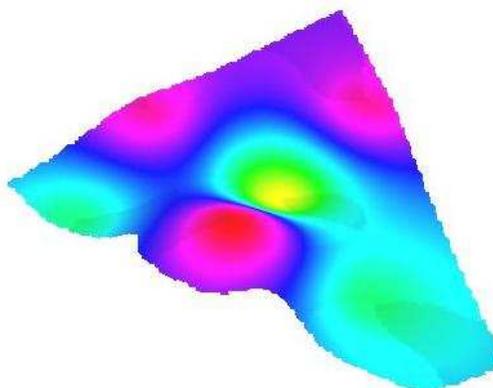


A-2.8 – POROSIDADE MACRO DO SOLO ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

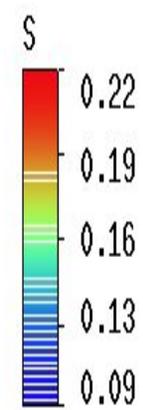
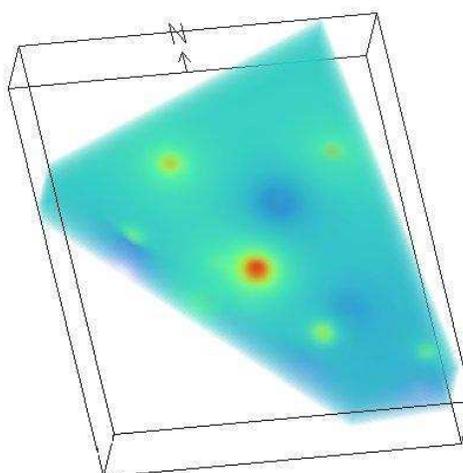
2 D



2 ½ D



3 D



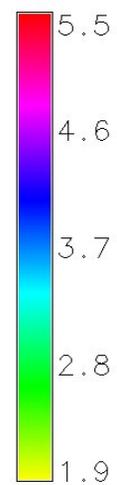
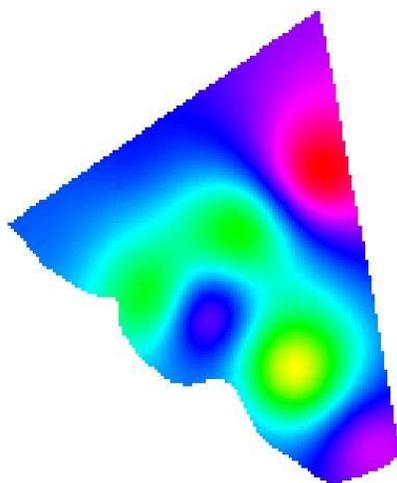
**ANEXO 3 – VISUALIZAÇÕES DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS:  
SOMA DE BASES E COEFICIENTE DE TROCA CATIONICA**

### **Soma de Bases e Coeficiente de Troca Catiônica**

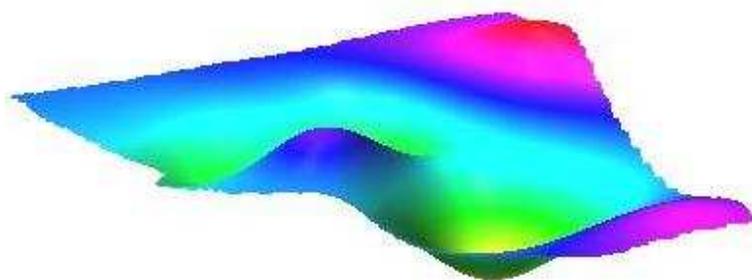
As visualizações no plano e na superfície mostram a variação da propriedade, por meio de isovalores representados por diferentes cores, para o solo até um metro de profundidade. A visualização do volume mostra a distribuição espacial dos valores das propriedades químicas referentes à soma de bases e ao coeficiente de troca catiônica dentro do solo (fig. A-3.1 e fig. A-3.2).

A-3.1 – SOMA DE BASES (cmol/dm<sup>3</sup>)

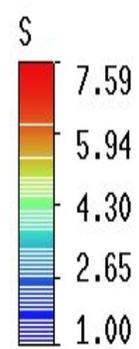
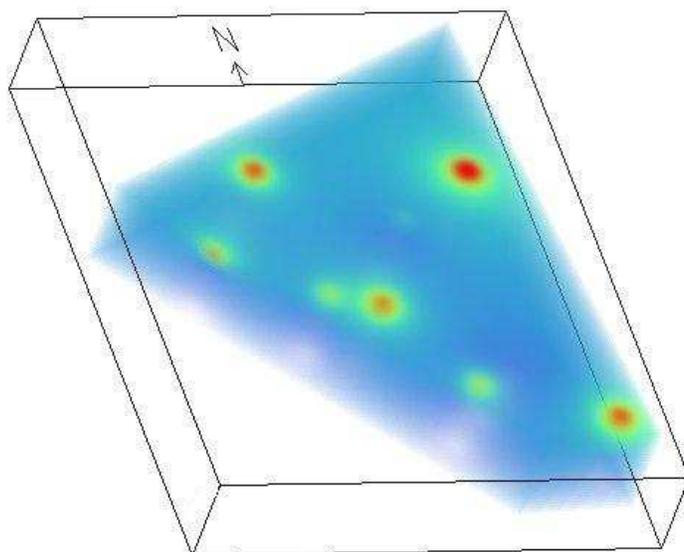
2 D



2 ½ D



3 D



A-3.2 – COEFICIENTE DE TROCA CATIÔNICA – CTC (cmol/dm<sup>3</sup>)