

Visualização Volumétrica Aplicada às Geociências

ANDREA LOPES IESCHECK¹; CLAUDIA ROBBI SLUTER²
& RENATO ANTÔNIO DEDECEK³

1. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001
CEP 91501-970, Porto Alegre, RS e-mail: andrea.iescheck@ufrgs.br

2. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná,
Caixa Postal 19001, CEP 81531-990, Curitiba, PR

3. Embrapa Florestas, Estrada da Ribeira km 111, Caixa Postal: 319, CEP: 83411-000 Colombo, PR

(Recebido em 08/07. Aceito para publicação em 05/08)

Abstract - This paper is on volume visualization of spatial data. It aims at showing new possibilities to visualize three-dimensional phenomena such as geology, soils, geophysics, seismic and the like. The use of volumes in the evaluation processes allows one to visualize and to explore the phenomenon as a continuous body in space, thus incorporating the third dimension in cartography. The volumetric visualization is a branch of scientific visualization that has shown a fast growth and its goal is to comprehend the internal structure and the behavior of three-dimensional volumetric objects. Volumetric visualization depends on the interaction. We must, therefore, interact with the volume through rotations, cuts and other forms of graphic manipulation, seeking the complete information. The methodology of this research entails the acquisition of three-dimensional data, three-dimensional interpolation, as well as volume formation and visualization by means of three-dimensional Geographic Information System and volumetric visualization software. Soil's data were interpolated in order to be continuously represented in three-dimensional space. The outcome of volume representations of physical and chemical properties is a new way to visualize the soil and a new source of knowledge to the study of this phenomenon.

Keywords - volumetric visualization, three-dimensional interpolation, three-dimensional geographic information systems

INTRODUÇÃO

O presente trabalho diz respeito à representação e à visualização volumétrica de dados espaciais e apresenta novas possibilidades para visualizar tridimensionalmente as propriedades de fenômenos geocientíficos. A demanda que rege a visualização dos volumes surge com a necessidade de ter o domínio do conhecimento da distribuição e comportamento espacial dos fenômenos caracterizados como feições tridimensionais. O

delineamento espacial das propriedades dos fenômenos e de suas variações, a partir de conjuntos de dados representativos, permite extrair informações científicas relevantes.

Os fenômenos de natureza tridimensional e contínua como os solos, a geologia e a geofísica, dentre outros, 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 & 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 que configuram o fenômeno.

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, a necessidade de explorar novas tecnologias, uma vez que as técnicas existentes não eram suficientes para proporcionar a visualização dos resultados complexos (Bartrolí, 2001).

De acordo com 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. A visualização científica, segundo Earnshaw & Wiseman (1992), está relacionada com a exploração de dados e informações na busca pelo entendimento e compreensão intuitiva dos fenômenos espaciais. A visualização volumétrica é uma área dentro da visualização científica que tem apresentado rápido crescimento, e tem por objetivo conhecer a estrutura interna e o comportamento de objetos volumétricos tridimensionais (Fujishiro *et al.*, 1996).

Na visualização volumétrica a exploração dos dados não é fixa, ou seja, constitui-se em um processo dinâmico de análise na busca do conhecimento do fenômeno. Assim, como pressuposto, deve-se interagir com o volume por meio de rotação, aproximação, cortes e outras formas de manipulação gráfica, buscando a informação de maneira completa.

Considerando a avaliação de solos, o conhe-

cimento da estrutura complexa do fenômeno se dá a partir de critérios qualitativos, relativos às suas propriedades morfológicas, e quantitativos, relativos às suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Atualmente, as representações das informações dos solos são realizadas na forma de mapas pedológicos, perfis de seqüências topográficas, cartas com curvas de isodiferenciação, superfícies representativas das variações dos atributos, bloco diagramas e gráficos. Estas formas de representação, no entanto, não permitem visualizar de maneira completa as variações em volume, uma vez que descrevem padrões sobre superfícies bidimensionais ao invés da distribuição espacial dos atributos da subsuperfície. Por conseguinte, visualizar tridimensionalmente as propriedades dos solos significa não somente uma nova possibilidade, mas um avanço para o estudo deste fenômeno.

Os dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho são referentes às propriedades físicas e químicas dos solos. Estes dados são resultado das análises laboratoriais de amostras coletadas em campo e foram interpolados para sua representação contínua no espaço tridimensional.

A presente pesquisa, que resultou em trabalho de tese de doutorado, foi estruturada de forma a apresentar e discutir os conceitos relativos às estruturas de dados tridimensionais, como também, à representação e à visualização de dados volumétricos. A considerar a visualização de volumes, requer-se que os dados tridimensionais sejam interpolados, descrevem-se as características espaciais dos dados e o método para interpolação com condicionantes baseados na sua tensão (*splines*). Aqui, são apresentados os procedimentos utilizados e os resultados obtidos para representação e visualização volumétrica das propriedades físicas e químicas dos solos.

METODOLOGIA

A representação e a visualização volumétricas de fenômenos espaciais pressupõem a utilização de sistemas computacionais que possam atender a sua complexidade. Portanto, para viabilizar de maneira adequada a visualização volumétrica das propriedades dos solos, foi necessário usar um sistema de informações geográficas tridimensional

(SIG-3D) em conjunto com um programa para visualização de volumes.

Este trabalho foi desenvolvido em um ambiente SIG-3D, utilizando o programa GRASS GIS, versão 6.1 cvs, para o sistema operacional Linux. O GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) é um programa computacional de domínio público e de código aberto, documentado e organizado como bibliotecas de funções, e a estrutura de dados também é aberta.

Para visualização dos volumes das propriedades dos solos foi usado o programa Vis5D. O Vis5D é um programa de domínio público, oferecido nos termos do GPL (*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, das quais são três dimensões espaciais (x_1, x_2, x_3), uma dimensão referente ao atributo (z_i) e uma dimensão temporal (t).

Os procedimentos adotados 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, o desenvolvimento metodológico contempla as fases de aquisição de dados tridimensionais, organização dos dados, interpolação tridimensional, formação dos volumes, visualização dos volumes e manipulação gráfica e interação com os volumes gerados para extração de informações.

Área de Estudo

A área utilizada para o desenvolvimento deste trabalho localiza-se no município de Castro, Estado do Paraná, a 140 km de Curitiba, na região do Segundo Planalto Paranaense (Fig. 1). O talhão selecionado para condução da pesquisa está situado no Centro de Treinamento da Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária, abrange uma área de 21,5 hectares e apresenta um relevo suave ondulado. Este talhão é caracterizado por diferentes tipos de solos e seu uso é para atividade agrícola com plantio direto.

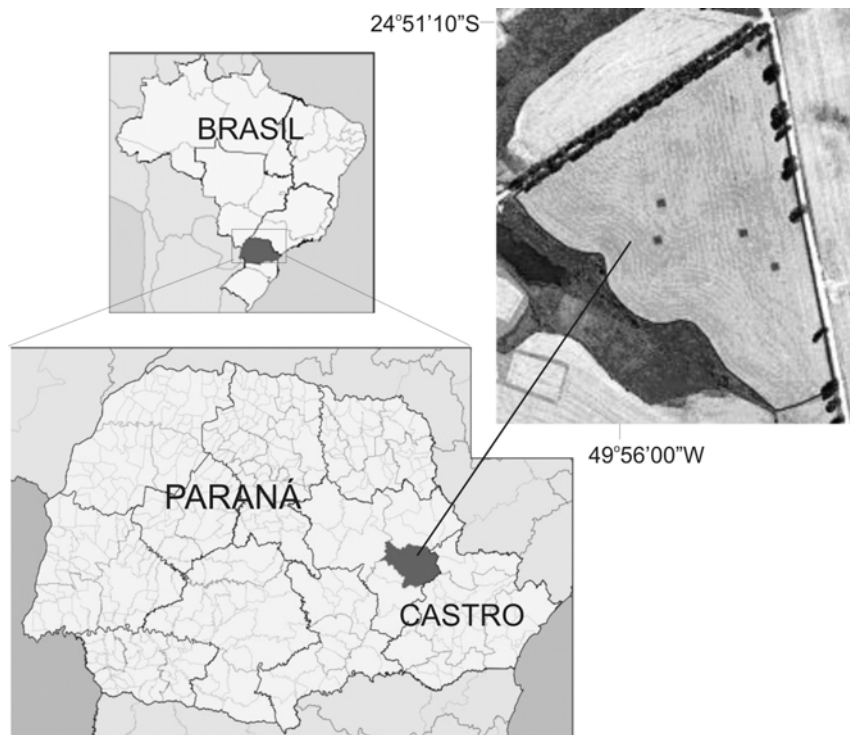


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

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, com 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 e a representação inadequada desta superfície compromete a qualidade dos trabalhos pedológicos. Portanto, com o objetivo de subsidiar as atividades desenvolvidas nesta pesquisa, foi gerada a base topográfica digital da área de estudo, a partir de levantamento topográfico, com curvas de nível equidistantes de 20 cm para representação detalhada do relevo local (Fig. 2).

Aquisição de Dados

O problema de pesquisa tratado neste trabalho é como representar e visualizar os volumes das propriedades dos solos. O desenvolvimento das atividades necessárias à solução do problema em questão é formulado a partir das seguintes premissas: a visualização de volumes demanda a formação do volume que, por sua vez, requer dados volumétricos, os quais são obtidos por interpolação

tridimensional a partir de dados tridimensionais.

Segundo Neteler (2001), um dos principais problemas para se trabalhar com volumes é a disponibilidade de dados tridimensionais. As características dos fenômenos são definidas em função dos dados que se dispõe para análise e representação destes fenômenos. Considerando que o fenômeno em estudo neste trabalho é o solo, que é uma feição volumétrica e seu comportamento espacial é caracterizado como tridimensional, os dados aqui utilizados são tridimensionais. A representação dos dados no espaço tridimensional (R^3) é feita pelas três coordenadas espaciais (x_1 , x_2 , x_3) e um ou mais dados referentes aos atributos (z_i). Os atributos, nesse caso, correspondem às propriedades físicas e químicas dos solos.

Para caracterização analítica dos solos foi realizada coleta em campo, da qual obtiveram-se amostras para expressar as propriedades físicas e químicas da área. A coleta de amostras dos perfis foi feita pela 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. 2). A localização destes pontos foi definida por pedólogos, a partir da análise da base topográfica planialtimétrica na escala 1:1.000 e do mapa de solos na escala 1:10.000.

As análises físicas e químicas das amostras foram realizadas nos laboratórios da Embrapa Florestas, localizada no município de Colombo, na região metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná. Das análises físicas resultaram os dados das seguintes propriedades: densidade do solo; umidade volumétrica atual; umidade volumétrica a 6 kPa; umidade volumétrica a 10 kPa; umidade volumétrica a 100 kPa; umidade volumétrica a 1500 kPa; porosidade total; porosidade macro; água disponível; e frações granulométricas correspondentes aos percentuais de areia (areia grossa e areia fina somadas), silte e argila. Das análises químicas os dados resultantes foram: pH (CaCl_2); nutrientes; matéria orgânica; soma de bases; saturação de bases e capacidade de troca catiônica (CTC).

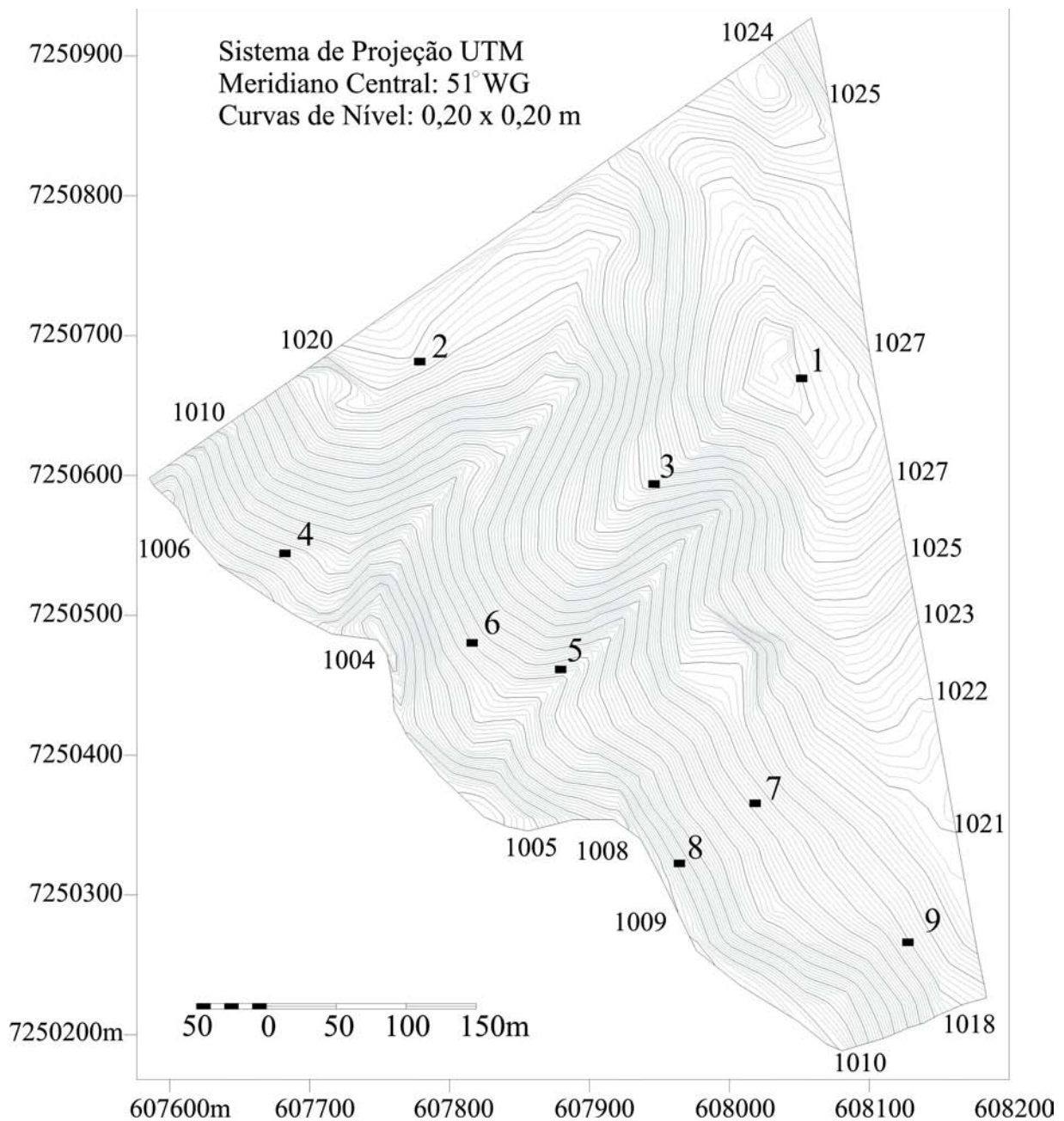


Figura 2 - Base topográfica digital do talhão e localização dos pontos de coleta das amostras.

Representação e Visualização dos Volumes

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. Nos modelos matriciais o espaço é tratado como um conjunto de elementos discretos de dimensão regular, sendo que no espaço bidimensional cada elemento discreto é denominado *pixel* e, no espaço tridimensional, denominado *voxel*. Segundo Bartolói (2001), a região de valor constante no entorno de cada amostra é conhecida como *voxel*

e seu ponto central corresponde à posição de um ponto amostrado (Fig. 3). A discretização do volume por meio 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. Cada *voxel* é armazenado explicitamente como uma matriz tridimensional, ordenada por camadas e linhas, e com o valor do seu atributo associado (Raper, 2000).

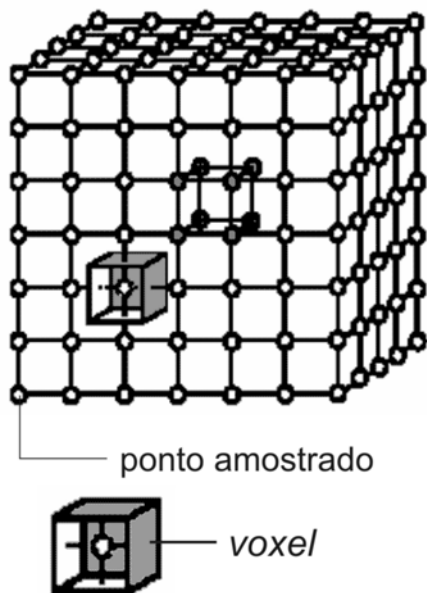


Figura 3 - *Voxel* (fonte: adaptado de: Bartrolí, 2001).

Os dados tridimensionais das propriedades dos solos foram obtidos de maneira discreta, a partir de quarenta e cinco amostras coletadas em nove trincheiras abertas em campo e submetidas a análises laboratoriais. Os dados provenientes destas análises são de natureza quantitativa e representam as grandezas medidas das propriedades físicas e químicas dos solos para cada horizonte. A forma discretizada de sua aquisição estabelece a necessidade de interpolação como um condicionante para a representação contínua do fenômeno no domínio espacial.

A representação dos dados para modelagem de superfícies em R^2 (espaço Euclidiano), é feita a partir de duas coordenadas espaciais (x_1, x_2) e um terceiro dado (z), 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 e sua representação no espaço tridimensional (R^3) é feita pelas três coordenadas espaciais (x_1, x_2, x_3) e um ou mais dados referentes aos atributos (z_j). Os arquivos *ascii* para entrada dos dados foram organizados com a seguinte estrutura: $|x_1|x_2|x_3|z_1|z_2|z_3|...|z_j|$.

Após a organização dos dados, as informações foram processadas para formar os volumes. Para formação do volume, ou seja, para transformar dados pontuais tridimensionais em dados volumétricos, o programa GRASS GIS disponibiliza dois métodos. No primeiro método é feita a conversão direta dos pontos para as suas respectivas representações tridimensionais por *voxels* (*voxelização*). Esse método, porém, fica restrito aos valores dos dados existentes e não gera novos valores por interpolação. O segundo processo realiza a interpolação tridimensional dos dados, 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. Um conjunto de pontos definidos em uma grade regular, de acordo com Kaufman *et al.* (1993), contém amostras obtidas em intervalos regularmente espaçados ao longo dos três eixos ortogonais, as quais são armazenadas em uma matriz tridimensional.

A interpolação tridimensional dos dados dos solos foi realizada com o algoritmo da *spline* regularizada com tensão em três dimensões (3D-RST) implementado no programa GRASS GIS. Deste procedimento resultaram os arquivos correspondentes aos dados volumétricos das propriedades dos solos.

A formulação geral do problema da interpolação espacial, segundo Mitas & 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:

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

Existem diversas funções que atendem aos requisitos estabelecidos na equação (1) e, portanto, 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 (Mitas & Mitasova, 1999).

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 & Mitasova, 1999):

$$\sum_{j=1}^N |z_j - F(r_j)|^2 w_j + w_o I(F) = \text{mínimo} \quad (2)$$

onde:

w_j e w_o são ponderações positivas;

$I(F)$ é a medida de suavização (seminorma).

Considerando que a *spline* deve passar próxima dos valores amostrados, uma *spline* suavizada é a função que minimiza a soma dos desvios, ou seja, minimiza a curvatura da superfície e pode ser expressa como a soma de dois componentes:

$$F(r) = T(r) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r, r_j) \quad (3)$$

Nesta equação (3), o primeiro termo representa a suavidade da função (componente de tendência) e o segundo termo representa a sua proximidade ou fidelidade ao dado. $R(r, r_j)$ é uma função de base radial que depende de $I(F)$.

Como forma de sintetizar todas as propriedades desejadas em uma única função, Mitasova *et al* (1995) propuseram e implementaram em um ambiente SIG a *spline* regularizada com tensão (*regularized spline with tension*). A medida de suavização e a função de base da RST generalizada para uma dimensão arbitrária, são dadas pelas equações (4) e (5), respectivamente:

$$I(F) = \sum_{\min} c_{\min}(\varphi) \int [F_{x y}^{n m}]^2 dr \quad (4)$$

$$R_d(r, r_j) = R_d(|r, r_j|) = R_d(r) = \rho^{-\delta} \gamma(\delta, \rho) - \left(\frac{1}{\delta}\right) \quad (5)$$

onde:

$$r = |r - r_j|,$$

$$\delta = \left(\frac{d-2}{2}\right);$$

$$\rho = \left(\varphi \frac{r}{2}\right)^2;$$

φ é um parâmetro de tensão generalizado;

$\gamma(\delta, \rho)$ é a função gama incompleta.

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 & Mitas, 1993).

De acordo com Cressie (1993), Hutchinson & Gessler (1993), Matheron (1981) e Wahba (1990), citados por Mitas & Mitasova (1999), as *splines* são formalmente equivalentes a *krigagem* universal, sendo a escolha da função covariância determinada pela medida de suavização. Portanto, muitos dos conceitos geoestatísticos podem ser explorados no contexto da *spline*. Além disso, a interpretação física das *splines* torna sua aplicação mais fácil e intuitiva.

Os volumes resultantes do processo de interpolação tridimensional totalizam 63.674 *voxels*. Estes elementos estão distribuídos da seguinte maneira: 79 *voxels* na direção sul-norte, 62 *voxels* na direção leste-oeste e 13 *voxels* na direção superior-

inferior.

Para visualização dos volumes dos solos, objetivo desta pesquisa, utilizou-se o método do *rendering* direto de volumes. Para isto, foi necessário exportar os arquivos de dados volumétricos referentes às propriedades dos solos para o programa Vis5D. Este programa realiza o *rendering* de volumes e possui ferramentas de interação, o que possibilita extrair isosuperfícies no espaço tridimensional, realizar cortes horizontais e verticais, e visualizar estes cortes por meio de cores e de isolinhas.

RESULTADOS

Com os dados das propriedades físicas e químicas foram geradas representações que mostram a distribuição dos atributos no plano bidimensional, as superfícies de variação destes atributos, isto é, seus padrões sobre superfícies bidimensionais, e a distribuição espacial dos atributos por meio 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.

A partir dos resultados das análises físicas foram criadas as visualizações 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 frações granulométricas correspondentes aos percentuais de areia, silte e argila (textura). E, 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.

Neste trabalho, são apresentadas as visualizações volumétricas das propriedades dos

solos referentes à densidade, à quantidade de água disponível e à quantidade de matéria orgânica. 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.

Para visualização e manipulação dos volumes foi adotada a resolução de 10 m, que se mostrou mais adequada em virtude do tamanho dos arquivos gerados e da capacidade de processamento computacional dos equipamentos utilizados (microcomputadores).

Densidade do Solo

As representações no plano e de superfície mostram a variação da densidade do solo correspondente à faixa de um metro de profundidade. Com a representação volumétrica é possível visualizar a distribuição espacial desta propriedade na subsuperfície. Interagindo com o volume, foram geradas diferentes isosuperfícies que representam os valores de: 1,110 kg/dm³; 1,079 kg/dm³; 1,048 kg/dm³; 1,021 kg/dm³; 1,016 kg/dm³ e 0,985 kg/dm³ de densidade (Fig. 4).

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 representações bidimensionais, onde se visualiza apenas a variação da densidade na superfície horizontal. A figura 5 apresenta em detalhe a distribuição espacial da densidade no solo. Nessa figura, as isosuperfícies representam a quantidade de 0,985 kg/dm³, as isolinhas representam valores com intervalo de 0,02 kg/dm³ e os diferentes tons de cinza representam os isovalores de densidade do solo. Utilizou-se 35% de transparência nos cortes verticais.

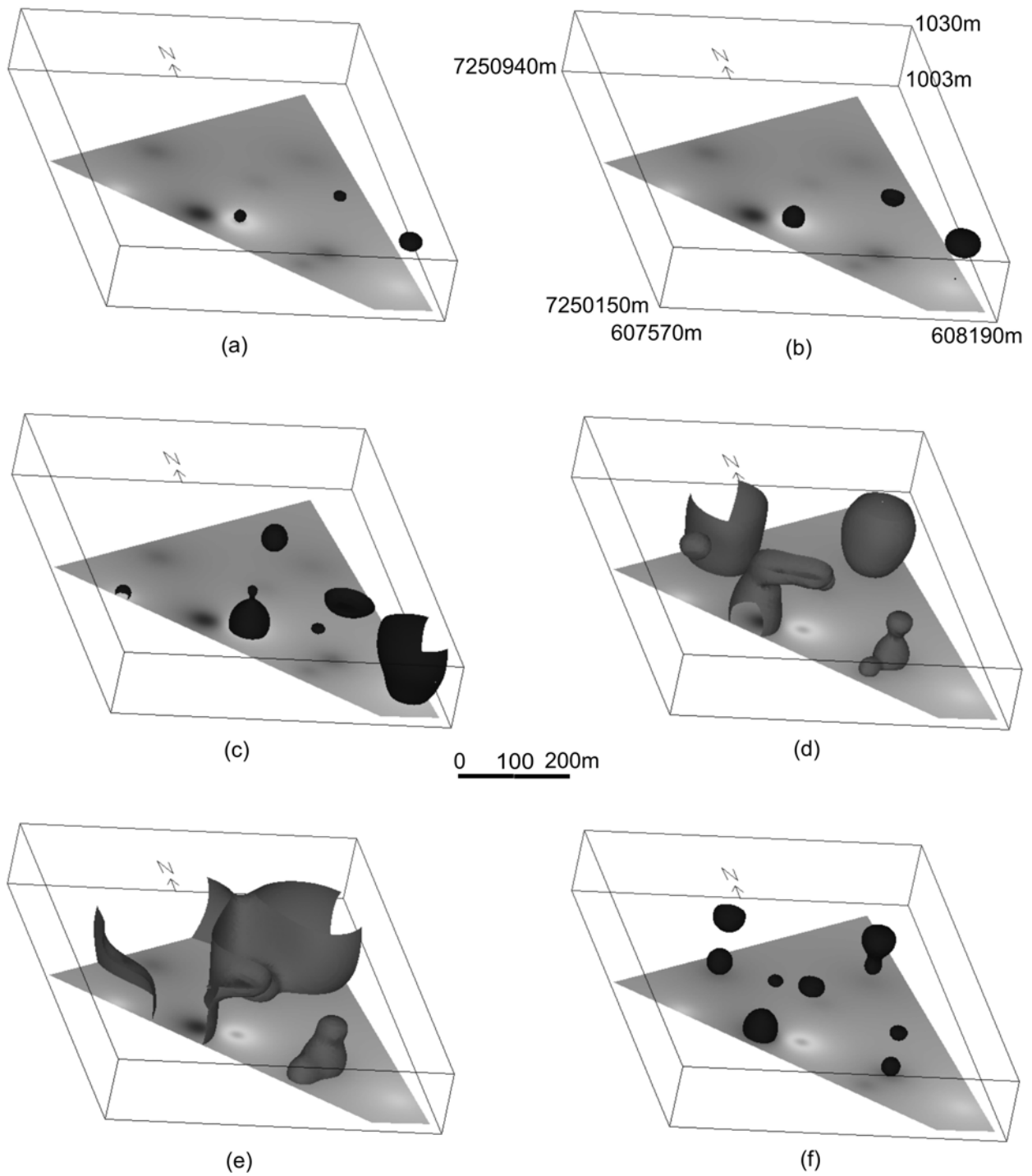


Figura 4 - Visualização volumétrica da densidade do solo por meio de isosuperfícies. (a) isosuperfície de densidade $1,110 \text{ kg/dm}^3$; (b) isosuperfície de densidade $1,079 \text{ kg/dm}^3$; (c) isosuperfície de densidade $1,048 \text{ kg/dm}^3$; (d) isosuperfície de densidade $1,021 \text{ kg/dm}^3$; (e) isosuperfície de densidade $1,016 \text{ kg/dm}^3$; (f) isosuperfície de densidade $0,985 \text{ kg/dm}^3$.

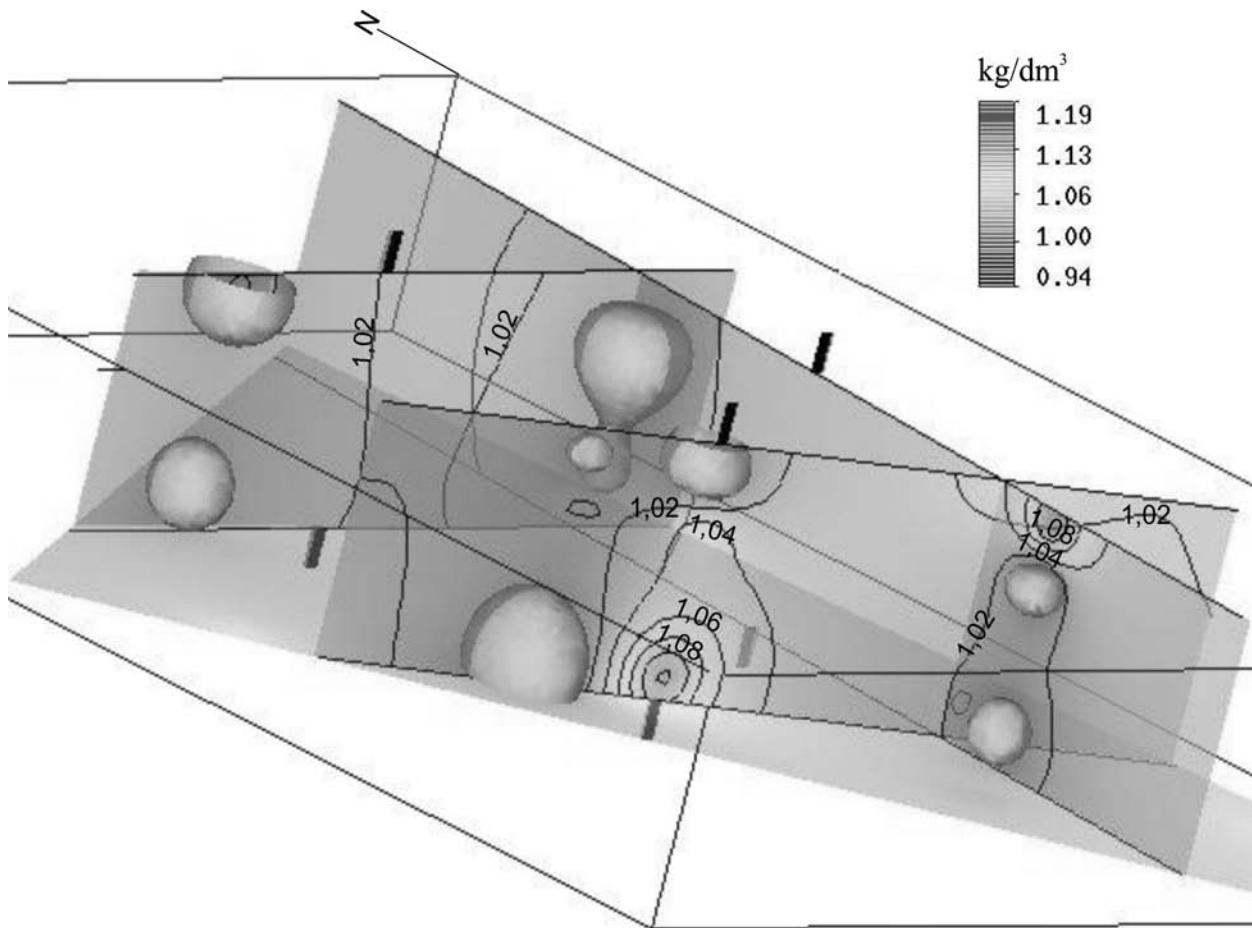


Figura 5 - Visualização em detalhe da densidade do solo: isosuperfície de valor 0,985 kg/dm³; isolinhas representando intervalos de 0,02 kg/dm³; e tons de cinza representando isovalores de densidade do solo.

Água disponível

Na figura 6, podem ser visualizados os lugares de maior quantidade de água disponível no corpo do solo, a partir de diferentes pontos de vista, por meio de isosuperfícies. A mudança do ponto de vista permite conhecer a distribuição espacial destas ocorrências em todas as direções dentro do volume. Dessa forma, observa-se na figura 6-a a distribuição horizontal do atributo e, nas figuras 6-b e 6-c, vê-se sua distribuição no sentido vertical.

A figura 7 apresenta a localização de um corte vertical realizado no volume, para interação e visualização detalhada desta porção do solo. Na figura 7-b, tem-se a representação volumétrica por *rendering* de volume da quantidade de água disponível, ou seja, o padrão de distribuição desta propriedade dentro do solo. As isolinhas representam valores com intervalo de 0,005 cm³/cm³ e os diferentes tons de cinza representam os isovalores de água disponível no solo.

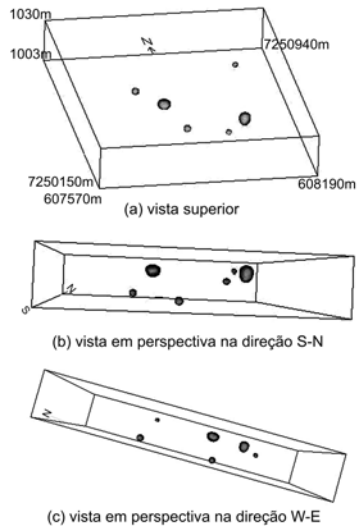


Figura 6 - Visualização volumétrica da quantidade de água disponível no solo: isosuperfícies representativas das quantidades de 0,08 a 0,10 cm^3/cm^3 . (a) vista superior; (b) vista em perspectiva na direção S-N; (c) vista em perspectiva na direção W-E.

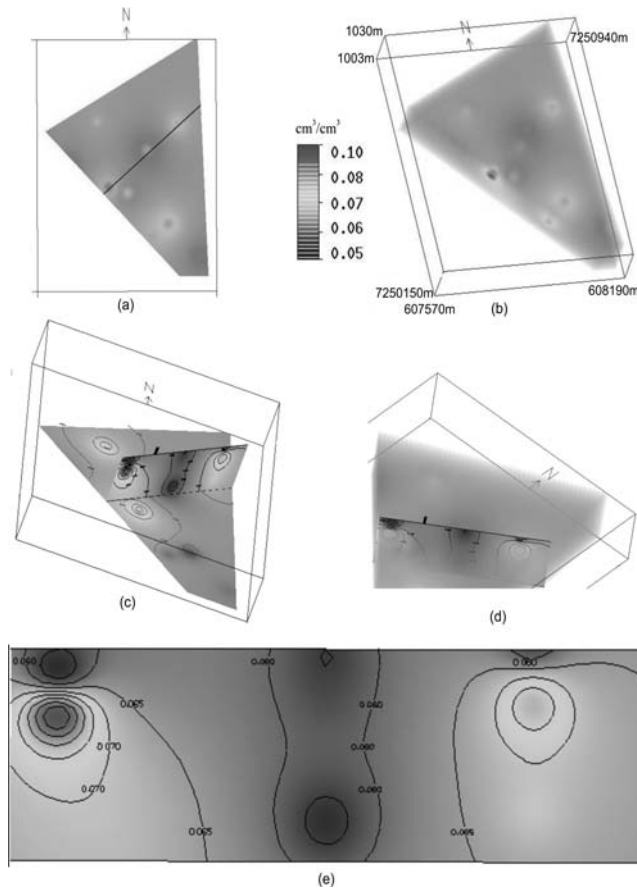


Figura 7 - Visualização volumétrica da água disponível no solo. (a) localização do corte vertical; (b) *rendering* de volume; (c) corte vertical, isolinhas horizontais, isolinhas verticais e tons de cinza; (d) corte vertical e *rendering* de volume; (e) detalhe do corte vertical: isolinhas verticais e tons de cinza.

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 8 apresenta a distribuição espacial da quantidade de matéria orgânica no solo por meio de

isosuperfícies. Nesta figura 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. Pode-se visualizar, portanto, que os maiores valores de quantidade de matéria orgânica se depositam nas camadas mais superficiais.

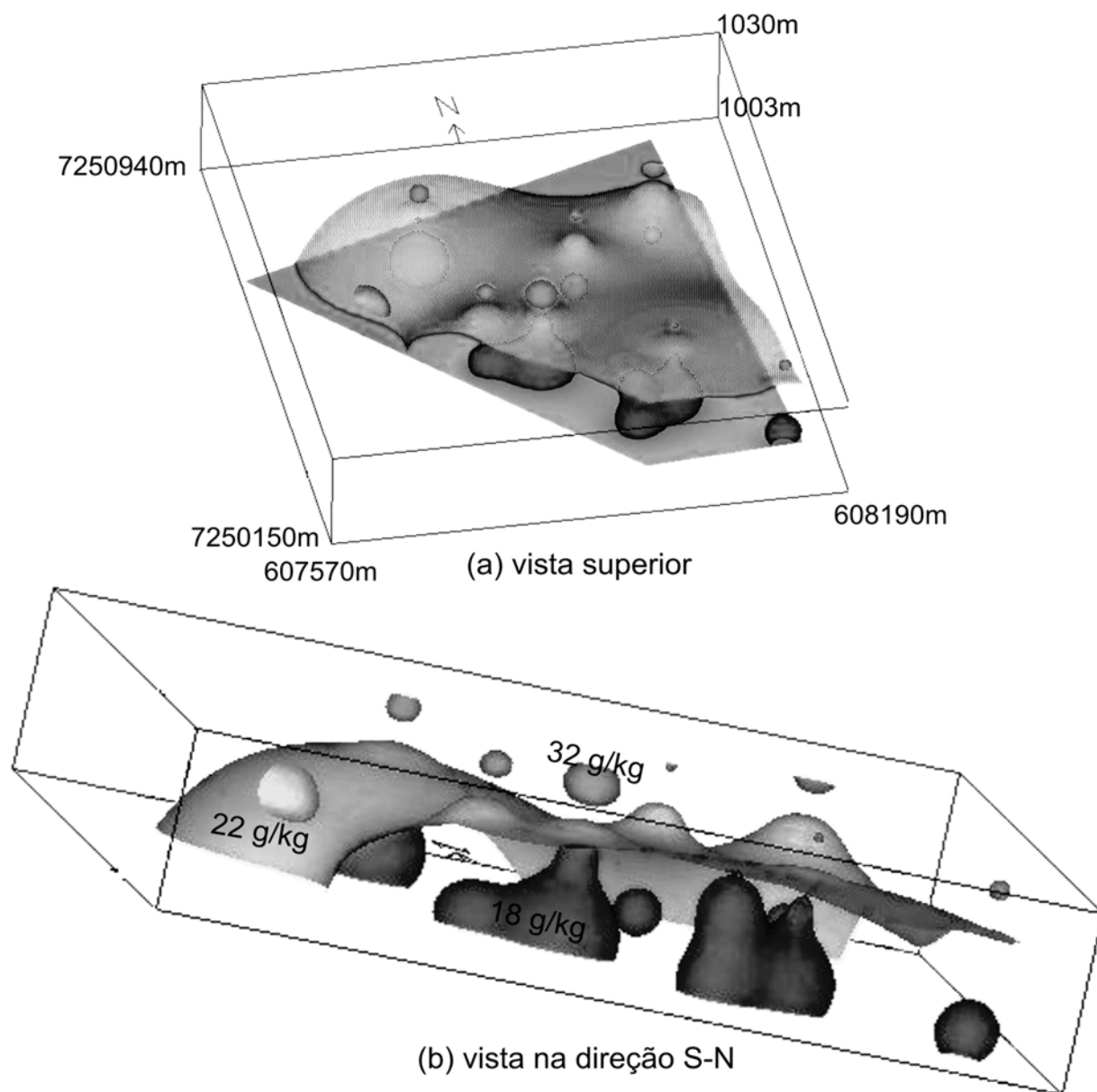


Figura 8 - Quantidade de matéria orgânica no solo. (a) vista superior; (b) vista na direção S-N.

CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa confirmam a hipótese inicial de que a representação e a visualização volumétrica dos solos, e de qualquer fenômeno caracterizado como tridimensional e contínuo, é de grande valia para diversas áreas da ciência e se constitui em uma importante ferramenta de apoio aos processos de análise. A utilização de um sistema de informações geográficas tridimensional, em conjunto com programas de visualização volumétrica, pode contribuir para a tomada de decisões e realização de análises no âmbito das geociências, aumentando dessa forma o potencial de utilização dos dados disponíveis.

É importante ressaltar que 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.

A visualização tridimensional das propriedades 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.

Ressalte-se também 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.

A visualização volumétrica pressupõe a interação para exploração da informação. A interatividade e a dinâmica do processo ficam, aqui, limitadas pelo meio.

REFERÊNCIAS

- Bartrolí, A. V. 2001. **Visualization techniques for virtual endoscopy**. Viena. 93p. Tese de Doutorado (PhD Dissertation). Technischen Universität Wien, Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik.
- Burrough, P. A. & McDonnell, R. A. 1998. **Principles of geographical information systems**. Oxford University Press, 333p.
- Earnshaw, R. A. & Wiseman, N. 1992. **An introductory guide to scientific visualization**. Alemanha: Springer-Verlag, 156p.
- Foley, J. D., Van Dam, A., Freiner, S. K. & Hughes, J. F. 1992. **Computer graphics: principles and practice**. 2 ed. Readings, MS: Addison-Wesley Publishing Company, 1174p.
- Fujishiro, I., Maeda, Y., Sato, H. & Takeshima, Y. 1996. Volumetric data exploration using interval volume. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, 2 (2):144-155.
- Grunwald, S. & Barak, P. 2003. 3D geographic reconstruction and visualization techniques applied to land resource management. **Transactions in GIS**, 7 (2):231-241.
- Kaufman, A. E., Cohen, D. & Yagel, R. 1993. Volume graphics. **IEEE Computer**, 26 (7):51-64.
- Kaufman, A. E. 1996. Volume visualization. **ACM Computing Surveys**, 28 (1):165-167.
- Mitas, L. & Mitasova, H. 1999. **Spatial interpolation**. In: Longley P A, Goodchild M F, Maguire D.J. and Rhind D W (eds) *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Blackwell Publishers Ltd.
- Mitasova, H. & Hofierka, J. 1993. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. **Mathematical Geology**, 25 (6):657-667.
- Mitasova, H. & Mitas, L. 1993. Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. **Mathematical Geology**, 25 (6):641-655.
- Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W.M., Gerdes, D.P., Kosinovsky, I. & Baker, T. 1995. Modelling spatially and temporally distributed phenomena: new methods and tools for GRASS GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, 9:433-446.
- Neteler, M. 2001. Volume modeling of soils using GRASS GIS 3D-tools. In: Italian GRASS Users Meeting, 2., University of Trento. **Proceedings...**

- Trento.
- Paiva, A. C., Seixas, R. B. & Gattass, M. 1999. **Introdução à visualização volumétrica**. PUC-Rio Inf.MCC03/99. Rio de Janeiro, 106 p.
- Peterson, M. P. 1995. **Interactive and animated cartography**. University of Nebraska at Omaha. Englewood Cliffs, Nova Jersey: Prentice Hall, 183p.
- Queiroz Neto, J. P. 2002. Análise estrutural da cobertura pedológica: uma experiência de ensino e pesquisa. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, 15:77-90. São Paulo.
- Raper, J. 2000. **Multidimensional geographic information science**. Londres: Taylor & Francis, 300p.
- Santos, L. J. C. 2000. Contribuição da análise estrutural da cobertura pedológica ao desenvolvimento da ciência do solo. **Revista RA'E GA**, 4:131-138. Editora da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://calvados.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/raega/article/viewFile/3344/2680>>. Acesso em: 12 fev. 2006.

Editor responsável pelo artigo: Dejanira L. Saldanha