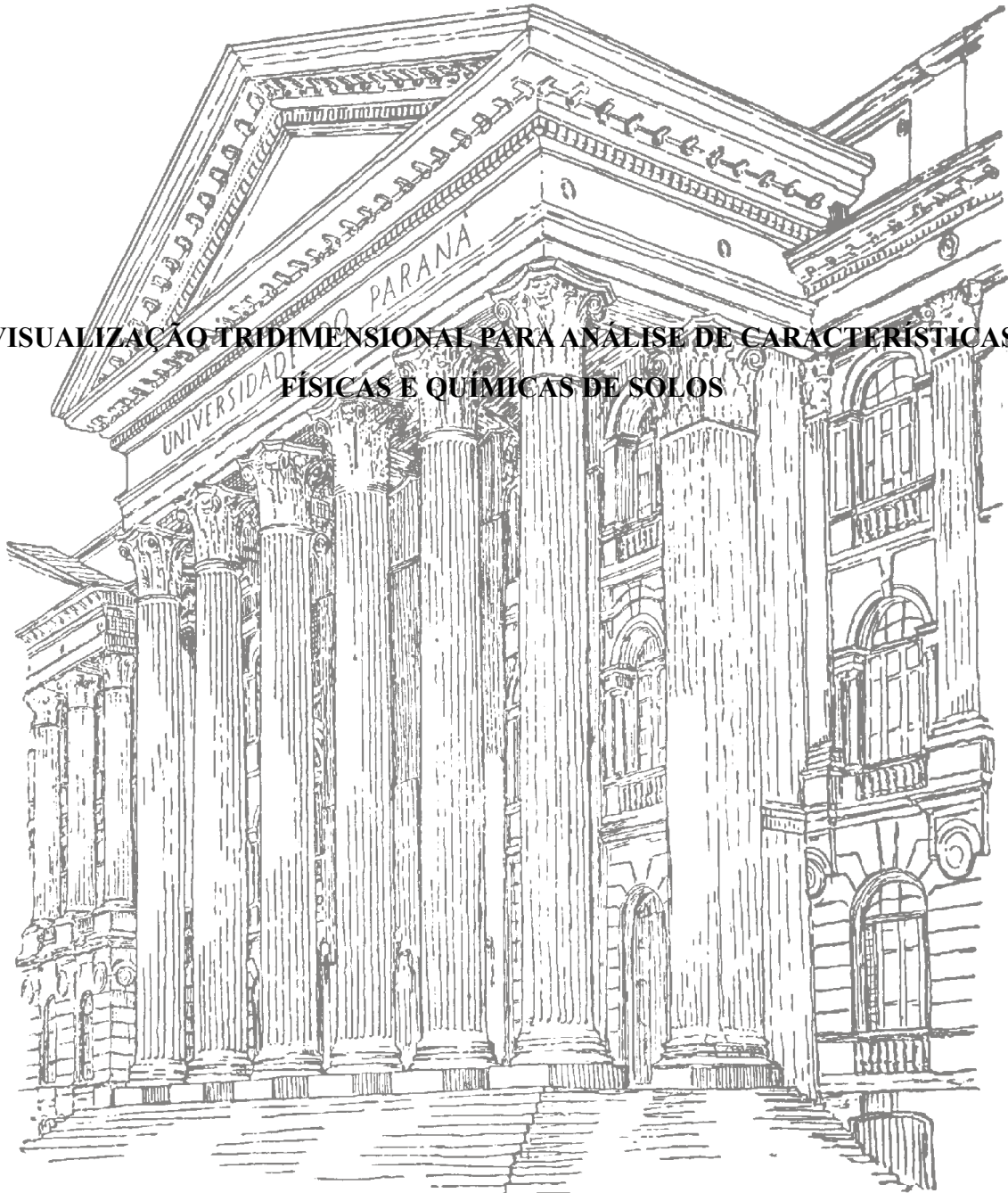


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TALES DE CAMPOS PIEDADE

**VISUALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS
FÍSICAS E QUÍMICAS DE SOLOS**



CURITIBA

2010

TALES DE CAMPOS PIEDADE

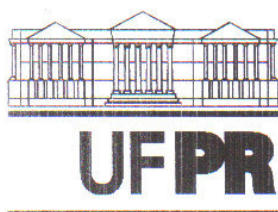
**VISUALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS
FÍSICAS E QUÍMICAS DE SOLOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Pedologia e Manejo do solo, linha de pesquisa Composição, Gênese e Levantamento do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Professor Dr. Vander de Freitas Melo.
Co-Orientador: Professor Dr. Luiz Claudio de Paula Souza.

CURITIBA

2010



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO(MESTRADO)
Rua dos Funcionários, 1540-Curitiba/PR-80035-050-Fone/Fax 41-3350-5648
Página: www.pgcsolo.agrarias.ufpr.br/
E-mail: pgcsolo@ufpr.br

PARECER

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **TALES DE CAMPOS PIEDADE**, sob o título: "**Visualização tridimensional para análise de características físicas e químicas de solos**", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Concentração: Pedologia e Manejo do Solo, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e argüido o candidato, são de Parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Pedologia e Manejo do Solo"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 23 de agosto de 2010.

Prof. Dr. Vander de Freitas Melo, Presidente.

Prof.^a. Dr.^a. Andréa Lopes Iescheck, I^a. Examinadora.

Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta, II^o. Examinador.

Prof. Dr. Luiz Claudio de Paula Souza, III^o. Examinador.

Dedico este trabalho aos meus pais, Célio Roberto de Campos Piedade e Janaína Kether Campos Piedade, pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por me conceder todas as possibilidades e guiar os meus passos.

Ao professor Dr. Vander de Freitas Melo, pela orientação e amizade.

Ao professor Dr. Luiz Claudio de Paula Souza pelo apoio na co-orientação do trabalho.

Ao Professor Dr. Valmiqui Costa Lima pelas várias contribuições e ajuda no desenvolvimento das atividades.

Ao PPG em Ciência do Solo/UFPR, seus professores e funcionários pelo aprendizado e acolhida durante o desenvolvimento do trabalho.

À CAPES pela bolsa de mestrado.

A todos os meus colegas e amigos de mestrado do PPG em Ciência do Solo.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	vii
GENERAL ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
LITERATURA CITADA.....	2
CAPÍTULO 1 – ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DOS TEORES DE AREIA, SILTE E ARGILA DE SOLOS ORIGINÁRIOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA EM PINHAIS – PR	4
Resumo	4
Abstract.....	6
1.1. Introdução	8
1.2. Material e Métodos	9
1.3. Resultados e Discussão.....	14
1.4. Conclusões.....	21
1.5. Literatura Citada	21
CAPÍTULO 2 – ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ATRIBUTOS DA FERTILIDADE DE SOLOS DE UMA ÁREA COM DIFERENTES FEIÇOES PEDOMORFOLÓGICAS EM PINHAIS – PR.....	25
Resumo	25
Abstract.....	26
2.1. Introdução	27
2.2. Material e Métodos	29
2.3. Resultados e Discussão.....	32
2.4. Conclusões.....	44
2.5. Literatura Citada	44
CAPÍTULO 3 – ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO DE CHUMBO (Pb) EM SOLOS CONTAMINADOS DE UMA ÁREA DE MINERAÇÃO E METALURGIA EM ADRIANÓPOLIS-PR	48
Resumo	48
Abstract.....	49
3.1. Introdução	50
3.2. Material e Métodos	52
3.3. Resultados e Discussão.....	60
3.4. Conclusões.....	70
3.5. Literatura Citada	71
CONCLUSÃO GERAL	75

VISUALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DE SOLOS ¹

Autor: Tales de Campos Piedade

Orientador: Prof. Dr. Vander de Freitas Melo

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio de Paula Souza

RESUMO GERAL

Como forma de agregar valor ao processo de interpretação dos dados quantitativos relativos às características físicas e químicas do solo, essa pesquisa teve como tema a utilização de imagens tridimensionais representando a distribuição espacial desses dados, tendo em vista identificar e analisar a atuação dos fatores de formação e processos pedogenéticos, enfocando também aspectos ligados a contaminação do solo. Nesse sentido, amostras de solo foram coletadas e analisadas em laboratório para determinar as características granulométricas, atributos de fertilidade, e teores de metal pesado (Pb - chumbo). Como as amostras de solo foram coletadas em diversos pontos e profundidades distribuídos pelo terreno, foi realizado um processo de interpolação para gerar um modelo contínuo no espaço tridimensional, submetido posteriormente a procedimento de visualização científica. Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos o estudo foi dividido em três capítulos: o primeiro e o segundo, tendo como universo de pesquisa uma área da Estação Experimental do Canguiri – UFPR, no município de Pinhais (PR), enfocou a atuação dos fatores de formação e processos pedogenéticos; o terceiro, realizado em uma área de mineração no município de Adrianópolis (PR), enfocou a contaminação do solo por metal pesado (Pb). Os resultados obtidos no primeiro e segundo capítulos mostraram que a interpretação das imagens apoiada pelo referencial bibliográfico apontou que as características físicas e os atributos da fertilidade do solo variaram muito em função do relevo e material de origem, sendo possível identificar a atuação de fatores de formação e processos pedogenéticos. Os resultados obtidos no terceiro capítulo mostraram que a espacialização dos teores de Pb no espaço tridimensional permitiu o monitoramento das áreas mais contaminadas e que necessitam maiores cuidados, foi possível identificar também a interação do metal em função das características químicas e físicas do solo e formas de contaminação.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (86 p.) Agosto, 2010.

Palavras-chaves: Fatores de formação e processos pedogenéticos, interpolação tridimensional, metal pesado, visualização científica.

THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION TO ANALYZE OF PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF SOIL²

Autor: Tales de Campos Piedade

Orientador: Prof. Dr. Vander de Freitas Melo

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio de Paula Souza

GENERAL ABSTRACT

To improve the interpretation process of quantitative data of physical and chemical soil properties, this research theme was the use of three-dimensional images representing the spatial distribution of these data in order to identify and analyze the factors of soil formation and pedogenetic processes, and also focusing on aspects of soil contamination. In this sense, soil samples were collected and analyzed in the laboratory to determine the physical characteristics, attributes of fertility, and heavy metal contents (Pb - lead). Because soil samples were collected at various points and depths distributed over the ground, there was a process of interpolation to generate a continuous model in three-dimensional space, later subjected to scientific visualization procedure. In order to achieve the proposed objectives, the study was divided into three chapters: the first and second, was conducted at Canguiri Experimental Station - UFPR in the city of Pinhais (PR), focused on the role of factors of soil formation and pedogenetic processes; the third chapter was in a mining area in the city of Adrianópolis (PR), focused on soil contamination by heavy metals (Pb). The results obtained in the first and second chapters showed that the interpretation of images supported by bibliographic references pointed out that the physical characteristics and attributes of soil fertility varied greatly depending on the topography and source material, it was possible to identify the performance of factors of soil formation and pedogenetic processes. The results in the third chapter showed that the spatial distribution of Pb in three-dimensional space allowed tracking of the most contaminated area that are needing more care, it was also possible to identify the interaction of metal with the soil depending on the chemical and physical characteristics of the soil and forms of contamination.

Key-words: Factors of soil formation and pedogenetic processes, three-dimensional

² Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (86 p.) August, 2010.

interpolation, heavy metal, scientific visualization.

INTRODUÇÃO GERAL

O estudo da distribuição das características químicas e físicas do solo na paisagem é bastante importante, pois é parte integrante da avaliação do meio ambiente físico para determinar suas fragilidades e potencialidades, visando não apenas o planejamento regional como também o apoio aos planos de manejo sustentável ou recuperação de áreas degradadas, sendo dessa forma estudados preferencialmente com uma visão multidisciplinar, tendo em vista que a ocorrência e evolução de seus constituintes físicos, químicos e biológicos, ocorrem sempre em conexão com intervenções naturais ou antrópicas ocorridas em determinada região.

A questão da representação gráfica do solo em três dimensões (3D) não depende necessariamente de recursos computacionais. Preliminarmente, a Análise Estrutural da Cobertura Pedológica (Boulet, 1988), apresentou uma metodologia de mapeamento 3D cujo princípio é puramente analógico. Nessa metodologia, todas as características morfológicas, físicas e químicas são analisadas em conjunto com a paisagem e transpassadas para o papel por analogia, de acordo com uma escala de detalhe imposta pelas mudanças e transições do solo determinadas em campo, onde a percepção tridimensional é obtida pela interpretação de curvas de isodiferenciação e cortes transversais. Isso fornece uma base para interpretar a gênese e evolução tanto do solo quanto das formas topográficas (Queiroz Neto, 1988; Boulet, 1992).

Com o surgimento de placas gráficas com aceleração 3D, do aumento da capacidade de armazenamento e processamento dos microcomputadores, juntamente com a evolução do geoprocessamento e a grande disponibilidade de interpoladores matemáticos incorporados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), os estudos com foco na visualização tridimensional se tornaram mais comuns, e as aplicações diversificadas, especialmente na área ambiental.

Em comum tanto aos métodos tradicionais de levantamento e mapeamento de solos, quanto aos que empregam uso da computação, é a existência do problema da prospecção do dado de solo a ser investigado, onde a distribuição no espaço contínuo é baseada na observação de pontos amostrais tomados de forma discreta, e não contínua, então os limites e transições das suas características são de difícil determinação.

Da mesma forma, o problema da transformação para o espaço contínuo existe, quando há intenção de gerar e visualizar superfícies tridimensionais representativas das características químicas e físicas do solo. Essa transformação resulta na geração de um volume, ou seja, em

uma representação por *voxel*, e não por *pixel*. Diferentemente de outras áreas da ciência, como na medicina, ou as que estudam fenômenos atmosféricos, que contam com sensores mais desenvolvidos e capazes de captar seus objetos de estudo como um todo e de forma contínua, no caso do solo, é necessário a interpolação dos dados para se gerar um volume contínuo. Uma vez gerado o volume, a informação pode ser visualizada iluminando-se com cores, ou extraindo superfícies desse volume, onde dessa forma, a informação passa a ter um formato geométrico.

Como os elementos constituintes do solo são analisados pelo seu teor, e a variação de sua intensidade ocorre lateralmente e verticalmente, em função das características do ambiente onde está inserido, a visualização no espaço tridimensional apresenta-se como uma forma de analisar esse conjunto de maneira interativa. Esse ambiente digital e tridimensional vem sendo experimentado em trabalhos que contemplam dados pedológicos (Neteler, 2001; Iescheck, 2006), fornecendo as bases para que soluções alternativas possam surgir e agregar valor aos procedimentos analógicos utilizados na Análise Estrutural da Cobertura Pedológica, apresentando novas formas de visualização para interpretação dos dados. O foco desses trabalhos foi baseado na visualização volumétrica, demonstrando o potencial da ferramenta e os recursos técnicos e computacionais necessários.

Essa dissertação teve como objetivo geral identificar e analisar a distribuição das características físicas e químicas do solo, sob o contexto dos fatores de formação e processos pedogenéticos, enfocando também aspectos ligados a contaminação do solo, com base na interpretação de imagens sob a perspectiva tridimensional.

Para alcançar tal objetivo optou-se por dividir a dissertação em três capítulos: o primeiro e o segundo, realizado em uma área dentro da Estação Experimental do Canguiri – UFPR, no município de Pinhais (PR), visa analisar as características físicas (granulométricas), e de atributos da fertilidade de solos enfocando aspectos da paisagem; o terceiro, realizado em uma área de mineração no município de Adrianópolis (PR), visa analisar a distribuição dos teores pseudototais de Pb para avaliação ambiental e como suporte no monitoramento e apoio a planos de recuperação de áreas degradadas por solos contaminados.

LITERATURA CITADA

BOULET, R. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica e Cartografia. In. XXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Campinas, 1988.

BOULET, R. Uma revolução recente da pedologia e suas implicações no conhecimento da gênese do relevo. In. III Congresso ABEQUA. Belo Horizonte, 1992.

IESCHECK, A. L. Representação e Visualização Volumétrica de Dados Espaciais para Avaliação de Solos. 180p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2006.

NETELER, M. Volume modeling of soils using GRASS GIS 3D-tools. In: Second Italian GRASS Users Meeting, 2001, Trento. Proceedings.

QUEIROZ NETO, J. P. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica no Brasil. In. XXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Campinas, 1988.

CAPÍTULO 1 – ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DOS TEORES DE AREIA, SILTE E ARGILA DE SOLOS ORIGINÁRIOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA EM PINHAIS – PR

RESUMO

A representação gráfica tridimensional de um parâmetro quantitativo do solo em ambiente digital é complexa, pois passa pela transformação de um objeto coletado de forma discreta para uma superfície contínua e passível de interpretação, mas apresenta grande potencial de uso na Ciência do Solo. Para compreender as relações volumétricas dos constituintes minerais do solo, este estudo utilizou uma abordagem virtual de representação gráfica para analisar a atuação dos fatores de formação e dos processos pedogenéticos nos teores de argila, silte e areia de solos formados do intemperismo de argilitos e arcósios da Formação Guabirota, região metropolitana de Curitiba (PR). A área, com 12,9 ha, foi coberta com uma malha regular de amostragem de 135 pontos, de onde foram coletadas amostras dos horizontes A, AB, BA e B até 1,1 m de profundidade. A configuração do espaço de processamento no SIG foi realizada da seguinte forma: i) definição do sistema de coordenadas UTM – Universal Transverse Mercator; ii) o ambiente tridimensional (caixa que delimitou o espaço 3D) foi definido de forma que a altura dessa caixa (fundo) tivesse a equivalência do comprimento do trado utilizado para coletar as amostras (1,1 m), e para o topo atribuiu-se valor zero. Nesse intervalo os limites intermediários foram representados pelo valor da espessura do horizonte no ponto de coleta; iii) a resolução espacial norte/sul, leste/oeste e a resolução da caixa foram definidas em 2 m. A resolução da altura da caixa foi definida em 0,10 m, o que permitiu formar 11 planos horizontais entre o topo e o fundo (altura total de 1,1 m). Os teores de areia, silte e argila foram interpolados para geração de um modelo contínuo no espaço 3D com o programa GRASS GIS, e para visualização gráfica utilizou-se o aplicativo Paraview. O geoprocessamento e a computação gráfica possibilitaram a visualização da distribuição dos teores das frações dos solos no espaço tridimensional e a identificação de volumes internos com teores diferenciados de argila e areia confinados dentro da matriz do solo. Os solos com teor de argila superior a 600 g kg^{-1} (muito argiloso) se concentraram na parte mais baixa e plana do terreno, região de predomínio de Latossolos e, principalmente, acompanharam as linhas de drenagem da área. Por outro lado, as partes mais elevadas na forma de cristas apresentaram os maiores teores de areia total e areia grossa, comportamento atribuído ao transporte e erosão preferencial de partículas mais finas no terreno.

Palavras-chaves: geoprocessamento, Grass Gis, Paraview, visualização volumétrica, visualização científica, processos pedogenéticos.

CHAPTER 1 – THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF SANDY, SILT AND CLAY CONCENTRATIONS IN SOILS ORIGINATED BY THE GUABIROTUBA FORMATION IN PINHAIS – PR

ABSTRACT

The three-dimensional graphical representation of a quantitative soil data in the digital environment is complex, since is necessary the transformation of a discrete object to a continuous surface that is liable to interpretation. However, it has great potential for use in Soil Science. To understand the volumetric relationship of the mineral constituents, this study used a virtual graphic approach to analyze the effect of the formation factors and pedogenetic processes in the clay, silt and sand concentrations of soils formed from the weathering rocks of the Guabirota Formation, Metropolitan Curitiba region (PR). The area, with 12.9 ha, was covered with a regular grid of 135 sampling points, from which samples at A, AB, BA and B horizons, up to 1.1 m deep, were collected. The configuration of the processing space in GIS was performed as follows: i) definition of the UTM coordinate system - Universal Transverse Mercator; ii) the three-dimensional environment (box that defined the 3D space) was set so that the height of this box (bottom) had the equivalence of the length of the dutch auger used to collect samples (1.1 m), and the top was assigned with zero value. In this intermediate range the limits were represented by the value of the thickness of the horizon at each sampling point; iii) the spatial resolution north/south, east/west and the box resolution were defined in 2 m. The resolution of the height of the box was set at 0.10 m, allowing 11 horizontal planes formed between the top and bottom (total height of 1.1 m). The concentrations of sand, silt and clay were interpolated to generate a continuous model in 3D space with the GRASS GIS software, and for graphic visualization the Paraview application was used. The use of GIS and graphic computation have enabled the visualization of the distribution of soil fractions concentrations in 3D space, allowing to identify the occurrence of internal volumes with different clay and sand concentrations confined within the soil matrix. Soils with higher clay content than 600 g kg^{-1} (very clayey) occurred mainly on the lower and flat region, with predominance of Oxisols, and, mainly, following the drainage lines of the area. Moreover, the highest parts in the form of ridges showed the highest concentrations of total and coarse sand, behavior attributed to preferential erosion and transport of finer particles on the glebe.

Key-words: geoprocessing, Grass GIS, Paraview, volumetric visualization, scientific

visualization, pedogenetic processes.

1.1. INTRODUÇÃO

A Bacia Sedimentar de Curitiba, constituída de argilitos, arcósios e areias arcósianas, apresenta cerca de 3.000 km², e a espessura do pacote de sedimentos varia de 1 a 85 m (Bigarella & Salamuni, 1962). Alguns autores apresentaram dados mineralógicos do argilito da Formação Guabirota, evidenciando o predomínio de mineral do grupo das esmectitas (Massad et al., 1981), compatível com o acúmulo e a consolidação dos sedimentos sob paleoclima semi-árido (Lima et al., 1985). As características do solo estão ligadas ao contexto de formação e sedimentação da área, mas com forte influência das condições pedoclimáticas atuais (Bigarella & Salamuni, 1958; Salamuni et al., 2004). Melo et al., (2009) encontraram esmectita 2:1 nos horizontes subsuperficiais (montmorilonita e beidelita) e esmectita com hidróxi entrecamadas nos horizontes superiores em cambissolos da Região Metropolitana de Curitiba. Pires et al. (2007) classificou a textura de Cambissolos e Latossolos da Bacia Sedimentar como argilosa ou muito argilosa (predomínio de argilitos na litoestratigrafia) e a fração argila como essencialmente caulinitica (teores variando de 662 a 725 g kg⁻¹).

Alguns trabalhos foram realizados em solos originados de argilito e arcósios da Formação Guabirota em Curitiba (PR) com a finalidade de estudar a variabilidade de suas características químicas e mineralógicas. Barbar & Melo (2008) encontraram alta variabilidade para os teores de Ct (caulinita) e Gb (gibbsita) na fração argila (CV de 43 e 30% respectivamente) em amostras de solos coletadas a apenas 0,5 m de distância.

Essa variabilidade, quando estudada utilizando técnicas de geoprocessamento, geralmente é representada no espaço bidimensional, que é a forma clássica de representação geográfica dos dados. Para a espacialização em 2D de teores de elementos no solo a técnica mais utilizada tem sido a interpolação pela Krigagem (Wei et al., 2009; Rodríguez et al., 2009). No entanto, a ferramenta não permite ao usuário a visão realística do fenômeno estudado, mesmo quando se representa a área em diferentes camadas (*layers*). A variação do solo, por ser um corpo tridimensional, representado pelo *pedon*, extrapola os limites do perfil, tanto no sentido horizontal como vertical, por isso, a análise do conjunto de variáveis químicas, físicas e mineralógicas pode ser com técnicas de visualização tridimensional. Isso fornece uma base para interpretar a gênese e evolução, tanto do solo, quanto das formas topográficas (Queiroz Neto, 1988; Neteler, 2001). Com o surgimento de placas gráficas com aceleração 3D, o aumento da capacidade de armazenamento e processamento dos microcomputadores, juntamente com a evolução do geoprocessamento e a grande disponibilidade de interpoladores matemáticos incorporados aos SIGs, ampliou-se o potencial

da aplicação da visualização tridimensional de atributos do solo (Iescheck, 2006).

Esse ambiente digital, tridimensional e interativo vem sendo experimentado ainda de forma incipiente e experimental em trabalhos com dados pedológicos. Delarue et al. (2009) recriaram os horizontes do solo gerando inicialmente uma grade triangular dos pontos representando suas profundidades e interpolaram essa grade com uma função de interpolação bidimensional, e com isso, conseguiram representar os horizontes do solo em três dimensões. Embora esses autores não tenham gerado volumes, a representação tridimensional ajudou a interpretar a evolução pedogenética dos horizontes de um Planossolo. Na área ambiental, em estudo de contaminação por metal pesado, Ouyang et al. (2002) estudaram a pluma de contaminação por Pb, Cu, Zn e Cd em sedimentos dos rios Cedar e Ortega na Flórida por meio da krigagem tridimensional e verificaram que as concentrações dos teores de metais pesados diminuíram com a profundidade de amostragem.

O objetivo desse trabalho foi gerar imagens tridimensionais dos teores de argila, silte e areia para proporcionar a interpretação dos dados e discutir as interações desses componentes minerais com os fatores de formação e processos pedogenéticos dos solos.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. ÁREA DO ESTUDO, COLETA DAS AMOSTRAS E ANÁLISE TEXTURAL DOS SOLOS

A área de estudo ocupa uma gleba de 12,9 ha, e foi situada na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Paraná, município de Pinhais (PR), na Bacia Sedimentar de Curitiba, entre as coordenadas geográficas: 25°22'38" S; 49°09'05" W, e 25°24'46" S; 49°06'40" W. A encosta em que se encontra a área possui orientação SO-NE, com amplitude altimétrica de 35 m, e altitude mínima e máxima de 905 e 940 m, respectivamente.

O clima atual da região foi classificado por Maack (1968) como sendo Cfb, baseado na classificação de Köppen, caracterizado em clima úmido temperado, com estações bem definidas, e chuvas distribuídas em todos os meses do ano.

Kraemer (2007) identificou as principais classes de solo da área de estudo (gleba de 12,9 ha) em mapa de reconhecimento de alta intensidade: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico húmico, Latossolo Vermelho Distrófico húmico, Cambissolo Háptico Tb Distrófico latossólico, Cambissolo Húmico Distórfico latossólico, Cambissolo Húmico Alumínico latossólico, Cambissolo Húmico Distrófico típico. Na porção mais alta e dissecada do terreno predominam os Cambissolos e na parte mais plana os Latossolos (FIGURA 1).

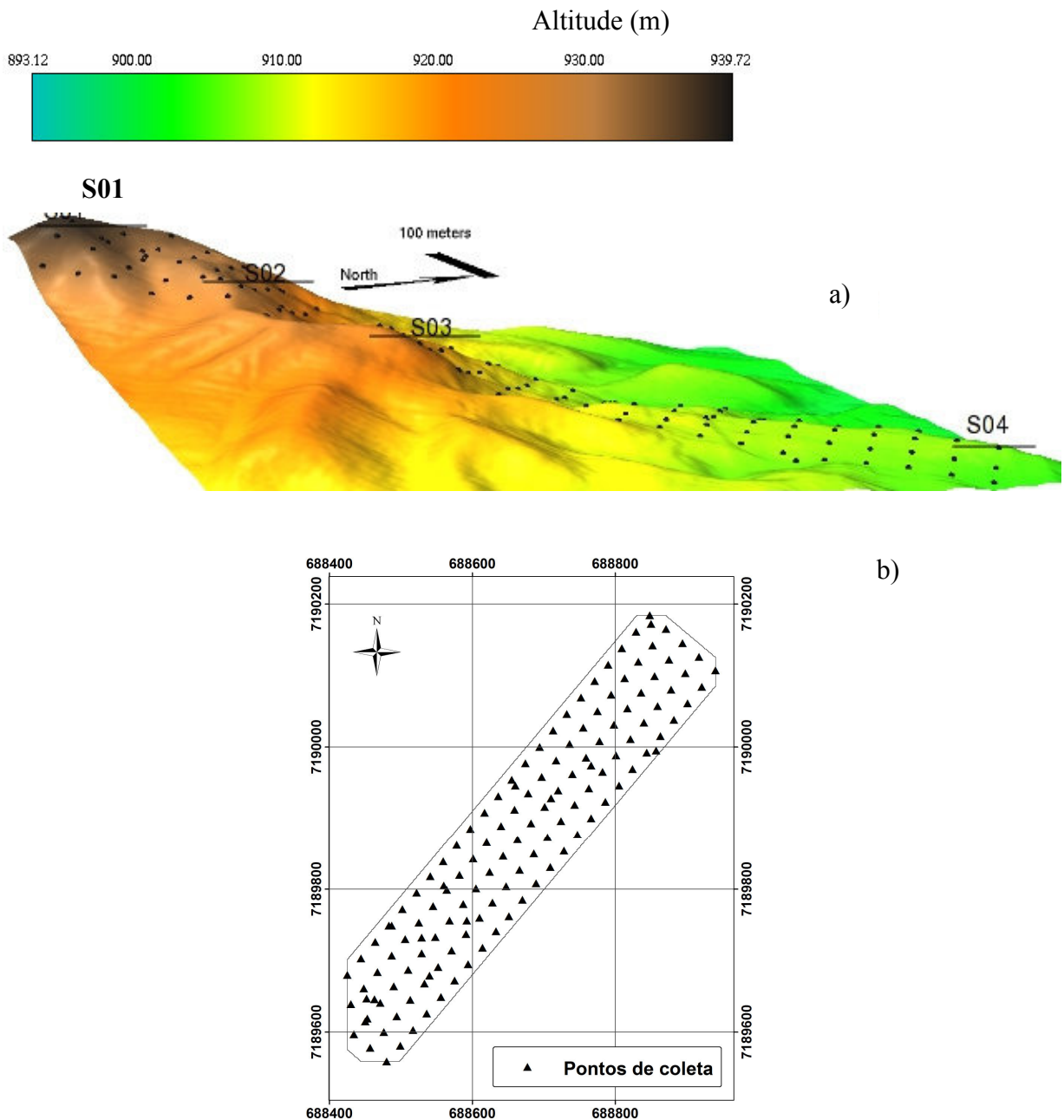


FIGURA 1. Relevo detalhado da área de estudo (12,9 ha), com indicações dos pontos de coleta das amostras e separação de quatro superfícies geomorfológicas (S01 - cota de 940 m, S02 - cota de 935 m, S03 - cota de 930 m e S04 - cota de 905 m) (a), e planta baixa da área com distribuição dos pontos de amostragem em malha regular (b).

Os componentes litoestratigráficos da Bacia Sedimentar de Curitiba compreendem depósitos argilosos, lamosos, arcossianos, de areia fina, diamictíticos e rudáceos, denominados como Formação Guabirota (Bigarella & Salamuni, 1962) e Formação Tinguis (Becker, 1982). A Formação Tinguis, sobreposta à primeira, representa os sedimentos retrabalhados da Formação Guabirota. A calha da bacia constitui uma depressão rasa e alongada na direção

NE-SW, cuja origem tem controle estrutural por falhas antigas do embasamento, reativadas no Terciário Inferior (Salamuni & Stellfeld, 2001). Os sedimentos que constituem a Formação Guabirotuba foram originados a partir da decomposição química das rochas pré-cambrianas do entorno da bacia em clima úmido, porém depositados em condições semi-áridas, na forma de extensos leques ("corrida de lama") aluviais e fluviais coalescentes. As lentes de arcósios (cunhas arenosas, areno-argilosas e conglomeráticas), dispersas nos sedimentos argilosos, formaram associações de fácies no preenchimento dos canais (Bigarella & Salamuni, 1962).

De acordo com a classificação dos domínios geomorfológicos da região de Curitiba proposta por Salamuni et al. (2004), a área de estudo apresenta relevo de colinas com topos planos e com formas arredondadas, tipo meia-laranja, vertentes suaves, em geral côncavas, com entalhamento e dissecação pouco profunda, mas com densa rede fluvial. A área encontra-se bastante dissecada pela erosão (FIGURA 1), favorecida pela condição úmida atual. De acordo com as feições geomorfológicas do relevo na FIGURA 1A e por meio de análises de campo foi possível diferenciar quatro superfícies distintas na área de estudo: S01 - cota de 940 m, S02 - cota de 935 m, S03 - cota de 930 m e S04 - cota de 905 m. Os setores S01 a S03 foram delimitados por pequenos níveis divisores de água, preservados como testemunhos em forma de pequenas cristas. Já a área representada pela superfície S04 é mais plana e recebeu o aporte de sedimentos coluvionares.

A amostragem da área foi feita em malha regular com 135 pontos espaçados entre si a uma distância de 30 m (FIGURA 1B). Para coleta das amostras de solo utilizou-se um tubo de PVC de 1,1 m de altura colocado dentro de um trado mecânico acoplado a tomada de potência de um trator. Após identificação e descrição morfológica (Kraemer, 2007), os horizontes A, AB, BA e B foram separados (135 pontos x 4 horizontes = 540 amostras) e as amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira de malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A análise textural das amostras de TFSA foi realizada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997).

1.2.2. INTERPOLAÇÃO E VISUALIZAÇÃO DAS IMAGENS TRIDIMENSIONAIS DOS TEORES DAS FRAÇÕES DO SOLO

Inicialmente, os dados obtidos nas análises de laboratório (540 amostras) foram organizados em uma planilha eletrônica com a seguinte estrutura: código do ponto de amostragem (*cod*); coordenadas planas *x*, *y* (UTM) e profundidade de amostragem (*z*) do ponto de coleta; teor de argila (*targ*); teor de areia total (*tartot*); teor de areia grossa (*targro*); teor de areia fina (*tarfi*); teor de silte (*tsil*); relação silte argila (*rsilarg*).

As quatro amostras exemplificadas na TABELA 1 correspondem a apenas um local de coleta, variando apenas a coordenada z conforme a profundidade e os teores texturais das amostras. Para garantir a interpolação em subsuperfície usou-se a notação negativa para o parâmetro z . Na planilha eletrônica os horizontes de amostragem (0 a -0,40 m (A); -0,40 a -0,59 m (AB); -0,59 a -0,87 m (BA); e -0,87 a 1,10 m (B)) foram representados apenas pelo limite superior do horizonte, pois a interpolação é feita entre pontos (vetores).

TABELA 1. Estrutura do arquivo para organização e exportação dos dados (1)

cod	x	Y	z	targ	tartot	targro	tarfi	tsil	rsilarg
1	688848	7190184	0	525	234	76	158	241	0,46
2	688848	7190184	-0.40	660	211	83	128	129	0,20
3	688848	7190184	-0.59	700	195	80	115	105	0,15
4	688848	7190184	-0.87	610	242	66	176	148	0,24
...

(1) teor de argila (*targ*); teor de areia total (*tartot*); teor de areia grossa (*targro*); teor de areia fina (*tarfi*); teor de silte (*tsil*); relação silte argila (*rsilarg*). O significado dos demais termos está descrito no texto.

A planilha foi exportada em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) para compatibilizar com o software de SIG. O uso das ferramentas do SIG foi por meio de linhas de comando escritas em *shell script*, cujas sintaxes estão exemplificadas e disponíveis no manual do GRASS GIS (GRASS Development Team, 2009).

Antes de importar os dados no SIG foi necessário criar um ambiente georreferenciado limitando a área de amostragem ou retângulo envolvente (FIGURA 1). Esse ambiente foi referenciado ao Datum SAD 69, no fuso 51° W.Gr., utilizando o sistema de coordenadas UTM. Para criar a região de processamento (limites da área de estudo) foi utilizado o comando “*g.region*”, por meio da seguinte linha de comando: *g.region n=7190250 s=7189500 e=688950 w=688400 t=0 b=-1.10 res=2.0 res3=2.0 nsres=2.0 ewres=2.0 tbres=0.1 -o*. Onde: *n*, *s*, *e*, *w*, referem-se aos pares de coordenadas dos limites inferior esquerdo e superior direito do retângulo envolvente; *t* e *b*, são os valores do limite de superfície e profundidade de coleta de solo; *res*, *res3*, *nsres*, *ewres* e *tbres*, são os valores das resoluções utilizados durante o processamento dos dados.

Após a criação da região do estudo foi feito a importação dos dados utilizando-se o comando “*v.in.ascii*”, conforme a seguinte linha de comando: *v.in.ascii -z input=/home/talescp/Documentos/canguiri/textura.csv output=textura fs=, z=3 -o*. Onde: *-z*,

indica que devem ser considerados como dados altimétricos os valores de coleta em subsuperfície; *input*, indica o diretório com o arquivo a ser importado; *output*, indica o nome do mapa vetorial resultante da importação; *fs*, indica que o arquivo a ser importado tem as colunas separadas por vírgula; *z*, indica o número da coluna onde estão representados os valores referentes às profundidades de coleta.

Após a importação dos dados foi definida uma máscara (formato *raster*) dentro do retângulo envolvente, para que o processamento dos dados fosse limitado somente à área de estudo (FIGURA 1). Esse processo foi feito utilizando-se quatro comandos. O primeiro foi o “*v.type*”, responsável por transformar um vetor de linha para polígono, por meio da seguinte linha de comando: *v.type input=mascara output=mascarar type=line,boundary -o*. Onde: *input*, corresponde a um mapa com representação vetorial de linha; *type*, corresponde à transformação de linha para polígono; *output*, o nome do mapa resultante dessa transformação. O segundo comando foi o “*v.centroids*”, que adiciona o centroide ao mapa gerado pelo comando anterior, ou seja, isso caracteriza que o polígono está fechado, para isso foi utilizada a seguinte linha de comando: *v.centroids input=mascarar output=mascarav -o*. O terceiro comando utilizado foi o “*v.to.rast*”, que transforma o mapa vetorial (polígono fechado com o centroide) em mapa *raster*. A linha de comando utilizada foi a seguinte: *v.to.rast input=mascarav output=mascara2d use=cat type=area -o*. Onde: *input*, refere-se ao mapa contendo o polígono com o centroide; *output*, o mapa *raster* resultante; *type*, significa que o tipo de transformação envolve uma representação com área. O quarto comando utilizado foi o “*r.mask*”, que efetivamente habilita o uso da máscara, sendo utilizado a seguinte linha de comando: *r.mask input=mascara2d -o*. Onde: *input*, indica o nome do mapa *raster* utilizado como máscara.

Após a definição da máscara foi dado início ao procedimento de interpolação. Para interpolar os teores texturais, e representá-los no espaço contínuo tridimensional na forma de superfícies volumétricas, foi utilizada a função de interpolação Spline Regularizada com tensão (RST), na versão tridimensional (Mitasova & Mitas, 1993), presente no software de SIG GRASS GIS 6.4.0.

O comando utilizado para interpolação dos dados representando as 540 amostras (135 locais x 4 profundidades), distribuídos sob uma malha regular com resolução espacial de 2 m, foi o “*v.vol.rst*” (GRASS Development Team, 2009). A linha de comando utilizada foi a seguinte: *v.vol.rst input=textura elev=targ3d wcolumn=dbl_2 ten=40 smo=0.1 dmin=0.01 zmult=100 -o*. Onde: *input*, corresponde ao mapa vetorial com os dados a serem interpolados; *elev*, corresponde ao volume resultante, ou seja, o resultado da interpolação; *wcolumn*, refere-

se à coluna constando os dados a serem interpolados: (teor de argila (*targ*); teor de areia total (*tartot*); teor de areia grossa (*targro*); teor de areia fina (*tarfi*); teor de silte (*tsil*); relação silte argila (*rsilarg*); *ten*, o valor da tensão utilizada; *smo*, o valor de suavidade utilizado; *dmin*, à distância mínima entre pontos para remover pontos idênticos; *zmult*, ao numero de vezes que o valor *z* deve ser multiplicado para torná-lo proporcional aos valores horizontais *x* e *y*. No caso da interpolação foram utilizados os valores default do sistema: *tension* 40 and *smoothness* 0.1.

Após a interpolação dos dados, o volume resultante foi exportado em formato VTK (*The Visualization Toolkit*) para visualização científica com o software Paraview v.3.6.0 (Kitware Inc, 2010). Essa exportação exigiu o emprego de uma mascara 3D para que o volume fosse exportado dentro do perímetro abrangendo os dados, tanto no plano horizontal quanto vertical. Isso foi feito transformando o mapa *raster* da mascara 2D para 3D, por meio do seguinte comando: *r.to.rast3 -m input=mascara2d output=mascara3d -o*.

Após a confecção da mascara 3D foi feito a exportação do volume tridimensional através do seguinte comando: *r3.out.vtk -p -s -m input=targ3d mascara3d output=/home/talescp/Documents/mestrado/correcao/vtk/targ3d.vtk top=elevtop bottom=elevbot -o*. Onde: *-p*, corresponde a dados vetoriais; *-s*, a associação com mapas *raster* representando o modelo de elevação da superfície e profundidade do relevo; *-m*, a obrigatoriedade de se utilizar a mascara 3D; *input*, ao mapa de entrada juntamente com a máscara; *output*, ao mapa de saída com extensão VTK; *top*, ao mapa representando a elevação da superfície do relevo; *bottom*, ao mapa representando a elevação da profundidade do relevo; a notação *-o*, indica *overwrite*, e significa que um arquivo com o mesmo nome será sobrescrito.

No processo de visualização no software Paraview v.3.6.0 foi utilizado somente três filtros de visualização: *contour*; *slice*; *threshold*. *Contour* filtra contornos por meio de isovalores determinados pelo usuário; *slice* é um filtro de fatiamento que permite a realização de cortes no volume, onde se pode visualizar o interior do volume por meio do seu corte em perfil; *threshold* é um filtro que extrai valores escalares dentro de um limite inferior e superior especificado pelo usuário.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise textural indicou que o solo variou de textura argilosa a muito argilosa, distribuídas ao longo da encosta (FIGURA 2a). Essa característica é dominante para os solos

da Bacia Sedimentar de Curitiba (Pires et al., 2007), pela maior ocorrência de argilitos sobre as areias arcósias e arcósios da Formação Guabirotuba (Bigarella & Salamuni, 1962). Os solos com teor de argila superior a 600 g kg^{-1} (muito argiloso) se concentraram na parte mais baixa e plana do terreno, entre os níveis S03 e S04, região de predomínio de Latossolos (Kraemer, 2007), e, principalmente, acompanhando as linhas de drenagem localizadas entre esses planos de erosão (FIGURAS 2b e 3). Oliveira Júnior et al. (2010) avaliaram a variabilidade de atributos químicos da mesma área apresentada na FIGURA 1b e também observaram a importância da posição e da forma do relevo sobre os parâmetros da fertilidade dos solos, onde os maiores teores de carbono orgânico ocorreram nas linhas de drenagens e nas posições côncavas pelo maior acúmulo de água no terreno.

O incremento de argila nas linhas de drenagens (FIGURA 2b) foi atribuída a dois processos, não excludentes: i) dissecação da área: a retirada de material por processos erosivos pode ter exumado os horizontes inferiores mais próximos da rocha de origem ricos em argila, principalmente, nos fundos de vale da drenagem, como se observa no corte longitudinal o acúmulo diferenciado de argila nessas posições (FIGURA 2b); ii) migração lateral dentro do terreno: no corte transversal observou-se o aumento do teor de argila em direção a linha de drenagem (FIGURA 2b). As classes de argila com maior frequência no corte transversal e longitudinal foram de 564 e 576 g kg^{-1} , respectivamente. Observou-se, também, translocação moderada de argila dos horizontes A e AB para os horizontes mais profundos em toda a área; observar que as cores vermelhas na lateral da caixa que representa a área em 3D (FIGURA 2a), no corte longitudinal da área (FIGURA 2b) e o volume representado pela transparência em verde na FIGURA 3 estão abaixo da superfície do solo. Contudo, o gradiente de textura não foi suficiente para atender o enquadramento em horizonte B textural (Embrapa, 2006).

Na porção inferior do terreno os Latossolos foram formados, predominantemente, pela ação de processos pedogenéticos sobre sedimentos transportados das posições mais altas e depositados na região da superfície S04. Na descrição morfológica dos monólitos retirados pelo trado mecânico na parte baixa do terreno foram observadas linhas de pedra oscilando entre 90 a 110 cm (Kraemer, 2007), o que indica descontinuidade litológica e a deposição de material coluvionar. Dessa forma, os maiores teores de argila na região dos Latossolos (predomínio de volumes de solo com teores de argila superiores a 600 g kg^{-1} na FIGURA 3) podem ser associados à deposição preferencial de material mais fino e o maior grau de intemperismo dos horizontes subsuperficiais dessa classe de solo.

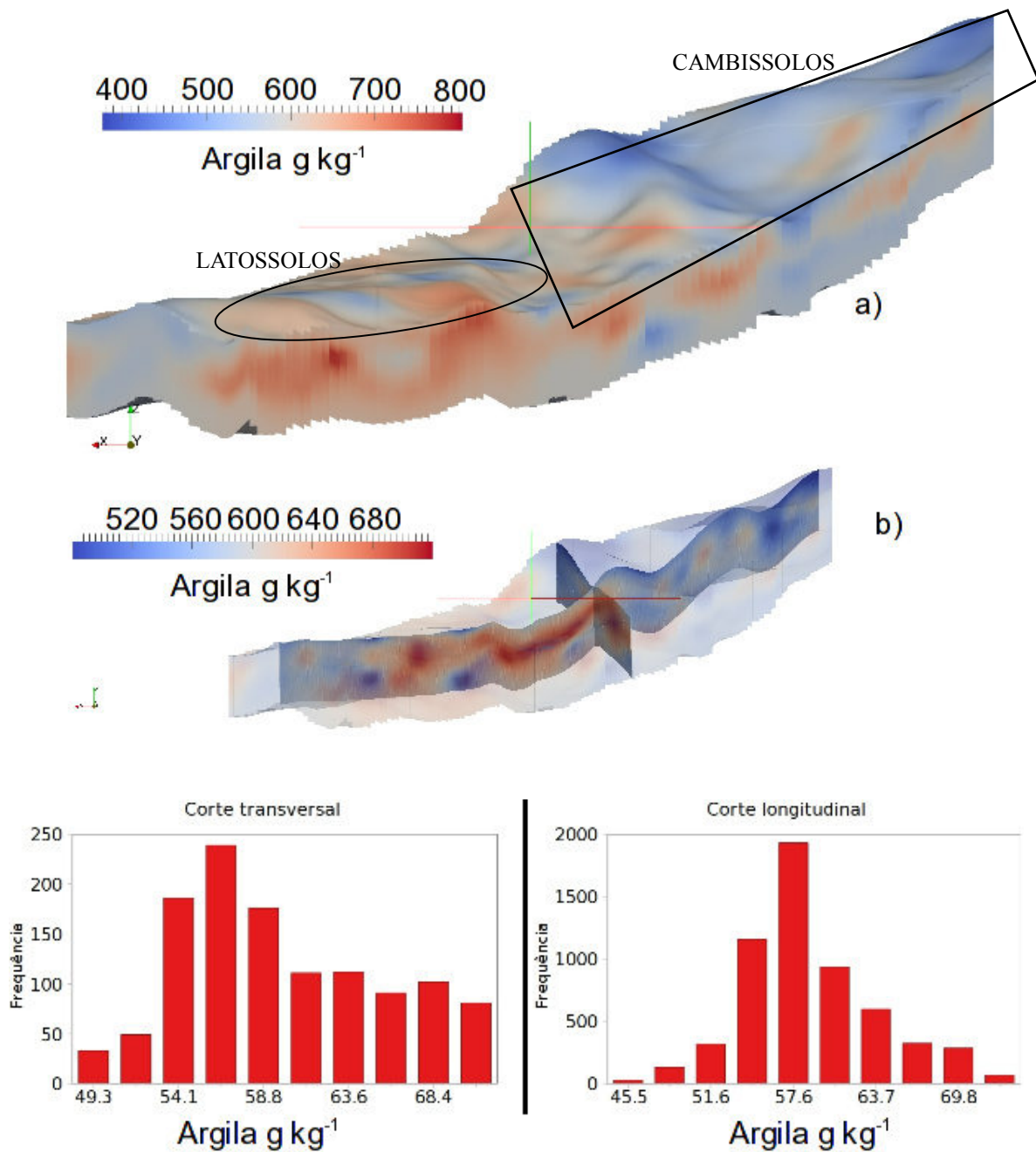


FIGURA 2 - Distribuição dos teores de argila, variando entre as classes argilosa e muito argilosa, com destaque para as regiões de domínio dos Latossolos e Cambissolos (a) e corte longitudinal e transversal dos teores de argila, com os gráficos de distribuição de frequência dos teores de argila dos respectivos cortes (b).

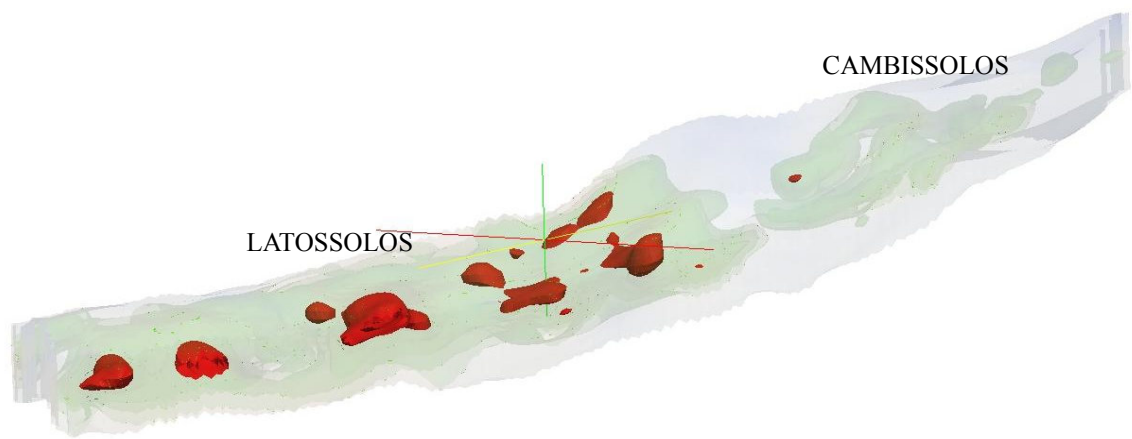


FIGURA 3. Distribuição dos teores de argila superiores a 600 g kg^{-1} (solo muito argiloso), identificados pela transparência em verde, no interior do contorno volumétrico da área em azul claro. No interior da área em verde existem “bolsões” de solos com teores de argila entre 700 e o teor máximo de 800 g kg^{-1} (volumes em vermelho).

Dentro da classe muito argilosa verificou-se a ocorrência de bolsões de solo com mais de 700 g kg^{-1} de argila na parte mais baixa e mais plana da área (volumes em vermelho da FIGURA 3). Com a sobreposição das posições das FIGURAS 2a e 3 foi possível identificar que os teores de argila superiores a 700 g kg^{-1} também se localizaram nas linhas de drenagem. Além das possibilidades de transporte diferenciado de argila, mencionados anteriormente, deve-se considerar a deposição preferencial das partículas mais finas em camadas pontuais na formação das rochas sedimentares da Formação Guabirotuba. De acordo com Salamuni et al. (1999) a deposição das lentes de sedimentos na Bacia Sedimentar de Curitiba foi bastante heterogênea: i) depósitos lamosos - nas bordas da bacia os depósitos argilosos são pouco espessos enquanto que no centro ocorrem suas maiores espessuras e geralmente apresentam-se bem compactados e com granulação muito fina; ii) arcósios e areias arcósianas - estão presentes em menor quantidade em toda a bacia, mostrando extensão lateral e espessura variável entre centímetros a dezenas de metros, pouco consolidados e compostos por clastos de quartzo, quartzito e feldspatos, geralmente caulinizados; iii) depósitos de cascalhos - são em geral compostos por seixos de quartzo com matriz argilosa a argilo-arenosa; iv) calcretes - apresentam-se geralmente dispersos lateralmente e geralmente em profundidades mais superficiais da Formação Guabirotuba.

A distribuição de areia total não foi uniforme na área, concentrando-se, principalmente, nas partes mais elevadas formadas pelas cristas do terreno (superfícies S01 a S03), coincidindo com os menores teores de argila (FIGURA 4). O volume confinado (cor vermelha) com maiores teores de areia total na região de predomínio de Latossolos (parte

mais baixa do terreno) ocorreu em uma pequena elevação do terreno nessa porção. Mesmo na superfície S04, que apresenta menor variação de declividade e topos mais planos, tem-se o encaixe de pequenas linhas de drenagens. Conforme já destacado, esse comportamento pode ser atribuído à remoção preferencial de partículas mais finas das partes mais altas (observar o predomínio de areia grossa nas mesmas posições - FIGURA 5). Nas mesmas posições de cristas do terreno, definidas como S01, S02 e S03. O material mais arenoso (principalmente areia grossa - FIGURAS 4 e 5) também pode ser uma relíquia de superfícies mais antigas (deposição preferencial de areias arcossianas), que agora se encontram rebaixadas pela erosão.

Os maiores teores de areia fina (entre 140 e o teor máximo de 150 g kg^{-1}) não são contínuos na área, surgindo como lamelas revestidas por superfícies com menores teores dessa fração (FIGURA 6). Esse comportamento é mais uma evidência da intensa atuação dos processos pedogenéticos (principalmente adição, remoção e translocação) na formação dos solos, aliados aos controles geológicos e geomorfológicos.

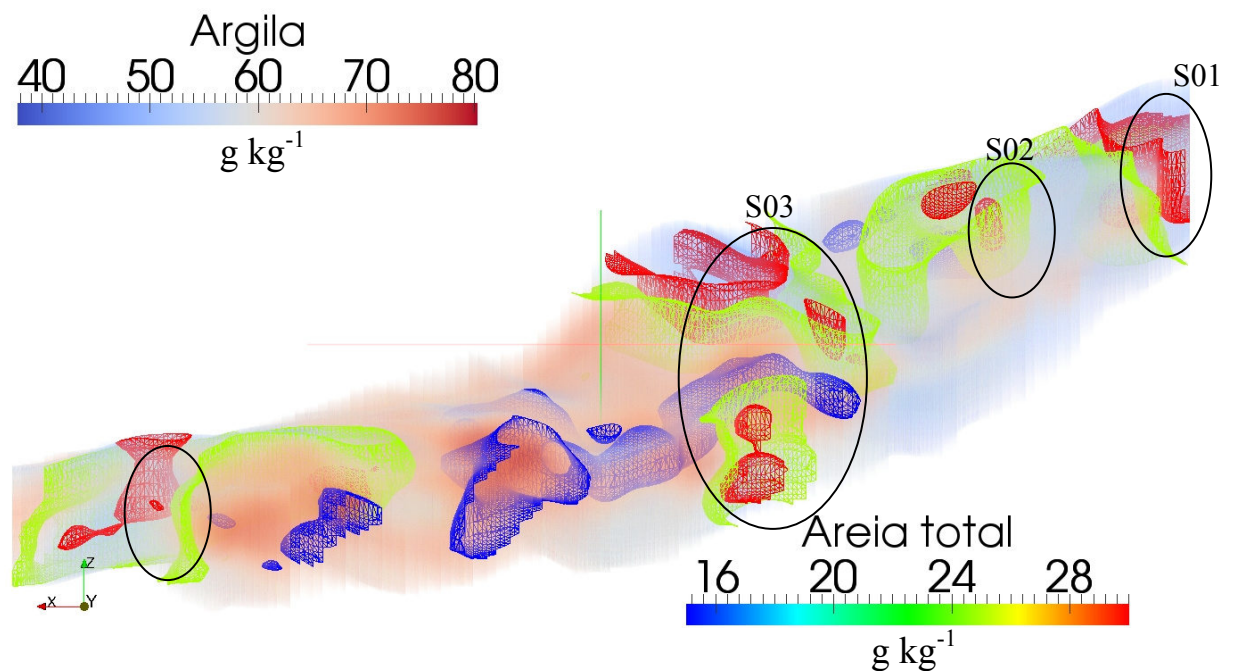


FIGURA 4. Distribuição dos teores de argila em cores mais fracas (transparência) e preenchimento com os teores de areia total (volumes com cores mais fortes), com o destaque de três superfícies geomorfológicas ou níveis divisores de água (S01 a S03).

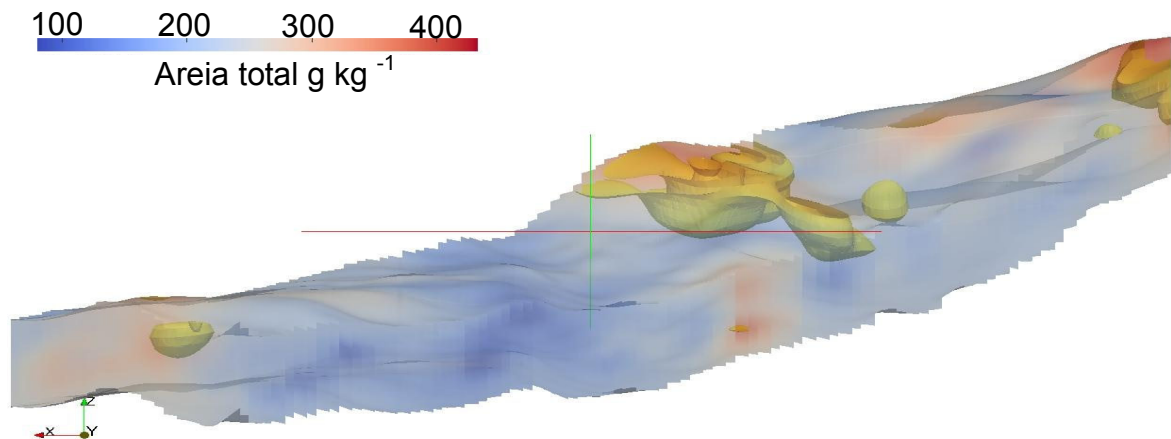


FIGURA 5. Distribuição dos teores de areia total em cores mais fracas (transparência da caixa) e preenchimento com os teores de areia grossa apenas entre 150 g kg^{-1} e o teor máximo 340 g kg^{-1} (cor amarela mais forte).

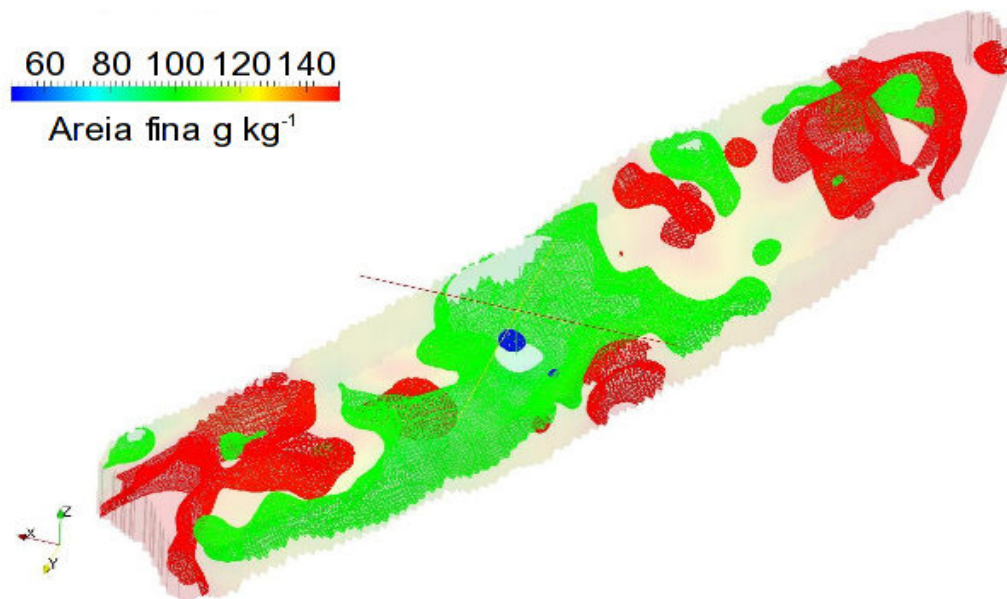


FIGURA 6. Distribuição dos teores de areia fina, onde os teores menores que 50 g kg^{-1} foram representados em cor mais fraca (transparência da caixa).

De maneira geral, os menores teores de silte estão distribuídos na parte mais baixa do terreno (superfície S04), o que é coerente com o maior grau de intemperismo dos Latossolos (FIGURA 7). Para solos argilosos, um dos critérios de enquadramento de horizonte Bw é a relação silte/argila inferior 0,6 (Embrapa, 2006); observar que as menores relações ocorrem na área de maior ocorrência de Latossolos (FIGURA 8). Na lateral da caixa que representa o volume da área estudada é possível identificar os menores teores de silte em uma faixa intermediária do solo como resultado do transporte e acúmulo de argila nessa porção do perfil

(FIGURA 7).

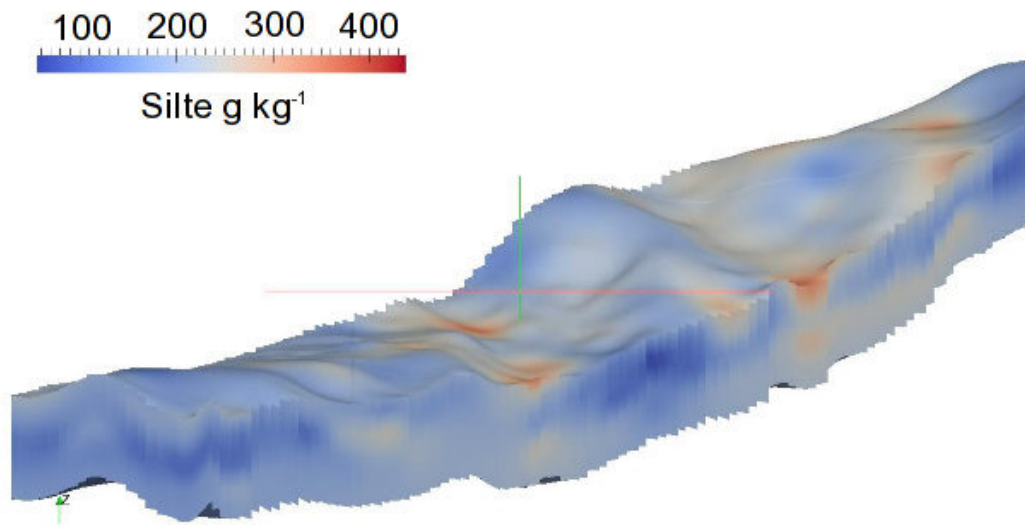


FIGURA 7. Distribuição dos teores de silte no volume de solo estudado.

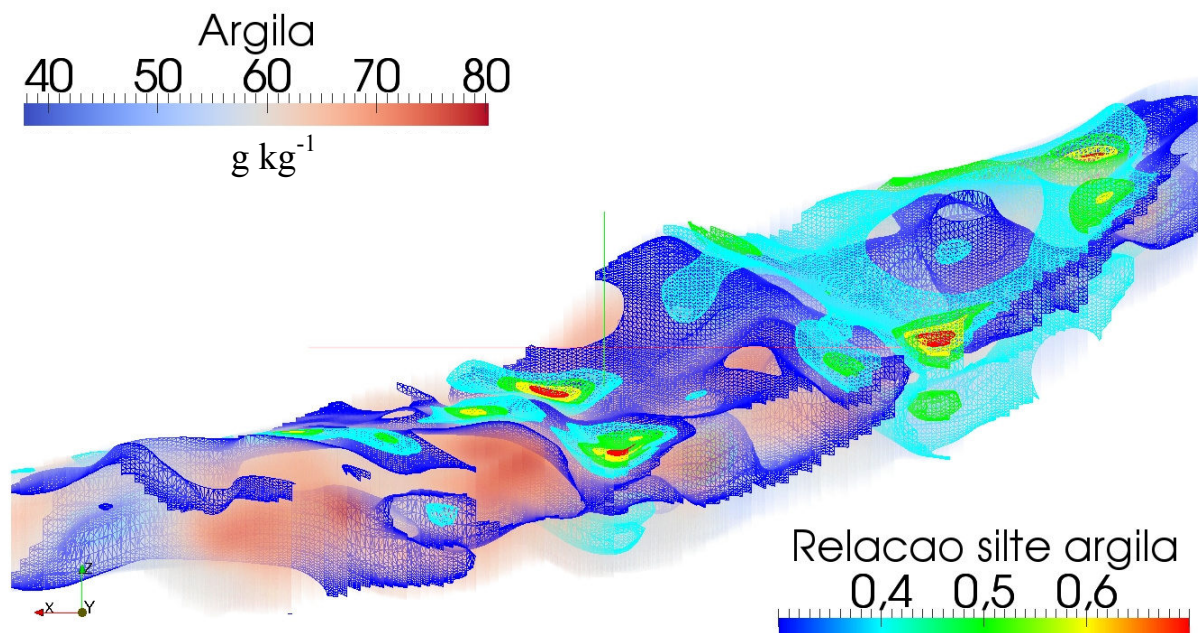


FIGURA 8. Distribuição dos teores de argila em cores mais fracas (transparência) e preenchimento com os valores da relação silte/argila apenas entre 0,3 e máximo de 0,7 (volumes com cores mais fortes).

1.4. CONCLUSÕES

O geoprocessamento e a computação gráfica possibilitaram a visualização da distribuição dos teores das frações dos solos no espaço tridimensional e a identificação de volumes internos com teores diferenciados de argila e areia confinados dentro da matriz do solo. A associação dessas técnicas deve ser mais bem explorada na Ciência do Solo visando entender melhor os aspectos pedológicos dos solos, além das inúmeras possibilidades da visualização de dados quantitativos em 3D na produção de plantas e nas questões ambientais (p. ex. identificação de volumes confinados e explorados pelas raízes com características físicas, químicas e mineralógicas diferentes da matriz do solo e o acompanhamento da pluma de contaminação por poluentes orgânicos e inorgânicos em solos e sedimentos).

A ferramenta 3D também facilitou a visualização e a interpretação das relações causa-efeito entre as características texturais dos solos e fatores e processos pedogenéticos, tais como, maior concentração de argila nas linhas de drenagem e áreas mais planas do terreno e maiores teores de areia nas cristas do terreno, atribuídos a migração interna de argila e a processos erosivos no terreno.

1.5. LITERATURA CITADA

BARBAR, L.C. & MELO, V.F. Variabilidade das características químicas e mineralógicas de solos da região de Curitiba (PR). *Sci. Agr.*, 9:187-197, 2008.

BECKER, R.D. 1982. Distribuição dos sedimentos cenozóicos na Região Metropolitana de Curitiba e sua relação com a estrutura geológica e morfológica regional. Tese de Doutorado, IG-UFRGS, p237, Porto Alegre, 1982.

BIGARELLA, J.J. & SALAMUNI, R. Considerações sobre o paleoclima da Bacia de Curitiba. *Bol. Inst. Histórico Natural*, 1:1-10, 1958.

BIGARELLA, J.J. & SALAMUNI, R. Caracteres texturais dos sedimentos da bacia de Curitiba. *Bol. Paranaense Geoc.*, 7:1-164, 1962.

DELARUE, F.; CORNU, S.; DAROUSSIN, J.; SALVADOR-BLANES, S.; BOURENNANE, H.; ALBÉRIC, P.; VENNINK, A.; BRUAND, A. & KING, D. 3D representation of soil distribution: An approach for understanding pedogenesis. *Comptes Rendus Geoscience*, 341:

486-494, 2009.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de Métodos de análise de solo. 2o ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, EMBRAPA-CNPq, 1997. 212p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, EMBRAPA-CNPq, 2006. 306 p.

GRASS Development Team, 2009. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.0. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>

IESCHECK, A. L. Representação e Visualização Volumétrica de Dados Espaciais para Avaliação de Solos. 180p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2006.

KITWARE, Inc. Paraview: Parallel visualization application. <http://paraview.org>, 2010.

KRAEMER, G.B. Variabilidade espacial dos atributos na delimitação das unidades de mapeamento. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2007. 101p. (Dissertação de Mestrado)

LIMA, V. C.; DEMATTE, J. L. I. & MONIZ, A. C. Mineralogia da argila do Rubrozem (Palehumult), Bacia de Curitiba - Paraná. R. Bras. Ci. Solo, 1:81-85, 1985.

MAACK, R. Geografia física do Estado do Paraná. Curitiba, Banco de desenvolvimento do Paraná, 1968, 350p.

MASSAD, F.; ROCHA, J.L.R. & YASSUDA, A.J. Algumas características geotécnicas de solos da Formação Guabirota. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1981. Anais. Rio de Janeiro, ABMS, 1981, p.706-723.

MELO, V.F., MATTOS, J.M.S.M. & LIMA, V.C. Métodos de concentração de minerais 2:1

secundários na fração argila visando sua identificação por difratometria de raios X. R. Bras. Ci. Solo, 33:527-539, 2009.

MITASOVA, H. & MITAS, L. Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. Mathematical Geol., 25:641-655, 1993.

NETELER, M. Volume modeling of soils using GRASS GIS 3D-tools. In: ITALIAN GRASS USERS MEETING, 2., Trento, 2001. Anais. Trento, 2001. CD-ROM

OLIVEIRA JUNIOR, J.C.; SOUZA, L.C.P. & MELO, V.F. Variabilidade de atributos físicos e químicos de solos da Formação Guabirotuba em diferentes unidades de amostragem. R. Bras. Ci. Solo, 34:1491-1502, 2010.

OUYANG, Y.; HIGMAN, J.; THOMPSON, J.; O'TOOLE, T. & CAMPBELL, D. Characterization and spatial distribution of heavy metals in sediment from Cedar and Ortega rivers subbasin. J. Contaminant Hydrology, 54:19-35, 2002.

PIRES, A. C. D.; MELO, V. F.; MOTTA, A. C. V. & LIMA, V. C. Majors soil classes of the metropolitan region of Curitiba (PR), Brazil: I - Mineralogical Characterization of the Sand, Silt and Clay Fractions. Braz. Arch. Biol. Tech., 50:169-181, 2007.

QUEIROZ NETO, J. P. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 21, Campinas, 1988. Anais. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p.508-508.

RODRÍGUEZ, L.; RUIZ, E.; ALONSO-AZCÁRATE, J. & RINCÓN, J. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb-Zn mine in Spain. J. Environm. Management, 90: 1106–1116, 2009.

SALAMUNI, E. & STELLFELD, M.C. Banco de dados geológicos geo-referenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG). Bol. Paranaense Geoc., 49:21-32, 2001.

SALAMUNI, E.; EBERT, H.D. & HASUI, Y. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de

Curitiba. R. Bras. Geoc. 34: 469-478, 2004.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R. & EBERT, H.D. Contribuição à geologia da Bacia Sedimentar de Curitiba. Bol. Paranaense Geoc., 47:123-142, 1999.

WEI, C.; WANG, C. & YANG L. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China. J. Environm. Sciences, 21: 1230–1236, 2009.

CAPÍTULO 2 – ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ATRIBUTOS DA FERTILIDADE DE SOLOS DE UMA ÁREA COM DIFERENTES FEIÇÕES PEDOMORFOLÓGICAS EM PINHAIS – PR

RESUMO

A representação gráfica das características do solo em ambiente digital é extremamente complexa, pois passa pela transformação de um objeto coletado de forma discreta para uma superfície contínua e passível de interpretação. O objetivo desse trabalho foi gerar imagens tridimensionais dos atributos da fertilidade dos solos para facilitar a interpretação do comportamento espacial dos dados e suas interações com fatores e processos pedogenéticos. Como ferramenta para geração do modelo tridimensional e para visualização dos volumes de solo utilizou-se os programas GRASS GIS e Paraview, respectivamente. O estudo foi realizado na Estação Experimental do Canguiri no município de Pinhais (PR), pertencente à Universidade Federal do Paraná. Amostras de solo da área de estudo foram coletadas nos horizontes A, AB, BA e B, em uma malha regular de 135 pontos (135 locais x 4 horizontes = 540 amostras). O uso do geoprocessamento e da computação gráfica permitiram a identificação de volumes internos de atributos da fertilidade com valores/teores diferenciados confinados dentro da matriz do solo. Com isso, espera-se que raízes de plantas crescendo lado a lado podem encontrar condições químicas de solo distintas. A ferramenta 3D também facilitou a visualização e a interpretação das relações causa-efeito entre os atributos da fertilidade dos solos e fatores e processos pedogenéticos, como a relação inversa entre intemperismo e acidez de solo: para utilização agrícola da área, a parte mais plana com maior ocorrência de solos mais intemperizados (Latosolos) demandaria menores doses de corretivos devido aos maiores valores de pH e menores teores de Al^{3+} . Como resultado prático, o acompanhamento das variações dos atributos da fertilidade do solo tridimensionalmente pode tornar o manejo dos solos mais preciso e contribuir para o aumento da produção das plantas.

Palavras-chaves: geoprocessamento, Grass Gis, Paraview, acidez do solo, fatores e processos pedogenéticos.

CHAPTER 2 – THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF SOIL FERTILITY ATTRIBUTES OF AN AREA WITH DIFFERENT PEDOLOGICAL FEATURES IN PINHAIS – PR

ABSTRACT

The graphical representation of soil characteristics in the digital environment is extremely complex, as is the transformation of a discrete object collected to a continuous surface and liable to interpretation. The aim of this study was to generate three-dimensional images of the attributes of soil fertility to facilitate interpretation of the spatial behavior of data and its interactions with factors of soil formation and pedogenetic processes. As a tool for model generation, and display of three-dimensional volumes of soil, GRASS GIS and Paraview softwares, respectively was used. The study was conducted in the Canguiri Experimental Station (UFPR), located in the city of Pinhais (PR). Soil samples from the study area were collected in the A, AB, B and B horizons, in a regular grid of 135 points (135 x 4 local horizons = 540 samples). The use of GIS and computer graphics have enabled the identification of internal volumes of fertility attributes with different concentrations confined within the soil matrix. Thus, it is expected that plant roots grown side by side can find different chemical conditions of the soil. The tool also facilitated the 3D visualization and interpretation of cause-effect relationships between the attributes of soil fertility and the factors of soil formation and pedogenetic processes, such as the inverse relationship between weathering and soil acidity: in agriculture use of the area, the flattest part with a higher incidence of most weathered soils (Oxisols) would require smaller doses of lime due to higher pH values and lower levels of Al^{3+} . As a practical result, monitoring of changes in attributes of soil fertility by three-dimensional visualization can make more precise handling of soils and contribute to increase the production of plants.

Key-words: geoprocessing, Grass Gis, Paraview, soil acidity, factors of soil formation and pedogenetic process.

2.1. INTRODUÇÃO

Fenômenos físicos e químicos diferenciados atuam no material de origem, ocasionando progressivas transformações e determinando as características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos solos formados. A participação do relevo também é importante, pois influencia na quantidade de água retida e promove o transporte de sólidos ou de materiais em solução, produzindo diferentes tipos de solos. Curi & Franzmeier (1984) estudaram uma topossequência de latossolos originários de basalto sob condições tropicais úmidas e observaram que os solos das posições mais inclinadas eram menos intemperizados e na posição mais alta mais oxídicos (hematita - Hm e gibbsita - Gb). Nos locais inferiores predominava caulinita (Ct) na fração argila, devido ao maior acúmulo de Si.

O conhecimento da distribuição espacial, assim como dos fatores que controlam essa distribuição, é fundamental para os estudos ambientais e para estabelecer estratégias de manejo do solo. Mais do que a mineralogia da fração argila, as características químicas (fertilidade), por se tratar de atributos mais dinâmicos no solo, são mais rapidamente afetadas pelos processos de formação do solo, principalmente por variações locais de relevo. Alguns trabalhos foram realizados em solos originados de argilito da Formação Guabirotuba em Curitiba (PR), (mesmo material dos solos do presente estudo) com a finalidade de estudar a variabilidade de suas características químicas e mineralógicas. Barbar & Melo (2008) encontraram alta variabilidade para os teores de Ct e Gb na fração argila (CV de 43 e 30% respectivamente) em amostras de solos coletadas a apenas 0,5 m de distância.

Oliveira Junior et al. (2010), avaliou diferentes unidades amostrais de solo em uma encosta (135 amostras em malha georreferenciada com espaçamento regular de 30 m) por meio da estatística clássica e da geoestatística e concluiu que os maiores coeficientes de variação foram observados para os teores de Al^{3+} , P e K^+ (117, 99 e 78 % respectivamente). A ocorrência de linhas de drenagem nas encostas induziu o aumento local nos teores de C orgânico. Para os dados mineralógicos, os teores de Ct, principal mineral da fração argila, tiveram alcance de apenas 22,4 m, que representa a distância máxima da malha de amostragem para adequada caracterização da variabilidade desse atributo. Os teores totais de Fe-cristalino (extração com ditionito-citrato-bicarbonato) foi o atributo que apresentou menor variabilidade espacial na fração argila, com alcance de 625,0 m.

Atualmente, esses e outros estudos, utilizam a espacialização 2D, que é a forma clássica de representação geográfica dos dados. No entanto, a ferramenta não permite ao usuário a visão realística do fenômeno estudado, mesmo quando se representa em diferentes

camadas (*layers*). A representação 3D possibilita a visualização espacial das variações de determinado atributo, facilita o entendimento da ocorrência de fenômenos naturais e também permite a quantificação e localização de volumes com grande eficiência.

A variação do solo, por ser um corpo tridimensional, representado pelo *pedon*, extrapola os limites do perfil, tanto no sentido horizontal como vertical. A análise do conjunto de variáveis químicas pode ser analisada com base em técnicas de visualização que permitem compreender essas variações sob a perspectiva tridimensional (Boulet, 1988). Isso fornece uma base para interpretar a gênese e evolução tanto do solo quanto das formas topográficas (Queiroz Neto, 1988; Boulet, 1992). Como resultado prático, o acompanhamento das variações dos atributos da fertilidade do solo em 3D pode tornar o manejo dos solos mais precisos e contribuir para o aumento da produção das plantas. Neteler (2001) e Iescheck (2006) demonstraram a viabilidade e os recursos técnicos e computacionais necessários para representar e visualizar as características químicas do solo no espaço tridimensional pela abordagem volumétrica e extração de superfícies. Com o surgimento de placas gráficas com aceleração 3D, o aumento da capacidade de armazenamento e processamento dos microcomputadores, juntamente com a evolução do geoprocessamento e a grande disponibilidade de interpoladores matemáticos incorporados aos Sistemas de Informações Geográficas - SIG, as aplicações se tornaram mais diversificadas.

Diferentemente de outras áreas da ciência, como na medicina, ou as que estudam fenômenos atmosféricos, que contam com sensores mais desenvolvidos e capazes de captar seus dados de forma contínua, no caso do solo, é necessária a interpolação dos dados para se gerar um volume contínuo. Uma vez gerado o volume, a informação pode ser visualizada iluminando-se com cores, ou extraindo superfícies desse volume, e a informação passa a ter um formato geométrico. Esse ambiente digital, tridimensional e interativo vem sendo experimentado ainda de forma muito incipiente em trabalhos com dados de solos (Neteler, 2001; Iescheck, 2006).

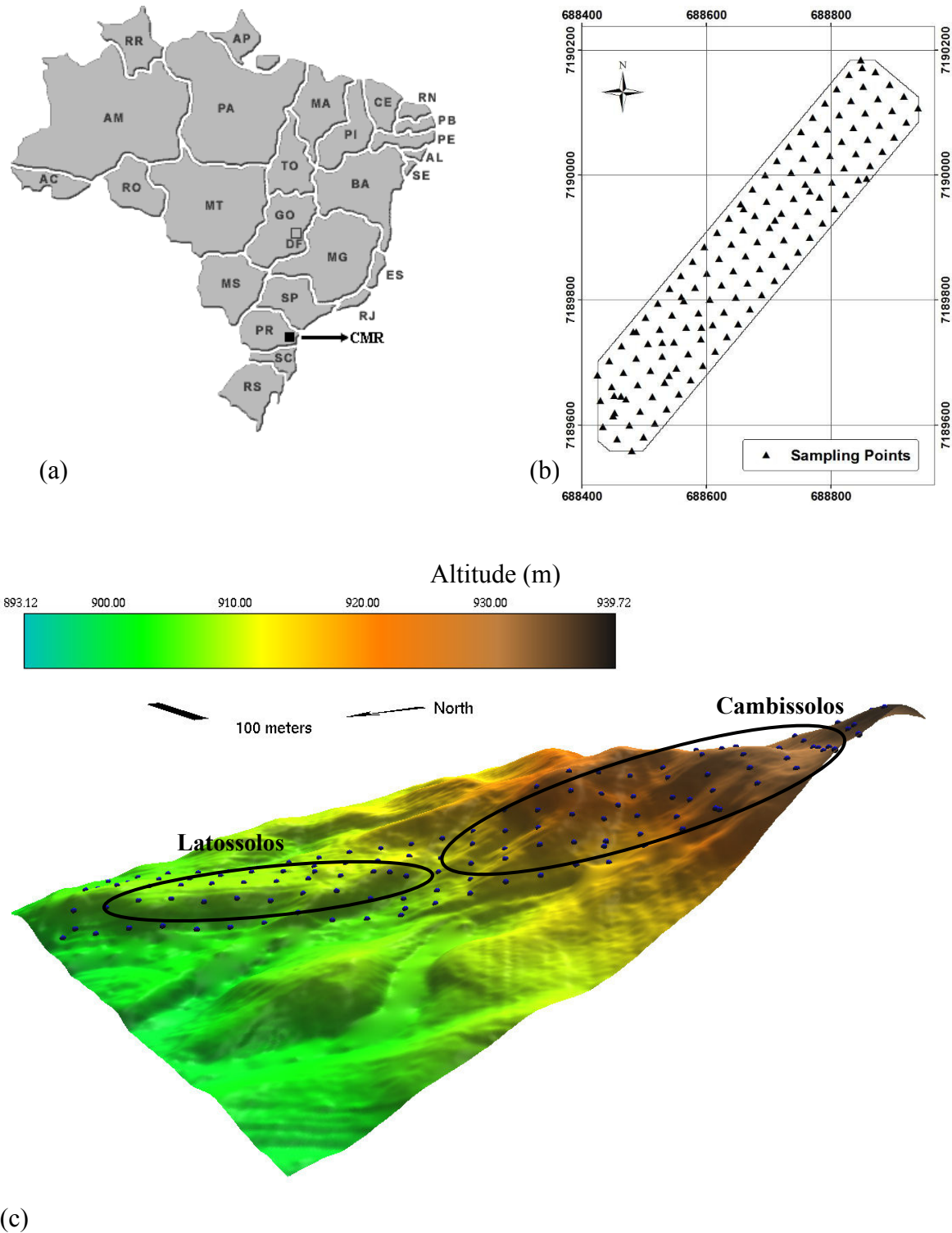
O objetivo desse trabalho foi gerar imagens tridimensionais dos atributos da fertilidade dos solos para facilitar a interpretação do comportamento espacial dos dados e suas interações com fatores e processos pedogenéticos.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. ÁREA DO ESTUDO, COLETA DAS AMOSTRAS E ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO

A área de estudo ocupa uma gleba de 12,9 ha e foi situada na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, município de Pinhais, na Bacia Sedimentar de Curitiba (PR), entre as coordenadas geográficas: -25°22'38" e -25°24'46" de latitude Sul, -49°09'05" e -49°06'40" de longitude Oeste. A encosta em que se encontra a área possui orientação SO-NE, com amplitude altimétrica de 35 m, e altitude mínima e máxima de 905 e 940 m, respectivamente.

O substrato geológico da área é proveniente do intemperismo de rochas do embasamento cristalino que constituíram a Formação Guabirota, cujos sedimentos foram formados durante ciclos que se alternaram em períodos de clima úmido e sedimentação em clima semi-árido. A litoestratigrafia é constituída de argilito (rico em esmectita), seguido por arcóseos, depósitos rudaceos e pequenos horizontes de caliche (Salamuni & Stellfeld, 2001). As principais classes de solos da área são os Cambissolos (posição mais alta e dissecada da paisagem) e os Latossolos (base da paisagem) (FIGURA 1b).



(c)
 FIGURA 1. (a) Mapa do Brasil com a indicação do estado do Paraná e a Região Metropolitana de Curitiba; (b) Distribuição das amostras em uma grade regular (c) Representação em 3D do relevo da área de estudo com a indicação das áreas com predomínio de latossolos e cambissolos;

A amostragem da área foi disposta em uma malha regular com 135 pontos espaçados entre si a uma distância de 30 m (FIGURA 1c). Para coleta das amostras de solo utilizou-se

um trado mecânico de 1,1 m acoplado a tomada de força de um trator. Após identificação e descrição morfológica, os horizontes A, AB, BA e B foram separados (135 pontos x 4 horizontes = 540 amostras) e as amostras de solo foram secas (estufa a 40° C por 24 horas) e passadas em peneira de malha de 2 mm.

Determinaram-se os seguintes parâmetros químicos do solo (Embrapa, 1997): pH em H₂O; teores trocáveis de Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ - extração com KCl 1 mol L⁻¹; teores trocáveis de K⁺ e disponíveis de P - extração com HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹ (Mehlich -1); acidez potencial não trocável (H) - extração com Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0 e; carbono orgânico (CO) - extração com solução de H₂SO₄ e dicromato de sódio.

2.2.2. ORGANIZAÇÃO NO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG), PROCESSAMENTO E VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

A configuração do espaço de processamento no SIG foi realizado da seguinte forma: foi definido o sistema de coordenadas UTM – *Universal Transverse Mercator*; o ambiente 3D (caixa que delimita o espaço 3D) foi definido de forma que a altura da caixa fosse equivalente ao comprimento do trado utilizado para coletar as amostras (1,10 m), sendo que o topo foi definido com o valor zero e o fundo com o limite do comprimento do trado, nesse intervalo os limites intermediários foram representados pelo valor da espessura do horizonte no ponto de coleta; a resolução espacial norte/sul, leste/oeste e a resolução do cubo foi definido em 2 m, e a resolução da altura do retângulo foi definida em 0,10 m, o que permitiu formar 11 planos horizontais entre o topo e o fundo espaçados entre si em 10 cm.

Para a geração de um modelo detalhado do terreno foi utilizado dados de varredura *laser*, importados para o SIG no formato de texto ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*.

Os dados obtidos com as análises químicas e granulométricas foram organizados em planilha eletrônica, onde cada linha da tabela representou uma amostra de solo relativa ao horizonte determinado na descrição morfológica. Dessa forma cada amostra de solo (linha da tabela), consistiu das seguintes informações: posição no perfil definida por um trio de coordenadas x , y , z ; e as informações quantitativas dos dados químicos e granulométricos, compondo os valores da coordenada w a ser interpolada. A importação dessa tabela para o SIG seguiu o padrão de textos ASCII.

O procedimento de geoprocessamento foi realizado utilizando-se o SIG *GRASS GIS* v. 6.3.0, que possui a funcionalidade de processar dados em 2D e 3D (*GRASS Development Team*, 2009), associado a um gerenciador de banco de dados relacional com suporte *SQL* –

Structured Query Language.

Para geração do modelo numérico do terreno foi necessário realizar uma filtragem dos dados *laser*, eliminando a vegetação para que apenas a superfície topográfica fosse representada. Essa superfície foi utilizada para dividir a área em setores no intuito de analisar a geomorfologia e sua relação com a distribuição das características químicas e físicas do solo.

A transformação para o modelo contínuo no espaço 3D (geração dos volumes) dos dados químicos foi realizado utilizando a função *Splines Regularizado com Tensão - RST* (Mitasova & Mitas, 1993 e Mitasova & Hofierka, 1993), onde além das coordenadas x , y , z foi adicionado uma quarta variável (w) à função de interpolação, contendo os valores descritivos da informação de interesse. Nesse processo de interpolação, foi gerada uma grade tridimensional composta por *voxels*, ao invés de uma grade bidimensional composta por *pixels*. O conjunto desses *voxels* no espaço contínuo formaram os volumes.

O processo de visualização foi realizado utilizando o programa de visualização científica *Paraview* v.3.6.0 que é baseado na biblioteca gráfica OpenGL e possibilita a projeção dos dados 2D e 3D (Kitware Inc, 2010). A obtenção da informação contida nos volumes foi realizada pelo procedimento de extração de superfícies. Cada superfície foi definida de forma interativa, seguindo os valores de interesse de cada característica e conforme a literatura do assunto, por exemplo: pH acima de 5,4; teor de argila acima de 600 g kg⁻¹.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. ACIDEZ ATIVA (pH em água) E ACIDEZ POTENCIAL TROCÁVEL (Al³⁺)

As amostras de solo apresentaram pH ácido, variando de 4,8 a 6,0 (FIGURA 2a), com maior ocorrência de valores iguais a 5,2 (FIGURA 2c). Na análise em conjunto do comportamento do pH e Al³⁺ ficou evidente a falta de coincidência entre esses parâmetros, no que se refere à distribuição espacial (FIGURA 3): maiores valores de pH nas camadas superficiais (até 20 cm), com alguns volumes internos e confinados de solos com valores também superiores a 5,4, e teores de Al³⁺ acima de 4 cmol_c kg⁻¹ em volumes confinados dentro da área de maior acidez potencial trocável (20 a 80 cm).

A principal fonte do Al³⁺ no solo pode ser atribuída aos altos teores de esmectita na rocha da região (argilito) (Bigarella & Salamuni, 1962). Melo et al. (2009) estudaram a mineralogia da fração argila de dois Cambissolos da mesma região e formados do mesmo argilito até a profundidade de 4,5 m e identificaram montmorilonita e beidelita, ambas

esmectitas dioctaedrais (Al na lâmina octaédrica), nos horizontes C2, C3, e C4. Com o processo de intemperismo, a esmectita por processos de diagênese e neogênese, se transforma, preferencialmente, em minerais 1:1 (caulinita) nos horizontes subsuperficiais dos solos, com intensa liberação de Al^{3+} (Juo & Kamprath, 1979; Thomas & Hargrove, 1984).

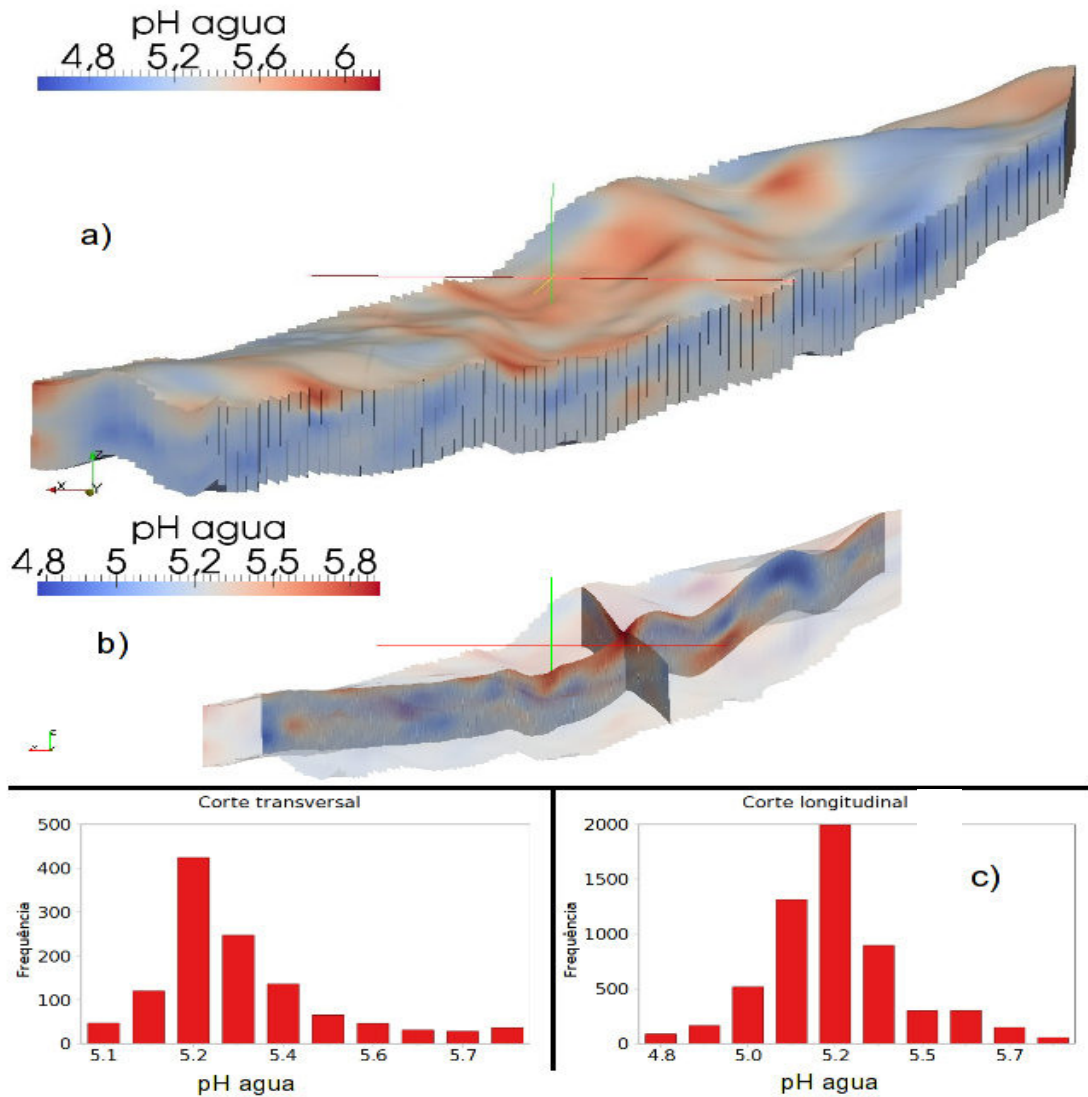


FIGURA 2 - a) Distribuição dos valores de pH em água na área; b) cortes longitudinal e transversal, com os respectivos gráficos de distribuição de frequência dos valores de pH em água.

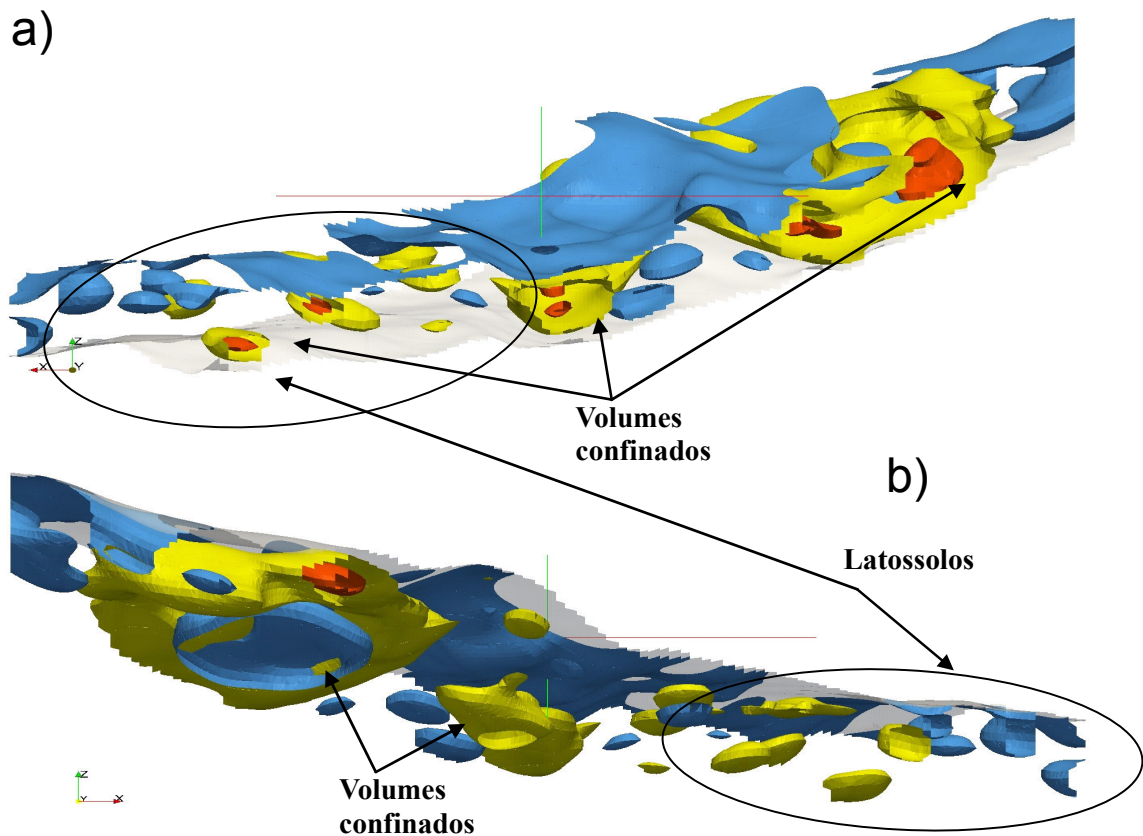


FIGURA 3. Vista lateral (a) e da base (b) da distribuição dos valores de pH superiores a 5,4 (azul) e dos teores de Al^{3+} entre 2,8 e 3,9 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (amarelo) e superiores a 4,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (vermelho). Em destaque os volumes confinados com os maiores valores de pH e maiores teores de Al^{3+} e a região com predomínio de latossolos.

Na região de solos mais intemperizados (latossolos) houve pouca formação de volumes (ausência de cores) para valores de pH superiores a 5,4 e teores de Al^{3+} maiores que 2,8 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, tanto na vista lateral (FIGURA 3a) como basal (FIGURA 3b). Nessa parte baixa do terreno, mesmo com valores de pH mais baixo, os menores teores de Al^{3+} são atribuídos ao maior processo de intemperismo, ocorrendo remoção de sílica pela água e formação de gibbsita. De acordo com Motta e Melo (2009) os baixos teores de Al^{3+} dos solos mais intemperizados, na prática, resulta em menor tamponamento da acidez e menor requerimento de doses de calcário para correção de solos.

A ocorrência dos menores teores de Al^{3+} nas camadas superficiais (0 a 20 cm) tem sua explicação na soma de três fatores: horizonte mais intemperizado, onde o Al^{3+} transformou-se em gibbsita; maiores teores de carbono orgânico, que contribuem para a complexação do Al^{3+} (Simas et al., 2005); e maiores valores de pH (superiores 5,4) induzem a precipitação do Al^{3+} (Pionke & Corey, 1967). Na superfície, tem-se extensos volumes de solos com pH superiores a 5,4 (FIGURA 2) e teores de carbono orgânico maiores que 25 g kg^{-1} (FIGURA 4), que não

coincidem com as superfícies que representam os maiores teores de Al^{3+} . De acordo com Conyers (1990) e Rodeja et. al. (2004), a extração do Al^{3+} ligado especificamente à matéria orgânica (complexo de esfera interna) envolveria o uso de soluções molares com maior poder de extração que o KCl , como o CuCl_2 .

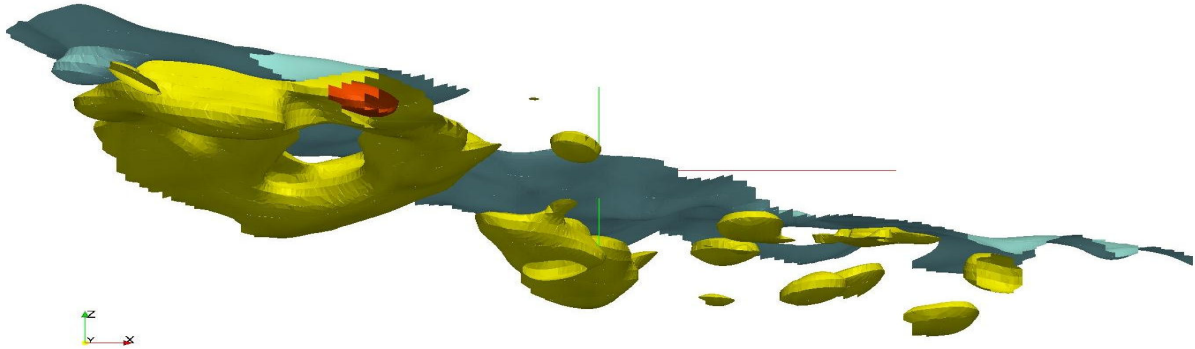


FIGURA 4 - Distribuição dos teores de carbono orgânico superiores a 25 g kg^{-1} (verde) e teores de Al^{3+} entre $2,6$ a $2,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (amarelo) e superiores a $4,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (vermelho).

Nas linhas de drenagem nas áreas mais altas (região dos cambissolos) verificou-se o predomínio de volumes de solos com teores de Al^{3+} superiores a $4,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (FIGURA 5). Devido ao menor desenvolvimento dos solos, principalmente nas linhas de drenagens e na subsuperfície (corte a 80 cm) (região de acúmulo de Si por fluxos laterais e verticais), tem-se condições mais favoráveis à manutenção de parte da esmectita herdada do material de origem na fração argila. Os maiores valores de CTC da fração argila nas linhas de drenagens (FIGURA 5) sugerem a ocorrência, mesmo que restrita (CTC da argila máximo de $21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), de minerais 2:1 expansivos. Dessa forma, a esmectita atuaria no tamponamento de maiores teores de Al^{3+} nessas posições (Thomas & Hargrove, 1984; Motta e Melo, 2009).

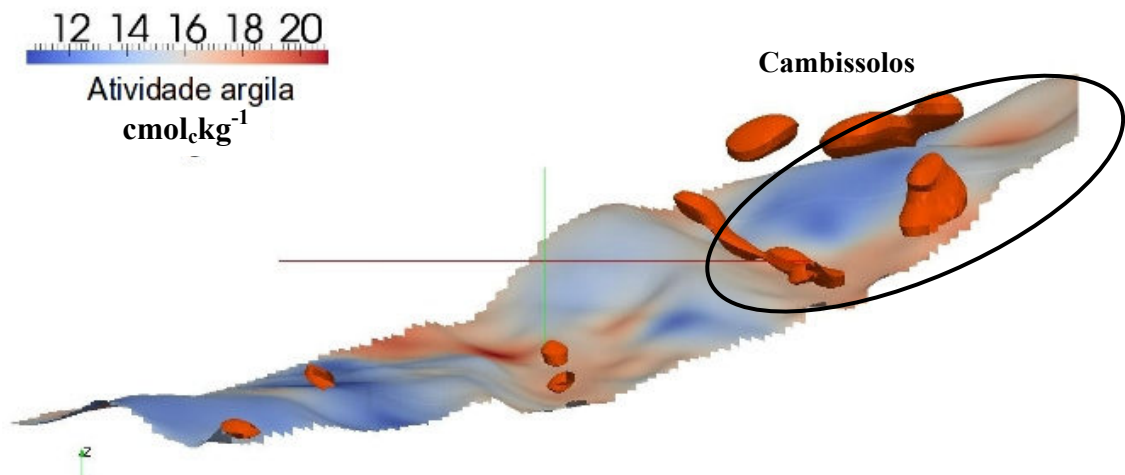


FIGURA 5 – Distribuição dos teores de Al^{3+} maiores que $4,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (volumes em vermelho) sobre a superfície de corte do terreno a 80 cm de profundidade. As cores sobre o terreno representam as variações nos valores de atividade ou CTC da fração argila [CTC da argila = (CTC pH 7,0 do solo x 1000)/teor de argila em g kg^{-1} - Embrapa, 2006] nessa profundidade.

A área apresentou altos valores de saturação do complexo sortivo por alumínio (m), principalmente nos horizontes subsuperficiais, acompanhando os teores de Al^{3+} (FIGURA 6). Fica evidente a relação inversa entre grau de intemperismo e tamponamento e toxidez das plantas por Al^{3+} . A ausência de cor em cima da superfície de m entre 70 e 83% (FIGURA 6a) indica que mesmo na superfície, a saturação por Al^{3+} nos solos mais jovens (Cambissolos) foi mais expressiva (m entre 41 e 69%), o que demandaria a aplicação de maior dose de calcário para correção dos solos. O valor de corte de 40% foi escolhido por representar o limite superior para o adequado crescimento da maioria das espécies agrícolas.

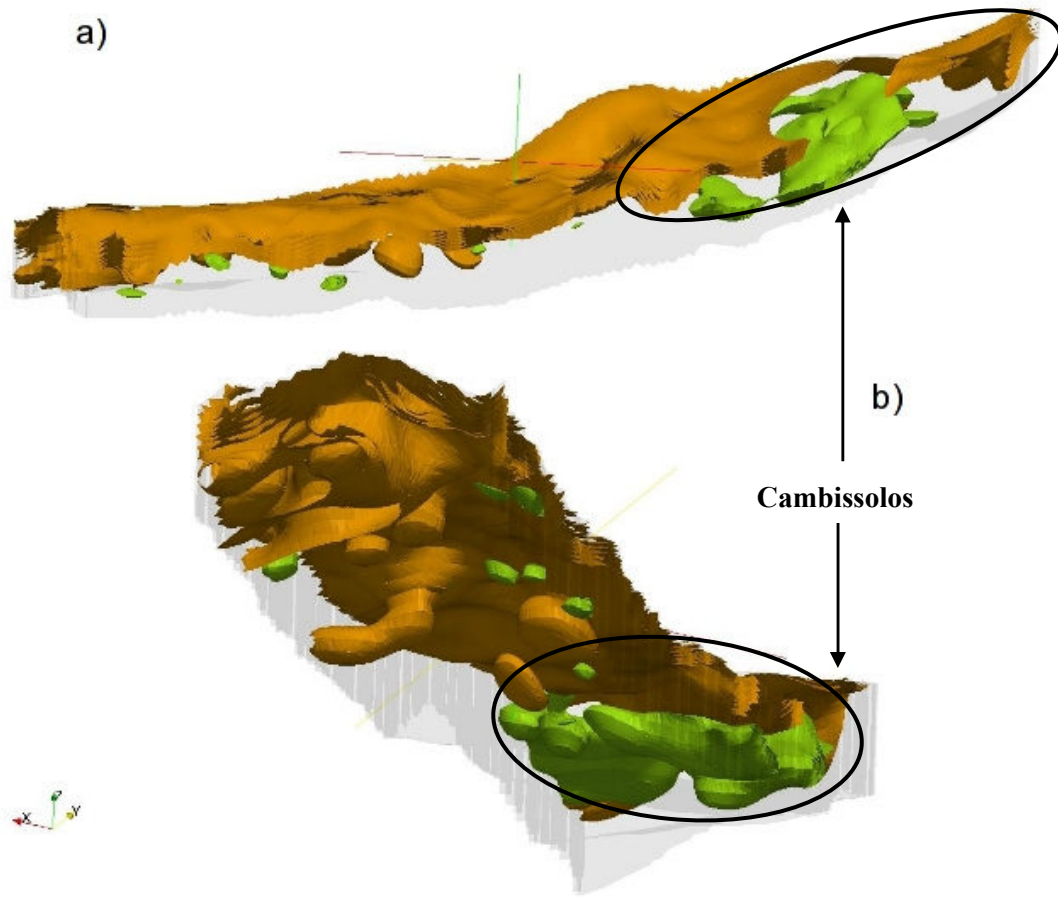


FIGURA 6 - Vista lateral (a) e da base (b) da distribuição dos valores de saturação do complexo sortivo por Al^{3+} [$m = \text{Al}^{3+} / \text{CTC pH do solo} \times 100$ - Embrapa, 2006]: laranja - $m < 40\%$ e verde - m entre 70% e o valor máximo de 83%.

2.3.2. ACIDEZ POTENCIAL NÃO TROCÁVEL (H)

Existe forte associação entre teores de carbono orgânico e de H (FIGURA 7). Nas posições de topo de morro, onde os teores de carbono orgânico são baixos, o volume dos menores teores de H se estendem para a superfície do terreno. A matéria orgânica, ao lado de minerais da fração argila de cargas dependentes de pH (caulinita e óxidos de Fe e Al) são as principais fontes de H covalente: fração húmica - liberação por dissociação de grupos carboxílicos e fenólicos (Dick, et. Al, 2009); minerais da fração argila - liberação por grupos silanol (-SiOH), aluminol (-AlOH) e ferrol (-FeOH) (Tari et al., 1999; Alleoni et. al., 2009).

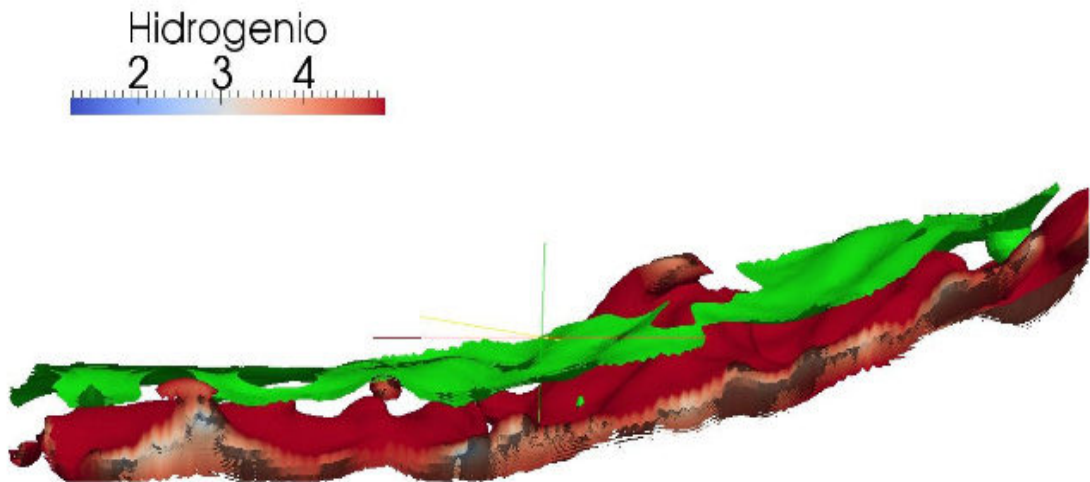


FIGURA 7 - Distribuição dos maiores teores de carbono orgânico (CO entre 25 e o valor máximo de 42 g kg⁻¹ - verde) e menores teores de H (1,2 até 5,0 cmol_c kg⁻¹ - cores variadas conforme a legenda).

2.3.3. CTC pH 7,0

Os valores de CTC pH 7,0 reduziram em profundidade e aumentaram nas linhas de drenagens devido a forte influência da matéria orgânica nesse atributo do solo (FIGURA 8). Em profundidade (corte a 100 cm), com menor influência da matéria orgânica, identificou-se o efeito expressivo da qualidade da fração argila: maiores valores de CTC pH 7,0 (figura não apresentada) e maiores valores de atividade da fração argila nas linhas de drenagem (FIGURA 5). A 100 cm de profundidade, o valor de maior frequência de CTC está em torno de 9,0 cmol_c kg⁻¹.

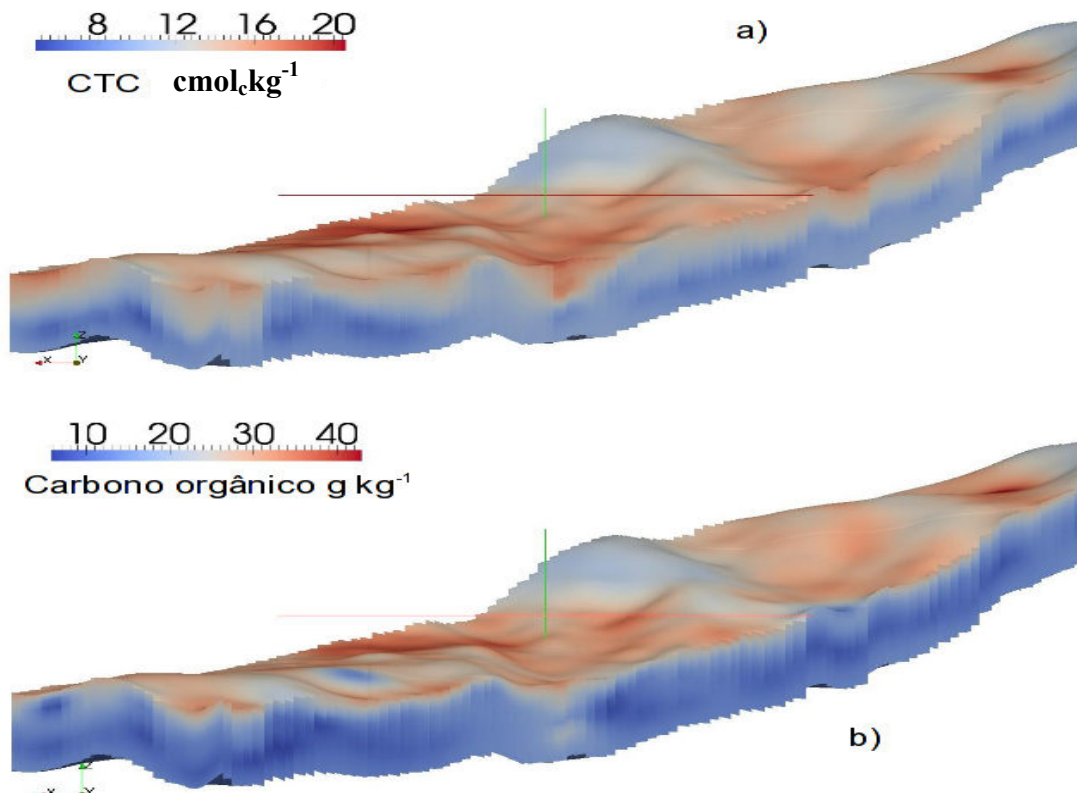


FIGURA 8 – a) Distribuição dos valores de CTC pH 7,0; b) Distribuição dos teores de Carbono orgânico.

2.3.4. BASES TROCÁVEIS: Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+

Os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , tanto na superfície quanto em profundidade (FIGURAS 9 e 10), acompanharam as regiões de maior acúmulo de matéria orgânica e maiores valores de CTC pH 7,0 nas linhas de drenagem da área (FIGURA 8). Possivelmente, houve lixiviação dessas bases das posições mais altas e convexas em direção às partes mais baixas, com maior capacidade adsortiva. Apesar do mesmo comportamento em relação à superfície, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram inferiores na profundidade de 100 cm (FIGURAS 9 e 10 a,c).

Devido a maior força de adsorção do Ca^{2+} em relação ao Mg^{2+} , a relação entre os teores de maiores frequências na superfície ($4,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} / 2,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) foi superior ao observado a 100 cm ($1,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} / 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (FIGURAS 9 e 10 b,d), o que sugere maior lixiviação e acúmulo relativo de Mg^{2+} na subsuperfície.

Os maiores teores de Mg^{2+} na saída da drenagem principal a 100 cm de profundidade, que divide a região de latossolos e cambissolos (FIGURA 10c), também podem ser atribuídos a lixiviação preferencial desse cátion em relação ao Ca^{2+} .

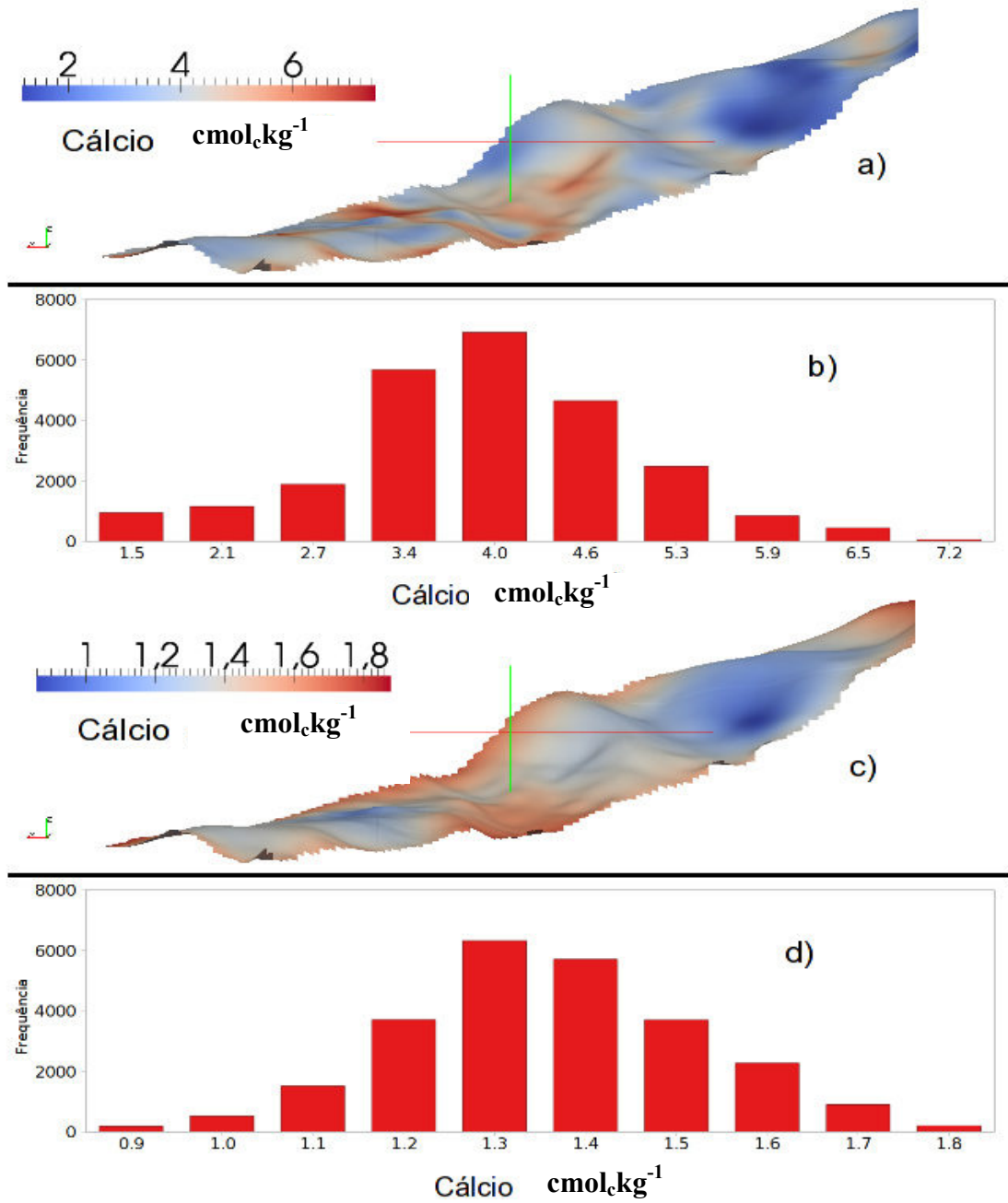


FIGURA 9 - Planos da superfície do terreno (a) e de corte a 100 cm de profundidade (c) com os teores de Ca^{2+} e seus respectivos gráficos de distribuição de frequência (b, d).

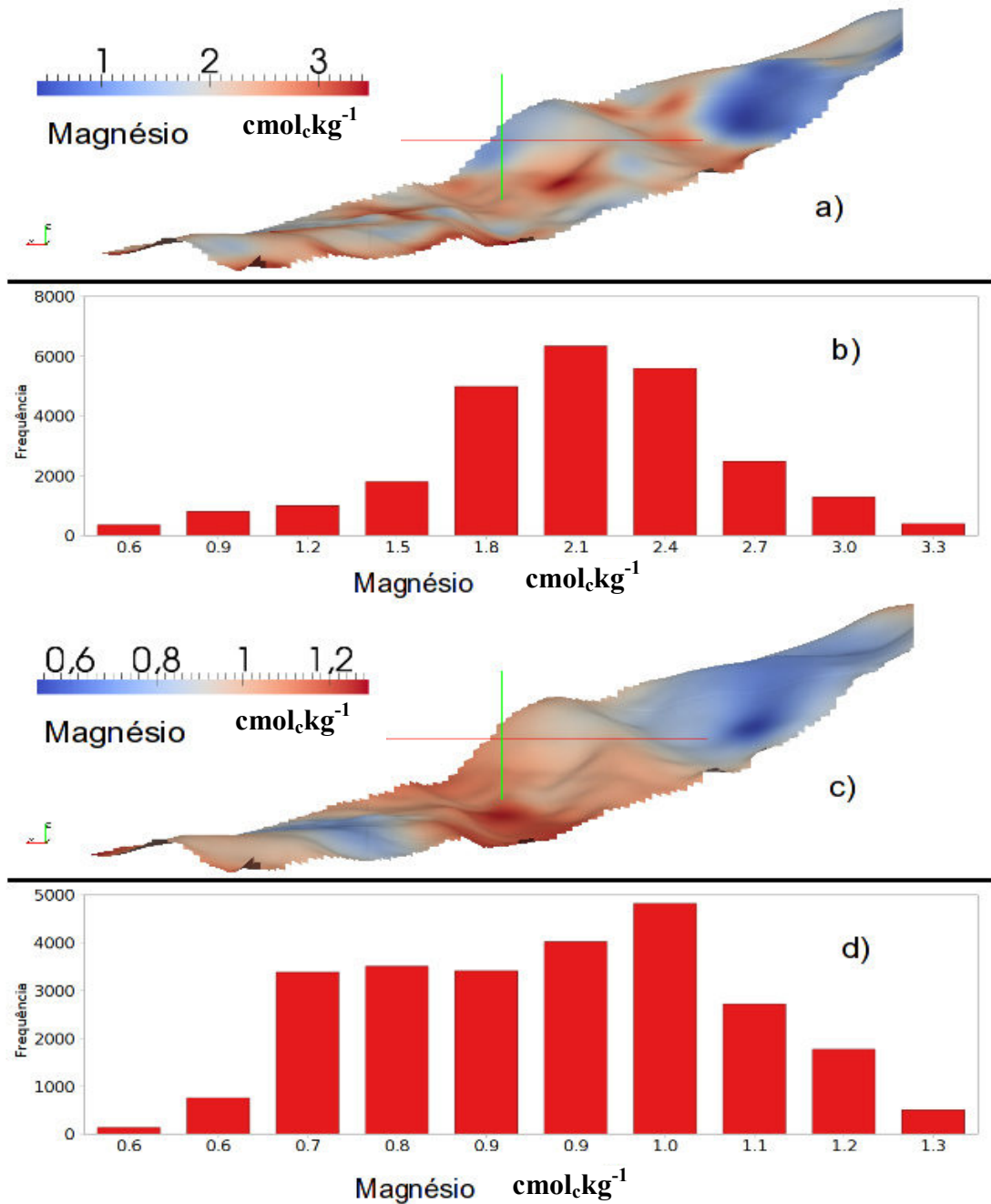


FIGURA 10 - Planos da superfície do terreno (a) e de corte a 100 cm de profundidade (c) com os teores de Mg^{2+} e seus respectivos gráficos de distribuição de frequência (b, d).

Os volumes com os maiores teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ e maiores valores de saturação por bases não coincidiram com os maiores teores de Al^{3+} (FIGURA 11) ou com os maiores valores de saturação por Al^{3+} (FIGURA 12), respectivamente. Esse comportamento, mais uma vez, é oposto às generalizações normalmente empregadas a solos tropicais, do tipo: “os solos altamente intemperizados são muito ácidos” (Motta e Melo, 2009). Para utilização agrícola da área, a parte mais plana com maior ocorrência de solos mais intemperizados (base das figuras - latossolos) demandaria menores doses de corretivos. O volume confinado em forma de anel

com maiores teores de Al^{3+} (amarelo) é similar ao volume com maiores valores de saturação por Al^{3+} (m) (vermelho) no interior das superfícies de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e de saturação por bases (FIGURAS 11 e 12, respectivamente).

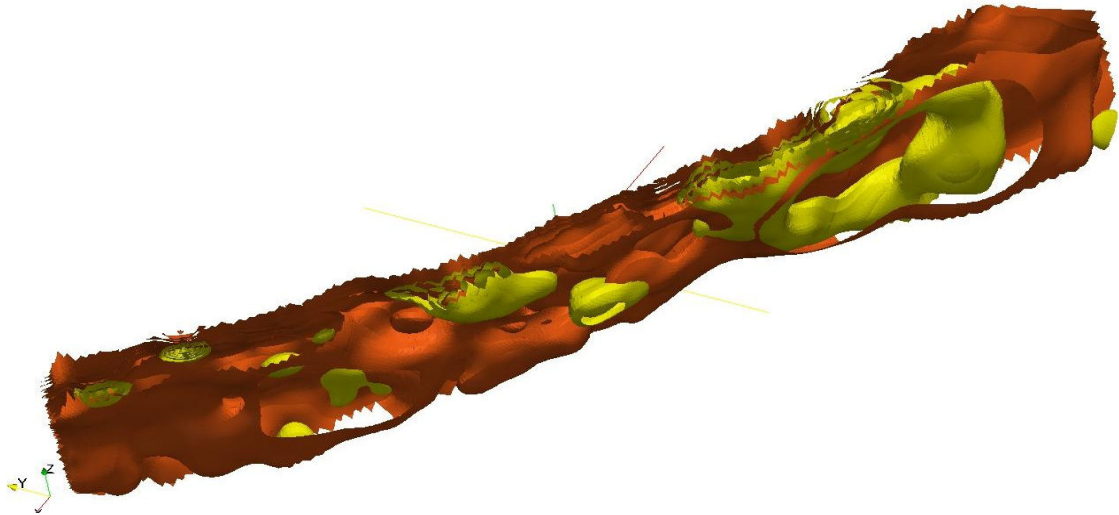


FIGURA 11 - Distribuição dos maiores teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (2,1 a 10,8 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ - laranja) e dos teores de Al^{3+} maiores que 2,8 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (amarelo).

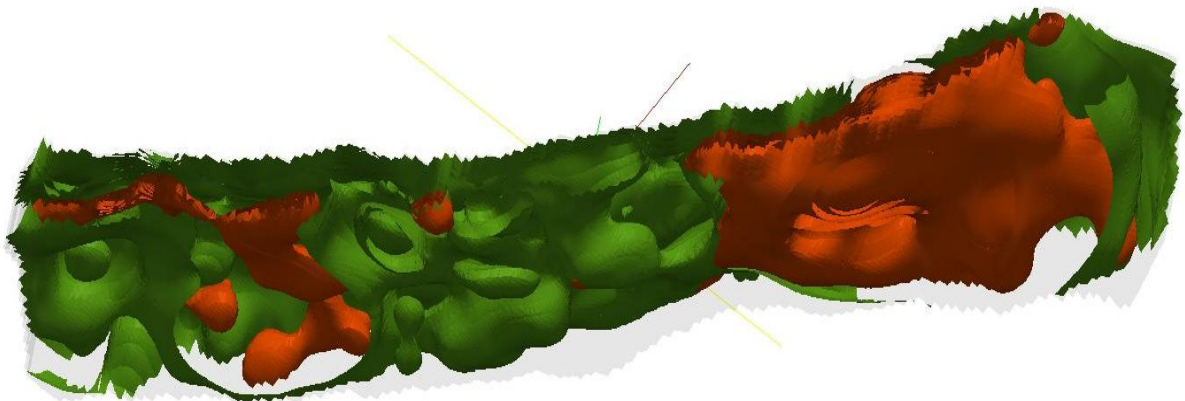


FIGURA 12 - Distribuição dos valores de saturação por bases [$V = ((\text{Soma de bases} - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+)/\text{CTC pH } 7,0 \text{ do solo}) \times 100$ - Embrapa, 2006] entre 23% e o valor máximo de 68% (verde) e dos valores de saturação por Al^{3+} (m) entre 60% e o valor máximo de 83% (vermelho).

A distribuição tridimensional permitiu, ainda, a expectativa das condições químicas do solo exploradas pelo aprofundamento das raízes; na vista pela base da distribuição dos valores de saturação por bases (FIGURA 12) percebe-se que próximo à linha mais central da área (limite entre latossolos e cambissolos) tem-se uma melhor condição de crescimento pela maior projeção da faixa de maiores valores de V (23 a 68%) em direção aos horizontes mais

profundos. Contudo, mesmo nessa região, plantas crescendo lado a lado podem encontrar condições distintas de fertilidade devido às ondulações nos volumes de saturação por bases.

O comportamento do K^+ foi similar as demais bases, com enriquecimento do nutriente na superfície e nas linhas de drenagens. Apenas em volume confinado os teores de K^+ são superiores a $0,51 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (cores verde e vermelho na FIGURA 13). Logo acima da parte mais alta da área, próximo a esse volume, tem-se um estábulo em atividade a mais de 30 anos, o que, possivelmente, foi responsável por essa anomalia nos teores de K^+ .

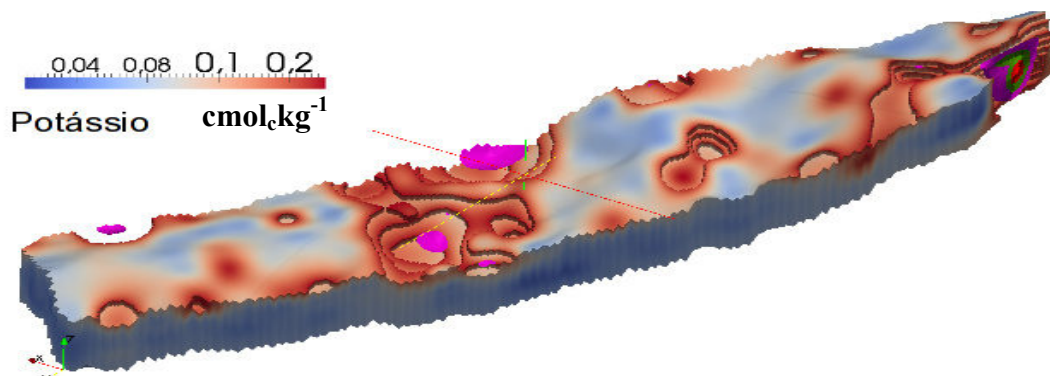


FIGURA 13 - Distribuição dos teores de K^+ . Os teores na legenda variam de $0,01$ a $0,18 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. As faixas de corte completam os seguintes volumes: áreas vazias - $0,19$ a $0,34 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, cor magenta - $0,35$ a $0,50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, cor verde - $0,51$ a $0,67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e cor vermelho - $0,68$ a máximo de $0,83 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

2.3.5. FÓSFORO

É evidente a associação entre matéria orgânica e teores de P (FIGURAS 8b e 14): linhas de drenagens com maiores teores desses dois atributos. Os teores pontuais de P entre $13,2$ a $16,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (cor vermelha no interior de anel de cor verde) em posição convexa, fugindo de área com maior teor de matéria orgânica, também pode ser atribuído a alguma anomalia causada por interferência externa.

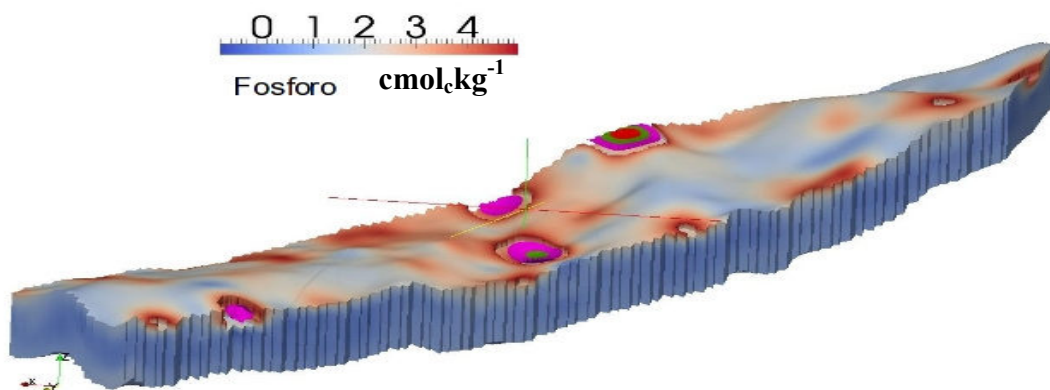


FIGURA 14 - Distribuição dos teores de P. Os teores na legenda variam de 0 até 5 mg kg^{-1} . As

faixas de corte completam os seguintes volumes: áreas vazias - 5,1 a 6,82 mg kg⁻¹, cor magenta - 6,83 a 9,74 mg kg⁻¹, cor verde - 9,75 a 13,2 mg kg⁻¹ e cor vermelho - 13,3 a 16,2 mg kg⁻¹.

2.4. CONCLUSÕES

1) O uso do geoprocessamento e da computação gráfica possibilitaram a visualização da distribuição dos atributos da fertilidade no espaço tridimensional, o que permitiu identificar a ocorrência de volumes internos com valores/teores diferenciados confinados dentro da matriz do solo. Nessa situação, espera-se que raízes de plantas crescendo lado a lado podem encontrar condições químicas de solo distintas.

2) A ferramenta 3D também facilitou a visualização e a interpretação das relações causa-efeito entre as propriedades químicas dos solos e fatores e processos pedogenéticos: relação inversa entre intemperismo e acidez de solo (para utilização agrícola da área, a parte mais plana com maior ocorrência de solos mais intemperizados (Latosolos) demandaria menores doses de corretivos devido aos maiores valores de pH e menores teores de Al³⁺); relação inversa entre teores de Al³⁺ e de matéria orgânica (ocorrência dos menores teores de Al³⁺ nas camadas superficiais); relação direta entre teores de bases e de P com teores de matéria orgânica (os maiores teores de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e P, tanto na superfície quanto em profundidade, acompanharam as regiões de maior acúmulo de matéria orgânica); relação entre a força trocadora do Ca²⁺ e do Mg²⁺ (maiores teores de Mg²⁺ foram observados na saída da drenagem principal a 100 cm de profundidade).

2.5. LITERATURA CITADA

ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A.CASAGRANDE, J.C.; SOARES, M.R. Química dos solos altamente intemperizados. In: QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO, parte II 695p. (eds. Vander de Freitas Melo e Luiz Reynaldo Ferraciu Alleoni.), SBCS, Viçosa, 2009.

BARBAR, L.C. & MELO, V.F. Variabilidade das características químicas e mineralógicas de solos da região de Curitiba (PR). Sci. Agr., 9:187-197, 2008.

BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. Caracteres texturais dos sedimentos da bacia de Curitiba. Instituto de Geologia, Boletim Paranaense de Geociências, n. 07, p. 1-164. Curitiba, 1962.

BOULET, R. Análise estrutural da cobertura pedológica e cartografia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Campinas, 1988. Anais. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p.79-90.

BOULET, R. Uma evolução recente da Pedologia e suas implicações no conhecimento da gênese do relevo. In: CONGRESSO ABEQUA, 3., Belo Horizonte, 1992. Anais. Belo Horizonte, 1992. p.43-58.

CONYERS, M. The control of aluminum solubility in some acidic Australian soils. J. Soil Sci., 41:142-156, 1990.

CURI, N. & FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J., 48:341-346, 1984.

DICK, D.P.; NOVOTNY, E.H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO, parte II 695p. (eds. Vander de Freitas Melo e Luiz Reynaldo Ferraciu Alleoni.), SBCS, Viçosa, 2009.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

GRASS Development Team, 2009. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.0. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>

IESCHECK, A. L. Representação e Visualização Volumétrica de Dados Espaciais para Avaliação de Solos. 180p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2006.

JUO. A.S.R.; KAMPRATH, E.J. Copper chloride as na extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.43, p.35-38, 1979.

KITWARE, Inc. Paraview: Parallel visualization application. <http://paraview.org>, 2010.

Melo, V.F., Mattos, J.M.S.M., Lima, V.C. Métodos de concentração de minerais 2:1 secundários na fração argila visando sua identificação por difratometria de raios x. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 527-539, 2009.

MOTTA, A.C.V.; MELO, V.F. Química dos solos ácidos. In: QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO, parte II, 695p. (eds. Vander de Freitas Melo e Luíz Reynaldo Ferraciu Alleoni.), SBCS, Viçosa, 2009.

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.

NETELER, M. Volume modeling of soils using GRASS GIS 3D-tools. In: Second Italian GRASS Users Meeting, 2001, Trento. Proceedings.

OLIVEIRA JUNIOR, J.C.; SOUZA, L.C.P. & MELO, V.F. Variabilidade de atributos físicos e químicos de solos da Formação Guabirotuba em diferentes unidades de amostragem. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1491-1502, 2010.

PIONKE, H.B.; COREY, R.B. Relations between acidic aluminum and soil pH, clay, and organic matter. *Soil Science Society of America Proceeding*, Madison, v.34, p.749-752, 1967

QUEIROZ NETO, J. P. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica no Brasil. In. XXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Campinas, 1988.

RODEJA, E.G.; NOVOA, J.C.; PONTEVEDRA, X.; CORTEZAS, A.M. & BUURMAN, P. Aluminum fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *Catena*, 56:155-183,2004.

SALAMUNI, E. & STELLFELD, M.C. Banco de dados geológicos geo-referenciados da

Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG). Bol. Paranaense Geoc., 49:21-32, 2001.

SIMAS, F.N.B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES, E.I.; CHAGAS, A.C. & BRANDÃO, P.C. Chemistry, mineralogy and micropedology of highland soils on crystalline rocks of Serra da Mantiqueira, southeastern Brazil. Geoderma, 125:187-201, 2005.

TARÌ, G.; BOBOS, I.; GOMES, C.S.F. & FERREIRA, J.M.F. Modification of surface charge properties during kaolinite to halloysite-7Å transformation. J. Colloid Interface Sci., 210:360-366, 1999.

THOMAS. G.W., HARGROVE W.L. The chemistry of soil acidity. In: PEARSON. R.W., ADAMS. F. Soil acidity and liming. Madison: American Society of Agronomy, 1984. Cap. 1 p.3-56.

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DA PLUMA DE CONTAMINAÇÃO DE CHUMBO (Pb) EM SOLOS CONTAMINADOS DE UMA ÁREA DE MINERAÇÃO E METALURGIA EM ADRIANÓPOLIS-PR

RESUMO

As atividades de mineração de metais pesados causam grande impacto ao meio ambiente, podendo desencadear problemas de saúde pública e ambiental. Uma vez detectada a contaminação é interessante monitorar a pluma de contaminação e quantificar os níveis mais críticos, no sentido de subsidiar os tomadores de decisão na tentativa de minimizar os impactos causados. Para tanto, o objetivo desse trabalho foi utilizar imagens tridimensionais dos teores pseudo-totais (extração com HNO₃ e HCl concentrados) e trocáveis (extração com Ca(NO₃)₂ 0,5 mol L⁻¹) de Pb em solos de área de mineração e metalurgia de metais pesados, para monitorar a distribuição desse poluente e estimar os volumes de solos mais contaminados que poderiam ser retirados como alternativa de remediação da área. Os teores de Pb determinados em laboratório a partir de 171 amostras de solo (57 amostras x 3 profundidades) foram interpolados pela função Spline Regularizada com Tensão (RST), na versão 3D, a partir dessa interpolação foram obtidas imagens tridimensionais. A visualização tridimensional apresenta-se com grande potencial em aplicações relativas ao meio ambiental, assim, possibilitaram a determinação da distribuição tridimensional da pluma de contaminação de Pb na área, e estabelecer a relação com as características do solo, paisagem, e fontes de poluição. Os volumes de solos mais contaminados com Pb (teores entre 10.001 e 52.000 mg kg⁻¹) foram observados mais próximos a fábrica de metalurgia do metal, e as principais fonte de contaminação da área foram atribuídas às emissões atmosféricas (Pb particulado) pelas chaminés da fábrica e a dispersão de resíduos da metalurgia sobre a superfície do terreno. O grande volume de solo calculado para remobilização para aterros industriais ou para co-processamento evidenciou a dificuldade dessa prática como remediação da área.

Palavras chaves: geoprocessamento, Grass GIS, Paraview, interpolação de dados, resíduos de metalurgia, chumbo particulado.

CHAPTER – 3 THREE-DIMENSIONAL EVALUATION OF A LEAD CONCENTRATIONS (Pb) PLUME IN CONTAMINATED SOILS OF A MINING AND METALLURGY AREA IN ADRIANÓPOLIS-PR

ABSTRACT

Monitoring of heavy metals contamination plume and critical levels in soils can be helpful in establishing strategies to minimize the hazardous impacts to environment. The objective of this study was to utilize a new approach of visualization, using tridimensional images, of pseudo-total (extracted with HNO₃ e HCl concentrated) and exchangeable (extracted with Ca(NO₃)₂ 0,5 mol L⁻¹) Pb concentrations in soils of a mining and metallurgy area to determine the spatial distribution of this pollutant and to estimate the most contaminated soil volumes. Tridimensional images were obtained after interpolation of Pb soil concentrations from 171 soil samples (57 sampling points x 3 depths), with Regularized Spline with Tension (RST) in a 3D function version. The three-dimensional visualization has a great potential of use in environmental works and allowed to determine the spatial 3D distribution of Pb contamination plume in the area and establish relationships with soil characteristics, landscape and pollution sources. The most contaminated Pb volumes (total contents ranging from 10.001 to 52.000 mg kg⁻¹) occurred near the metallurgy factory. The main contamination sources were attributed to atmospheric emissions of particulate Pb through chimneys. The large soil volume estimated to be removed to industrial landfills or co-processing evidenced the difficulties related to this practice as a remediation strategy.

Keywords: geoprocessing, Grass GIS, Paraview, data interpolation, metallurgy waste, particulate lead.

3.1. INTRODUÇÃO

As atividades industriais de mineração e metalurgia de metal pesado produzem grandes quantidades de rejeito, aumentando os riscos de contaminação do solo e do ecossistema (Morgan et al., 2007; Udovic & Lestan, 2007). Pesquisas realizadas em diversos países tem se dedicado a estudar a distribuição espacial de solos contaminados por metais pesados pela geração e interpretação de mapas temáticos. Esses mapas são gerados a partir da interpolação de pontos amostrais georreferenciados, geralmente organizados em uma malha regular, com o uso de diferentes metodologias de interpolação. A geração, visualização e interpretação dos mapas são feitas de forma bidimensional (2D) no intuito de localizar áreas com maiores teores de metais pesados e para correlacionar esses teores com as possíveis fontes de contaminação.

A técnica mais usada para a espacialização bidimensional é a que emprega o uso da geoestatística pela técnica de interpolação krigagem. Imperato et al. (2003) na Itália, Maas et al. (2010) na Argélia, e Zhao et al., 2007 na China, utilizaram a geoestatística para representar a distribuição espacial dos teores de metais pesados em solos de regiões urbanas e em suas periferias, e concluíram, com base nos mapas gerados, que as maiores concentrações de Pb estavam localizadas nas regiões centrais das cidades, como resultado de emissões atmosféricas dos veículos. Rodríguez et al. (2009) na Espanha e Wei et al. (2009) na China estudaram a concentração de metais pesados em áreas de mineração de Pb, e os mapas gerados pela interpolação por krigagem mostraram que as maiores concentrações de Pb estavam localizadas próximos das pilhas de rejeito da mineração e das chaminés das indústrias, respectivamente.

Celine et al. (2006) usaram uma metodologia alternativa de distribuição espacial de dados com o uso do interpolador IDW (*Inverse Distance Weight*), para avaliar a relação entre solos contaminados por metais pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) e suas fontes de contaminação na região de Hong Kong. De maneira similar aos estudos em áreas urbanas e suburbanas já destacadas, os mapas temáticos bidimensionais mostraram que a distribuição de metais pesados foi determinada por emissões atmosféricas dos veículos. As atividades industriais também foram importantes para aumentar a contaminação dos solos por metais pesados.

No município de Adrianópolis (PR), por mais de 50 anos, foram desenvolvidas as atividades de mineração e metalurgia de primeira fusão de Pb. O mineral de interesse econômico na área foi a galena (PbS), e a jazida no município de Adrianópolis, foi

responsável por cerca de 55 % da produção de Pb do Vale do Ribeira; foram extraídos aproximadamente 1.330.000 t de minério, com teor médio de Pb de 69 g kg^{-1} (Andrade et al., 2009). Em 1995 a mineradora encerrou suas atividades deixando a céu aberto, sem nenhuma proteção, aproximadamente 177.000 t de resíduos de beneficiamento de Pb (Barros et al., 2010).

Estudos realizados por Andrade et al. (2009), Barros et al. (2010), Kummer (2008), mostraram grande difusão de Pb e Zn nos solos, na água e nos sedimentos. Esses resultados mostram que a contaminação já atingiu a cadeia trófica, afetando negativamente o desenvolvimento de plantas e organismos do solo. Para complementar e ampliar o escopo dos estudos em Adrianópolis, os quais consideraram apenas sete locais de amostragem dispersos em uma área de 48,8 ha, a utilização de interpolação e a visualização em três dimensões (3D) para estudar a distribuição espacial da pluma de contaminação dos teores de Pb, apresenta-se como alternativa para agregar valor aos resultados. Nesse sentido, amostras de solos foram coletadas em diferentes profundidades em transectos na área.

Esse ambiente interativo digital e tridimensional vem sendo experimentado em trabalhos que contemplam dados pedológicos (Grunwald & Barak, 2001; Delarue et al., 2009), ainda de forma bastante incipiente. Em outras áreas do conhecimento, como medicina e engenharia, essas aplicações estão mais difundidas, facilitadas pelo desenvolvimento de placas gráficas com aceleração 3D, e pela capacidade de armazenamento e processamento dos microcomputadores, juntamente com a variedade de funções matemáticas para interpolação de dados incorporados nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Como exemplo da aplicação da espacialização em 3D na área ambiental pode-se citar o trabalho de Ouyang et al. (2002), que estudaram as características e distribuição espacial de metais pesados (Pb, Cu, Zn, and Cd) em sedimentos dos rios Cedar e Ortega na Flórida. Os resultados mostraram que os teores de Pb diminuíram com a profundidade de amostragem.

Grunwald & Barak (2001) utilizaram a Linguagem para Modelagem de Realidade Virtual (VRML) para criar ambientes virtuais em 3D da paisagem do solo para estudar as relações entre os horizontes do solo e as características do terreno.

Delarue et al. (2009) também utilizaram um ambiente virtual para recriar os horizontes do solo para estudar a distribuição espacial do solo na paisagem, embora não tenham gerado volumes, a representação tridimensional ajudou a interpretar a evolução pedogenética dos horizontes do solo.

O objetivo deste estudo ambiental foi aplicar as técnicas de interpolação e visualização tridimensional para estudar dados de solo organizados em uma malha irregular. A região de

estudo foi contaminada com Pb devido à atividade de mineração e metalurgia em Adrianópolis (PR). Os volumes gerados com diversos níveis de contaminação foram relacionados com as fontes poluidoras e características dos solos, e foram usados para estimar a necessidade de remobilização de solo para a remediação da área.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA E AMOSTRAGEM DE SOLO

O estudo foi conduzido em uma área abandonada de uma indústria de mineração e metalurgia de Pb no município de Adrianópolis (PR), na região metropolitana de Curitiba (FIGURA 1), localizada nas coordenadas: 48°55'11,98" W; 24°41'55,60" S; 48°53'49,18" W; 24°40'23,92 S.



FIGURA 1. Mapa do Brasil com a localização do Estado do Paraná (PR) e Região Metropolitana de Curitiba (CMR).

Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0 a 0,10 m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m em 57 locais distribuídos em quatro transectos na área central sob influência direta das atividades de mineração e metalurgia de Pb (FIGURA 2b), totalizando 171 amostras (57 locais x 3 camadas).

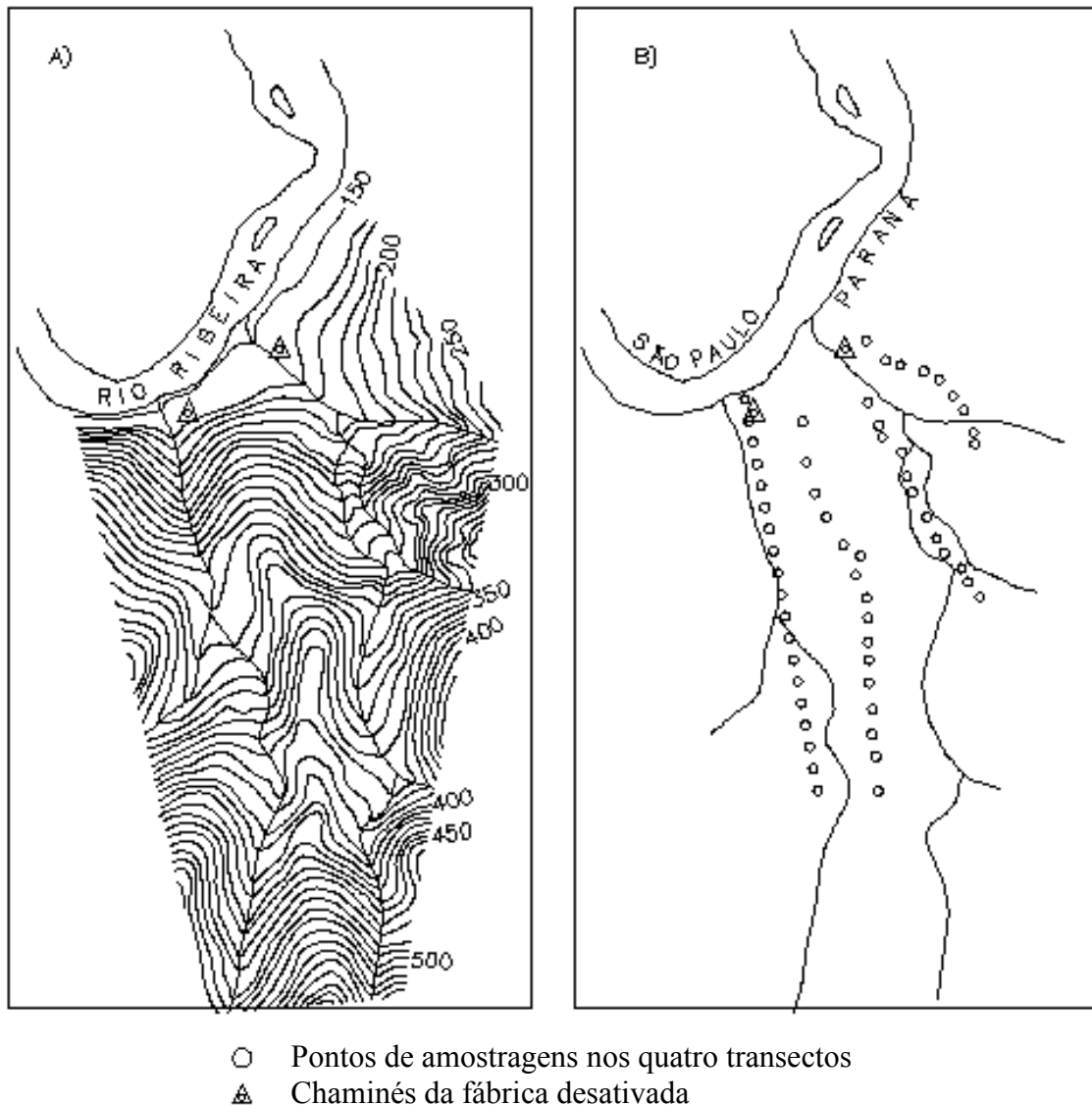


FIGURA 2. Representação da área de estudo sob influência direta das atividades de mineração e metalurgia de Pb, no município de Adrianópolis (PR), Brasil. a) representação da altimetria e hidrografia da área; b) representação da localização dos 57 pontos de coleta das amostras de solo nos 4 transectos;

Aproximadamente 0,5 kg de cada amostra de solo foram secas em estufa (40°C), e moídas para passar em peneira com malha de aço de abertura 2 mm e armazenados para análises químicas.

Para caracterizar e contextualizar os solos da área de estudo com o problema abordado, Kummer (2008) realizaram a descrição do solo de sete locais dentro da mesma área do presente estudo (identificados na FIGURA 3), cujas características são apresentadas na TABELA 1.

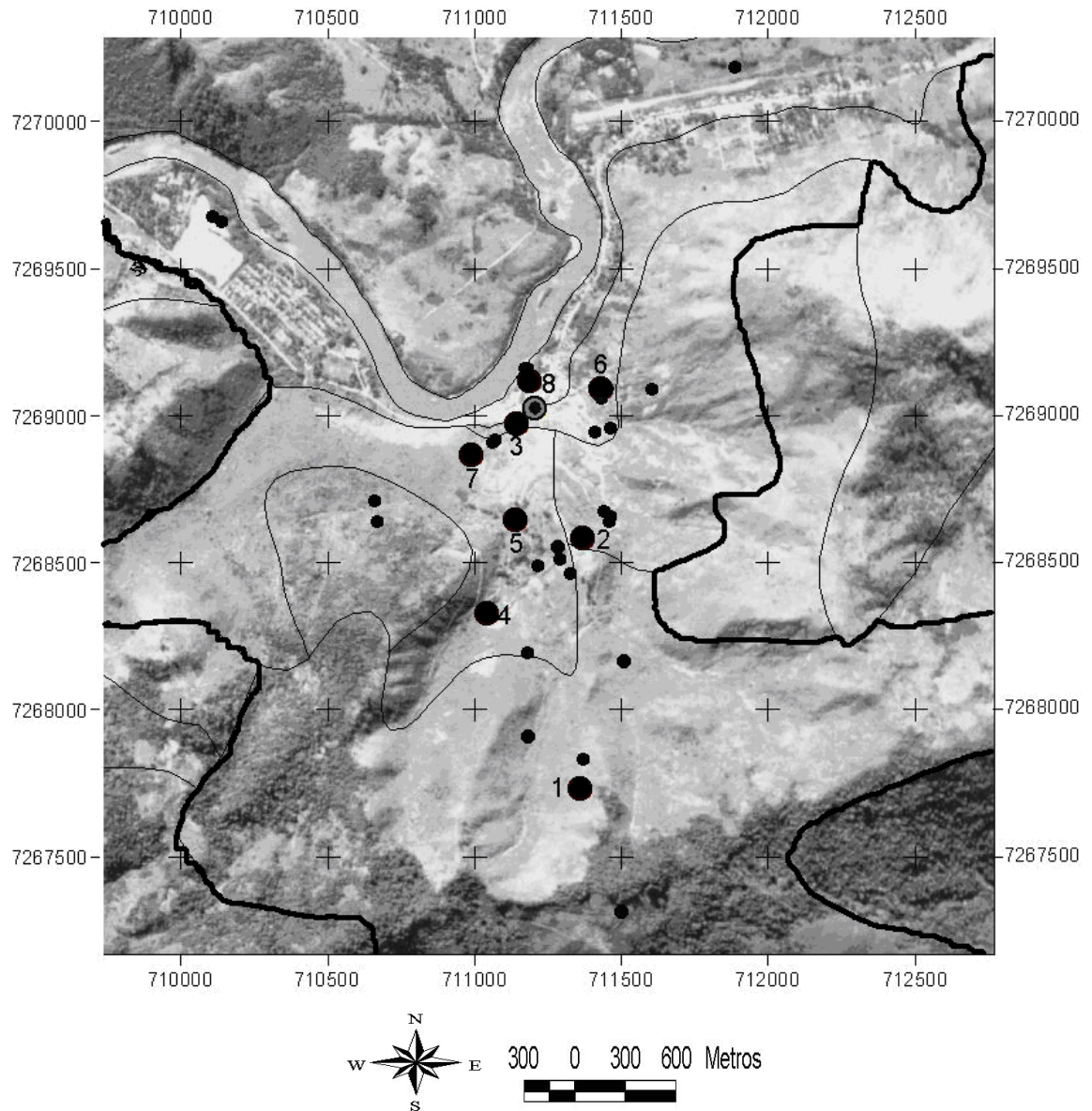


FIGURA 3. Foto aérea georreferenciada com os pontos selecionados (1 a 8) para estudo de Kummer (2008). O ponto mais claro às margens do rio Ribeira representa a fábrica desativada.

TABELA 1. Localização, classificação dos solos e características dos sete locais de amostragem identificadas a campo por Kummer (2008) e indicados na FIGURA 2b

Solo	UTM (22J)		Altitude (m)/ Distância (m) ⁽¹⁾	Classificação brasileira	Observações
	N-S (m) Latitude	E-W (m) Longitude			
1	7267313 S	711502 W	546/1.560	Neossolo Litólico	Solo de referência sob mata nativa. Graças a grande distância (1.700 m) e altitude do local em relação à fábrica (diferença de cota de 380 m), não havia evidências da influência direta das atividades de mineração no solo. Material de origem: rochas carbonáticas/complexos granitóides.
2	7268164	711513	326/563	Cambissolo Háplico	Posição intermediária da encosta, com evidência de deposição de colúvio mais rejeitos da metalurgia vindo das partes mais altas. Material de origem: rochas carbonáticas/complexos granitóides.
3	7268555	711287	165/45	Neossolo Litólico	Próximo à fábrica (FIGURA 2c), com os horizontes do solo preservados e sem incorporação de rejeitos sólidos da metalurgia. Perfil na base da encosta. Solo com potencial (muito próximo da fábrica e localizado no sentido de caminhamento dos ventos) de adição de Pb particulado, por meio da emissão de fumaça pelas chaminés. Material de origem: rochas carbonáticas/complexos granitóides.
5	7268070	711360	316/455	Mistura de solo mais rejeito grosseiro ⁽²⁾	Grande ocorrência de rejeitos da metalurgia na superfície e parte incorporada ao solo. Como resultado, a camada de coleta de amostra não apresentava estrutura e horizontes pedogenéticos. Material de origem: mistura de solo mais rejeitos da metalurgia.
6	7268671	711572	202/295	Neossolo Quartzarênico	Idem solo 3, exceto pela maior distância em relação a fábrica e pelo material de origem que é quartzito.
7	7268499	711158	194/321	Cambissolo Háplico	Idem solo 3, exceto pela maior distância em relação a fábrica.
8	7268701	711331	157/64	Neossolo Fluvico	Faixa entre a fábrica e o rio Ribeira e relevo praticamente plano. Solo com potencial de contaminação pela passagem da água pluvial pela fábrica, que escorre em direção ao rio Ribeira. Material de origem: sedimentos arenosos (fluviais).

⁽¹⁾ Distância em linha reta do ponto de amostragem à fábrica desativada; ⁽²⁾ Resíduo de mineração e metalurgia de chumbo intimamente misturados ao solo; devido a falta de horizontes pedogenéticos, não foi possível classificar os perfis de solos.

3.2.2. TEORES TROCÁVEIS E PSEUDOTOTAIS DE Pb

Aproximadamente 0,5 kg de solo seco ao ar foi passado em peneira de malha 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA) para determinação dos teores de Pb, em duas formas. A digestão das amostras de solo para determinação das formas pseudototais foi realizada em forno de micro-ondas, marca Milestone, modelo ETHOS 1, segundo o método SW 846-3051A (U.S.EPA, 2007). Aproximadamente 0,5 g de solo foi digerida com 9 mL de ácido nítrico (65%) e 3 mL ácido clorídrico (36 %) (água régia), em pré-aquecimento por 5 min a uma potência de 1.000 W até atingir a temperatura de 175 ± 5 °C, a qual foi mantida por 10 min. Em seguida, a amostra foi resfriada por cerca 30 min, mantida no interior do aparelho. Todo o filtrado (solução da extração mais da lavagem dos frascos) foi coletado em balão volumétrico de 50 mL e o volume completado com água deionizada. Determinaram-se os teores de Pb por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES), em aparelho PERKIN ELMER, modelo OPTIMA 3300 DV. Para determinação das formas trocáveis de Pb transferiram-se cerca de 2 g de TFSA para erlenmeyer de 125 mL, adicionaram-se 20 mL de solução de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e agitou-se a suspensão por 1 h, de acordo com Miller et al., (1986). A suspensão foi filtrada e os teores de Pb foram determinados por ICP-AES. Os resultados dessas análises foram processados em ambiente SIG para espacialização em duas e três dimensões (*GRASS Development Team, 2009*).

3.2.3. INTERPOLAÇÃO E IMAGENS TRIDIMENSIONAIS DE TEORES DE Pb

Inicialmente, os dados obtidos das análises de solo (171 amostras) foram organizados em uma planilha eletrônica com a seguinte estrutura (TABELA 2): código do ponto de amostragem (*cod*); coordenadas planas *x*, *y* (UTM) e profundidade de amostragem (*z*) do ponto de coleta; teor pseudototal de Pb (*tp*); teor trocável de Pb (*tt*).

TABELA 2. Estrutura e organização do arquivo na planilha eletrônica⁽¹⁾

cod.	x	y	z	tp	tt
	m			mg kg ⁻¹	
1	711192	7268600	0	1572.5	3.7
2	711192	7268600	-0.10	2363.2	7.4
3	711192	7268600	-0.20	2045.2	6.0

⁽¹⁾ O significado dos termos da tabela está descrito no texto.

As três amostras exemplificadas na TABELA 2 correspondem a apenas um local de

coleta, variando apenas a coordenada z conforme a profundidade e os teores pseudototais e trocáveis de Pb. Para garantir a interpolação em subsuperfície usou-se a notação negativa para o parâmetro z . Na planilha eletrônica as camadas de amostragem (0 a -0,10; -0,10 a -0,20; e -0,20 a -0,40 m) foram representadas apenas pelo limite superior da camada, pois a interpolação é feita entre pontos (vetores).

A planilha foi exportada em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) para compatibilizar com o software de Sistema de Informações Geográficas (SIG). O uso das ferramentas do SIG foi por meio de linhas de comando escritas em *shell script*, cuja sintaxes estão disponíveis no manual do GRASS GIS (GRASS Development Team, 2009).

Antes de importar os dados no SIG foi necessário criar um ambiente georreferenciado limitando a área de amostragem ou retângulo envolvente (FIGURA 1). Esse ambiente foi referenciado ao Datum SAD 69, no fuso 51° W.Gr., utilizando o sistema de coordenadas UTM. Para criar a região de processamento (limites da área de estudo) foi utilizado o comando “*g.region*”, por meio da seguinte linha de comando: *.g.region n=7268801 s=7267642 e=711794 w=711085 t=0 b=-0.40 res=2.5 res3=2.5 nsres=2.5 ewres=2.5 tbres=0.01 -o*. Onde: *n, s, e, w* referem-se aos pares de coordenadas dos limites inferior esquerdo e superior direito do retângulo envolvente; *t, b* são os valores do limite de superfície e profundidade de coleta de solo; *res, res3, nsres, ewres, tbres* são os valores das resoluções utilizados durante o processamento dos dados.

Após a criação da região do estudo foi feita a importação dos dados utilizando-se o comando “*v.in.ascii*”, conforme a seguinte linha de comando: *v.in.ascii -z input=/home/talescp/Documentos/adrianopolis/chumbo.csv output=chtot3d fs=, z=3 -o*. Onde: *-z* indica que devem ser considerados como dados altimétricos os valores de coleta em subsuperfície; *input* o diretório com o arquivo a ser importado; *output* o nome do mapa vetorial resultante da importação; *fs* indica que o arquivo a ser importado tem as colunas separadas por vírgula; *z* o número da coluna onde estão representados os valores referentes às profundidades de coleta.

Após a importação dos dados foi definida uma máscara (formato *raster*) dentro do retângulo envolvente, para que o processamento dos dados fosse limitado somente à área de estudo (FIGURA 1). Esse processo foi feito utilizando-se quatro comandos. O primeiro foi o “*v.type*”, responsável por transformar um vetor de linha para polígono, por meio da seguinte linha de comando: *v.type input=mascara output=mascarar type=line,boundary -o*. Onde: *input* corresponde a um mapa com representação vetorial de linha; *type* representa a

transformação de linha para polígono; *output* é o nome do mapa resultante dessa transformação. O segundo comando foi o “*v.centroids*”, que adiciona o centroide ao mapa gerado pelo comando anterior, ou seja, isso caracteriza que o polígono está fechado. Para isso foi utilizado a seguinte linha de comando: *v.centroids input=mascarar output=mascarav -o*. O terceiro comando utilizado foi “*v.to.rast*”, que transforma o mapa vetorial (polígono fechado com o centroide) em mapa *raster*. A linha de comando utilizada foi: *v.to.rast input=mascarav output=mascara2d use=cat type=area -o*. Onde: *input* refere-se ao mapa contendo o polígono com centroide; *output* o mapa *raster* resultante; *type* significa que o tipo de transformação envolve uma representação com área. O quarto comando utilizado foi o “*r.mask*”, que efetivamente habilita o uso da máscara, sendo utilizado a seguinte linha de comando: *r.mask input=mascara2d -o*. Onde: *input* é o nome do mapa *raster* utilizado como máscara.

Após a definição da máscara foi dado início ao procedimento de interpolação. Para interpolar os dados contendo as concentrações dos teores pseudototais e trocáveis de Pb no solo, e representá-los na paisagem de forma contínua (superfície volumétrica em 3D), foi utilizado a interpolação tridimensional, usando-se a função de interpolação Spline Regularizada com Tensão (RST) (Mitasova e Mitas, 1993), presente no software GRASS GIS 6.4.0 (GRASS Development Team, 2009).

No procedimento de interpolação utilizando o comando “*v.vol.rst*”, considerou-se 171 pontos amostrais (57 locais de amostragem sites × 3 camadas), distribuídos em uma grade irregular, com 2,5 m de resolução espacial, por meio da seguinte linha de comando: *v.vol.rst input=chtot3d elev=defori3d wcolumn=dbl_4 ten=40 smo=0.1 dmin=0.01 zmult=100 -o*. Onde: *input* corresponde ao mapa vetorial com os dados a serem interpolados; *elev* ao volume resultante, ou seja, o resultado da interpolação; *wcolumn* à coluna constando os dados a serem interpolados (*tp* pseudototais, ou *tt* trocáveis); *ten* ao valor da tensão utilizada; *smo* ao valor de suavidade utilizado; *dmin* à distância mínima entre pontos para remover pontos idênticos; *zmult* ao numero de vezes que o valor *z* deve ser multiplicado para torná-lo proporcional aos valores horizontais *x* e *y*.

Os valores de tensão e suavidade são os principais parâmetros que controlam o desempenho da interpolação, e foram definidos a partir de um procedimento conhecido como validação cruzada (Caruso & Quarta, 1998; Tomczak, 1998; Tabios & Salas, 1985). Esse procedimento foi realizado a partir da modificação de um código escrito em *shell script* (Neteler & Mitasova, 2008), que utiliza o método “*Jack-knife*”, também conhecido como “*leave-one-out*”, e auxilia na escolha da melhor combinação de tensão e suavidade através do

menor valor RMSE (*Root Mean Square Error*). Esse método retira um ponto do conjunto dos dados de entrada, realiza a interpolação com os dados restantes e estima um valor para a posição do ponto retirado, sendo que o processo é repetido até que todos os pontos tenham passado pelo mesmo procedimento. Nesse código *shell script*, os valores de tensão utilizados variam de 10 até 90 e suavidade de 0.1 até 0.9, assim, para cada valor de tensão definido, são testados 09 valores de suavidade. O resultado da validação cruzada apresenta os desvios entre os valores observados e estimados pela interpolação.

Para avaliar a performance do interpolador e do procedimento da validação cruzada, foi utilizado métodos de estatística descritiva (media absoluta dos valores, desvio padrão, RMSE), para mostrar o resultado que apresentou o menor erro de predição (Robinson & Metternicht, 2006, Hofierka et al., 2007). Dessa forma, o parâmetro definido para avaliação da interpolação e escolha dos valores de tensão e suavidade foi o resultado que apresentou o menor valor encontrado para o RMSE. Para determinar o RMSE deve-se calcular a raiz do somatório da média dos quadrados dos desvios, conforme a fórmula:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{est,i})^2}{n}}$$

Onde: X_{obs} é o valor observado; X_{est} é o valor estimado; n é o número de observações.

3.2.4. VISUALIZAÇÃO 3D E VOLUME ESTIMADO DE SOLO CONTAMINADO

Após a interpolação dos dados, o volume resultante foi exportado em formato VTK (*The Visualization Toolkit*) para visualização científica com o software Paraview v.3.6.0 (Kitware Inc, 2010). Essa exportação exigiu o emprego de uma máscara 3D para que o volume fosse exportado dentro do perímetro abrangendo os dados, tanto no plano horizontal quanto vertical. Isso foi feito transformando-se o mapa *raster* da máscara 2D para 3D, por meio do seguinte comando: `r.to.rast3 -m input=mascara2d output=mascara3d -o`.

Após a confecção da máscara 3D foi feito a exportação do volume tridimensional através do seguinte comando: `r3.out.vtk -p -s -m input=defori3d,mascara3d output=/home/talescp/Documents/mestrado/correcao/vtk/defori3d.vtk top=elevtopr25 bottom=elevbotr25 -o`. Onde: `-p` corresponde a dados vetoriais; `-s` a associação com mapas *raster* representando o modelo de elevação da superfície e profundidade do relevo; `-m` a obrigatoriedade de se utilizar a máscara 3D; `input` ao mapa de entrada juntamente com a máscara; `output` ao mapa de saída com extensão VTK; `top` ao mapa representando a elevação da superfície do relevo; `bottom` ao mapa representando a elevação

da profundidade do relevo.

No processo de visualização no software paraview v.3.6.0 foi utilizado somente três filtros de visualização: *contour*; *slice*; *threshold*. *Contour* filtra contornos por meio de isovalores determinados pelo usuário; *slice* é um filtro de fatiamento que permite a realização de cortes no volume, onde se pode visualizar o interior do volume por meio do seu corte em perfil; *threshold* é um filtro que extrai valores escalares dentro de um limite inferior e superior especificado pelo usuário.

Os volumes de solo para remobilização em um possível trabalho de remediação, foi calculado para cinco faixas de concentração de valores pseudototal de Pb (mg kg^{-1}): 2501 a 5000; 5001 a 10000; 10001 a 15000; 15001 a 25000; 25000 até o máximo valor de 52000.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. QUALIDADE DOS DADOS DA INTERPOLAÇÃO

O resultado da validação cruzada (TABELA 3), para o conjunto de 171 pontos indicou que o menor valor do RMSE foi 3593,1 mg kg^{-1} , para a combinação Tensão=30 e suavidade=0.1. Para essa combinação a média absoluta dos valores foi de 1534,6 mg kg^{-1} , e os valores mínimos e máximos dos desvios entre os valores observados e estimados foram - 27813,1 e 15060,0 mg kg^{-1} , respectivamente. Esses desvios extremos, ocorreram principalmente pela dificuldade do interpolador em ajustar a superfície nos pontos localizados nas áreas com grande contaminação, ou seja, a transição entre áreas com baixa contaminação e áreas com grande contaminação é bastante abrupta (Hofierka et al., 2007). Sendo os valores *default* do sistema para a tensão (40) e suavidade (0.1), verificou-se que as combinações testadas com valores acima do *default* tiveram resultados de RMSE mais elevados, significando maiores erros de predição.

TABELA 03 – Combinação de tensão e suavidade, com os respectivos valores de RMSE.

tensão	suavidade	RMSE	tensão	suavidade	RMSE	tensão	suavidade	RMSE
10	0.1	4008,8	10	0.2	4106,5	10	0.3	4172,2
20	0.1	3690,0	20	0.2	3880,3	20	0.3	3995,0
30	0.1	3593,1	30	0.2	3787,0	30	0.3	3932,2
40	0.1	3630,6	40	0.2	3820,7	40	0.3	3975,5
50	0.1	3741,6	50	0.2	3929,8	50	0.3	4086,4
60	0.1	3887,5	60	0.2	4072,0	60	0.3	4227,0
70	0.1	4042,4	70	0.2	4222,1	70	0.3	4373,7
80	0.1	4192,1	80	0.2	4366,7	80	0.3	4513,8
90	0.1	4330,1	90	0.2	4499,4	90	0.3	4641,8
100	0.1	4454,5	100	0.2	4618,6	100	0.3	4756,1

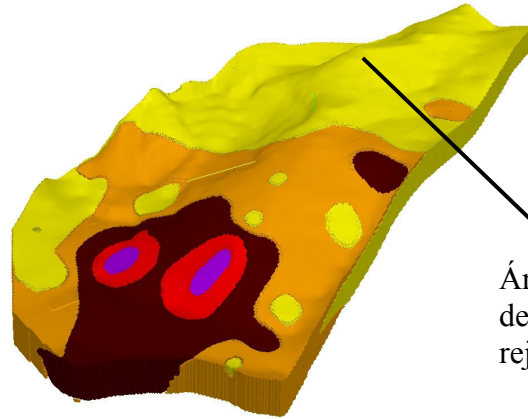
110	0.1	4565,6	110	0.2	4724,6	110	0.3	4857,4
120	0.1	4664,8	120	0.2	4818,8	120	0.3	4947,1
130	0.1	4753,6	130	0.2	4903,0	130	0.3	5026,9
140	0.1	4833,5	140	0.2	4978,4	140	0.3	5098,2
150	0.1	4905,9	150	0.2	5046,5	150	0.3	5162,3
10	0.4	4232,3	10	0.5	4290,2	10	0.6	4346,4
20	0.4	4085,7	20	0.5	4165,8	20	0.6	4239,5
30	0.4	4050,8	30	0.5	4153,7	30	0.6	4246,0
40	0.4	4106,4	40	0.5	4220,7	40	0.6	4322,5
50	0.4	4220,7	50	0.5	4338,4	50	0.6	4442,9
60	0.4	4360,4	60	0.5	4477,2	60	0.6	4580,7
70	0.4	4504,1	70	0.5	4617,9	70	0.6	4718,2
80	0.4	4640,1	80	0.5	4749,9	80	0.6	4846,4
90	0.4	4763,5	90	0.5	4869,0	90	0.6	4961,4
100	0.4	4873,3	100	0.5	4974,5	100	0.6	5062,8
110	0.4	4970,1	110	0.5	5067,2	110	0.6	5151,6
120	0.4	5055,6	120	0.5	5148,7	120	0.6	5229,5
130	0.4	5131,4	130	0.5	5220,8	130	0.6	5298,3
140	0.4	5199,0	140	0.5	5285,0	140	0.6	5359,3
150	0.4	5259,6	150	0.5	5342,4	150	0.6	5413,8
10	0.7	4400,4	10	0.8	4452,1	10	0.9	4501,5
20	0.7	4308,5	20	0.8	4373,4	20	0.9	4434,5
30	0.7	4330,1	30	0.8	4407,4	30	0.9	4478,9
40	0.7	4414,4	40	0.8	4498,0	40	0.9	4574,4
50	0.7	4536,7	50	0.8	4621,5	50	0.9	4698,6
60	0.7	4673,1	60	0.8	4756,2	60	0.9	4831,4
70	0.7	4807,5	70	0.8	4887,6	70	0.9	4959,7
80	0.7	4931,9	80	0.8	5008,3	80	0.9	5076,9
90	0.7	5043,0	90	0.8	5115,6	90	0.9	5180,7
100	0.7	5140,5	100	0.8	5209,5	100	0.9	5271,3
110	0.7	5225,7	110	0.8	5291,4	110	0.9	5350,0
120	0.7	5300,3	120	0.8	5362,9	120	0.9	5418,6
130	0.7	5366,0	130	0.8	5425,7	130	0.9	5478,8
140	0.7	5424,1	140	0.8	5481,3	140	0.9	5532,0
150	0.7	5476,0	150	0.8	5530,8	150	0.9	5579,3

Para verificar a relação entre os valores observados e estimados, foi feito um gráfico de dispersão dos valores, cuja linha de tendência mostrou um coeficiente de determinação R^2 de 0,96, mostrando-se assim, um resultado bastante satisfatório para os dados disponíveis.

3.3.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS TEORES PSEUDOTOTAIS DE Pb

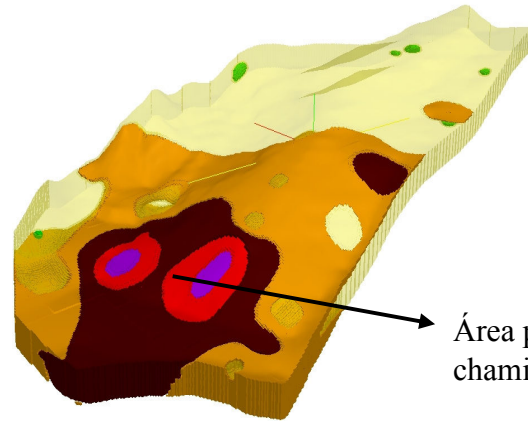
Os solos com teores de Pb inferiores a 2500 mg kg^{-1} (cores verde e amarelo - FIGURA 4b), pela cota mais alta e pela maior distância da fábrica, que dificulta o acúmulo de Pb particulado no solo emitido pelas chaminés, apresentaram menor contaminação em decorrência das atividades de mineração e metalurgia na área. No campo também foi observada baixa ocorrência de resíduos da metalurgia nessa área.

a)



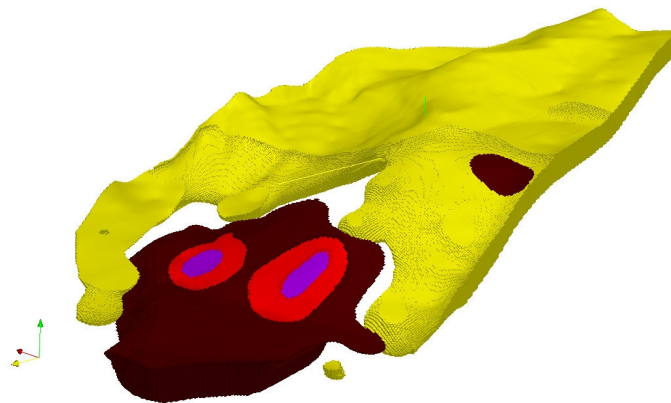
Área de maior deposição de rejeitos sólidos.

b)



Área próxima às chaminés da fábrica.

c)



d)



e)



f)

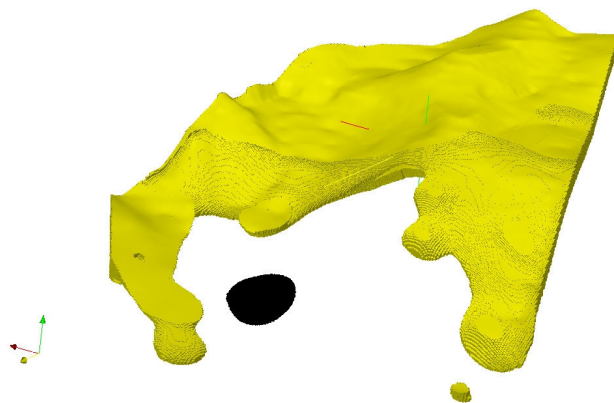


FIGURA 4 - Distribuição tridimensional dos teores pseudo-totais de Pb (mg kg^{-1}): a) amarelo

- 181 a 2.500; laranja - 2.501 a 5.000; marrom - 5.001 a 10.000; vermelho - 10.001 a 15.000; roxo - 15.001 a 25.000; b) detalhe para os teores abaixo de 180 representados na cor verde, e vistos em virtude da transparência de 20 % dos teores representados pelo amarelo; c) representação dos teores de 181 a 2.500 (amarelo) e acima de 5.001 (omissão da cor laranja); d) representação dos teores de 181 a 2.500 (amarelo) e acima de 10.001 (omissão das cores laranja e marrom). A cor vermelha está apresentada transparência de 20 % para permitir a visualização da cor roxa; e) representação dos teores 181 a 2.500 (amarelo) e acima de 15.001 (omissão das cores laranja, marrom e vermelho). A cor roxa apresenta transparência de 20 % para permitir a visualização da cor preta; f) representação dos teores 181 a 2.500 (amarelo) e entre 25.001 e 52.000 (preto).

Kummer (2008) tomou uma amostra a montante da área do presente estudo, em mata nativa (solo 1 - FIGURA 3 e TABELA 1), como referência dos teores supostamente naturais de Pb da região, e determinou os teores pseudototais nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm: 87 e 426 mg kg⁻¹, respectivamente. Mesmo com o cuidado na seleção desse ponto de amostragem, os teores de Pb foram superiores aos obtidos em outros estudos com solos não contaminados (teores naturais) no Brasil, usando o mesmo método de extração (Campos et al., 2003). Mesmo em áreas distantes da mineração, o maior teor natural de Pb (valores anômalos) nos solos da região de Adrianópolis, estado do Paraná, é de origem litogênica, associado a grande ocorrência de veios de galena (PbS) (Barros et al., 2010).

Observa-se uma mancha maior de solo com cor amarela (solos arenosos com menores teores de Pb - 181 a 2500 mg kg⁻¹) na margem esquerda da área próxima a fábrica (FIGURA 4a). De acordo com Kummer (2008) essa área restrita (solo 6 - TABELA 1) apresentou quartzito como material de origem, solos arenosos (teor de argila entre 64 e 124 g kg⁻¹) e baixo teor de carbono orgânico (inferior a 10 g kg⁻¹). Essas condições determinaram baixos valores de CTC a pH 7,0 (inferior a 6 cmol_c kg⁻¹) e favoreceram a lixiviação de Pb. O predomínio de rochas carbonáticas e complexos granitóides (TABELA 1) determinaram a formação de solos mais argilosos nos demais locais da área de estudo.

Considerando os limites de qualidade de solo estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama, 2009), mesmo os teores de Pb das áreas com cor amarela representam riscos ambientais, pois são superiores aos teores de intervenção para uso agrícola (180 mg kg⁻¹), residencial (300 mg kg⁻¹) e industrial (900 mg kg⁻¹). Dessa forma, sem práticas de remediação, essa área não pode ser usada para nenhum desses fins.

Os solos com teores entre 2501 até 5000 mg kg⁻¹ (cor laranja), localizados na porção mediana da área (FIGURA 3a,b), foram mais contaminados em relação a área com cor amarela pela maior ocorrência de pilhas de resíduos da metalurgia na superfície do terreno. Em relação aos perfis de solos descritos por Kummer (2008) a área com a cor laranja contém

o ponto 2 (FIGURA 3 e TABELA 1). Em toda a área do lado direito do rio Ribeira, que inclui o perímetro da área de estudo (FIGURA 2), foi disposto cerca de 177000 t de resíduos de cor escura e granulometria grosseira (0,5 a 2 mm) da metalurgia de Pb, diretamente sobre a superfície dos solos (Barros et al., 2010). Rodríguez et al. (2009) também encontraram teores totais altos de Pb em solos próximo a pilhas de resíduos em áreas de mineração, com valores variando entre 1243 e 93900 mg kg⁻¹. As pequenas incursões de manchas amarelas (81 a 2500 mg kg⁻¹) no interior da área com teores entre 2501 até 5000 mg kg⁻¹ (FIGURA 4a,b) evidencia que a distribuição dos resíduos na área não foi homogênea.

Andrade et al. (2009), em estudos de fitoextração de metal pesado, utilizando solos da mesma área, concluíram que *Helianthus annuus* (sunflower), foi a espécie que mostrou grande potencial para remediação de solos com níveis intermediários de contaminação, com teores de Pb menores que 5000 mg kg⁻¹, representados pelas áreas com cores amarela e laranja.

Os volumes de solos com teores de Pb entre 5001 e 10000 mg kg⁻¹ (cor marron) foram divididos em duas posições na área (FIGURA 4a,b,c). Na região da menor mancha, em posição mais elevada na paisagem, foi depositado o maior volume de resíduos sobre o terreno em relação a toda a área de estudo. Devido aos processos erosivos e de transporte de sedimentos, favorecidos pela declividade do terreno (FIGURA 2a), houve intensa mistura de resíduos com os horizontes dos solos, o que impediu, por exemplo, a classificação do perfil 5 (TABELA 1).

A principal fonte de contaminação dos solos identificados com a cor marrom no entorno da fábrica, possivelmente, foi a mesma das áreas com as cores vermelho (10001 a 15000 mg kg⁻¹), roxo (15001 a 25000 mg kg⁻¹) e preto (25001 a 52000 mg kg⁻¹), que representam os teores máximos de Pb (FIGURA 4). A proximidade dessas áreas em relação as duas chaminés da fábrica (FIGURA 2b) favoreceu ao aporte de material particulado rico em Pb na superfície do solo (Barros et al., 2010). No entorno da fábrica não foi observada a ocorrência de resíduos da metalurgia. Isso demonstra que as emissões de material particulado foram mais agressivas ao ambiente que os resíduos espalhados sobre o terreno nas áreas mais elevadas (cores amarelo, laranja e mancha marrom em cota mais elevada). As atividades de mineração e de processamento de minérios sulfetados de Pb produzem, além de rejeitos e escória de forno, emissões gasosas contendo SO₂ e CO e poeiras contendo partículas com 20 a 65% de Pb (Burgess, 1995).

Analisando o corte longitudinal da área também foi verificada intensa contaminação dos solos próximos à fábrica (FIGURA 5a). No estudo conduzido por Wei et al. (2009) na

China, os mais altos teores de Pb nos solos de uma área de mineração e metalurgia de metais pesados também estavam ao redor das chaminés das indústrias. A visualização 2D desse padrão de distribuição foi possível por meio da interpretação dos mapas temáticos.

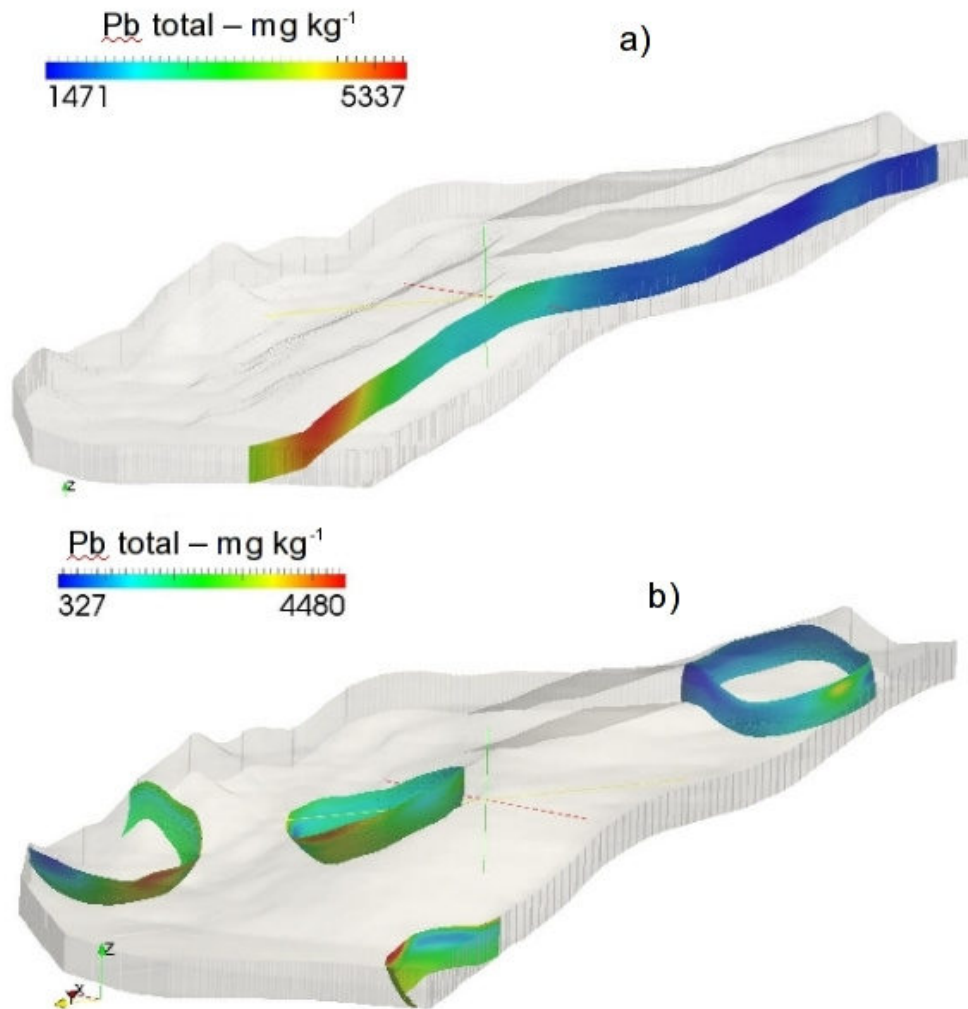


FIGURA 5. Representação em forma de fatiamento dos teores pseudo-totais de Pb: a) corte longitudinal enfatizando os maiores teores próximo à fábrica; b) fatiamento circular enfatizando os maiores teores na superfície do solo.

A faixa de maior concentração de Pb (cor preta) está na forma de bolsão no interior do volume representado pela cor roxa (FIGURA 4e), indicando um máximo acúmulo pontual em subsuperfície próximo a fábrica; observar na FIGURA 4a que a cor preta não aparece na superfície do terreno. Já a cor roxa, mesmo envolta pela cor vermelha, se manifesta na superfície da área. Essa diminuição radial dos teores de Pb no volume próximo a fábrica

indica a dispersão do metal nas áreas de maior contaminação: preto (núcleo) → roxo → vermelho. Na região desses bolsões foi observado a campo o enterramento de filtros usados das chaminés.

Além da forma de contaminação, a distribuição dos teores de Pb também variou conforme as características do solo. Estudos de liberação de Pb nesta área mostraram que os maiores teores na profundidade de 0 a 10 cm, em relação a profundidade de 20 a 40 cm, estão relacionados a contaminação preferencial e acúmulo na superfície dos solos (Kummer, 2008). Esta situação ocorre devido à baixa solubilidade e forte adsorção do Pb aos colóides orgânicos do solo (Welch & Lund, 1989; Zhang et al., 2005). A FIGURA 5b ilustra esse comportamento, com maiores teores de Pb nas camadas mais superficiais dos solos.

3.3.3. DISTRIBUIÇÃO TRIDIMENSIONAL DOS TEORES TROCÁVEI DE Pb

Os teores trocáveis de Pb também foram maiores próximos à fábrica (181 a 4300 mg kg⁻¹ - FIGURA 6). A forma particulada, além de promover maior contaminação dos solos (teores pseudototais), apresentou maior solubilidade que a deposição via resíduos sólidos da metalurgia nas partes mais altas da área.

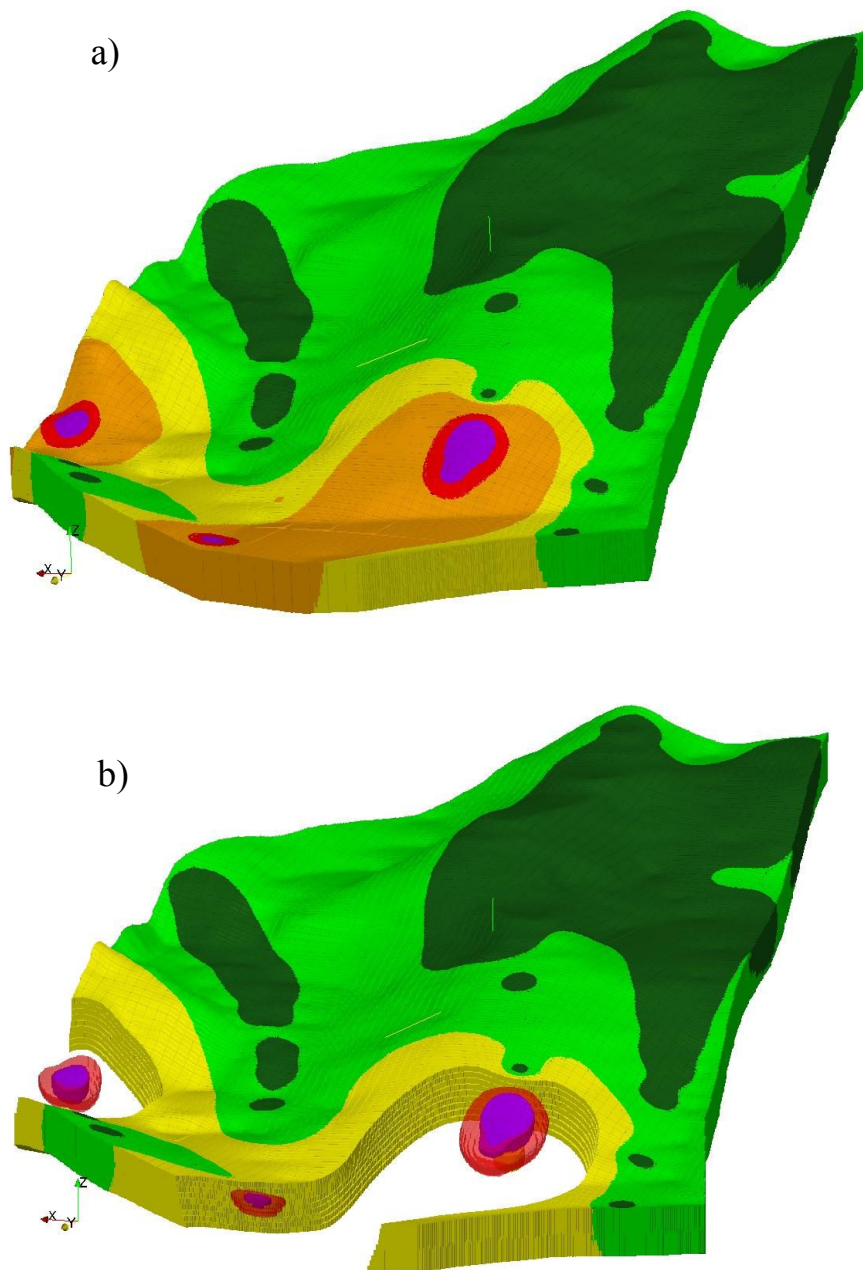


FIGURA 6 - Distribuição tridimensional dos teores trocáveis de Pb (mg kg^{-1}): a) verde escuro - 1 a 72; verde claro - 73 a 180; amarelo - 181 a 300; laranja - 301 a 900; vermelho - 901 a 1.500; roxo - 1.501 a 4.300; b) omissão do preenchimento com a cor laranja.

A ligação de natureza não específica (complexo de esfera externa) do Pb trocável aos colóides do solo (CTC) facilita sua troca iônica e liberação para a solução do solo. Verifica-se extensa área onde os teores trocáveis são superiores a 180 mg kg^{-1} (cores amarela, laranja, vermelha e roxa), ou seja, mesmo o teor de Pb extraído com solução de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ foi superior ao Valor de Intervenção Agrícola (180 mg kg^{-1}) estabelecido pelo Conselho Nacional do Meio

Ambiente (Conama, 2009), que adota o tratamento nítrico-clorídrico, com capacidade muito superior de extração. Assim, considera-se que os solos de toda extensão próxima à fábrica devem merecer maior preocupação com a difusão de poluentes e contaminação ambiental, principalmente, por estarem mais próximos ao rio Ribeira (FIGURA 2).

3.3.4. ESTIMATIVA DOS VOLUMES DE SOLO CONTAMINADOS POR Pb

No trabalho de Andrade et al. (2009) a fitoextração na área próxima da fábrica (altos teores pseudototal e trocável de Pb oriundos de deposições atmosféricas) não foi eficiente, devido à forte fitotoxidez das plantas pelo metal pesado. Como alternativa de remediação nessas áreas próximas da fábrica (teores pseudototal entre 5001 e 52000 mg kg⁻¹ e teores trocáveis entre 181 e 4300 mg kg⁻¹ - FIGURAS 4 e 6) pode-se usar a técnica de remobilização dos solos mais contaminados para aterros industriais ou para co-processamento em indústrias de cimento.

Pela estimativa de volume com base nos teores pseudototal de Pb (FIGURA 4) haveria a necessidade de remoção de cerca de 59,9 m³ de terra (9,11 % do volume total de solo da área estudada indicada pelo contorno da FIGURA 2) para se retirar todo o solo com teores superiores a 5001 mg kg⁻¹ (cores marrom, vermelho, roxo e preto - FIGURA 4), até 40 cm, o que, na prática, seria inviável. Sucessivamente por faixa de concentração de Pb, removendo cada vez menores porções de solos contaminados, representaria os seguintes volumes de terra (TABELA 4): superiores a 10001 mg kg⁻¹ (2,27%) - vermelho, roxo e preto; superiores a 15001 mg kg⁻¹ (0,75%) - roxo e preto; superiores a 25001 mg kg⁻¹ (0,18%) - preto. Mesmo a remoção de solos com teores de Pb de 25001 a 52000 mg kg⁻¹ representaria um grande volume de terra - 1172 m³, ou 117 cargas de caminhões com 10 m³ cada. Esses dados indicam as dificuldades práticas a serem encontradas nos trabalhos de remediação da área, principalmente do entorno da fábrica.

TABELA 4. Volume de solos em função das faixas de teores pseudo-totais de Pb da área

Faixa de concentração (mg kg ⁻¹)		Volume de solo (m ³)	Proporção em relação a área total (%)	Representação na FIGURA 3	Cor na FIGURA 2
2.501	5.000	126.137	19,19	a,b	laranja
5.001	10.000	44.989	6,84	a,b,c	marrom
10.001	15.000	10.011	1,52	a,b,c,d	vermelho
15.001	25.000	3.758	0,57	a,b,c,d,e	roxo
25.001	52.000	1.172	0,18	e,f	preto

3.4. CONCLUSÕES

A visualização gráfica em três dimensões permitiu determinar a distribuição espacial da pluma de contaminação de Pb na área e identificar volumes internos (bolsões) com teores diferenciados do metal confinados dentro da matriz do solo.

A contaminação ambiental por Pb foi determinada pelas fontes de contaminação do metal, posição na paisagem (distância da fábrica) e pelas características dos solos. Os volumes de solos mais contaminados por Pb (teores entre 10001 e 52000 mg kg⁻¹) foram observados mais próximos da fábrica de metalurgia do metal, com exceção da área com predomínio de solos arenosos. A principal fonte de contaminação desses solos foi atribuída às emissões atmosféricas (Pb particulado) pelas chaminés da fábrica. Outra fonte importante de contaminação da área foi a dispersão de resíduos da metalurgia sobre a superfície do terreno, o que resultou em volume de solo com teores de Pb entre 5001 e 10000 mg kg⁻¹.

O grande volume de solo para possível remobilização para aterros industriais ou para co-processamento em indústrias de cimento evidenciou a dificuldade dessa alternativa como prática de remediação da área: o volume de solos das duas faixas com maiores teores de Pb (15001 a 25000 mg kg⁻¹ e 24001 a 52000 mg kg⁻¹) foram de 3758 m³ e 1172 m³, respectivamente.

A técnica de interpolação e visualização em três dimensões mostrou grande potencial de aplicação em estudos de contaminação de solos por poluentes inorgânicos e orgânicos. A grande vantagem em relações às técnicas de interpolações bidimensionais é o acompanhamento em 3D da pluma de poluentes nos solos, o que torna os trabalhos de diagnósticos mais abrangentes e precisos, e auxilia nas decisões para os procedimentos de remediação ambiental.

3.5. LITERATURA CITADA

ANDRADE, M.G.; MELO, V. de F.M.; GABARDO, J.; SOUZA, L.C.de P. & REISSMANN,C.B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. I – Fitoextração. R. Bras. Ci. Solo, 33:1879-1888, 2009.

BARROS, Y.J.; MELO, V.F.; SAUTTER, K.D.; BUSCHLE, B.; OLIVEIRA, E.B.; AZEVEDO, J.C.R. & SOUZA, L.C.P. Indicadores de qualidade de solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: II - mesofauna e plantas. R. Bras. Ci. Solo, 34:1413-1426 - 2010.

BURGESS, W.A. Recognition of health in hazards in industry: a review of materials and processes. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 537p.

CAMPOS, M.L. et al. Baseline concentration of heavy metals in brazilian latosols. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v.34, n. 3/4, p.547-557, 2003.

CARUSO, C.; QUARTA, F. Interpolation methods comparison. Computers and Mathematics with Applications, 35(12):109–126, 1998.

CELINE S. L., XIANGDONG L., WENZHONG S., SHARON C. C., IAIN T. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics. Science of the Total Environment, 356: 45– 61, 2006.

Conama - Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2009.

DELARUE F., CORNU S., DAROUSSIN J., SALVADOR-BLANES S., BOURENNANE H., ALBÉRIC P., VENNINK A., BRUAND A., KING D. 3D representation of soil distribution: An approach for understanding pedogenesis. C. R. Geoscience, 341: 486–494, 2009.

GRASS Development Team, 2009. GRASS 6.4 Users Manual. Electronic document: http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/html64_user/.

GRUNWALD, S.; BARAK, P. The use of VRML for virtual soil-landscape modeling. *SAMS* 41:755-776, 2001.

HOFIERKA, J.; CEBECAUER, T.; SÚRI, M. Optimisation of Interpolation Parameters Using a Cross-validation. In Peckham, R.J., Jordan, G. (eds.) *Digital terrain modelling: development and applications in a policy support environment*, Springer, New York. 67-82, 2007.

IMPERATO M., ADAMO P., NAIMO D., ARIENZO M., STANZIONE D., VIOLANTE P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 124: 247–256, 2003.

KITWARE, Inc. Paraview: Parallel visualization application. <http://paraview.org>, 2010.

KUMMER, L. Mineralogia e fracionamento de metais pesados em solos de área de mineração e processamento de chumbo, Adrianópolis (PR). Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2008. 140p. (Dissertação Mestrado)

MAAS S., SCHEIFLER R., BENSLAMA M., CRINI N., LUCOT E., BRAHMIA Z., BENYACOUB S., GIRAUDOUX P., 2010. Spatial Distribution of Heavy Metal Concentrations in Urban, Suburban and Agricultural Soils in a Mediterranean City of Algeria. *Environmental Pollution* 158, 2294 – 2301.

MILLER, W. P.; MARTENS, D. C. & ZELAZNY, L. W. Effect of sequence in extraction of trace metals from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:598-601, 1986.

MITASOVA, H.; MITAS, L. Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, vol. 25, p. 641-655, 1993.

MORGAN, A.J. B; PLEASANCE, H; KINSEY, D; MURPHY, S. DAVIES, The manganese relationships of ecophysiologically contrasting earthworm species (*Lumbricus rubellus* and *Aporrectodea caliginosa*) inhabiting manganese-mine soils, *Eur. J. Soil Biol.* 43 (2007) 297-302.

NETELER, M. AND MITASOVA, H. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Third

Edition. The International Series in Engineering and Computer Science: Volume 773. Springer New York Inc, p. 406, 2008.

OUYANG Y., HIGMAN J., THOMPSON J., O'TOOLE T., CAMPBELL D. Characterization and spatial distribution of heavy metals in sediment from Cedar and Ortega rivers subbasin. *Journal of Contaminant Hydrology* 54: 19– 35, 2002.

ROBINSON, T. P.; METTERNICHT, G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v.50, n.2, p.97-108, 2006.

RODRÍGUEZ L., RUIZ E., ALONSO-AZCÁRATE J., RINCÓN J. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain. *Journal of Environmental Management*, 90: 1106–1116, 2009.

UDOVIC, M.; LESTAN, D. The effect of earthworms on the fractionation and bioavailability of heavy metals before and after soil remediation, *Environ. Pollut.* 148 (2007) 663-668.

TABIOS, G. Q.; SALAS, J. D. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Journal of the American Water Resources*, v. 21, n. 3, p. 365-380, 1985.

TOMCZAK, M. Spatial Interpolation and its Uncertainty Using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) - Cross-Validation/Jackknife Approach. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, vol. 2, No. 2, pp. 18-30, 1998.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Method 3051A – Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington, DC, Disponível em: <http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051a.pdf>. Revision 1, 2007. 30 p. Acesso em 07 mar. 2007

WEI C., WANG C., YANG L. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China. *Journal of Environmental Sciences*, 21: 1230–1236, 2009.

WELCH, J.E. & LUND, L.J. Zinc movement in sewage-sludgetreated soil as influenced by soil properties, irrigation water quality, and soil moisture level. *Soil Science*, 147:208- 214, 1989.

ZHANG, M.; LI, W.; YANG, Y.; CHEN, B. & SONG, F. Effects of readily dispersible colloid on adsorption and transport of Zn, Cu, and Pb in soils. *Environment International*, 31:840-844, 2005.

ZHAO Y. F., SHI X. Z., HUANG B., YU D. S., WANG H. J., SUN W. X., OBOERN I., BLOMBACK K. Spatial Distribution of Heavy Metals in Agricultural Soils of an Industry-Based Peri-Urban Area in Wuxi, China. *Pedosphere*, 17(1): 44-51, 2007.

CONCLUSÃO GERAL

A contribuição do geoprocessamento e da computação gráfica possibilitaram a visualização da distribuição das características físicas, atributos da fertilidade do solo e distribuição de metais pesados, no espaço tridimensional. Com o emprego desses instrumentos, foi possível identificar e analisar a atuação dos fatores de formação e processos pedogenéticos conforme os objetivos propostos nos capítulos tratados.

Houve maior concentração de argila nas linhas de drenagem e áreas mais planas do terreno, por outro lado, maiores teores de areia concentraram-se nos topos do terreno (cristas). Atribuiu-se esse fato à migração interna de argila no terreno dos topos (cristas) para as depressões, e também por processos erosivos que expuseram os horizontes inferiores mais próximos ao material de origem rico em argila.

Os maiores teores de pH concentraram-se na superfície, e situação oposta ocorreu com o Al^{3+} cujos maiores teores concentraram-se em subsuperfície devido ao material de origem rico em esmectita, que por processo de intemperismo liberou Al^{3+} para o sistema. A pouca formação de volume de Al^{3+} na superfície foi atribuído à presença de matéria orgânica que complexou o Al^{3+} , ao alto pH que favorece a precipitação do Al^{3+} e por processo de intemperismo onde transformou-se em gibbsita.

Na região dos latossolos houve pouca formação de volumes de Al^{3+} mesmo com pH mais baixo, fato atribuído também ao processo de intemperismo onde o Al^{3+} se transformou em gibbsita. Os valores mais altos de CTC ocorreram em profundidade, devido à qualidade da fração argila por influência do material de origem rico em esmectita, e nas linhas de drenagem devido ao incremento de matéria orgânica.

Os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} K^+ e P acompanharam o padrão de distribuição da CTC e matéria orgânica tanto em superfície como em profundidade.

A intensificação das atividades industriais, agrícolas e de urbanização tem aumentado o risco de poluição dos solos por metais pesados. A visualização gráfica em três dimensões permitiu determinar a distribuição espacial da pluma de contaminação de Pb na área e identificar volumes internos (bolsões) com teores diferenciados do metal confinados dentro da matriz do solo. O acompanhamento dessa contaminação pelas imagens tridimensionais permitiu identificar as formas e as fontes de contaminação, além de auxiliar na compreensão da interação do poluente com os constituintes do solo.

A distribuição dos teores de Pb refletiu as formas e fontes de contaminação, onde os maiores teores de Pb são provenientes do material particulado vindo da chaminé das fábricas,

mostrando que esses locais necessitam de maiores intervenções. Na superfície a contaminação foi preferencialmente devido a acúmulo na superfície dos solos e devido à forte adsorção pela matéria orgânica. Os altos volumes calculados mostraram que a retirada do solo envolverá grande maquinário e movimentação de terra.