

Modelo de Visualização 2D e 3D de Imagens Tomográficas de Raios X de Amostras Agrícolas, Baseado em Técnicas de Processamento Paralelo e Realidade Virtual

Maurício Fernando Lima Pereira

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de Novembro, 1452 São Carlos, SP - Brasil

mauricio@cnpdia.embrapa.br

Leonardo Castro Botega

Departamento de Computação - Universidade Federal de São Carlos

Rod. Washington Luís, km 235 São Carlos - SP - Brasil

leonardo_botega@dc.ufscar.br

Resumo

Neste trabalho é apresentado um modelo para reconstrução e visualização bidimensional(2D) e tridimensional(3D) de imagens tomográficas de raios X, para aplicação na área de físicas de solos. O modelo engloba a filtragem de projeções a priori para eliminação de ruídos, a paralelização dos algoritmos de reconstrução tomográfica 2D e 3D, sendo esta baseada em inserção de planos virtuais através de um algoritmo de interpolação por B-Spline-Wavelets. Completando o modelo, foram desenvolvidos um ambiente para visualização de cortes e extração de atributos de densidade e coeficiente de atenuação linear e dois ambientes de visualização 3D baseados em biblioteca Visualization Toolkit (VTK) e em técnicas da Realidade Virtual (RV). Os resultados mostraram que houve uma redução do tempo de reconstrução das imagens das amostras e que estes ambientes auxiliam os usuários na análise de amostras de solo, permitindo a extração de medidas de forma interativa e não invasiva.

1. Introdução

Avaliando a evolução que vem ocorrendo na área de física de solos, percebe-se o crescente interesse da comunidade científica para o desenvolvimento e aplicação de técnicas não invasivas para o estudo de características do solo. Dentre as técnicas utilizadas, destaca-se a tomografia computadorizada (TC) de raios X, que se sobressai em relação às demais técnicas aplicadas na física de solos, como a gravimétrica e a sonda de nêutrons [21] [4], devido à sua preci-

são na extração de atributos físicos, como densidade e umidade, e pela característica de possibilitar o exame de amostras de solo de forma não destrutiva [1] [3] [16]. Outra vantagem oferecida pela tomografia computadorizada, em relação às demais, é a possibilidade de fazer-se uso, após a reconstrução, das ferramentas do processamento de imagens para auxiliar a investigação dos fenômenos físicos que ocorrem solo.

Além dos desenvolvimentos ocorridos na área de ciência do solo na aplicação da tomografia, a pesquisa de madeiras recentemente também tem utilizado técnicas da TC para determinar a medida da densidade de madeira, a qual é um importante parâmetro, dado que ela é relacionada à propriedades físicas e anatômicas da madeira e muitas vezes correlacionada a sua qualidade [11].

Este trabalho apresenta um modelo de reconstrução tridimensional e visualização de amostras agrícolas que se baseia em técnicas do processamento paralelo e filtragem preditiva para eliminação de ruído das projeções. O foco do trabalho está na modelagem, implementação e validação do modelo de reconstrução; na capacidade de acelerar o processo tomográfico com uso de arquiteturas paralelas de processamento para permitir sua aplicação em grande escala e no desenvolvimento de ambientes de visualização e análise interativos. Os resultados encontram aplicação em estudos sobre:

- Solos e plantas (estruturas de formação de poros e texturas);
- Movimentação de água e soluto nos solos;
- Distribuição de raízes.

2. Materiais e métodos

A Figura 1 apresenta os módulos que compõem o modelo de reconstrução e visualização tridimensional desenvolvido neste trabalho. O modelo determina que os dados de projeções obtidos pelos tomógrafos agrícolas sejam filtrados e reconstruídos, através dos módulos paralelos de filtragem e reconstrução tomográfica bidimensional, gerando imagens bidimensionais dos cortes tomografados. Através de um algoritmo de reconstrução tridimensional por interpolação *B-Spline-Wavelets*, que utiliza sobreposição de fatias, é realizado o preenchimento do espaço existente entre os planos de forma a aumentar a resolução do objeto 3D, preservando-se as características de textura do solo. Após a reconstrução 3D, os objetos podem ser analisados em interfaces de visualização 2D ou pode-se interagir através de uma interface de análise dos objetos 3D, desenvolvida em C++ e VTK ou com uso de RV.

A RV nasceu nos anos 80 sob a necessidade de diferenciar simulações computacionais tradicionais dos mundos sintéticos que começavam a despontar. Esta iniciativa foi creditada a pesquisadores como Bolt [2] e Lanier [10].

Acadêmicos, desenvolvedores de software e pesquisadores buscam definir a RV baseados em suas próprias experiências, tornando-a largamente difundida. Tecnicamente, o termo relata uma experiência imersiva e interativa baseada em imagens geradas por computadores, renderizadas ou não em tempo real [18].

Machover afirma que a qualidade de um sistema de RV é essencial, porque estimula ao máximo o usuário, de forma criativa e produtiva, provendo *feedbacks* de forma coerente aos movimentos dos usuários [12].

Sob a perspectiva tecnológica, o objetivo principal da RV é fazer o participante sentir sua presença no mundo virtual [6]. Para criar esta sensação, sistemas de RV integram sofisticados dispositivos tais como luvas digitais, vídeo-capacetes, cavernas digitais, mesas digitais e outros.

Até o presente momento, apenas algumas unidades de pesquisa têm desenvolvido projetos com aplicações de RV na área de visualização científica, como a reconstrução tomográfica, devido ao alto custo e à dificuldades técnicas. Entretanto, algumas propostas têm surgido para minimizar as dificuldades de desenvolvimento, manutenção dos sistemas e programas necessários. Assim, recursos humanos qualificados, envolvendo a integração entre diferentes áreas do conhecimento, têm sido preparados para a otimização e democratização da utilização das tecnologias envolvidas [15].

2.1. Reconstrução tomográfica bidimensional

O algoritmo paralelo de reconstrução tomográfica baseia-se no algoritmo de retroprojeção filtrada, o qual

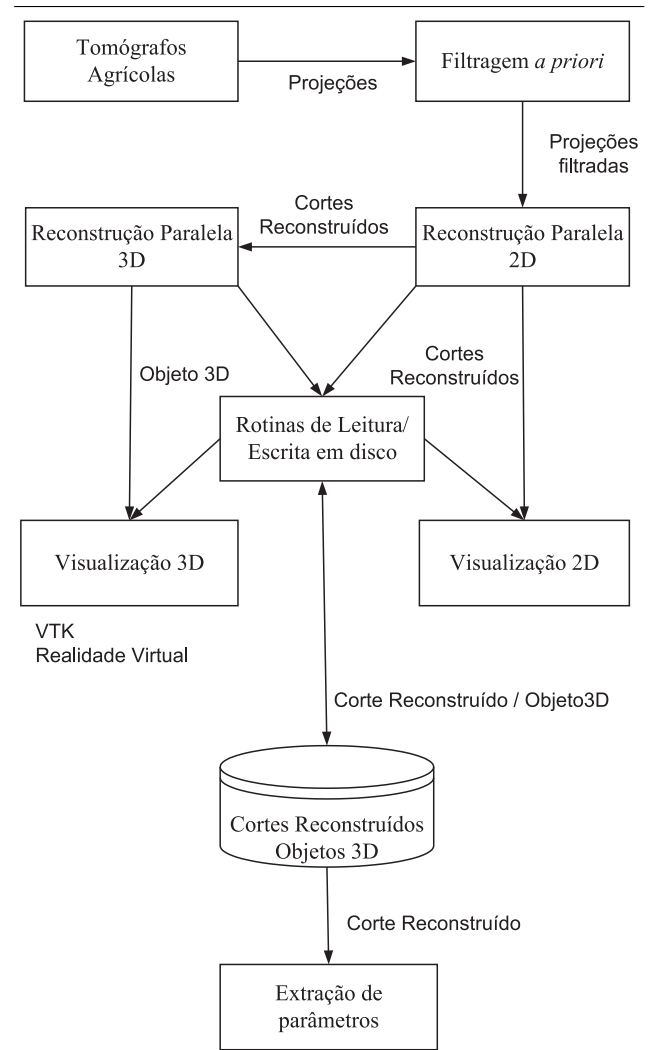


Figura 1. Modelo de reconstrução 3D e de visualização desenvolvido neste trabalho

está fundamentado na transformada de Radon [7].

A reconstrução por retroprojeção filtrada pode ser separada em duas equações. A primeira, responsável pela filtragem dos dados das projeções obtidas em cada ângulo θ , dada por :

$$Q_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(\omega) |\omega| e^{j\omega t} d\omega \quad (1)$$

onde $S_{\theta}(\omega)$ representa a transformada de Fourier convoluída com o filtro rampa no domínio da frequência. Depois de filtradas, as projeções são retroprojetadas para se obter uma função do objeto. A segunda (Eq. 2) apresenta a equa-

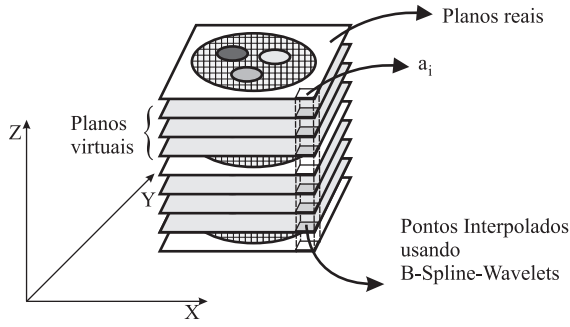


Figura 2. Diagrama ilustrando a inserção de planos virtuais entre planos reais na reconstrução tridimensional

ção de retroprojeção das projeções filtradas.

$$g(x, y) = \int_0^{2\pi} Q_\theta(x \cos(\theta) + y \sin(\theta)) d\theta \quad (2)$$

onde cada componente representa um pixel de coordenadas (x,y) na imagem reconstruída $g(x, y)$. Na forma discreta, a retroprojeção filtrada é apresentada por:

$$\hat{g}(x, y) = \frac{\pi}{K} \sum_{i=1}^K Q_\theta(x \cos(\theta_i) + y \sin(\theta_i)) \quad (3)$$

onde K ângulos θ são os valores discretos de θ para cada $P_\theta(t)$ conhecido.

Neste trabalho são utilizadas projeções obtidas de amostras de solo que foram coletadas pelos tomógrafos dedicados sob energia de 58 KeV, passo angular de 1° , passo linear 0.083 mm e tempo de aquisição de 4 segundos por amostra de projeção.

2.2. Reconstrução tridimensional

Uma função de aproximação Spline f de ordem m e passo μ é usada como função de aproximação e é dada pela Eq. (4) [23][14] :

$$f(\mu) = \sum_{i=-2}^{N+2} a_i \beta(N\mu - i) \quad (4)$$

onde N e a_i representam, respectivamente, o número de pontos conhecidos e os pontos reais extraídos dos planos reais reconstruídos, tal qual mostra a Figura 2. Nesta implementação, são utilizados dois pontos fantasmas antes do ponto inicial e dois pontos após o último ponto para garantir que a função B-Wavelet irá passar no primeiro e no último ponto [13].

De modo a otimizar o cálculo, a função $\beta(x)$, também chamada de função de *blending*, foi implementada neste trabalho como

$$\beta_m(x) = \begin{cases} \frac{1}{6}(2+x)^3 & -2 < x \leq -1 \\ \frac{1}{6}(4-6x^2-2x^3) & -1 < x \leq 0 \\ \frac{1}{6}(4-6x^2+2x^3) & 0 < x \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2-x)^3 & 1 < x < 2 \\ 0 & 2 \leq |x| \end{cases} \quad (5)$$

Para obter a função de interpolação, uma função de aproximação dada pela Eq. (6) foi utilizada.

$$f(\mu) = \sum_{i=-2}^{N+2} A_i \beta_m(N\mu - i) \quad (6)$$

onde A_i , denominados pontos de controle, substituem a_i . Esses pontos de controle são obtidos através da multiplicação $A = M^{-1}a$, onde M é dado por

$$M = \begin{bmatrix} \frac{N}{2} & -\frac{N}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\frac{N}{2} & \frac{N}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3. Modelagem de sistemas paralelos

A maioria dos problemas computacionais possui um conjunto variado de soluções que podem, no caso do desenvolvimento de um algoritmo paralelo, ser bastante diferentes das soluções sequenciais. Com isso, é importante levar em conta que paradigmas para sistema paralelos auxiliam na escolha de uma melhor forma de modelagem de problemas do mundo real em um conjunto de pequenos pedaços que reunidos atendem às necessidades impostas pelos problemas. A metodologia PCAM (*Partitioning, Communication, Agglomeration, Mapping*) [5], utilizada neste trabalho, mostra um paradigma de desenvolvimento de algoritmo paralelo baseado em quatro etapas:

1. Particionamento;
2. Comunicação;
3. Aglomeração;
4. Mapeamento.

A Figura 3 ilustra conceitos contidos em cada etapa. Basicamente, a metodologia consiste em dividir o problema em um conjunto de pequenas tarefas. Uma vez que isto tenha sido realizado, inicia-se a fase de comunicação, onde se

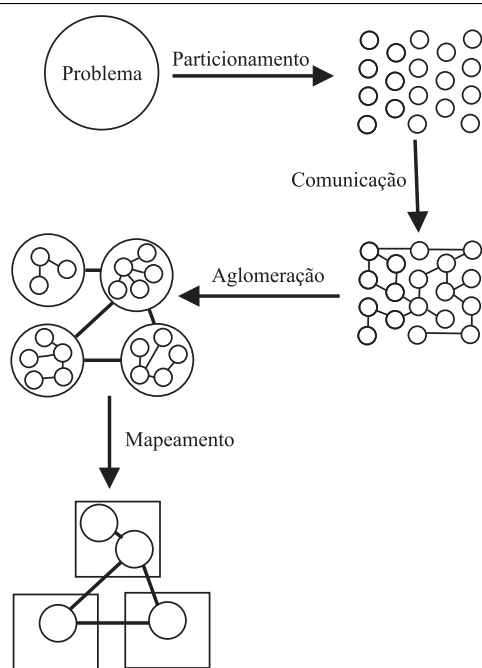


Figura 3. Modelo PCAM com as quatro fases para modelagem de um sistema paralelo

organiza a forma como estas tarefas irão trocar dados entre si. A fase de aglomeração consiste em agrupar as tarefas que tenham intensa comunicação em tarefas maiores e, finalmente, já com vistas ao tipo de máquina paralela que será utilizada. No mapeamento distribuem-se as tarefas entre os processadores disponíveis na máquina paralela.

2.4. Realidade Virtual

Neste modelo, a utilização de um ambiente de RV sobre o algoritmo de reconstrução é baseada em uma interface principal, desenvolvida como um controle principal, provendo acesso intuitivo para os usuários. Esta interface, através de frames independentes, é capaz de acessar tanto uma visualização completa da amostra reconstruída, quanto os diversos níveis de cinza que compõem suas partes, provendo uma análise individual das mesmas, através de operações de threshold. Todos os recursos utilizados na implementação das técnicas de RV foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Java e a API Java3D, a qual é baseada em estrutura hierárquica denominada Grafo de Cena, o qual se divide em subgrafo de visualização e subgrafo de conteúdo [20].

Para que as atividades desta fase possam ser iniciadas, torna-se necessária a utilização de métodos do pacote do VTK, descritos anteriormente, as quais são capazes de converter os arquivos que possuem as representações dos ob-

jetos tridimensionais, em formatos praticáveis em ambiente Java3D, possibilitando a implementação da classe importadora. Desta maneira, o objeto reconstruído tridimensionalmente e salvo no formato (.vtk) [9], é escrito sob o formato Wavefront File Format (.obj) [24].

Posteriormente, com os arquivos já preparados, uma nova classe será implementada, derivada da classe *Object-File*, a qual provê subsídios para trazer todas as características do modelo ao ambiente Java, utilizando-se de métodos pré-implementados, portáteis para a reutilização. Esta nova classe será capaz de importar o modelo completo, reconstruído e exportado sob o formato Wavefront, para o ambiente virtual, mantendo todas as suas características originais, tais como aparência (*Appearance*), material (*Material*) e geometria (*Geometry*).

Transformações físicas lineares foram escolhidas para serem inicialmente conectadas ao sistema, tais como rotação, translação, escala, reflexão e cisalhamento, definidas através de entradas por teclado e disponíveis para cada conjunto de dados do modelo.

No ambiente de visualização por RV, objetos Behavior foram instanciados para interpretar as ações dos usuários por eventos de entrada e traduzi-los em transformações de translação e rotação, disponíveis também para todos os modelos. Assim, a classe Behavior faz a conexão entre as interações e as reações, provendo mudanças no subgrafo de conteúdo.

Outro recurso acoplado ao sistema é a obtenção de informações dos voxels das amostras, que provê para os usuários informações a respeito de um ponto específico, através de seleção por mouse (*picking*). Os dados disponíveis para picking estão divididos em dois aspectos: aspectos de cena e tomográficos. Considerando o aspecto de cena, usuários podem obter informações como as fronteiras do modelo reconstruído, o número de subgrafos da cena, o modo de composição das geometrias da cena, a distância entre o modelo e o observador, as coordenadas do modelo e as coordenadas do vértice mais próximo. Sob o aspecto tomográfico, as informações disponíveis são os atributos de cor do modelo (RGBA e HSL), os atributos de material ou reflexão, o grau de transparência, o modo de renderização da geometria, tons de cinza do voxel e o coeficiente de atenuação linear de um ponto específico.

A manipulação e a obtenção de informações dos modelos também podem ser atingidas através da utilização de uma P5Glove [19]. Este dispositivo não convencional de entrada de dados tem seis graus de liberdade, permitindo que os usuários transladem e rotacionem tanto a cena virtual, como os modelos que nela se encontram, selecionando as representações desejadas de forma intuitiva e movendo-as por toda a cena sintética. Para este propósito, uma API e um *driver* específico foram adotados, responsáveis por fornecer subsídios para o comportamento da luva como um todo [8].

Comparado ao software do fabricante, o novo driver oferece filtragem de dados, maior precisão e melhor acesso às informações dos sensores.

Posteriormente, um sistema de luzes dinâmicas foi inserido em todo o contexto tridimensional, deixando o usuário escolher dentre quatro tipos de fontes de iluminação, tais como Ambiente, Direcional, Pontual e Pontual Angular. Cada fonte detém uma série de parâmetros, com influência direta sobre a direção, posição, atenuação, ângulos e cores das luzes envolvidas. Seus efeitos podem ser vistos sobre todos os modelos de dados, contribuindo para o realismo da cena.

Adicionalmente, a visualização por RV ainda permite que o usuário escolha a forma de renderização dos polígonos. Dentre as formas disponíveis estão: Faces, Arestas e Nuvem de Pontos.

Visando uma maior interatividade, uma das principais diretrizes de sistemas de RV, um sistema de cores em tempo real foi implementado. Através deste recurso, tanto um modelo completo quanto suas partes formadoras podem ser dinamicamente coloridos. As novas cores dos modelos são escolhidas através de uma paleta de cores bidimensional.

3. Resultados

3.1. Paralelização dos algoritmos de reconstrução 2D e 3D

O modelo desenvolvido implementa dois módulos para reconstrução 2D e 3D, que através de uma implementação paralela consegue explorar, de forma otimizada, as características das arquiteturas paralelas, acelerando o processo de reconstrução. Estes módulos podem ser utilizados em *clusters*, arquiteturas paralelas baseadas em processadores DSP ou em computadores baseados em processadores de múltiplos núcleos.

A organização dos algoritmos paralelos de reconstrução 2D é apresentada na Figura 4. No algoritmo paralelo de reconstrução 2D, a matriz de projeções, obtida durante o processo de varredura, é dividida igualmente entre os processos trabalhadores, os quais são responsáveis por realizar a filtragem e a retroprojeção dos pontos. Ao final do processo, os pontos retroprojetados por cada trabalhador são enviados ao processo gerente que é responsável por organizá-los em uma imagem reconstruída final.

A Figura 5(a), (b) e (c) apresenta o resultado da reconstrução tomográfica bidimensional paralela de amostras de solos, as quais foram utilizadas como cortes reais na reconstrução tridimensional paralela.

No algoritmo de reconstrução 3D paralelo, apresentado na Figura 6, o objeto 3D é dividido em blocos com planos reais, os quais são enviados a cada processo trabalhador, que fica responsável por inserir planos virtuais entre os pla-

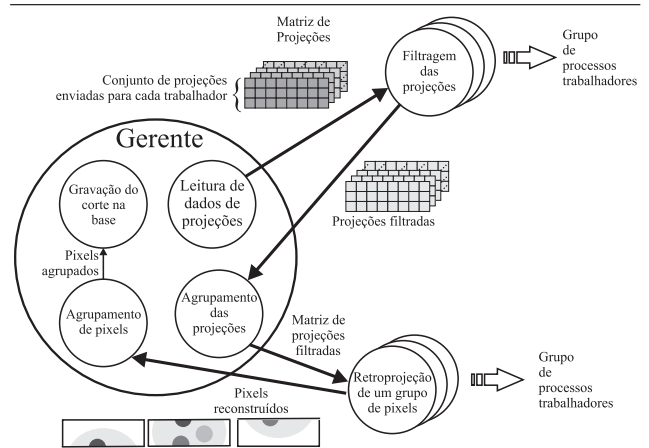


Figura 4. Tarefas da reconstrução paralela 2D

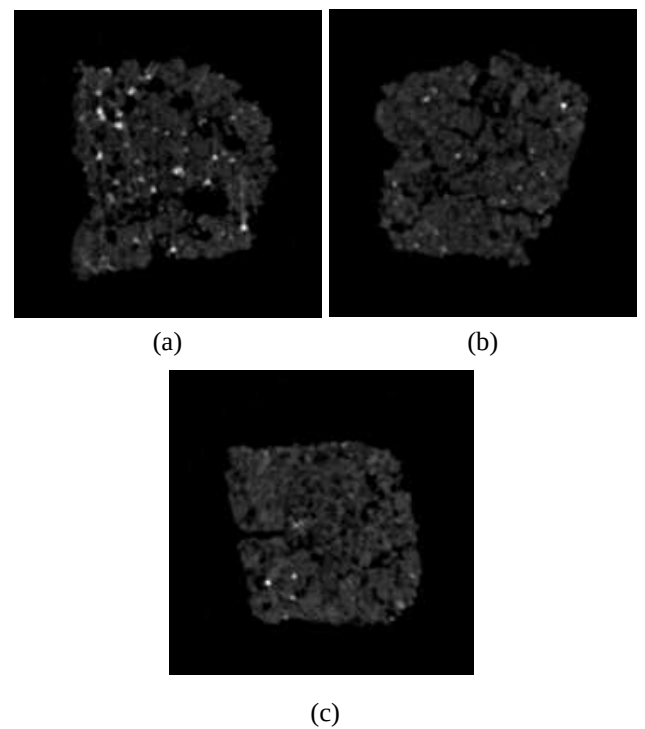


Figura 5. Imagens de solo reconstruídas pela algoritmo paralelo (a,b e c)

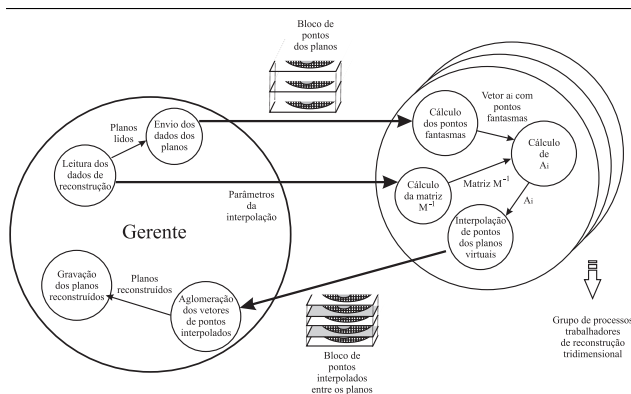


Figura 6. Tarefas da reconstrução paralela 2D

nos reais do seu bloco. A utilização do método de interpolação por B-Spline-Wavelets assegura, devido ao uso de informações de vizinhança, uma representação mais real das características de textura e acurácia dos coeficientes de atenuação, nos planos virtuais gerados. Quando cada processo trabalhador termina sua tarefa, todos os blocos são organizadas pelo processo gerente em um objeto 3D único.

3.2. Avaliação da correlação entre coeficiente de atenuação linear e tons de cinza do algoritmo paralelo de reconstrução 2D

Para avaliar a precisão do algoritmo paralelo de reconstrução 2D, buscou-se estabelecer a correlação existente entre as variáveis, o coeficiente de atenuação e os tons de cinza da imagem reconstruída. O coeficiente de correlação mede a relação existente entre as variáveis. Se o seu resultado estiver próximo de +1 ou de -1, isto indica que os dados se ajustam bem à reta estimada [22].

Na avaliação, utilizou-se um *phantom*¹ heterogêneo de *Plexiglass*², com 6 cm de diâmetro, que contém os elementos cálcio, fósforo, alumínio e água, como ilustra a Figura 7.

Para o processo de tomografia, usaram-se os seguintes parâmetros:

- 1 Amostra de calibração cujos elementos e seus respectivos coeficientes de atenuação linear são conhecidos *a priori*
- 2 Resina sólida de acrílico transparente de baixa atenuação que compõem os recipientes utilizados para abrigar amostras em ensaios tomográficos

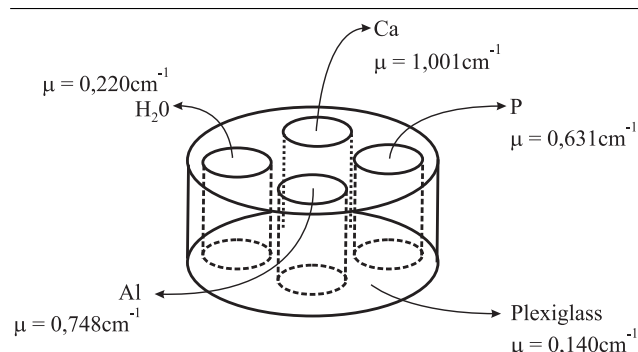


Figura 7. Phantom de calibração com os elementos Cálcio (Ca), Alumínio (Al), Fósforo (P), Água (H₂O) e Plexiglass

Translação total :	6 cm
Passo linear :	0,100 cm
Rotação total :	180°
Passo angular :	3,000°
Tempo de contagem :	10s
Fótons na região de feixe livre:	10.000
Energia:	60,0 keV

A partir das projeções obtidas com esses parâmetros, aplicou-se o algoritmo de reconstrução paralelo. Os valores de tons de cinza obtidos, para cada um dos cinco elementos, são apresentados na Tabela 3.2, juntamente com os valores de coeficiente de atenuação linear de cada elemento.

Elemento	Coeficiente de atenuação	Tons de cinza
Cálcio	1,001	232
Fósforo	0,748	173
Alumínio	0,631	130
Água	0,220	22
Plexiglass	0,140	11

Tabela 1. Tabela com os coeficientes de atenuação e os tons de cinza obtidos

A interface de visualização e a imagem reconstruída são apresentadas na Figura 8. Através dela é possível extrair valores de coeficiente de atenuação das amostras tomografadas.

Calculou-se, a partir desses valores, a correlação entre os coeficientes de atenuação e os tons de cinza da imagem reconstruída. O coeficiente de correlação encontrado entre as

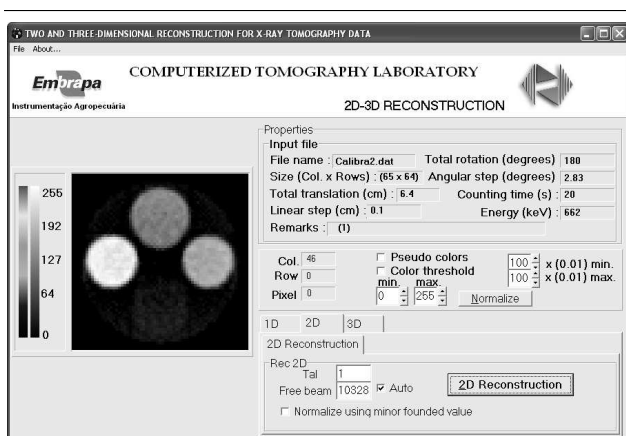


Figura 8. Janela do sistema que permite realizar a escolha da amostra tomográfica e a visualização dos cortes reconstruídos

duas variáveis foi de 0,996, mostrando que existe uma forte relação linear entre elas, tornando viável o ajuste de uma reta. Observa-se que a qualidade do ajuste da curva de calibração aos pontos observados possibilita uma boa representatividade do real coeficiente de atenuação na imagem reconstruída.

3.3. Ambientes de visualização tridimensional

Desenvolveu-se um ambiente de visualização tridimensional que tem por objetivo auxiliar a análise dos resultados e a precisão do algoritmo paralelo [17]. A ferramenta foi desenvolvida em ambiente *Windows*, utilizando o compilador *Borland Builder C++* versão 6, combinado com a biblioteca gráfica *VTK*, em sua versão 4.2, que foi compilada nesta mesma versão. A biblioteca *VTK* também fornece código-aberto para criação de um componente de renderização compatível com a biblioteca *VCL* do *Builder C++*, o qual pode ser inserido dentro da janela de visualização da ferramenta. A compilação deste código gera o componente de visualização *TvtkBorlandRenderWindow*.

A partir dos dados gerados pela reconstrução tridimensional, modelou-se um sistema de visualização para realização das análises que tem as seguintes funcionalidades:

- Visualização e interação com o objeto reconstruído;
- Conversão de arquivos de corte em arquivos *.vtk*;
- *Threshold* do objeto 3D, ajustando limiares mínimo e máximo;
- Visualização de cortes Sagitais, Coronais e Transversais, ao longo do eixo X, Y e Z, respectivamente;
- Criação de projetos de reconstrução;

- *Front-End* para execução dos algoritmos de reconstrução 2D e 3D.

A janela principal com a visualização de objetos tridimensionais é apresentada na Figura 9. Nela, é exibida uma imagem 3D de um torrão de solo que foi reconstruído utilizando os algoritmos paralelos de reconstrução tomográfica 2D e 3D.

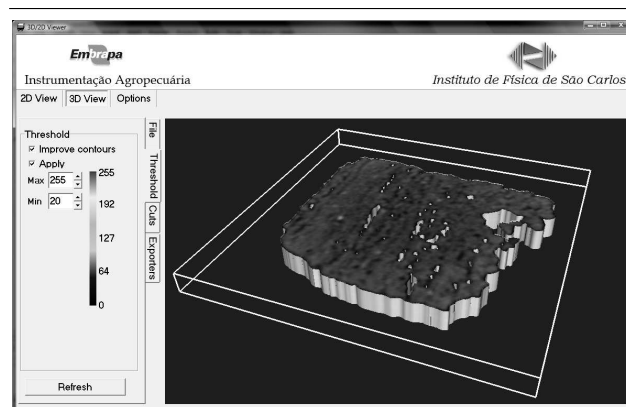


Figura 9. Interface do software de visualização onde é possível ao usuário interagir com o objeto reconstruído

A Figura 10 apresenta um corte transversal de um torrão de solo com 80 planos, do qual três medidas de coeficiente de atenuação linear foram extraídas através do modelo de visualização.

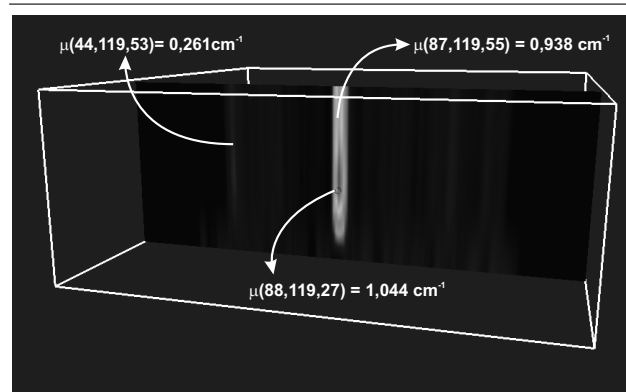


Figura 10. Medidas de coeficiente de atenuação linear de um torrão de solo, extraídas com a ferramenta

Considerando o ambiente de RV, a API Java3D adotada em todo o contexto interativo possibilitou a correta implementação dos recursos descritos e a construção do Grafo de Cena, representando todo o sistema e seus requerimentos.

De acordo com o processo de importação, o qual visa trazer a implementação da reconstrução tridimensional para o sistema de visualização por realidade virtual, o modelo reconstruído pode ser tratado por todos os conceitos anteriormente descritos. Assim, o modelo reconstruído, gravado sob o formato *Wavefront File Format* (.obj), pôde ser trazido ao sistema pelo *Loader*, preservando todas as características originais da amostra.

Visando uma completa manipulação dos objetos, as transformações físicas e a manipulação mostraram-se recursos amplamente interativos, transformando entradas de mouse e teclado nos *feedbacks* visuais esperados. Assim, através de novos parâmetros, o usuário pode esticar, mover e girar os modelos estaticamente. Paralelamente, todas as amostras podem ser rotacionadas, transladadas e escaladas para qualquer parte por meio de movimentos de mouse. Conforme o usuário escolhe o objeto na cena, a matriz de transformação é atualizada e exibida em tempo real, além dos outros dados disponíveis.

O modelo apresentou informações precisas e práticas através de seleções por mouse, uma vez que traz à cena, através de instâncias *PickCanvas* e *PickResult*, a informação exata sobre um *voxel* específico, sob os dois aspectos mencionados. A operação de *picking* estabiliza um nível de coordenada z na tela e deixa o usuário selecionar o ponto de forma bidimensional, de maneira intuitiva. A Figura 11 apresenta o resultado da obtenção de informações de uma amostra de solo degradado. A utilização da P5Glove demonstrou resultados satisfatórios, provendo ao usuário informações precisas sobre a posição e a orientação do dispositivo, mesmo sem a calibração original fornecida. Conjuntamente, os usuários podem navegar facilmente por simples movimentos de mão, alterando o subgrafo de visualização em tempo real e analisando os *voxels* do mesmo modo como quando se utiliza o mouse.

Através do sistema de iluminação, todas as luzes da presente visão puderam ser alteradas em tempo real, obtendo concisos *feedbacks* visuais. Dependendo da refletância da superfície dos objetos, os efeitos dos parâmetros das fontes de luz podem variar, e como consequência, alterar o resultado final. Desta maneira, a disponibilidade de tais parâmetros pode também mudar, condicionada à escolha da fonte. A Figura 12 apresenta os resultados da iluminação Ambiente (a); iluminação Direcional(b). A Figura 13 apresenta iluminação Pontual (a) e (b) iluminação Pontual Angular (b), todas com cores randômicas.

O sistema de cores também contribuiu para a interatividade do sistema, uma vez que traz a possibilidade de alterar a aparência dos modelos em tempo real, retornando in-



Figura 11. Resultado da extração de atributo de uma amostra de solo

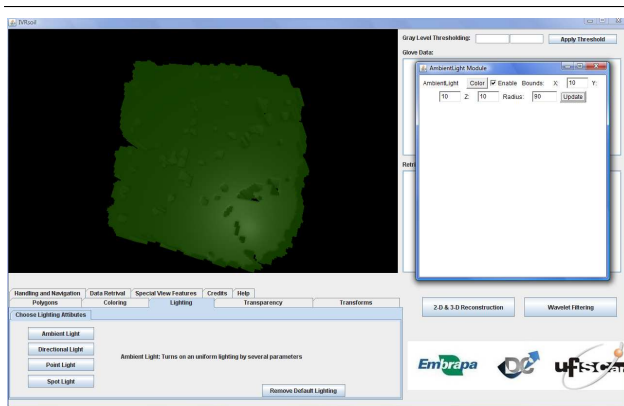
formações e respostas visuais esperadas. A interface principal provê a paleta de cores e permite ao usuário escolher a cor desejada de forma rápida e funcional. A Figura 14 mostra o resultado da aplicação do sistema de cores.

Por meio das novas opções de renderização, é fornecida uma visão analítica dos modelos na cena, permitindo aos usuários examinar os pontos e linhas gerados pelo algoritmo de reconstrução, especialmente os estimados. A Figura 15 mostra o resultado da escolha de renderização.

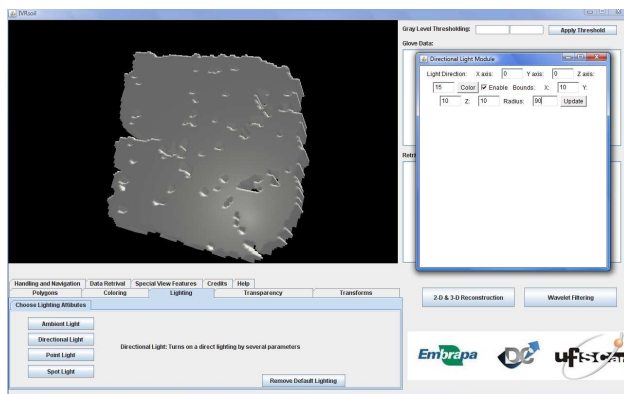
4. Conclusões

Os resultados demonstraram que a aplicação de algoritmos paralelos para reconstrução de imagens tomográficas contribuiu para o desenvolvimento do modelo no sentido de explorar, de forma otimizada, as características dos *hardwares* paralelos. O modelo de reconstrução paralela apresentou robustez e flexibilidade em diferentes arquiteturas paralelas. A forte correlação entre tonalidade de cinza e coeficiente de atenuação demonstrou a qualidade do algoritmo paralelo e da filtragem *a priori* na representação dos dados das amostras agrícolas.

Com relação aos resultados relacionados ao ambiente de visualização com VTK, este apresenta interatividade para análise de amostras tomográficas de solos. Ademais, permite a extração de atributos tais como coeficiente de correlação linear e densidade das amostras agrícolas.



(a)

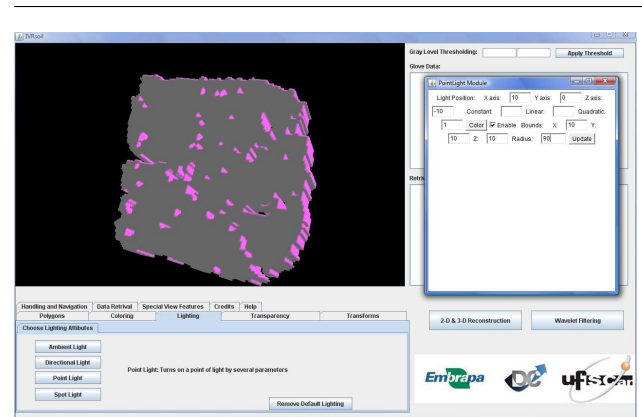


(b)

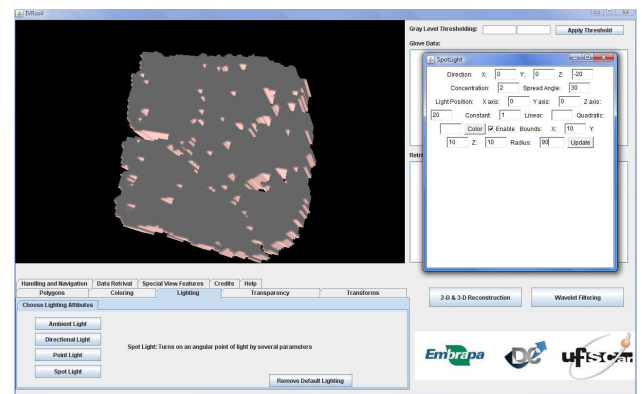
Figura 12. Resultados obtidos da aplicação do sistema de iluminação e seus respectivos parâmetros. (a) Ambiente: Fronteiras = (10, 10, 10); Raio = 90; (b) Direcional: Direção = (0, 0, 15); Fronteiras = (10, 10, 10); Raio = 90.

Com relação aos resultados do ambiente RV, eles demonstraram os *feedbacks* interativos esperados, considerando a manipulação por mouse, teclado e a luva de dados, bem como todos os processos de iluminação, renderização e colorização, os quais são cruciais para um ambiente sintético destinado à análise de modelos reais. O próximo passo será a incorporação de um vídeo-capacete ao modelo de visualização, visando atingir a imersão.

Desta maneira, nota-se a contribuição da utilização de ambientes interativos em processos não invasivos de análise e inspeção de amostras agrícolas reais. Através de tais ambientes, características internas e intrínsecas das amostras puderam ser extraídas e visualizadas, de forma mais realista que processos bidimensionais.



(a)



(b)

Figura 13. Resultados obtidos da aplicação do sistema de iluminação e seus respectivos parâmetros. (a) Pontual: Posição = (10, 0, -10); Atenuação Quadrática = 1; Fronteiras = (10, 10, 10); Raio = 90; (b) Pontual Angular: Direção = (0, 0, -20); Concentração = 2; Ângulo de Espalhamento = 30; Posição = (0, 0, 20); Atenuação Constante = 1; Fronteiras = (10, 10, 10); Raio = 90

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e Embrapa Instrumentação Agropecuária pelo apoio financeiro ao projeto.

Referências

- [1] L. Aylmore and J. M. Hainsworth. The use of the computed-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal Soil Res*, 21(4):435–443, 1983.

- [2] R. A. Bolt. Put-that-there: Voice and gesture at the graphics interface. In *7th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 262–270, Washington, 1980.
- [3] S. Crestana. *A Tomografia Computadorizada com um novo método para estudos da física da água no solo*. Doutorado, Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.
- [4] E. Ferreira, A. S. de Resende, F. Balieiro, L. Zotarelli, L. A. da Silva, M. Bacis, M. A. Alfaro, B. J. R. Alves, and S. Urquiaga. Avaliação de diferentes tubos de acesso para medição da umidade do solo através do uso de sonda de nêutrons. Technical report, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Agrobiologia, Seropédica - RJ, Novembro 1998.
- [5] I. Foster. Designing and building parallel programs. Disponível on-line em <http://www-unix.mcs.anl.gov/dbpp>, setembro 2005.
- [6] L. Jacobson. *Garage Virtual Reality*. SAMS Pub, Indianapolis, Jan 1994.
- [7] A. C. Kak and M. Slaney. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. IEEE Press, New York, 1999.
- [8] C. Kenner. Essential reality p5glove summary: Dual mode driver programming. Available at http://www.geocities.com/carla_kenner/p5.html, 2007.
- [9] Kitware Inc. *VTK 5.0.2 Documentation*, 2007.
- [10] J. Lanier. Visual programming languages. *Scientific American*, 1984.
- [11] A. Macedo, C. M. P. Váz, J. M. Naime, L. A. C. Jorge, S. Crestana, P. E. Cruvinel, J. C. D. Pereira, M. F. Guimarães, and R. Ralisch. *Soil Management Impact and Wood Science - Recent Contributions of Embrapa Agricultural Instrumentation Center Using CT Imaging*, pages 44–56. Embrapa - Agricultural Instrumentation, 2000.
- [12] C. Machover and S. Tice. *Virtual Reality*, volume 15. Jan 1994.
- [13] E. R. Minatel. *Modelo computacional baseado em técnicas Wavelets para relacionar imagens digitais obtidas em diferentes escalas e resoluções*. PhD thesis, Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [14] E. R. Minatel and P. E. Cruvinel. Three-dimensional reconstruction and visualization of tomographic images system applied to soil analysis using b-wavelets. In E. CNPDIA, editor, *Advances in Agricultural Tomography*, pages 120–124. Paulo E. Cruvinel and Luiz A. Colnago, São Carlos, Dezembro 2000.
- [15] E. F. S. Montero and D. J. Zanchet. Realidade virtual e a medicina. *Acta Cirurgica Brasileira*, 18(8):489 – 490, 10 2003.
- [16] A. Pedrotti, E. A. Pauletto, S. Crestana, P. E. Cruvinel, C. M. P. Vaz, J. M. Naime, and A. Macedo. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um planossolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(7):819–826, jul 2003.
- [17] M. F. L. Pereira. *Um modelo de reconstrução tomográfica 3D para amostras agrícolas com filtragem de Wiener em processamento paralelo*. PhD thesis, Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, Junho 2007.
- [18] K. Pimentel and K. Teixeira. *Virtual Reality - through the new looking glass*. McGraw-Hill, New York, 2nd edition, 1995.
- [19] E. Reality. P5glove specification. Available at <http://www.inition.com>, 2007.
- [20] I. Sun Microsystems. Java 3d 1.3 api documentation. Available at <http://java.sun.com/products/javamedia/3D>, 2006.
- [21] C. F. A. Teixeira, S. O. Moraes, and M. A. Simonete. Desempenho do tensiômetro, tdr e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:161–168, 2005.
- [22] S. M. Vanni. *Modelos de Regressão: Estatística Aplicada*. Legmar Informática & Editora Ltda, São Paulo, 1998.
- [23] L. Velho and K. Perlin. B-spline wavelet paint. *Revista de Informática Teórica e Aplicada (RITA)*, IX(2):100–119, Outubro 2002.
- [24] Wavefront. *Wavefront File Format Specification*. Wavefront Tech, 2006.

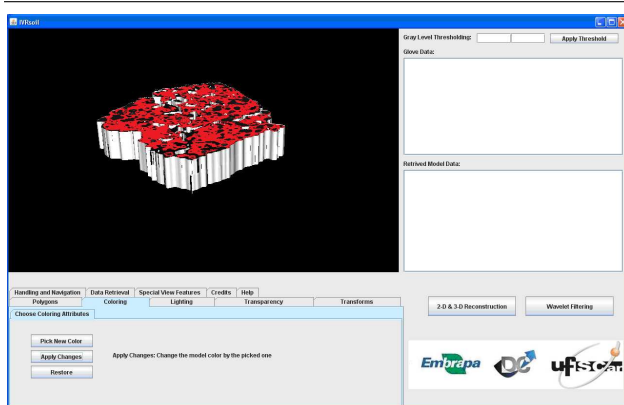


Figura 14. Resultado da aplicação do sistema de cores

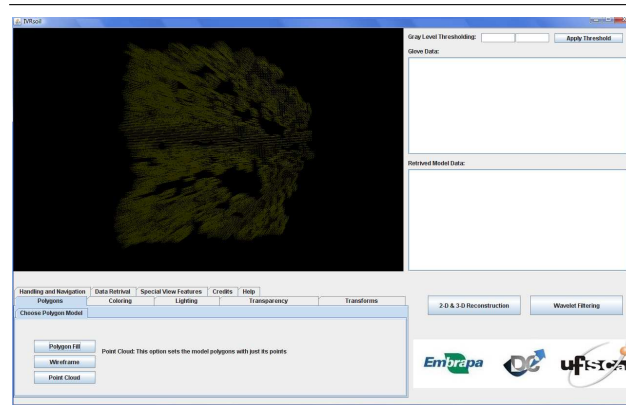


Figura 15. Resultado da aplicação de nuvem de pontos sobre uma amostra de solo