

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Hidráulica e Saneamento
Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental

Tseng Chien Ling

Tomografia Computadorizada de Raios-X Aplicada à Análise da Qualidade Ambiental de Solo no Entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira - SP

São Carlos

2013

Tseng Chien Ling

Tomografia Computadorizada de Raios-X Aplicada à Análise da Qualidade Ambiental de Solo no Entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira - SP

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental

Área de concentração: Aplicações das Ciências Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Silvio Crestana

VERSÃO CORRIGIDA, a versão original está disponível na EESC

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ling, Tseng Chien

L755t Tomografia computadorizada de raios-X aplicada à análise da qualidade ambiental de solo no entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira - SP / Tseng Chien Ling; orientador Silvio Crestana. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Tomografia computadorizada (CT). 2. Recuperação do solo. 3. Densidade do solo. 4. Porosidade do solo. 5. Análise de imagens. 6. Conectividade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Licenciada **TSENG CHIEN LING**.

Título da dissertação: "Tomografia computadorizada de raios-x aplicada à análise da qualidade ambiental de solo no entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira - SP".

Data da defesa: 07/02/2013

Comissão Julgadora:

Dr. **Silvio Crestana (Orientador)**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Prof. Associado **Francisco Arthur da Silva Vecchia**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Dr. **Carlos Manoel Pedro Vaz**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:
Prof. Dr. **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Ao meu irmão Yao Hsing, pelo total apoio e, principalmente, aos meus queridos pais Hui Ping e Hsiu Shih, pelo amor e constantes ensinamentos.

Agradecimentos

A Deus, fonte criadora do Universo, por ter sempre me preparado os melhores e mais surpreendentes caminhos.

Ao Dr. Silvio Crestana, por ter me proporcionado esta oportunidade de aprendizado e acreditado na minha capacidade de evolução, sempre me incentivando e mostrando como me tornar uma verdadeira cientista e, principalmente, pela sua amizade, paciência, conselho, orientação e apoio à realização desse trabalho. Agradeço ainda pelos momentos de reflexões cefaléicas, mas como dizia Albert Einstein: "A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.". É realmente um grande exemplo de professor, cientista que eu admiro e que me serviu de modelo.

À Embrapa Instrumentação Agropecuária - Unidade de São Carlos -SP, pelo espaço, equipamento e conforto para realização do presente trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, por meio do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, pela oportunidade de aprendizagem e crescimento.

À Faculdade de Odontologia da UNESP, Campus de Araraquara - SP, pela concessão do uso de microtomógrafo de raios-x desta pesquisa.

À Dra. Marlene Cristina Alves, da UNESP, Campus de Ilha Solteira -SP, pela amizade, a disposição e a ajuda na realização deste trabalho e, principalmente, pelo seu incentivo e exemplo de pesquisadora, pois vejo nela a paixão e a persistência naquilo de que gosta.

À Wilma Regina Barrionuevo e a Iandara Alves Mendes, duas batalhadoras, que considero, carinhosamente, como minhas tias brasileiras, por terem me encorajado a buscar e concretizar meu sonho de fazer mestrado e corrigir meus textos sempre que necessário.

Ao Dr. Francisco Vecchia e seu grupo de pesquisa, pela sua amizade e troca de experiências de vida. Sempre me acolheram na estação climatológica do CRHEA com muito carinho, disposição e boas energias.

À Dr. Carlos Manuel Pedro Vaz, Paulo Renato Orlandi Lasso e Luiz Francisco de Mattêo Ferraz, pelas informações e ajuda técnica do uso de microtomógrafo de raios-x e também pela disponibilidade e solicitude.

À Dra. Adriana Chierici Marcantonio, da Faculdade de Odotologia UNESP, Campus de Araraquara - SP, pela ajuda na realização do experimento em tempo hábil.

À Grace Tibério Cardoso e Caroline Galharte pela amizade, constantes apoios, momentos de descontração, sempre socorrendo, incondicionalmente, meus desesperos na correção de português dos meus textos.

À Luana Elis Sabino, estagiária da Faculdade de Odontologia UNESP, Campus de Araraquara - SP, pela sua boa vontade e auxílio durante os dois meses de experimento e, principalmente, pela sua amizade e exemplo.

À Aline Patrícia Sala (Line), Pedro Machado Meyer (Pê), Mariane Elizabeth Sakai (Má), Yu Fang Wang (Cris), Mariangela Spadoto (Mari), Theodoro Monteolone De Oliveira (Théo), Luís Eduardo Godoi (Seringa), Diogo Santos Ortiz Correa, José Teixeira da Silva Junior (Cabeça) e César Augusto Degiato Jotta pela amizade, carinho e, principalmente, pelos inúmeros momentos de apoio e incentivo além de exemplos de vida.

Ao Daniel Bartolomeu e Carlos Eduardo Candido Pereira, pela sua disposição, paciência, cuidado e carinho na correção e revisão do presente trabalho.

Ao Nelson e José Chiaretto, da secretaria de PPG-SEA, pela sua disposição e boa vontade em responder e resolver todos os problemas de documentos no decorrer do mestrado.

À Angela Giampetro, professora do Centro Cultural da EESC, pela ajuda na tradução e aprendizado do idioma inglês.

Aos meus queridos pais, Hui Ping e Hsiu Shih, pelo seu amor incondicional, carinho, exemplo de vida e, principalmente, por suas preocupações e ensinamentos incessantes em transmitir-me bons valores e condutas, além da imensa sabedoria de me mostrar como enxergar a vida além dos olhos, sempre acreditando que eu sou capaz de ir além do horizonte.

Ao meu irmão, Yao Hsing, por ser meu irmão de sangue, do coração e da alma, pelas suas palavras sábias, alegria contagiante e postura otimista em todos os momentos em que eu mais

precisei. À minha prima Yu Shan, pela sua amizade, companheirismo e carinho durante sua estadia no Brasil.

Ao meu tio e tia, Jei e Lai, por serem pessoas tão amadas que apesar da grande distância física, sempre me incentivaram e me apoiaram nos estudos e me proporcionaram momentos inesquecíveis quando estivemos juntos.

Ao André Luiz Ferraz Lourenço, uma surpresa maravilhosa em minha vida, pelo companheirismo, compreensão, apoio, paciência, doçura e amor. Sempre mostrando-me a importância da insistência e a firmeza naquilo que amo, assim como seu constante entusiasmo pela vida.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Por fim, agradeço a todos os citados acima e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para este trabalho, pois sem eles eu não teria realizado esse sonho tão importante na minha vida nem obtido mais força para continuar nesse caminho.

O Mestre disse: "O Homem Nobre ao se alimentar não procura se saciar. Não exige conforto, ao morar. É laborioso em seu trabalho. É cuidadoso ao se expressar. Aproxima-se dos [homens] que seguem o Caminho para corrigir [seus próprios defeitos]. Pode-se dizer que ele, de fato, gosta de Estudar."

Resumo

TSENG, C. L. **Tomografia computadorizada de raio-x aplicada à análise da qualidade ambiental de solos, no entorno da usina hidrelétrica de Ilha Solteira (SP)**. 2013. 97f. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O processo de recuperação das terras degradadas pela pecuária, principalmente no Brasil, tornou-se uma solução incontestável para atender à necessidade alimentar não somente do país, mas também mundial. Com o fim de avaliar a qualidade física de recuperação de áreas degradadas, propõe-se neste trabalho, aplicar o método de Tomografia Computadorizada de Raios-X (T.C.), mais precisamente o uso de um microtomógrafo não médico. As amostras de solo foram coletadas no entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (SP) e pastagens do MS. Foram selecionados seis tratamentos de solo para a aplicação de procedimentos técnicos: um ocupado por vegetação nativa (Cerrado), um de pastagem recuperada, um de pastagem degradada, outro de solo tratado com *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves) + *Brachiaria decumbens* + Lodo de esgoto, um de solo degradado/decapitado e um último de solo recuperado. Inicialmente, foi feito um estudo básico sobre os fundamentos da Física do Solo, o método de Tomografia Computadorizada e as técnicas de recuperação de solo. Em seguida foram obtidas as imagens tomográficas por meio de microtomógrafo e de software NRCon, pertencentes à Embrapa Instrumentação e à Faculdade de Odontologia da Unesp - Araraquara. Assim, baseado nessas imagens, foi utilizado o software CT-Analizer para a obtenção dos atributos físicos como densidade, tamanho dos agregados e porosidade, que são fundamentais para avaliação de qualidade ambiental de solo. Como resultado desse trabalho foram observadas diferenças qualitativas e quantitativas dos seis tipos de solo por meio das análises de imagem e, posteriormente, comparado com os resultados obtidos pelo método convencional. Por último, foi construído um modelo tridimensional para visualizar o interior das amostras de solo. Dessa forma, o trabalho mostrou a potencialidade e a aplicação do método de T.C. nas investigações de solo, em particular nos indicadores de qualidade física e ambiental dos solos estudados.

Palavras-chave - Tomografia computadorizada (CT). Recuperação do solo. Densidade do solo. Porosidade do solo. Análise de imagens. Conectividade.

Abstract

TSENG, C. L. **X-ray computed tomography applied to the analysis of the environmental quality of soil at usina hidrelétrica de Ilha Solteira (SP)**. 2013. 97f. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

The process of recovery of land degraded by livestock, mainly in Brazil, has become an incontestable solution to meet the needs of national and international food. This dissertation reports on the application of the X-ray Computed Tomography, more precisely a non-medical microtomograph, to the analysis of the physical quality of soils in the degraded area recovering. The soil samples were collected in the surroundings of Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (SP) and pastures in MS. Six sites were selected for the application of the technical procedures: a portion occupied by native vegetation (cerrado), a recovered pasture, a degraded pasture, a pasture treated with *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves)+*Brachiaria decumbens*+sewage sludge, a pasture of degraded/beheaded soil and a recovered soil. Initially, a theoretical study of the Soil Physics, the Computerized Tomography method and the techniques of soil recovery was conducted. The tomographic images were obtained by means of a microtomograph and NRCon software from Embrapa Instrumentação and UNESP Dentistry School - Araraquara. The CT-Analyser software was used to obtain the physical attributes, such as density, porosity and size of aggregates, which are fundamental to evaluate the physical characteristics of the soil. The image analysis showed qualitative and quantitative differences in the six types of soil and the results were compared with those obtained by the conventional method. A tridimensional model was constructed to show the interior of the soil samples. The study has proved the potential and application of the C.T. method to the soil investigations, especially in the indicators of the physical and environmental quality of the soils studied.

Keywords: Computed Tomography (CT). Soil recovery. Soil density. Soil porosity. Image analysis. Connectivity.

SUMÁRIO

1	Introdução	21
2	Objetivos	25
2.1	Objetivo geral.....	25
2.2	Objetivos específicos.....	25
3	Revisão Bibliográfica.....	27
3.1	Os princípios de tomografia computadorizada e a teoria de reconstrução de imagem	27
3.1.1	Uma breve história de tomografia computadorizada	27
3.1.2	Os princípios de funcionamento de um microtomógrafo de raios-x e a Teoria de Reconstrução de Imagem.....	29
3.2	Impactos das atividades agrícolas no solo.....	31
3.3	Métodos de recuperação: lodo de esgoto e adubação verde.....	32
3.4	Fundamentos da qualidade física do solo.....	33
3.5	Aplicações da técnica de tomografia computadorizada nas atividades agrícolas	35
3.6	A reconstrução de imagens tridimensionais (3D) para estudo de solo.....	36
4	Metodologia	37
4.1	Áreas de estudo	37
4.2	Procedimentos metodológicos.....	39
4.2.1	Coleta de amostras	39
4.2.2	Obtenção de densidade do solo	41
4.2.3	Aquisição e reconstrução de imagens bidimensionais (2D).....	41
4.2.4	Calibração de densidade das imagens por meio de Unidade de Hounsfield	45
	Procedimento II - Calibração de outras medidas por meio de CT-Analyser.....	47
4.2.5	Determinação dos atributos físicos em função das imagens tomográficas: densidade do solo, porosidade e tamanho dos agregados	48
4.2.5.1	Densidade do solo (ρ).....	48
4.2.5.2	A distribuição de tamanho dos agregados	51
4.2.5.3	Porcentagem de porosidade (%).....	52
4.2.6	Reconstrução de modelos tridimensionais (3D).....	52
5	Resultados e discussões.....	55
5.1	Método de tomografia computadorizada aplicado ao solo.....	55
5.1.1	Qualidade de imagens tomográficas e suas resoluções	55
5.1.2	As vantagens e desvantagens entre o microtomógrafo <i>Skyscan</i> modelo 1172 e 1176.....	57
5.1.3	Aplicação do software de <i>NRCon</i> na padronização de contraste das imagens tomográficas.....	59
5.2	Contribuição dos atributos físicos na qualidade ambiental do solo	60

5.2.1 Densidades.....	60
5.2.2 Distribuição de tamanhos dos agregados.....	64
5.2.3 Porosidade	71
5.3 Comparação entre os métodos de tomografia computadorizada e convencional	73
5.3.1 Distribuição de tamanho dos agregados	73
5.3.2 Porosidade	74
5.3.3 Visualização qualitativa das estruturas internas do solo.....	75
5.3.3.1 Plano Transversal	76
5.3.3.2 Plano Sagital.....	76
5.3.3.3 Plano Coronal	77
5.3.3.4 Camadas diferentes.....	77
5.4 Contribuição do modelo 3D nos estudos de solo.....	80
5.5 Novas oportunidades para uso de microtomógrafo de raios-x na investigação de solo	85
6 Conclusão	87
7 Sugestões	89
Referências	91

1 Introdução

Nas últimas décadas a economia brasileira foi caracterizada pelo seu rápido crescimento que, neste momento, é considerada como uma das maiores economias do mundo. Nota-se ainda que o agronegócio sozinho representa 22% do Produto Interno Bruto (PIB) nesse contexto, segundo Portal Brasil (2011).

Vale a pena ressaltar aqui, que esse crescimento econômico do país está intrinsecamente ligado à enorme demanda de alimentos pelo mundo. Atualmente, o país lidera o estoque de alimentos no mundo. Isso significa que o país, além de garantir seu próprio consumo, fornece o seu excedente para contribuir com a segurança alimentar do mundo. Dessa forma, o Brasil passa a ser um dos maiores produtores de alimentos e de commodities agrícolas (FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO, 2011).

Se o Brasil conseguiu alcançar esse resultado foi devido a seus privilégios em recursos naturais. No entanto, sabe-se que os recursos naturais, mais especificamente o solo, tem um limite para exploração, uma vez que, se for ultrapassado, o processo passa a ser irreversível no meio ambiente, ou seja, jamais será recuperado o seu estado inicial o que inviabiliza um desenvolvimento sustentável.

Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2006), 50% da área agricultável do país tem o seu uso ligado a pastagem. Porém, segundo a Secretaria de Assuntos Estratégicos (Agricultura brasileira no século XXI, 2009), "são cerca de 200 milhões de hectares sem utilização ou ocupados por pecuária altamente extensiva e de baixa produtividade, uma área equivalente a três vezes o total da superfície atual ocupada por lavoura".

Para promover a sustentabilidade do meio ambiente e assegurar a segurança alimentar do país e do mundo, será imprescindível, sobretudo, o estudo de processos físicos que ocorrem no interior do solo. A compreensão das funcionalidades estruturais desse recurso natural será fundamental para a recuperação das áreas degradadas. Somente após os procedimentos para recuperação terem sido concluídos com sucesso é que haverá a minimização de possíveis impactos ambientais, proporcionando aumento da produção agrícola e a conservação do meio ambiente.

Dessa forma, o presente trabalho pretende demonstrar a importância e as aplicações do método de tomografia computadorizada (TC), mais especificamente um microtomógrafo de raios-x, no estudo e na análise das qualidades físicas do solo.

A partir desde capítulo serão estabelecidas os principais tópicos relacionados ao estudo e à metodologia dessa técnica de TC, com o intuito de gerar resultados e discussões relacionados, assim como as futuras contribuições do estudo à realidade física do meio ambiente.

No capítulo 2, são definidos os principais objetivos do estudo, cujo propósito é mostrar uma cooperação dos estudos no laboratório com o problema real do meio ambiente, qualitativamente e quantitativamente.

No capítulo 3, é feita uma revisão sobre os princípios de funcionamento do método de TC, sua história e os princípios de reconstrução de imagem, assim como os conceitos relacionados ao método de recuperação adotado por Kitamura et al. (2008), Dos Santos Batista Bonini e Alves (2011) e qualidade física do solo. Finalizando, faz-se uma pequena revisão sobre as aplicações da técnica de TC no campo e a escassez de estudo de solo em tridimensão (3D).

No capítulo 4, entra a parte de metodologia desta pesquisa. Primeiramente será descrito o local de estudo selecionado, sua importância num estudo de qualidade física do solo, a seguir, como foram obtidos os atributos físicos a partir das imagens tomográficas e manipulação de softwares e, por fim, como esses dados foram reutilizados na construção de um modelo em 3D, que serve como uma importante ferramenta para a decisão sobre os processos de recuperação de solo.

No capítulo 5, serão abordados os resultados obtidos no capítulo 4, o que vai proporcionar uma discussão baseada na correlação desses dados com a realidade do que ocorre na natureza. Em primeiro lugar, será apresentado como foi usada a técnica de TC neste estudo, a caracterização e a manipulação do equipamento e do software. Em segundo, uma comparação qualitativa e quantitativa entre os métodos convencionais da obtenção de atributos físicos e o método de TC, que é não invasiva e não destrutiva. Além disso, o estudo traz ainda a visualização física da realidade em 2D e sua simulação em 3D. Por fim, abre possibilidades de novos estudos do uso de microtomógrafo de raios-x na investigação de solo.

Finalmente, no capítulo 6, são propostas as principais conclusões deste estudo e, no capítulo 7, as sugestões para futuras pesquisas sobre os recursos do solo no meio ambiente. Sabe-se que o meio ambiente é realmente um sistema dinâmico e complexo, com muitas incógnitas ainda a serem descobertas. Para se promover um desenvolvimento sustentável no Brasil são necessários incessantes esforços e muito trabalho dos cientistas para compreender melhor a Natureza, contando com a colaboração dos gestores e dos tomadores de decisão, a fim de que surjam soluções cada vez mais apropriada à realidade ambiental, social e econômica do país.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

- A partir da aplicação do método de Tomografia Computadorizada, estabelecer diferenciações dos atributos físicos, mais especificamente a densidade global média, a porosidade e o tamanho dos agregados de solos sob diferentes usos. Embora haja ainda outros atributos químicos e biológicos, porém, tais atributos físicos constituem alguns dos principais indicadores de qualidade física do solo.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar o potencial da tomografia computadorizada e de softwares de reconstrução de imagem na determinação de alguns atributos físicos do solo.
- Realizar uma comparação qualitativa e quantitativa entre métodos convencionais de análise do solo, realizado por Kitamura et al. (2008) e Dos Santos Batista Bonini e Alves (2011), e o método não convencional, de imagens obtidas através da microtomografia de raios-x.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Os princípios de tomografia computadorizada e a teoria de reconstrução de imagem

3.1.1 Uma breve história de tomografia computadorizada

Em 1895, quando Wilhelm Conrad Röntge descobriu o raio-x, mesmo não sabendo qual a sua importância, tal descoberta ficou marcada como o início de uma nova era para inúmeras áreas de pesquisa da ciência. Dentre essas áreas estão: medicina, biologia, física, química dentre outras.

Sessenta e um anos depois, em 1956, Allan McLeod Cormack, que foi convidado para assumir o cargo de físico responsável no Hospital Groote Schuur, na cidade do Cabo, percebeu a importância de encontrar uma solução para medir os coeficientes de atenuação dos meios heterogêneos, especialmente do corpo humano. No entanto ele desconhecia qualquer trabalho relacionado esse assunto. E Cormack (1963, 1964) formulou uma solução para caracterizar o coeficiente de atenuação ao longo do corpo humano atravessado por feixes monoenergéticos, a partir de integrais de linha. Dessa forma, tornou-se possível obter informações detalhadas do corpo humano e melhorar as aplicações da radiologia e da radioterapia.

Vale ressaltar o trabalho anterior realizado por Radon (1917), que Cormack não teve oportunidade de conhecer, para o problema que correlacionava descrição de imagem no espaço n-dimensional a partir das integrais de linha.

Em 1967, Godfrey Newbold Hounsfield desenvolveu o primeiro tomógrafo computadorizado do mundo. Em 1968, ele descreveu seu equipamento em seu pedido de patente que lhe foi concedido em 1972 (SILVA et al., 2007). Posteriormente, Hounsfield produziu fundamentais trabalhos sobre o tomógrafo, tanto assim que foi citado pela Nobel Assembly of Karolinska Institute como contribuinte central da tomografia computadorizada.

Posteriormente, em 1979, os trabalhos de Cormack e o de Hounsfield foram laureado com prêmio Nobel de Medicina pelo desenvolvimento da Tomografia Assistida por Computador (TAC ou CAT) ou também conhecida como Tomografia Computadorizada (TC) (SILVA et al., 2007).

Inicialmente, a tomografia era apenas usada na medicina, sua introdução em outras áreas do conhecimento é recente, tais como: engenharia, física, biologia, química, agronomia, dentre outras. O uso de tomógrafo na ciência do solo iniciou-se na década de 80, com os trabalhos pioneiros de Petrovic, Siebert e Rieke (1982), Hainsworth e Aylmore (1983). No Brasil, com o trabalho pioneiro de Crestana (1985), o qual representa o marco inicial dos estudos físico-hídricos do solo, segundo a revisão de literatura sobre Tomografia Computadorizado no solo de Pires et al. (2010)

Porém, nessa fase inicial dos estudos, as análises de solo somente eram obtidas com os tomógrafos de uso médico, que tinham custos altos e não apresentavam boa versatilidade para pesquisa de solo. Em 1987, começou a ser desenvolvida a primeira geração de minitomógrafos exclusivamente voltados para uso da ciência do solo, com incentivo da Unidade de Apoio à Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária (UAPDIA), atual Embrapa Instrumentação Agropecuária – São Carlos, (SP). Para construção desses minitomógrafos houve a contribuição de pesquisadores, dentre eles destacam-se: Cruvinel (1987), que construiu o primeiro minitomógrafo; Naime (1994) que projetou o tomógrafo de campo, Macedo (1997) que criou o tomógrafo de resolução micrométrica e Naime (2001) que desenvolveu o tomógrafo de terceira geração.

Graças ao desenvolvimento tecnológico gerado pelos pesquisadores acima mencionados, foram publicados diversos trabalhos voltados à aplicação da técnica TC no Brasil: Cruvinel et al. (1990); Crestana et al. (1992); Fante Júnior et al. (2002); Appoloni et al. (2002); Pedrotti et al. (2003); Balogun e Cruvinel (2003); Timm et al. (2005); Pires et al. (2005); Vaz et al. (2009); Pires (2010), entre muitos outros.

Dentre os principais grupos de pesquisa voltados para tomografia do solo no Brasil, destacam-se a Embrapa Instrumentação Agropecuária, o CENA/USP (Centro de Energia Nuclear na Agricultura/Universidade de São Paulo) e o Centro de Pesquisa da Universidade de Pelotas - RS (PIRES et al., 2010).

Em 2010, foram completados 25 anos de uso da Tomografia Computadorizada na Ciência do Solo no Brasil. Constata-se que, durante esse período, houve avanços significativos na área

que vem fundamentando pesquisas cada vez mais precisas do ponto de vista do meio-ambiente e agrícola.

3.1.2 Os princípios de funcionamento de um microtomógrafo de raios-x e a Teoria de Reconstrução de Imagem

Os fundamentos de funcionamento de um microtomógrafo de raio-X são baseados na interação de um feixe de fótons com o objeto de análise. A energia do feixe proveniente de uma fonte de raio-X é absorvida pelo objeto e posteriormente projetada no conjunto de detectores, cuja amplitude (intensidade) é proporcional à absorção (GONZALEZ; WOODS, 2010).

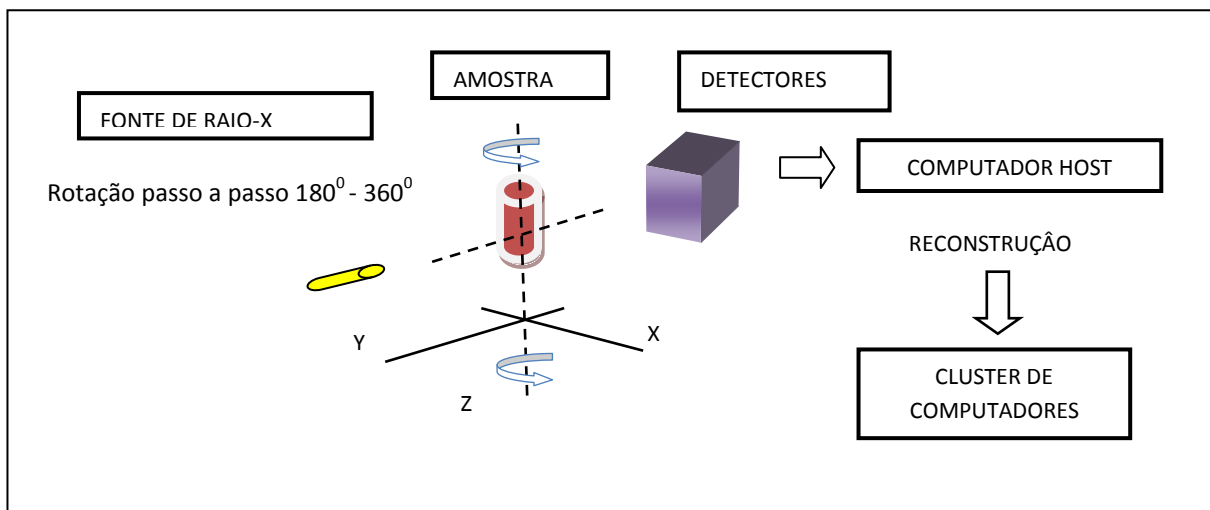


Figura 1 - Esquema que representa a obtenção de imagens por meio de um microtomógrafo de raio-X
Fonte: Adaptada de Argenta, Buriol e Hecke (2010)

A equação geral de Lambert-Beer que descreve essa ação do feixe de fótons com solo é:

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot x) \quad (1)$$

onde:

I_0 - é a intensidade incidente do feixe (contagem por segundo);

I - é a intensidade emergente do feixe (contagem por segundo);

μ (cm^{-1}) - o coeficiente de atenuação linear do solo

x (cm) - a espessura da amostra.

O solo é um material complexo cuja estrutura é composta, em geral, de 50% de ar e água (HILLEL, 1998). Portanto o coeficiente de atenuação linear é dependente da densidade e umidade, conforme as seguintes equações (CRESTANA, 1985; CRESTANA et al. 1992):

$$\mu = \mu_s \cdot D_s + \mu_a \cdot \theta \quad (2)$$

onde:

- μ (cm²/g) - o coeficiente de atenuação linear;
- μ_s (cm²/g) - o coeficiente de atenuação em massa do solo;
- μ_a (cm²/g) - o coeficiente de atenuação em massa da água;
- D_s (g/cm³) - a densidade do solo e
- θ_u (cm³/cm) - a umidade do solo.

De acordo com Crestana, Mascarenhas e Pozzi-Mucelli (1985), o coeficiente de atenuação em massa do solo e da água, respectivamente, podem ser determinados experimentalmente, pois são constantes do material numa determinada energia.

Das equações (1) e (2) obtém-se:

$$\mu_s \cdot D_s + \mu_a \cdot \theta = (1/x) \ln(I_0 / I) \quad (3)$$

A análise da equação (3), permite a constatação de que é possível determinar a densidade de uma amostra de solo seco ($\theta = 0$), medindo-se a intensidade do feixe incidente, do emergente, e dos parâmetros x , μ_s e μ_a . Numa amostra de solo úmido é possível a determinação dos dois parâmetros D_s e θ com uma medida de feixe emergente para amostra úmida e outra com amostra seca (estufa 105°C, 24 horas), admitindo-se que o objeto de estudo seja homogêneo conforme Crestana (1985).

Conforme apresentado por Crestana et al. (1992), quando as amostras são heterogêneas a equação (1) pode ser reescrita como:

$$I = I_0 \cdot \exp [- \sum_i \mu_i \cdot x_i] \quad (4)$$

onde:

μ_i - o coeficiente de atenuação linear do i -ésimo elemento do objeto e
 x_i - a espessura.

O princípio da obtenção de imagem é exatamente o mapa de distribuição espacial dos valores de coeficiente de atenuação linear. Assim, para formação de uma imagem é necessário o cruzamento de múltiplas medidas dos feixes incidentes e emergentes em várias direções. Em outras palavras, a "soma de raios" fornece um sinal de absorção 1-D, e o processo rotacional desse sinal 1-D ao redor do objeto de pesquisa dará o formato do objeto em questão, à medida que ocorra essa projeção, a intensidade da região onde não há cruzamento diminui e, dessa forma, forma-se a imagem 2-D (GONZALEZ; WOODS, 2010).

O objetivo da Tomografia Computadorizada é reproduzir o objeto de pesquisa em 3-D, isto é, criar um volume para o mesmo. Uma vez obtida a imagem 2-D como descrito anteriormente, essas "fatias" de imagem são sobrepostas, formando uma representação em 3-D (GONZALEZ; WOODS, 2010). As bases matemáticas da reconstrução de imagem podem ser encontradas em CRESTANA (1985) e em CRUVINEL (1987).

3.2 Impactos das atividades agrícolas no solo

De acordo com U.S. Department of Agriculture (USDA), o solo é composto por:

Minerais não consolidados e materiais orgânicos, que se encontram na superfície da Terra, servem como um meio natural para crescimento das plantas; Assim este corpo natural constituído por sólidos (minerais e matérias orgânicas), líquidos e gasosos que ocupam a superfície da Terra, é caracterizado pela presença de horizontes (camadas), que se diferenciam pelo material de origem, que é resultante do ganho, perda, transferência ou da transformação de energia e matéria, bem como da capacidade de suportar crescimento das raízes de plantas no meio-ambiente.

De acordo com Jenny (1941, p. 15):

O solo é resultante da interação de cinco fatores ambientais: material de origem, clima, topografia, organismo e tempo". Segundo Hillel (1982, p.5), o solo significa "[...] desintegração e decomposição de rochas por processos físicos e químicos, e são influenciados pelas atividades e pelos resíduos acumulados de abundantes espécies de plantas e animais microscópicos e macroscópicos [...].

Portanto o estado de solo é dinâmico, pois sofre constante processo de organização, transformação com intemperismo (processo de interação solo e meio ambiente) para encontrar um estado de equilíbrio com as condições ambientais (FERRAZ, 2008).

Entretanto o homem, no seu processo de apropriação do solo, não considera os processos naturais responsáveis pela gênese e evolução dos solos. Por isso, na maioria das vezes, essa interferência destrói mais do que melhora. Por consequência disso, acontece a degradação do solo provocando a redução de sua vida útil. Assim como acontece com as atividades de pastagem no Brasil, o excesso de exploração e a falta de práticas conservacionistas induzem cada vez mais a ocorrência da degradação dos solos.

Conforme Miller e Gardiner (1997, p. 53), "degradação do solo é qualquer contaminação, perda ou alteração não natural que leva o solo a perder sua produtividade tornando-o inapto para exercício de suas funções naturais". Um exemplo deste fato apontado por Miller e Gardiner é quando se reduz a espessura do horizonte A (onde há maior concentração de matéria orgânica e nutrientes essenciais para o crescimento de planta, tais como: nitrogênio, fósforo e enxofre) causando sua degradação.

Um solo manejado inadequadamente é uma das principais causas da erosão, como ocorre em muitas propriedades no país, ocupadas pelas atividades de pastagem. Em consequência, o cultivo das plantas é dificultado, reduz-se a produtividade agropecuária, as terras agricultáveis são perdidas, a permeabilidade do solo diminui e até ocorre o depósito de materiais pobres sobre o solo bom, culminando-se na insustentabilidade do meio ambiente.

Em suma, o solo manejado inadequadamente leva à erosão que por sua vez afeta diretamente as atividades agropecuárias e o meio ambiente. Assim, para resgatar a utilidade das terras e tornar o ambiente sustentável, as medidas de recuperação desses solos degradados pela pastagem devem ser adotadas primordialmente.

3.3 Métodos de recuperação: lodo de esgoto e adubação verde

Alves et al. (2008), após sete anos de pesquisa, obtiveram resultados positivos na recuperação do horizonte superficial dos solos, ou seja, a camada que fica de 0 a 0,10 m da superfície de terreno. O método adotado pelos autores (op. cit.) consiste em aplicação de adubos verdes, lodo de esgoto e plantas nativas no solo decapitado pela construção de usina hidrelétrica.

Os adubos verdes, segundo os autores Lombardi Neto e Drugowich (1994) explica que "essas plantas protegem o solo contra a ação direta da chuva quando estão vivas e, depois de

enterradas, melhoram as condições físicas do solo pelo aumento de conteúdo de matéria orgânica". Na pesquisa de Alves et al. (2008) foi introduzida a espécie *Brachiaria decumbens*, pois a gramínea é uma planta de rápido crescimento e ao mesmo tempo é facilmente encontrada na região da pesquisa onde a atividade predominante é agropecuária.

Galdos, De Maria e Camargo (2004) elucidam que a aplicação de lodo de esgoto funciona como uma adubação corretiva, pois ele aumenta o teor de fósforo no solo e é rico em matéria orgânica, o que proporciona maior rendimento de matérias verdes e secas. Além disso, o lodo de esgoto, segundo Tsutiya (2001), é capaz de tornar as culturas mais resistentes à seca pelo fato de favorecer a formação de agregados que ajudam no crescimento de raízes. O lodo evita ainda o processo de erosão, pois aumenta a quantidade de agregados no solo, estabiliza sua estrutura e retém água no seu interior.

O uso de Gonçalo-Alves (*Astronium fraxinifolium*) na recuperação de áreas degradadas deve-se ao fato de se tratar de uma espécie nativa, de fácil de produção em viveiro. A planta demonstra viabilidade de cultivo na condição de solo degradado, contribuindo no seu processo de recuperação (KITAMURA, 2007).

A combinação de *Brachiaria decumbens*, lodo de esgoto e *Astronium fraxinifolium* mostraram resultados positivos na recuperação de solos degradados. Simultaneamente, o resultado dessa combinação tem contribuído para a definição de indicadores de propriedades físicas do solo, como a densidade do solo e a infiltração da água (ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007).

3.4 Fundamentos da qualidade física do solo

A qualidade física do solo (QFS), segundo Millennium Ecosystem Assessment (2005) é fundamental para sustentabilidade global dos agroecossistemas. Entretanto, a avaliação da qualidade física do solo é bastante abrangente, não se limitando apenas às variáveis de condições ambientais que variam em função do local investigado. Além disso, a avaliação deve envolver diversos indicadores, cuja dinâmica pode ser alterada ao longo do tempo (VARANDAS, 2011). Como esclarece Gomes e Filizola (2006, p.2):

Entre os principais indicadores físicos da qualidade de solo sob o ponto de vista agrícola, estão a textura, estrutura, resistência à penetração, profundidade de

enraizamento, capacidade de água disponível, percolação ou transmissão da água e sistema de cultivo.

Em outras palavras, os atributos físicos como a densidade, a porosidade, a distribuição dos agregados, a resistência do solo à penetração, a infiltração e a curva de retenção de água, encontram-se intrinsecamente inter-relacionados e são indispensáveis para avaliação da qualidade física do solo, uma vez que os processos físico-hídricos dependem desses indicadores para serem expressos. Convém ressaltar a importância da porosidade na definição da oxigenação do solo, percolação da água, desenvolvimento das raízes e na intensidade da dinâmica erosiva.

Assim, Dexter (2004a, 2004b, 2004c) propôs o índice S para determinar a qualidade física do solo, através da retenção da água no seu interior. Apesar de o índice apresentar bons resultados para sua qualificação, ainda precisa ser melhor adaptado e estudado sob outras condições de solo (TORMENA et al., 2008). Varandas (2011) apresenta vários resultados brasileiros obtidos por ela a partir da elaboração de procedimentos propostos por pesquisadores de outros países.

O modelo de Arya e Paris apresenta uma abordagem físico-empírica para obtenção de curva de retenção de água com dados de granulometria, baseado na equação da capilaridade que relaciona o potencial mátrico (Ψ_i) com o raio dos poros. O Programa Qualissolo constitui-se de um software desenvolvido para a obtenção automática da curva de retenção de água baseado no modelo de Arya e Paris e Índice S do solo (VAZ et al., 2007). Simultaneamente, o programa propicia o cálculo e o estabelecimento de uma relação com Índice S em função da densidade do solo, faixa de umidade indicada para o manejo e a condutividade hidráulica na condição de umidade ideal para o manejo (DEXTER, 2004a; DEXTER et al., 2005; DEXTER, 2004b; VARANDAS, 2011).

3.5 Aplicações da técnica de tomografia computadorizada nas atividades agrícolas

O solo é um material complexo, pois é composto pela interação de partículas minerais, matérias orgânicas, água e ar e, simultaneamente, são estabelecidas no seu interior atividades físicas, químicas e biológicas, as quais propiciam o desenvolvimento da vida vegetal e animal. Neste contexto, convém lembrar que as atividades agrícolas, por exemplo, dependem diretamente/indiretamente dessas interações para terem êxito.

Do ponto de vista ambiental, o manejo adequado de solo é essencial para preservar o seu equilíbrio. As atividades agropecuárias exercidas pelo homem no solo resultam na produção de variados resíduos biológicos, que interagem diretamente com a camada edáfica da Terra. Dessa forma, a falta de planejamento e manejo adequados destas atividades leva ao desequilíbrio do ambiente e à consequente degradação de solo. Este fato é o que ocorre em 200 milhões de hectares de terra sem utilização e/ou ocupados por pecuária altamente extensiva e de baixa produtividade no Brasil (BRASIL, 2009).

Para recuperação dessas terras, torna-se imprescindível o desenvolvimento de pesquisas que forneçam subsídios que permitam a recuperação das características originais do solo, atendendo às necessidades antrópicas. Para esse fim, dispõe-se de instrumentos modernos que permitem a obtenção de dados cada vez mais precisos, como o microtomógrafo computadorizado de raio-X que favorece a aplicação de um método não convencional, não invasivo de solo (SILVA et al., 2007).

Assim no Brasil, as principais aplicações de microtomógrafo computadorizado de raio-x na agricultura tem se concentrado nos estudos de solo. As principais linhas de pesquisa são: distribuição de densidade, retenção de água, porosidade, mudanças estruturais (natural ou antrópica), movimento de água no solo, a eficiência de diferentes tipos de manejo (PIRES et al., 2010). Porém, há também outras linhas de pesquisa, tais como: diagnóstico de pragas no interior de plantas (SCOTT et al., 2007), fisiologia de plantas (HEERAMAN; HOPMANS; CLAUSNITZER, 1997), (STUPPY et al., 2003), sementes (MODOLO et al., 2008).

3.6 A reconstrução de imagens tridimensionais (3D) para estudo de solo

Apesar de quase três décadas de uso de tomógrafo computadorizado nos estudos de solo, há pouca literatura relacionada à geometria e à topologia de macroporos, as quais estão ligadas às investigações do fluxo de água (PIERRET et al., 2002). A maioria das publicações existentes consiste em descrições dos parâmetros físicos baseadas na imagem bidimensional. Entretanto, parâmetros como conectividade dos poros, tortuosidade e heterogeneidade de solo, ou seja, os elementos que permitem a descrição qualitativa da estrutura do solo associada ao caminho preferencial d'água requerem uma visualização tridimensional (PIERRET et al., 2002 ; MOONEY; NIPATTASUK, 2003).

Conforme Silva et al. (2000), os macroporos afetam diretamente o deslocamento de água, gás, solutos e microorganismos no interior do solo. Para Pierret (2002), a transferência desses elementos encontra-se relacionada às características geométricas e topológicas dos macroporos. Assim sendo, as pesquisas relacionadas à distribuição e ao tamanho de poros visando elucidar o deslocamento d'água no solo constituem-se em contribuições de suma importância no âmbito da ciência do solo. Nesse contexto, as imagens adquiridas através da aplicação do método de Tomografia Computadorizada e suas reconstruções em imagens tridimensionais, a partir de aplicação de softwares, são meios fundamentais na obtenção de dados sobre esse processo físico-hídrico essencial para as atividades agrícolas.

Os softwares CT-Analyser e CT-Volume são aplicativos derivados de minitomógrafo de raio-X Skyscan 1172, pertencente à Embrapa Instrumentação, localizada em São Carlos-SP, desenvolvidos para calcular diversos parâmetros morfométricos e, simultaneamente, capazes de obter o modelo de visualização em tempo real, ou seja, são ferramentas de grande potencial pouco exploradas na ciência de solo (SKYSCAN, 2011).. Convém ressaltar que, além dos softwares mencionados, existem outros instrumentos computacionais como Mimics 6.3, Magics 6 e o software aberto de ImageJ 1.21 (MOONEY, 2002).

4 Metodologia

4.1 Áreas de estudo

As coletas de amostra do solo foram realizadas na Fazenda de Ensino e Pesquisa Produção Animal da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, situada no município de Selvíria-MS, à margem direita do rio Paraná, local onde ocorreu uma decapitação de solo de 8,6 metros de espessura para construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, SP.

Essa usina é a maior do Estado de São Paulo e a terceira maior do país; a obra foi iniciada na década de 1960 e o solo decapitado está exposto desde 1969. A área está localizada entre as coordenadas geográficas 51^o 22' W e 20^o 22' S (Figura 2), com altitude de 327m. Quanto à pluviosidade a área caracteriza-se pela ocorrência de médias anuais de 1.370 mm, o período de chuva se estende de outubro a março, sendo os meses de dezembro a fevereiro o trimestre mais chuvoso (Gráfico 1). As temperaturas médias são aproximadamente 23,5° C, com a umidade relativa do ar entre 70 e 80%. O solo é um Latossolo Vermelho distrófico e sua classe textural é franco-argilo-arenosa (665, 79 e 256 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente) (DEMATTE, 1980; EMBRAPA, 2006). Na tabela 1 mostra o resultado da análise química da área experimental antes de implementação da pesquisa em 2001.

A vegetação nativa dessa área é o Cerrado. Entretanto atualmente, verificam-se apenas pequenas manchas dessa vegetação, já que o que predomina na área são testemunhos da intervenção antrópica, com regiões onde ocorreu a decapitação de solos em 8,60 m de espessura, consequência das obras de terraplenagem para a construção da usina de Ilha Solteira-SP, iniciada em 1960, permanecendo, desde então, com tais características. Alguns pontos dessa área onde o solo foi decapitado encontram-se em recuperação e/ou recuperados. Outras amostras foram coletadas na área da Fazenda experimental da UNESP e, embora esteja ocupada por pastagens, apresenta níveis diferenciados de degradação e recuperação.

Tabela 1 - Resultados da análise química do solo da área estudada, antes da instalação do experimento, em 5/3/2001, no município de Selvíria - MS

Profundidade	pH CaCl ₂	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	SB	CTC	V
m		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----m mol _c dm ⁻³ -----							%
0,00 - 0,10	5,0	32,0	31,2	5,6	14	9	37	2	28,6	65,3	44
0,10 - 0,20	4,8	26,0	10,4	3,3	10	7	36	3	19,60	55,70	35

MO = Matéria orgânica; P = fósforo disponível; K, Ca, Mg e Al trocáveis; H+Al = Acidez potencial; SB = soma de bases; CTC = CTC potencial; V = Saturação por base.

Fonte: Moreti et al. (2007)



Figura 2: Imagem de satélite mostrando a localização da área experimental

Fonte: Google Maps (2012)

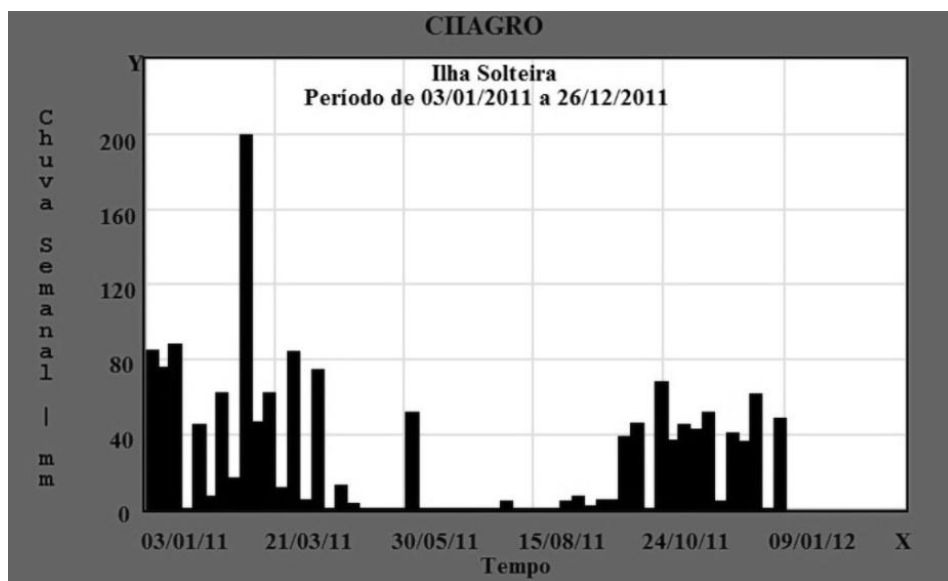


Gráfico 1: Pluviosidade de Ilha Solteira

Fonte: CIAGRO (2012)

4.2 Procedimentos metodológicos

4.2.1 Coleta de amostras

As amostras de solo foram coletadas com tubos de PVC com 2,5 cm de diâmetro e 4,0 cm de altura (Fotografias 1 e 2) em locais submetidos a diferentes tipos de tratamento: **I** - Tratamento ocupado por vegetação nativa do Cerrado (Fotografia 3); **II** - Tratamento ocupado por pastagem degradada (Fotografia 4); **III** - Tratamento ocupado por pastagem recuperada (Fotografia 5); **IV** - Tratamento com *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves) + *Brachiaria decumbens* + Lodo de esgoto (Fotografia 6); **V** - Tratamento ocupado por solo degradado (remanescente da construção de usina hidrelétrica) (Fotografia 7); **VI** - Tratamento ocupado por solo recuperado que a aplicação de adubação verde durante sete anos, de 1992 a 1999 e depois cultivado com *Brachiaria decumbens* (Fotografia 8). Para cada local de tratamento foram selecionados três pontos de coleta, em três profundidade na horizonte A: **(a)** 0,0 a 5,0 cm; **(b)** 5,0 a 10,0 cm e **(c)** 10,0 a 20 cm e por fim, três repetições de amostra para cada uma dessas profundidades. Assim, no total obteve-se 162 amostras do solo. Uma vez obtidas as amostras, elas foram secadas ao ar livre e no sol durante um mês até ficarem totalmente ressecadas.



Fotografia 1 - Coleta de amostras com tubo de pvc no campo (i)



Fotografia 2 - Coleta de amostras com tubo de pvc no campo (ii)



Fotografia 3 – Tratamento ocupado por vegetação nativa (Cerrado)



Fotografia 4 - Tratamento ocupado por pastagem degradada



Fotografia 5 - Tratamento ocupado por pastagem recuperada



Fotografia 6 - Tratamento com *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves) + *Brachiaria decumbens* + Lodo de esgoto



Fotografia 7 - Tratamento ocupado por solo degradado (remanescente da construção de usina hidrelétrica)



Fotografia 8 - Tratamento ocupado por solo recuperado que teve a aplicação de adubação verde durante sete anos, de 1992 a 1999 e depois cultivado com *Brachiaria decumbens*

4.2.2 Obtenção de densidade do solo

Os tubos de PVC e as amostras de solo foram todos pesados na balança semi-analítica (modelo BL 300, Shimadzu, Japão) com $d = 0,01g$ e $e = 0,1$. Em seguida foi feita uma média de pesos brutos, baseada em diferentes profundidades e tipos de amostra; uma vez cumprida essa parte, foi subtraído desse peso o valor médio do tubo de PVC em todas as amostras de solo. Dessa forma, obteve-se o peso líquido das amostras. Finalmente, para obter a densidade do solo foi aplicada a seguinte fórmula em todas as amostras:

$$\rho = m_g / V \quad (5)$$

onde:

ρ - a densidade do solo;

m_g - a massa da amostra e

V - o volume da amostra de solo

4.2.3 Aquisição e reconstrução de imagens bidimensionais (2D)

A aquisição das projeções e a reconstrução de imagens bidimensionais foram adquiridas a partir da utilização do microtomógrafo de raio-X de alta resolução (modelo 1176 Skyscan, Bélgica) da Faculdade de Odontologia da Unesp - Araraquara e, parcialmente, da Embrapa Instrumentação Agropecuária - São Carlos (Figura 3 e 4), cujas especificações utilizadas na pesquisa compõe a Tabela 2 e 3.



Figura 3 - Minitomógrafo de raio-X Skyscan 1176

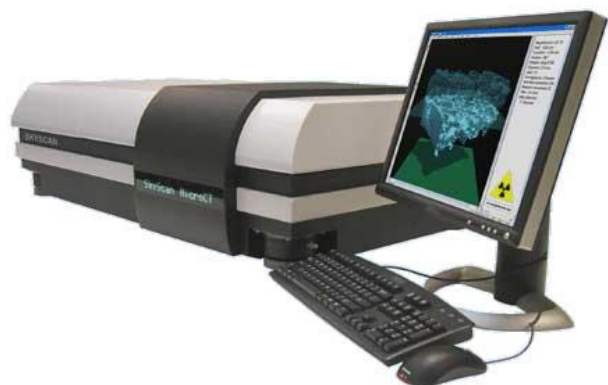


Figura 4 - Minitomógrafo de raio-X Skyscan 1172

Para a aquisição das projeções e reconstruções de imagens bidimensionais foram aplicados três procedimentos:

Procedimento I - Preparo de amostras

Etapa 1 - As amostras coletadas são vedadas com filme plástico e posicionadas no suporte de microtomógrafo de Raio-X no meio de um isopor tubular meia-lua para modelo Skyscan 1176, e para modelo Skyscan 1172 com fita dupla e durex, ambos para evitar movimento durante o experimento.

Etapa 2 - Fechar a porta do microtomógrafo e iniciar o processo de scanner. Verificar se a amostra está bem posicionada no centro do campo visual do detector da radiação.

Procedimento II - Obtenção das projeções

Etapa 1 - Ajuste dos parâmetros de aquisição no painel de controle do software NRcon, baseado nas especificações que integram na Tabela 2 e 3.

Tabela 2 - Especificações utilizadas na aquisição de projeções (Modelo *Skyscan 1176*)

Especificações	Unidades	Valor
Voltagem da Fonte de Raio-X	kV	80
Corrente da Fonte de Raio-X	uA	300
Distância da Fonte ao Objeto	mm	120.29
Distância da Câmera a Fonte	mm	172.04
Classe de Câmera	-	2 X 2
Tamanho do Pixel da imagem	um	17.48
Tipo de Filtro	-	Al + Cu
Altura	mm	40.344
Grau de rotação	Grau	360
Passo de rotação	Grau	0.6
Média de frame	-	15
Temperatura da Fonte	Grau Celsius	32

Tabela 3 - Especificações utilizadas na aquisição de projeções (Modelo *Skyscan 1172*)

Especificações	Unidades	Valor
Voltagem da Fonte de Raio-X	kV	100
Corrente da Fonte de Raio-X	uA	100
Distância da Fonte ao Objeto	mm	185.990
Distância da Câmera a Fonte	mm	282.246
Classe de Câmera	-	2 X 2
Tamanho do Pixel da imagem	um	11.38
Tipo de Filtro	-	Al + Cu
Altura	mm	37.86
Grau de rotação	Grau	180
Passo de rotação	Grau	0.7
Média de frame	-	10

Procedimento III- Reconstrução das projeções em imagens bidimensionais

As projeções (Figura 5) foram reconstruídas (Figura 6) com auxílio do software NRcon, baseadas nos parâmetros apresentados na Tabela 4 e 5.

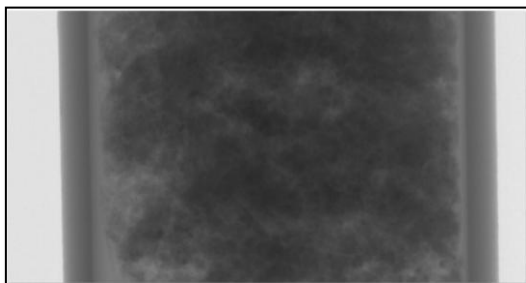


Figura 5 - Projeção de uma amostra de solo no tubo de pvc cilíndrica

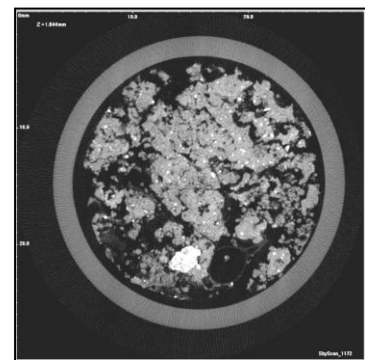


Figura 6 - Imagem reconstruída em 2D a partir de projeção obtida

Tabela 4 - Especificações da reconstrução de imagem tomográfica
(Modelo *Skyscan 1176*)

Especificações	Unidade	Valor
Formato de imagem	TIFF	-
Depth	Bits	16
Total de seções	-	1001
Passos de seção por seção		1
Tamanho de pixels	µm	18
Suavização (Smoothing)	-	5
Endurecimento de faixa (Misalignment compensation)	-	Varia de acordo com cada amostra
Correção de artefato de anel (Ring artifact correction)	-	10
Correção de Feixes de endurecimento (Beam-hardening correction)	%	60
Camada superior (Top)	-	1180
Camada inferior (Bottom)	-	180

Tabela 5 - Especificações da reconstrução (*Skyscan 1172*)

Especificações	Unidade	Valor
Formato de imagem	TIFF	-
Depth	Bits	16
Total de seções	-	811
Passos de seção por seção	-	1
Tamanho de pixels	µm	15
Suavização (Smoothing)	-	5
Endurecimento de faixa (Misalignment compensation)	-	Varia de acordo com cada amostra
Correção de artefato de anel (Ring artifact correction)	-	10
Correção de Feixes de endurecimento (Beam-hardening correction)	%	60

"Continua"

"Conclusão"		
Camada superior (Top)	-	920
Camada inferior (Bottom)	-	110

4.2.4 Calibração de densidade das imagens por meio de Unidade de Hounsfield

A calibração de densidade das imagens por meio do Método de U.H. (Unidade de Hounsfield) ocorre a partir do cumprimento de dois procedimentos de acordo com as instruções contidas no manual fornecido pelo fabricante.

Procedimento I - Obtenção de um "phantom"

Etapa 1- Produção de um "phantom" em U.H. (Unidade de Hounsfield) no microtomógrafo, o qual consiste em um tubo de PVC cheio de água, com o diâmetro aproximadamente similar ao da amostra de solo digitalizado usando-se o microtomógrafo.

Etapa 2 - Após a reconstrução do "phantom", todos os parâmetros da reconstrução devem ser utilizados em todas as amostras de solo. A imagem reconstruída da água (phantom) deve ficar bastante clara em relação às amostras, a única exceção a essa regra do parâmetro é o pós-alinhamento (post-alignment), pois ele varia de acordo com cada reconstrução e não compromete as medidas comparativas da densidade. Esse parâmetro é calculado automaticamente pelo NRcon (software de reconstrução de imagem - Skyscan 1172).

Etapa 3 - Nesta etapa, deve-se abrir o conjunto de dados reconstruídos do "phantom" no CT-Analyser e selecionar uma região de interesse (ROI) de água, excluindo a borda superficial. No caso de aparecimento de pequeno "feixe endurecimento" (beam-hardening) ou bolha de água próxima da superfície, como exemplificada na Figura 7, deve-se escolher outra imagem de água. É muito importante não aparecer nenhum objeto mais denso ao redor da água nessa calibração, pois isso afeta a obtenção da verdadeira densidade da água.

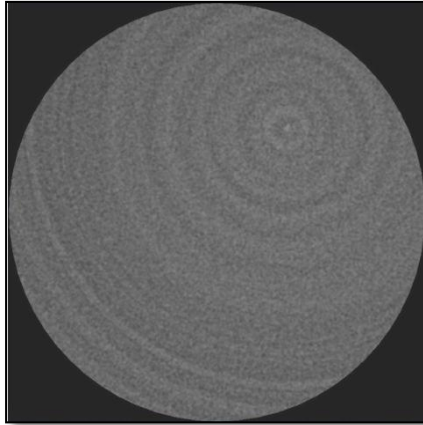



Figura 7 - Imagem tomográfica da água

Etapa 4 - Uma vez selecionado o volume de água de interesse (VOI), clica-se no botão "from selection" para recalcular o histograma de densidade para o VOI selecionado. Depois disso, deve-se ler no "mean (total)" a densidade em nível de cinza para o VOI de água em função da distribuição de densidade.

Etapa 5 - Em seguida, deve-se abrir a janela de calibração U.H. (o comando ). Após isso, na janela de "Density range calibration" haverá três colunas de calibração (Figura 8): "Index" (nível de cinza), "HU" (Unidade de Hounsfield) e "Attenuation" (Atenuação). Utiliza-se o valor 0 para "Index" (nível de cinza) e -1000 para HU (Unidade de Hounsfield), na primeira linha. Na segunda linha, insere-se o valor de cinza medido para água VOI e o valor 0 para HU (Unidade de Hounsfield); deve-se então apertar o botão relativo a OK, e a janela será fechada (Figuras 8 e 9).

Index	HU	Attenuation
0	-1000	0
22.77250	0	0.054

Figura 8 - A janela fornecida pelo software para a calibração de densidade média (i)

Deve-se, em seguida, reabrir a janela "Calibração da variação de densidade média", entretanto os números serão alterados (Figura 9), pois agora estão normalizados para mostrar o intervalo máximo de densidade que corresponde ao nível de cinza 255. Anota-se o número de U.H.

(Unidade de Hounsfield) da segunda linha, pois esse número será implementado na calibração U.H. (Unidade de Hounsfield) de outras amostras.

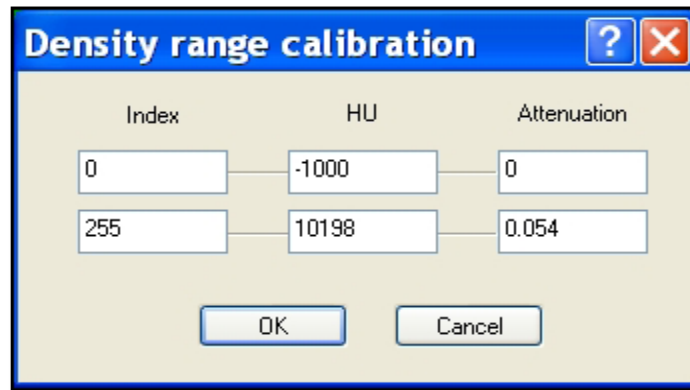





Figura 9 - A janela fornecida pelo software para a calibração de densidade média (ii)

Etapa 6 - Para aplicar a calibração U.H. (Unidade de Hounsfield) do "phantom" para outras medidas, deve-se selecionar um ROI na amostra e, em seguida, apertar o botão "from selection" do CT-Analyser para visualizar o histograma de densidade. Pode-se também utilizar-se o botão  para facilitar a visualização do histograma. Em seguida, coloca-se o número previamente anotado de U.H. (Unidade de Hounsfield) na janela de "Density range calibration" como foi efetuada na etapa 5. Dessa forma, o valor de VOI selecionado será calibrado de acordo com U.H. (Unidade de Hounsfield). Deve-se então, salvar a calibração.

Procedimento II - Calibração de outras medidas por meio de CT-Analyser.

Depois do "phantom" adquirido no procedimento I, efetua-se, em duas etapas, a reconstrução das imagens do procedimento I, baseando-se nos valores de U.H. (Unidade de Hounsfield), obtidos anteriormente:

Etapa 1 - Retoma-se o valor de calibração U.H. (Unidade de Hounsfield) obtido anteriormente, a partir do "phantom", lembrando que para U.H. (Unidade de Hounsfield) o maior nível de cinza sempre é igual a 255 para quando aplicá-lo a um conjunto de imagens provenientes do procedimento I e II da Aquisição de imagens bidimensionais (2D).

Etapa 2 - Abre-se o conjunto de imagens bidimensionais (2D), aperta-se o botão . Em seguida, seleciona-se a opção ROI do CT-Analyser. Escolhe-se um volume de interesse, ou seja, uma parte do conjunto de imagens ou todas as imagens, e salva-se como novo arquivo usando o botão  (Figura 10), assim, este novo conjunto de arquivo terá U.H. (Unidade de Hounsfield) calibrados.

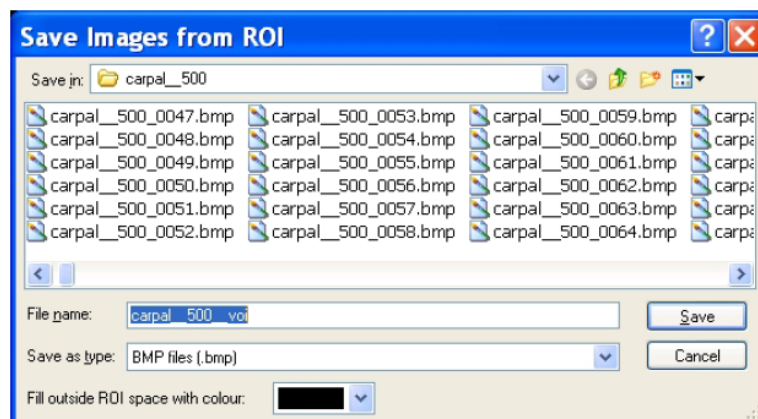


Figura 10: A janela que salva os arquivo calibrado

4.2.5 Determinação dos atributos físicos em função das imagens tomográficas: densidade do solo, porosidade e tamanho dos agregados

4.2.5.1 Densidade do solo (ρ)

Uma vez que os procedimentos descritos acima foram realizados, deve-se obter uma curva de calibração do U.H. em função da densidade do solo e, para isso, foram selecionadas algumas amostras que apresentaram melhor homogeneidade de cada parcela de solo e, assim, utiliza-se o software CT-Analyser para determinar média da U.H. correspondente. Com este resultado traça-se a curva de calibração entre U.H. e a densidade do solo das amostras selecionadas (CRESTANA et al., 1992).

Uma vez que as imagens tenham sido calibradas, são selecionados ROI (Região de Interesse) de igual tamanho para todas as amostras e, depois disso, essas seções de ROI devem ser todas binarizadas. Assim, baseadas nessas seções de ROI serão obtidas as informações relacionadas a porosidade, tamanho dos agregados em 2D e 3D, assim como dados para a construção de

modelo em 3D. Para este fim cumprem-se seis etapas (Figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16) (SILVA, 2009).

Etapa 1- Abrem-se os arquivos de reconstrução 2D do microtomógrafo com formato bmp.

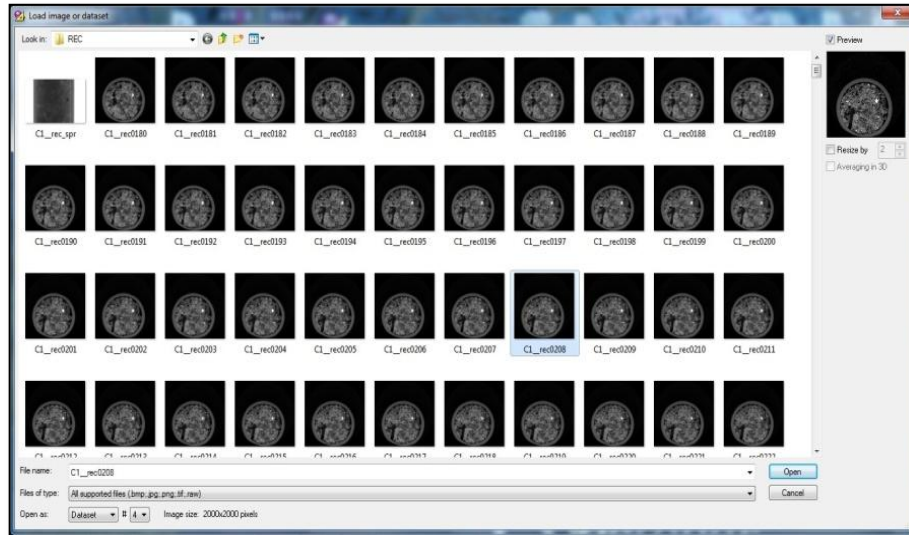


Figura 11 - Arquivo de imagens bidimensionais

Etapa 2 - Analisam-se as seções transversais reconstruídas.

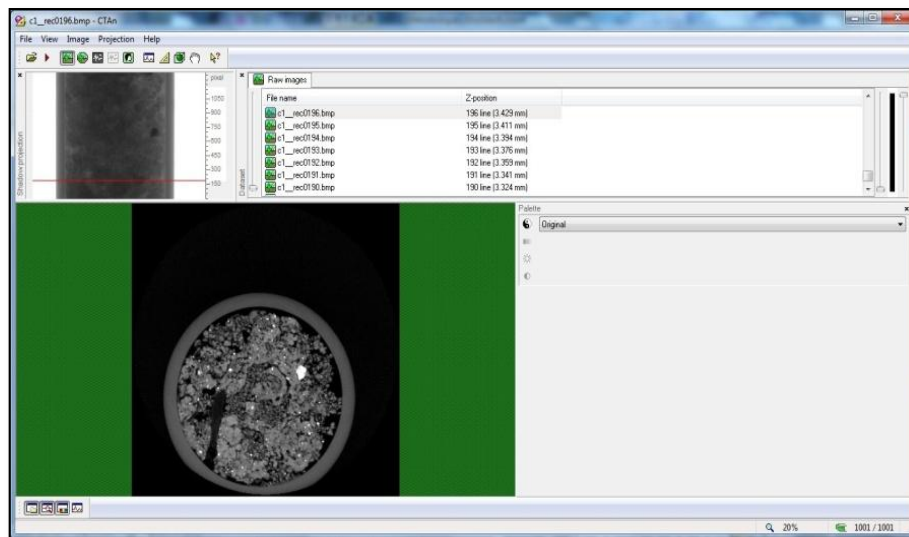


Figura 12 - Seleção das seções transversais

Etapa 3 - Escolhe-se a ROI (Região de Interesse) para análise morfométrica 2D e o VOI para análise morfométrica 3D.

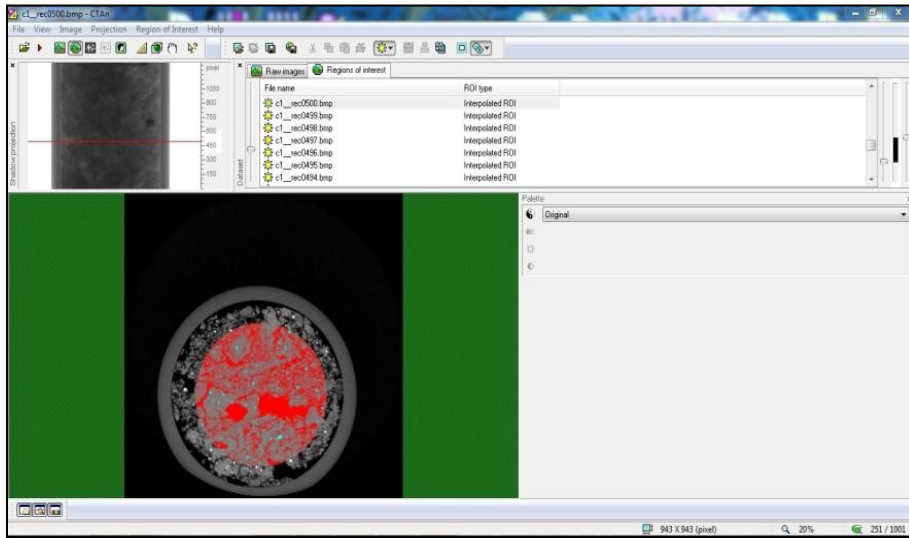


Figura 13 - Escolha da ROI (Região de interesse)

Etapa 4 - Os limiares da binarização foram estabelecidos visualmente, baseados na comparação com a imagem tomográfica da etapa 2. As imagens foram transformadas em preto e branco, a parte preta representa a fase sólida, enquanto a parte branca representa a fase porosa, ou o ar, em apreço.

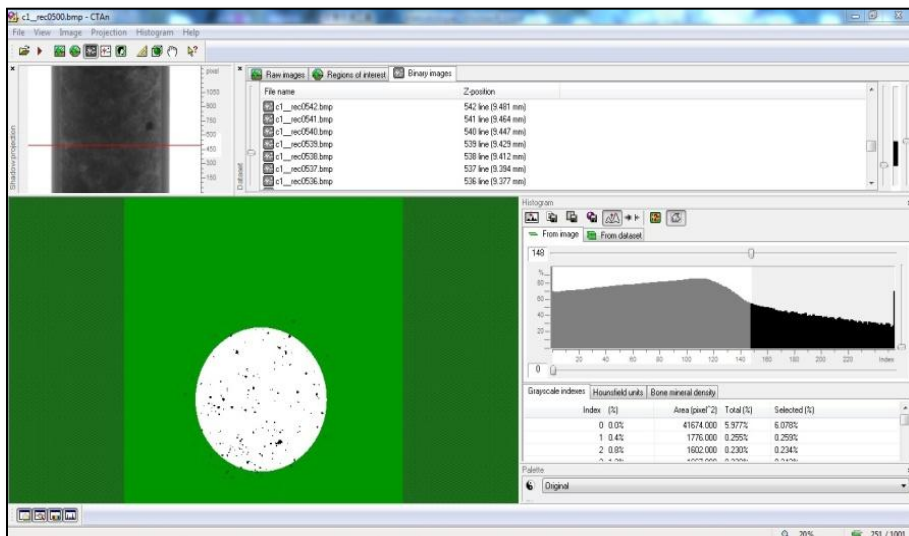


Figura 14 - Binarização de ROI (Região de interesse)

Etapa 5 - Análise Morfométrica 2D.

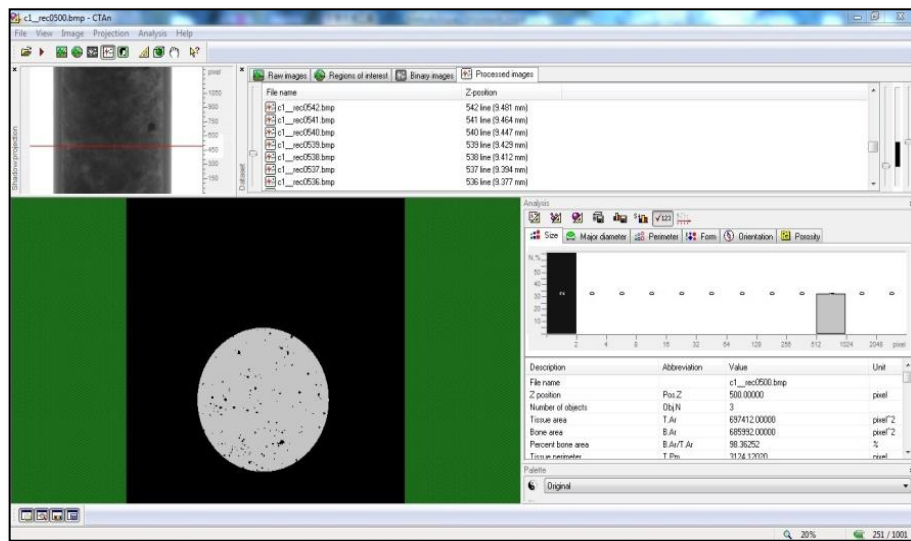


Figura 15 - Análise dos atributos físicos em 2D

Etapa 6 - Escolha dos parâmetros de interesse para análise morfométrica 3-D.

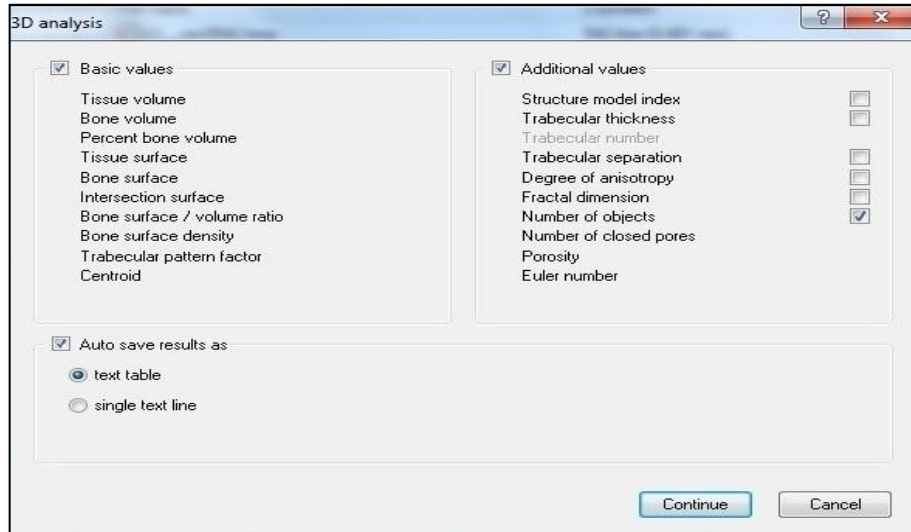


Figura 16 - Seleção dos parâmetros de análise em 3D

4.2.5.2 A distribuição de tamanho dos agregados

Para a obtenção da distribuição dos tamanhos de agregados em 2D, utiliza-se também o software CT-Analyser. Após obter as seções de ROI binarizadas na etapa 4, descrita anteriormente, elas foram processadas pelo software, seção por seção, por meio do comando

"Processed images". Desse modo, aparece na barra de análise a opção de "Size distribution", que significa mostrar a distribuição de tamanho dos agregados da área de ROI na forma de histograma, ou seja, porcentagem total de número de objetos no eixo y em relação ao diâmetro do objeto no eixo x em 2D (SKYSCAN, 2011).

4.2.5.3 Porcentagem de porosidade (%)

As imagens tomográficas são formadas pelos pixel e cada pixel representa um brilho, ou escala de cinza, que indica o coeficiente de atenuação linear média do material. A extensão do pixel em 3D forma um pequeno paralelepípedo chamado voxel. Assim, a porcentagem de porosidade do material é a área (volume) dos espaço aberto sobre a área (volume) total de objeto binarizado.

Dessa forma, a porcentagem de porosidade total e seu volume foram obtidas por meio do software CT-Analyser, como foi realizado na seção anterior: deve-se basear nas fatias de ROI e selecionar novamente o comando de "Processed images", para fornecer os valores de porosidade total e seu volume em 2D. Por fim, por meio da opção 3D analysis do próprio software, pode-se obter o volume total dos poros. No caso, para este trabalho foi adotada preferência a essa opção, pois ela apresenta uma melhor comparação com a realidade tridimensional (SKYSCAN, 2011).

4.2.6 Reconstrução de modelos tridimensionais (3D)

Foram utilizados os dados bidimensionais obtidos e calibrados no item 4.2.5 e etapa 4, e de software CT-Vox para construção e observação de conectividade entre os poros no modo de volume total (Figura 17) e, adicionalmente, pode-se ainda visualizar o objeto no modo de atenuação (Figura 18) ou na máxima intensidade (Figura 19), conforme no Skyscan CT-Vox Manual.

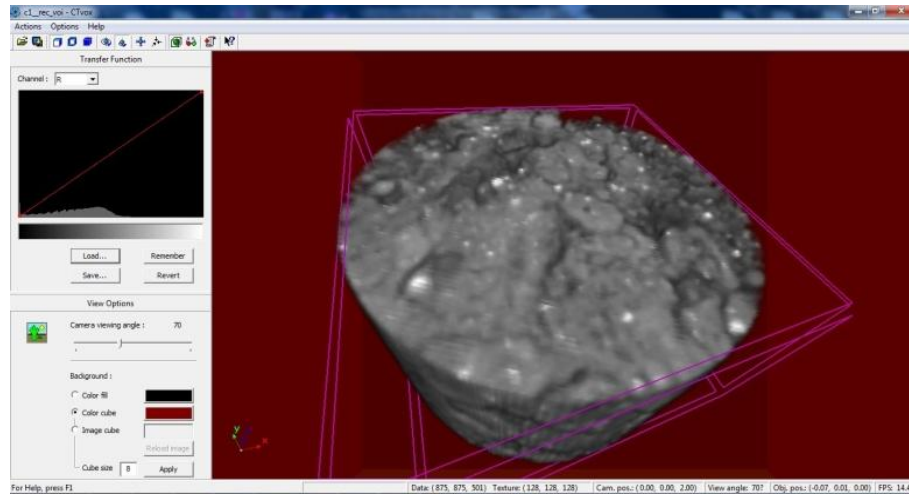


Figura 17 - Modelo 3D do solo em modo volume

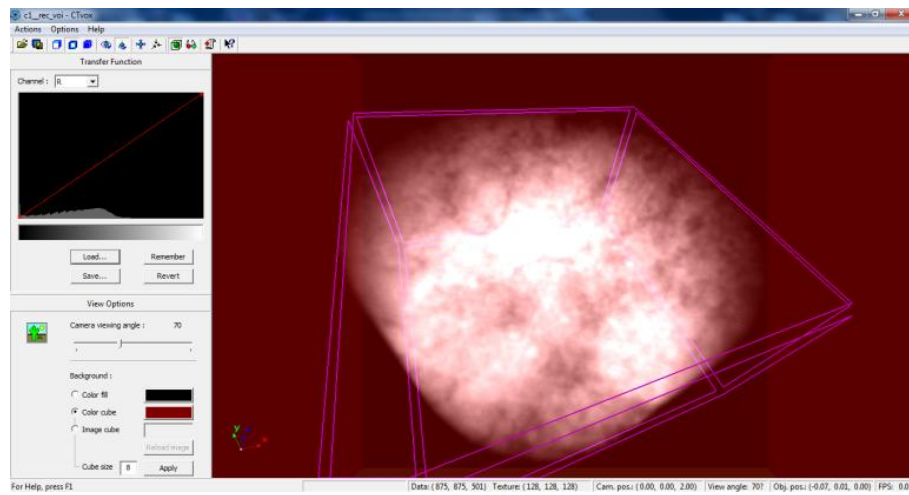


Figura 18 - Modelo 3D do solo em modo atenuação

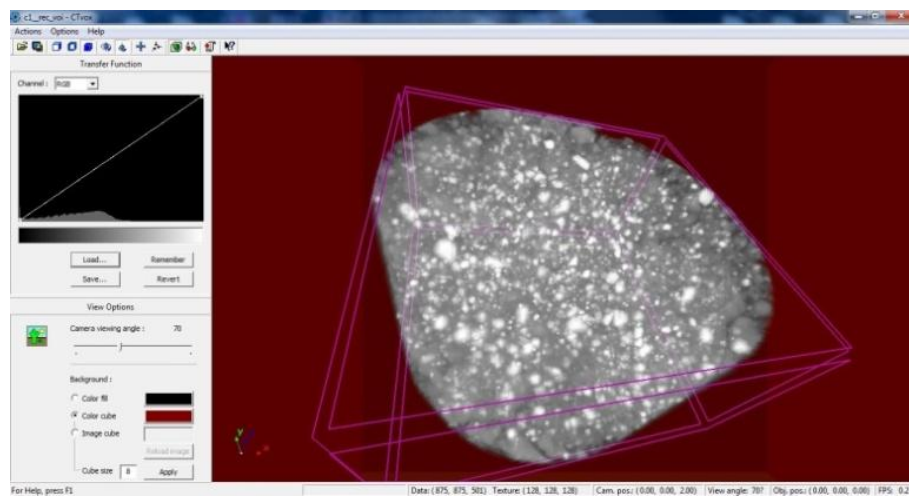


Figura 19 - Modelo 3D do solo em modo máxima intensidade

Baseados nas seções anteriores, foram obtidos os dados de densidade do solo, as imagens bidimensionais, atributos físicos em função das imagens tomográficas e, por fim, a técnica de reconstrução de modelos tridimensionais. Na próxima seção será discutida a interpretação desses dados e sua contribuição à análise da qualidade ambiental de solo.

5 Resultados e discussões

5.1 Método de tomografia computadorizada aplicado ao solo

5.1.1 Qualidade de imagens tomográficas e suas resoluções

A qualidade de imagens tomográficas é uma propriedade importante para análise dos materiais em estudo. O solo é considerado um material poroso de extrema complexidade, pois nele ocorre um conjunto de atividades físicas, químicas e biológicas, ou seja, o solo está sempre em constante mudança e desenvolvimento. Como consequência disso, resultam-se diversos tipos de estrutura morfológicas. Para obter a compreensão sobre esse material poroso (Fotografia 9), a seleção de tamanho de pixel e a resolução tornaram-se uma parte importante na seleção de melhor qualidade de imagem. Em razão disso, conforme se melhora a qualidade de imagem tomográfica, aumenta-se também a precisão de visualização e análise do solo.

Num primeiro momento, foi investigado o tamanho do pixel das imagens, conforme a tabela 6 e as figuras a seguir (Figura 20 e 21). Foi verificado que o tamanho do pixel das imagens afeta diretamente a nitidez e dificulta a percepção de detalhes da imagem.



Fotografia 9 - Solo de mata com estrutura preservada – solo poroso e permeável ao ar, à água e às raízes
Fonte: Moraes (2007)

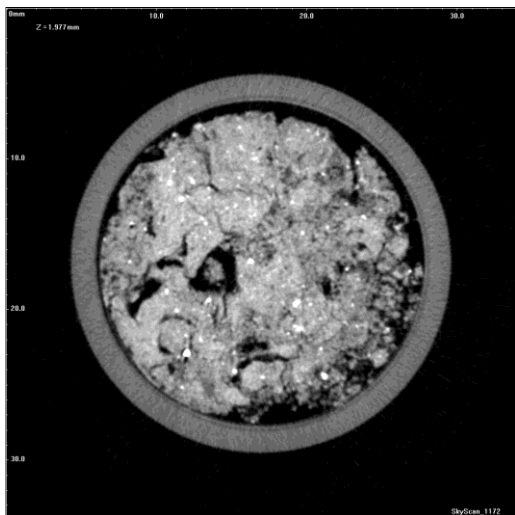


Figura 20 - Microtomografia de uma amostra de solo com tamanho de pixel igual a 34,07 μm

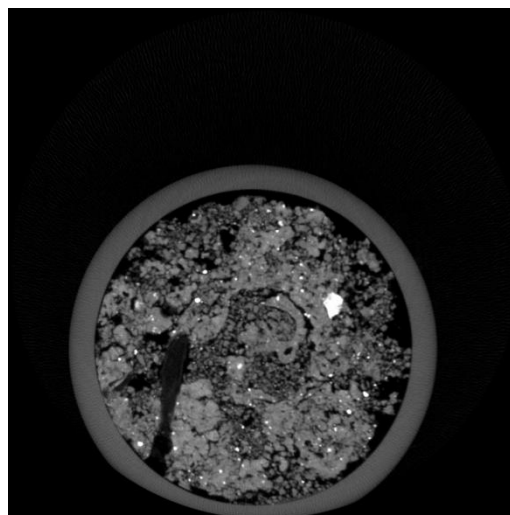


Figura 21 - Microtomografia de uma amostra de solo com tamanho de pixel igual a 17,48 μm

Tabela 6 - Especificações do teste de tamanho do pixel das imagens

Especificações	Unidade	Valor	Valor
		(Figura 16)	(Figura 17)
Tamanho do Pixel das Imagens	μm	34	28
Resolução das Seções Transversais	pixel	2000 x 2000	2000 x 2000
Tamanho do Pixel da Câmera	μm	11	11
Filtro Alumínio + Cobre	-	-	-
Passo de Rotação	grau	0.7	0.7

Em seguida, foi realizado um teste para verificar o efeito do uso de diferentes resoluções de câmera para as seções transversais. O microtomógrafo de raios-x disponibiliza 3 resoluções: 1K (1000 x 1000 pixels), 2K (2000 x 2000 pixels) e 4K (4000 x 4000x pixels). Notou-se que a resolução 4K (Figura 23) apresenta melhor qualidade de imagem do que 2K (Figura 22) e 1K. Em compensação, o tempo para aquisição e reconstrução de imagem com 4K aumentou e, durante a reconstrução, o computador parou de funcionar diversas vezes devido à grande quantidade de dados a serem tratados, no total 16.000.000 pixels. Para essa pesquisa foi adotada a resolução 2K (2000 x 2000 pixels). A tabela 7 contém dados que indicam a resolução de câmera selecionada;

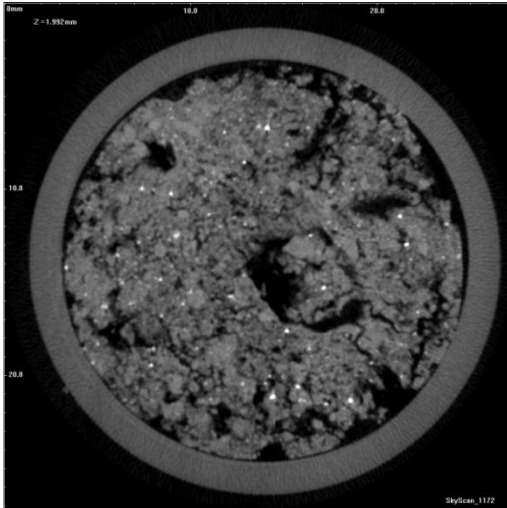


Figura 22 - Microtomografia de uma amostra de solo com resolução 2000 x 2000 pixels

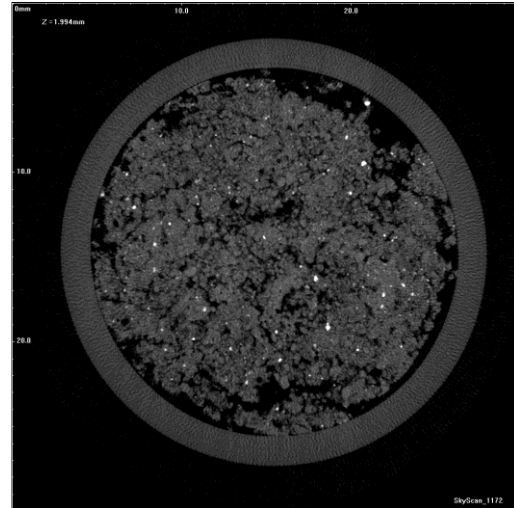


Figura 23 - Microtomografia de uma amostra de solo com resolução de 4000 x 4000 pixels

Tabela 7 - Especificações do teste de câmera

Especificações	Unidade	Valor	Valor
		(Figura 18)	(Figura 19)
Resolução das Seções Transversais	pixel	2000 x 2000	4000 x 4000
Tempo de aquisição	h:m:s	00:34:37	01:18:15
Tempo de reconstrução por imagem	segundo	0.54	1.38
Filtro Alumínio + Cobre	-	-	-
Passo de Rotação	grau	0.7	0.7

Baseado nos resultados obtidos na Tabela 7 pode-se dizer que quanto menor for o tamanho de pixel e a resolução, melhor será visualização das estruturas internas e análises de solo. Porém deve-se ponderar que entre o tipo de análise e o tempo requisitado pelo equipamento, com um maior tempo de aquisição a qualidade de imagem aumenta.

5.1.2 As vantagens e desvantagens entre o microtomógrafo *Skyscan* modelo 1172 e 1176

Esta pesquisa foi efetuada inicialmente na Embrapa Instrumentação - São Carlos com microtomógrafo *Skyscan* modelo 1172. O experimento foi interrompido logo no início porque queimou-se a fonte de radiação do equipamento. Dessa forma, foi necessário encontrar uma nova alternativa para prosseguir com o trabalho enquanto o problema estava sendo resolvido. Com base na avaliação de disponibilidade e possibilidade de acesso, foi concedido o uso de microtomógrafo de raios-x modelo 1176 do mesmo fabricante pela Faculdade de Odontologia

da Unesp - Araraquara. Portanto os experimentos deste trabalho foram realizados em dois lugares e equipamentos de modelos diferentes.

O microtomógrafo de alta resolução modelo 1172 possui uma ampla gama de utilização em diversas áreas, devido ao seu intervalo e flexibilidade na escala dos pixels, com precisão variando na casa de micrômetros, porém é mais indicado para materiais densos, um ponto bastante interessante para investigar as propriedades e comportamentos de solo. Embora o modelo 1176 possua alto desempenho de resolução espacial in-vivo, ele é mais indicado para pesquisas clínicas. Além do mais, existem apenas 3 resoluções pré-fixadas pelo fabricante: 9, 18 e 35 μm .

O sistema de detecção dos dois modelos seria outra grande diferença entre eles. No modelo 1172 (Figura 24) as amostras são colocadas no meio de um suporte giratório enquanto recebe energia proveniente da fonte de raios-x, projetada sobre os detectores fixos que estão posicionados atrás da amostra. Para o modelo 1176 as amostras são deitadas no suporte fixo, enquanto recebem a energia da fonte de raios-x e os detectores giram ao seu redor (Fotografias 10 e 11). O ponto interessante do último sistema referido é que as pequenas partículas sofrem menos locomoção durante a aquisição de projeção comparado com o modelo 1172.

A respeito da otimização de tempo, o modelo 1176 possui uma vantagem em relação ao modelo 1172, que é a possibilidade de fazer aquisição de várias amostras de uma única vez. Isso acontece porque o modelo 1172 só faz aquisição de uma amostra de cada vez e o usuário necessita recolocar os parâmetros toda vez que for utilizá-lo. O modelo 1176 otimiza o tempo para o usuário porque pode colocar o conjunto de amostra e não ter que recolocar os parâmetros sempre que necessitar ser usado.

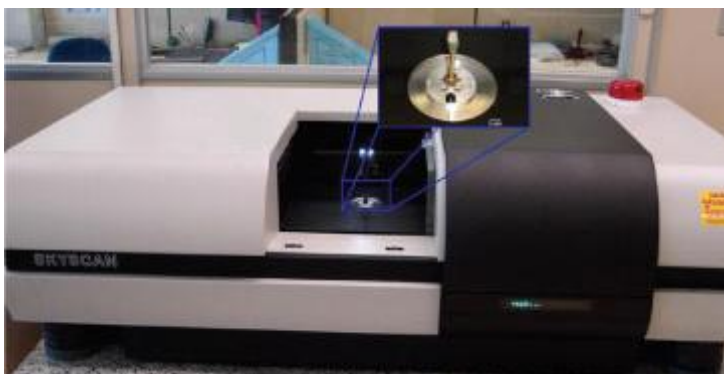
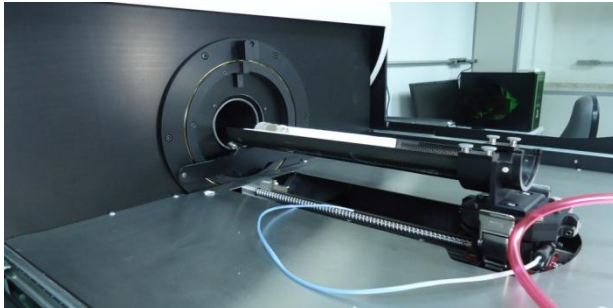
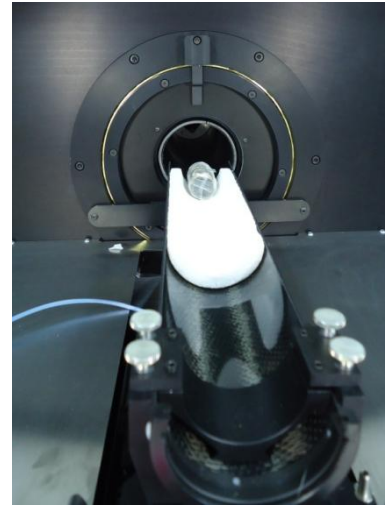


Figura 24 - A parte interna do microtomógrafo de raios-x (modelo 1172)



Fotografia 10 - Interior de Microtomógrafo de raios-x do modelo 1176 (a)



Fotografia 11 - Interior de Microtomógrafo de raios-x do modelo 1176 (b)

Apesar das características diferentes entre os dois modelos, todavia, uma adaptação de uso para o solo é permitida quando não há necessidade de variar o tamanho de pixel.

5.1.3 Aplicação do software de *NRCon* na padronização de contraste das imagens tomográficas

O software NRCon foi utilizado para reconstrução das projeções em 2D nos experimentos. Contudo esse software ainda possibilitou a padronização dos valores de contraste das imagens tomográficas, com o auxílio de um histograma, tanto pelo coeficiente de atenuação quanto pela unidade de Hounsfield. Portanto independentemente do contraste, os valores de coeficiente de atenuação e unidade de Hounsfield permaneceram iguais em todos os pontos (Figuras 25, 26 e 27).



Figura 25 - Contraste utilizado no experimento com valor de posição e coeficiente de atenuação

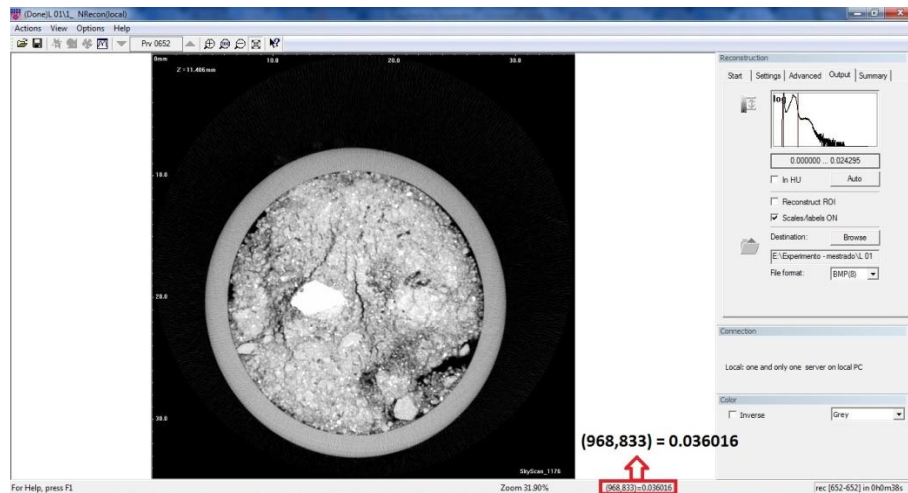


Figura 26 - Contraste muito alto e o valor de posição e coeficiente de atenuação



Figura 27 - Contraste muito baixo e o valor de posição e coeficiente de atenuação

5.2 Contribuição dos atributos físicos na qualidade ambiental do solo

5.2.1 Densidades

De acordo com os resultados obtidos no experimento, foi estimada uma curva de coeficiente de atenuação em relação à unidade de Hounsfield (Gráfico 2). Em outras palavras, essa curva determinou claramente a diferença quantitativa entre os seis tipos de solo analisados. Ela permite o cálculo de densidade por meio de Unidade de Hounsfield proveniente das imagens tomográficas, ou seja, demonstrou que o método utilizado é de investigação não-destrutivo e não-invasivo (CRESTANA, 1985).

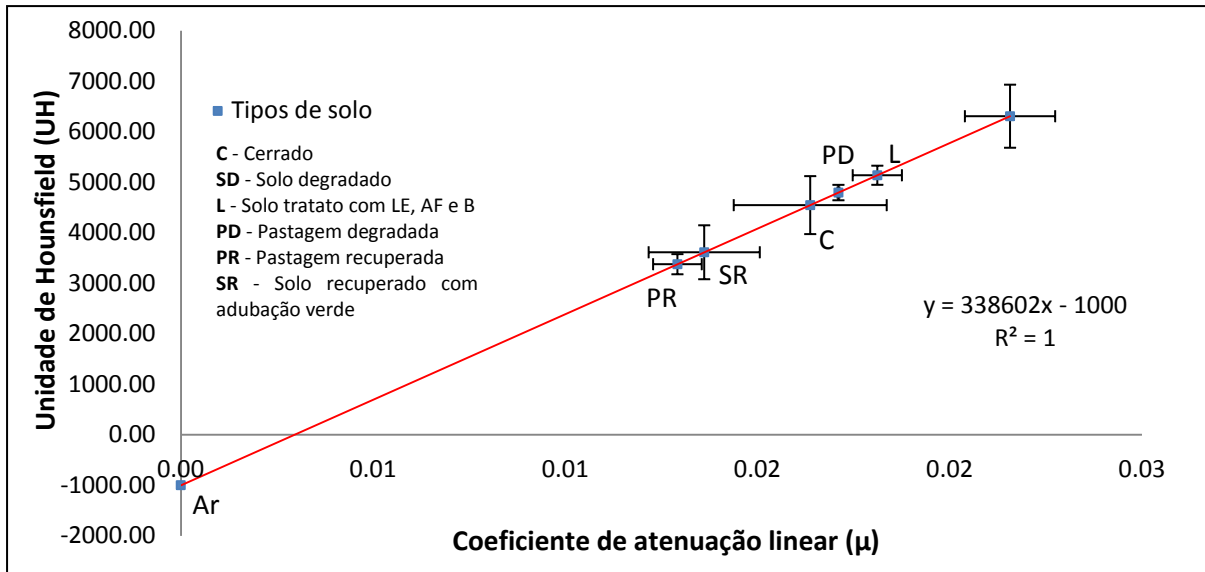


Gráfico 2 - Coeficiente de atenuação versus Unidade de Hounsfield (UH)

Foram estimadas experimentalmente, nessa pesquisa, as relações entre densidade e as unidades de Hounsfield em três camadas do solo, demonstrou-se a validade desse método e assinalou-se o comportamento parcial dos solos submetidos em diferentes manejos e profundidades distintas.

Nota-se que, conforme a compactação do solo, aumentou-se a unidade de Hounsfield (Gráfico 3 e 4), exceto na camada III (Gráfico 5), pois houve uma divergência grande dos pontos. Isso indica também uma necessidade de maior número de pontos para melhor interpretação do experimento.

Conforme a profundidade das camadas, houve um aumento nos intervalos da unidade de Hounsfield, partindo de 0 a 6000 U.H. da camada I (Gráfico 3), de 0 a 7000 U.H. da camada II (Gráfico 4) para 0 a 8000 U.H. da camada III (Gráfico 5). Isso significa que conforme a profundidade aumenta-se a compactação, ou quanto maior a densidade, maior será a unidade de Hounsfield no solo.

Outro ponto que vale a pena ressaltar é a ordem distributiva dos tipos de solo, que são semelhantes nas três camadas (Gráficos 3,4 e 5). Partindo do solo menos denso, do Cerrado, solo recuperado (aplicação de adubação verde durante sete anos, de 1992 a 1999), solo tratado com lodo de esgoto + *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo Alves) + *Brachiaria decumbens*, pastagem recuperada, pastagem degradada e por último solo degradado (remanescente da

construção de usina hidrelétrica) nessa ordem. Demonstrou-se quantitativamente o grau de compactação ou de recuperação.

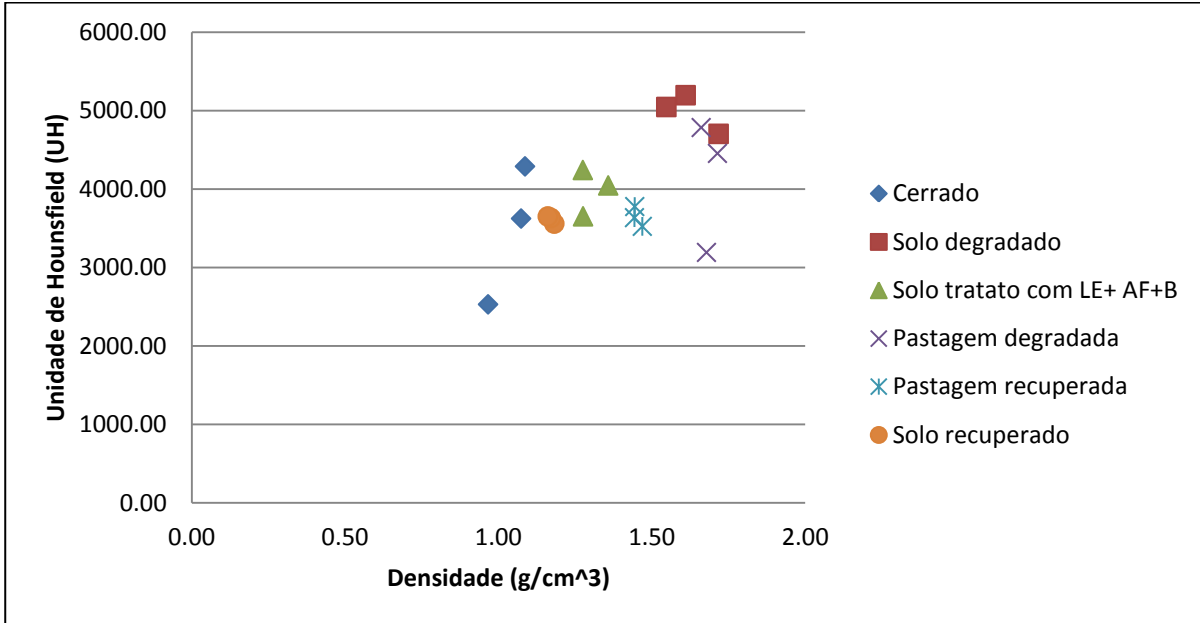


Gráfico 3 - Densidade de solo versus Unidade de Hounsfield (UH) na camada I

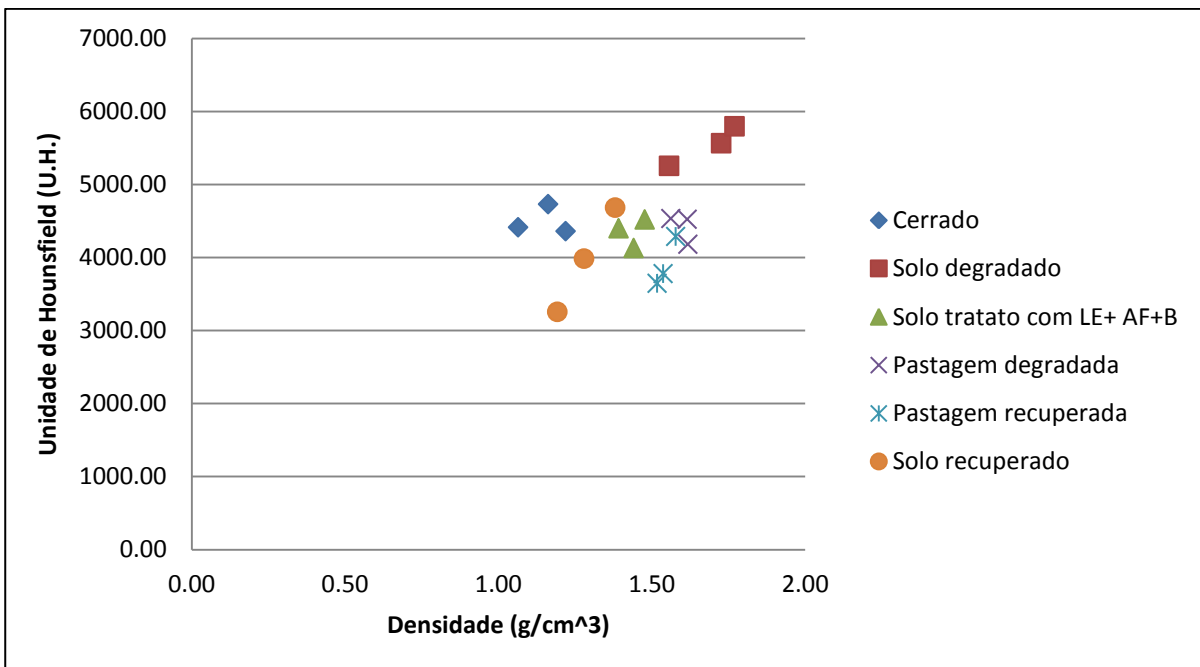


Gráfico 4 - Densidade de solo versus Unidade de Hounsfield (UH) na camada II

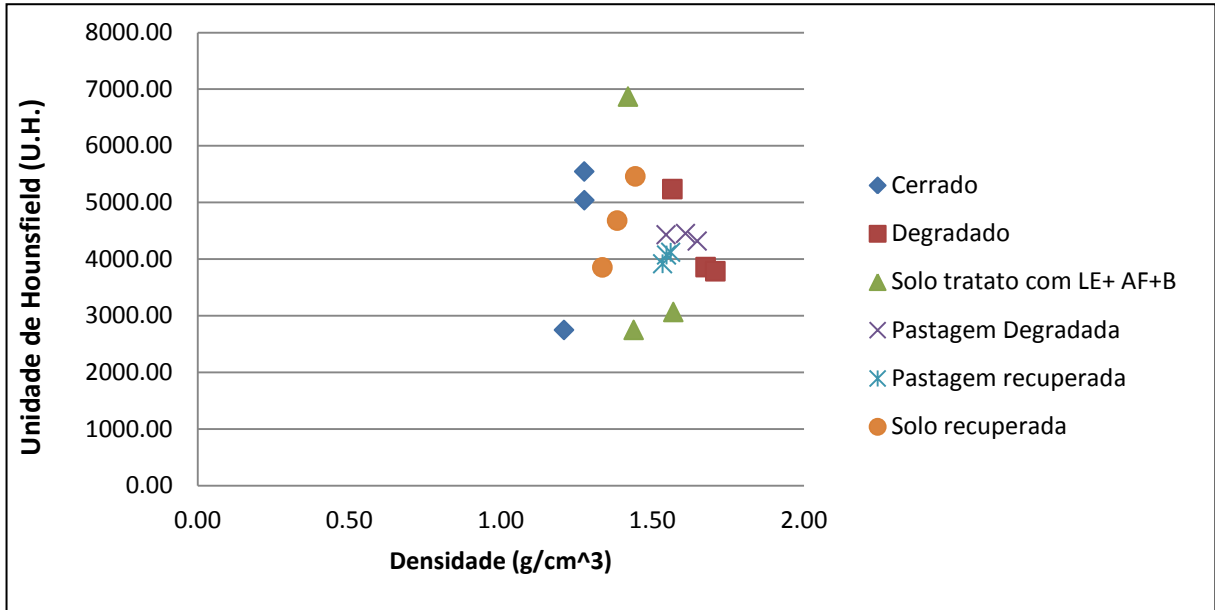


Gráfico 5 - Densidade de solo versus Unidade de Hounsfield (UH) na camada III

Calculada a média dos três pontos de coleta, nota-se que o comportamento da camada I e II são semelhantes (Gráfico 6 e 7), entretanto houve um aumento na unidade de Hounsfield conforme a profundidade. Mais uma vez este comportamento mostra uma evidência da influência da compactação do solo nessas camadas para os tipos de solo deste estudo. No entanto foi detectada uma pequena divergência entre pastagem recuperada e solo recuperado. O efeito de recuperação da pastagem recuperada destacou-se um pouco melhor do que o do solo recuperado por este método de análise. O mesmo resultado foi também observado na camada III (Gráfico 8), com uma defasagem ainda mais acentuada.

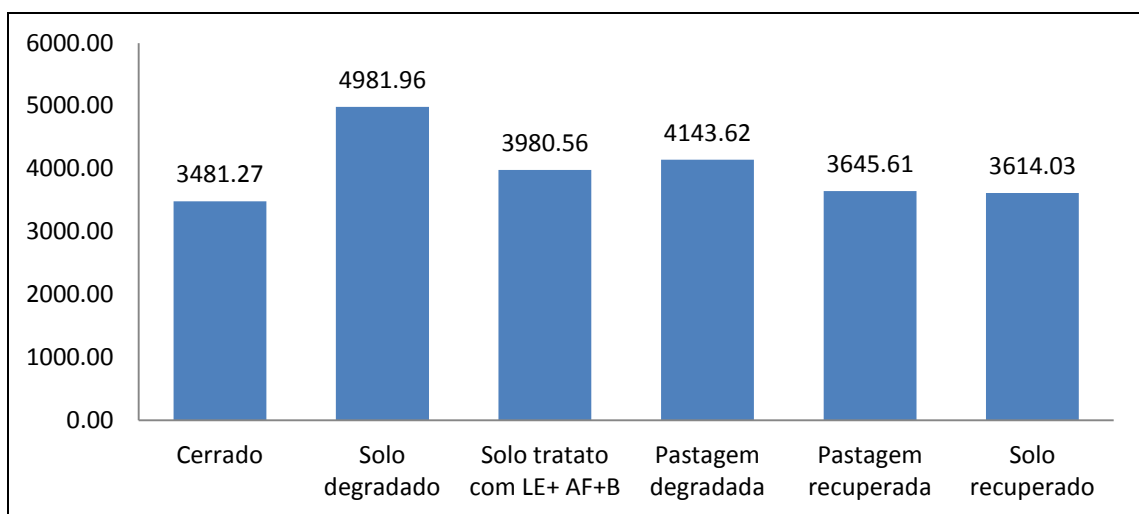


Gráfico 6 - Média de Unidade de Hounsfield na camada I

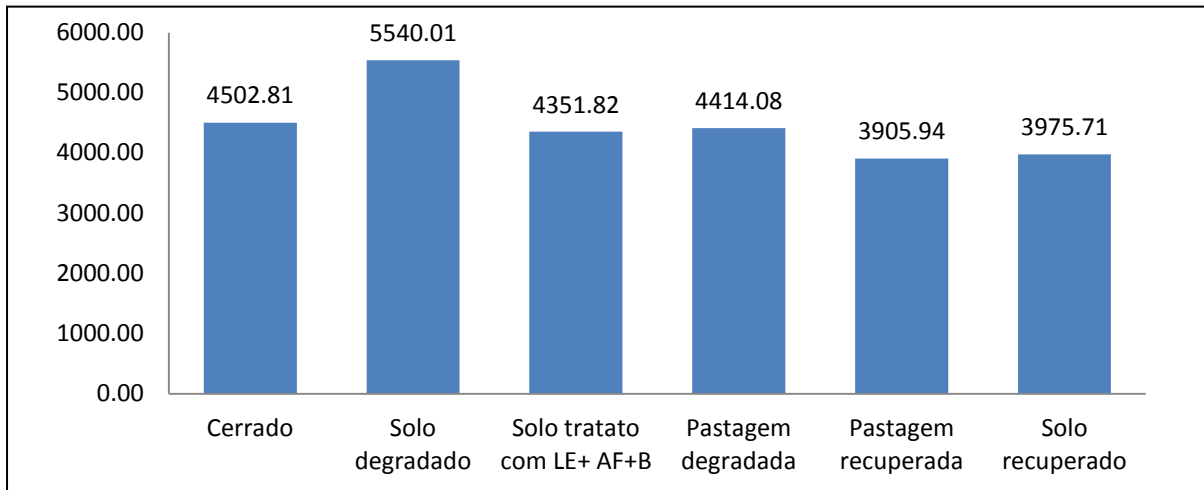


Gráfico 7 - Média de Unidade de Hounsfield na camada II

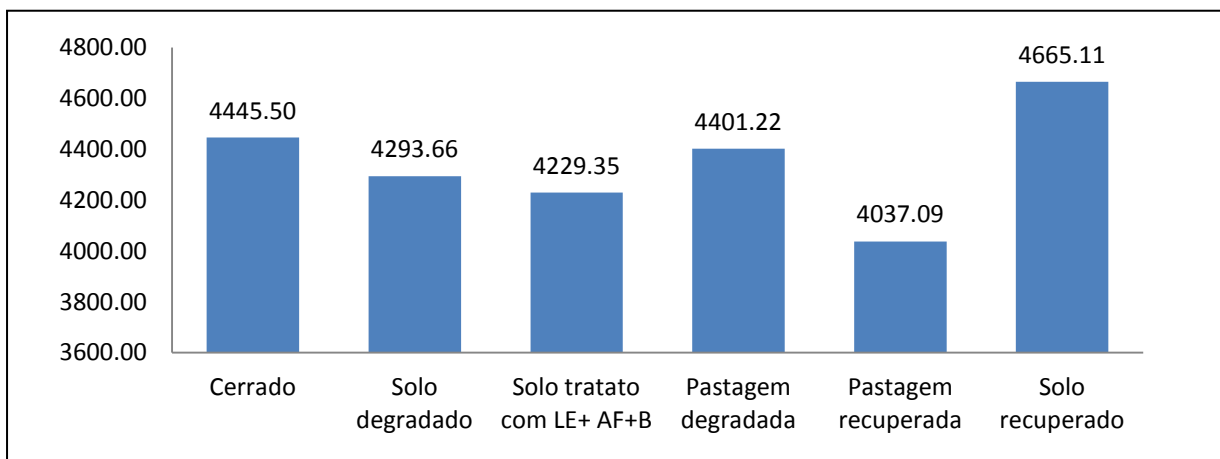


Gráfico 8 - Média de Unidade de Hounsfield na camada III

5.2.2 Distribuição de tamanhos dos agregados

O tamanho dos agregados é considerado um dos principais atributos físicos do solo, pois são essas partículas secundárias que constituem a estrutura do solo e as atividades que nele ocorrem, por exemplo, a velocidade de infiltração de água e de ar. Dessa forma, a distribuição do tamanho de agregado está relacionada diretamente com a distribuição de poros e grau de erosividade do solo (MILLER; GARDINER, 1997). A quantificação e os arranjos desses agregados são indicativos de extrema relevância no entendimento da qualidade ambiental do solo e maximização do rendimento das atividades agrícolas.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se observar que, na camada I, a distribuição de tamanho de agregado é proporcional à compactação do solo, ou seja, conforme

o aumento de densidade (Gráfico 3) aumenta a proporção de quantidade de agregados na classe de 4,4783-17,913 mm (Gráfico 9), exceto para pastagem recuperada e degradada. Nesse caso, todo esse processo está associado diretamente aos processos erosivos que ocorrem na região. Um solo natural (Cerrado) apresenta maior número de agregados grandes (Gráfico 10) do que um solo degradado (Gráfico 11) e de uma pastagem degradada (Gráfico 12) que, por sua vez, possuem maior número de microagregados. A concentração desses microagregados impede a circulação de ar e água no solo, inviabiliza o acúmulo de matéria orgânica no solo, e, posteriormente, o crescimento das plantas.

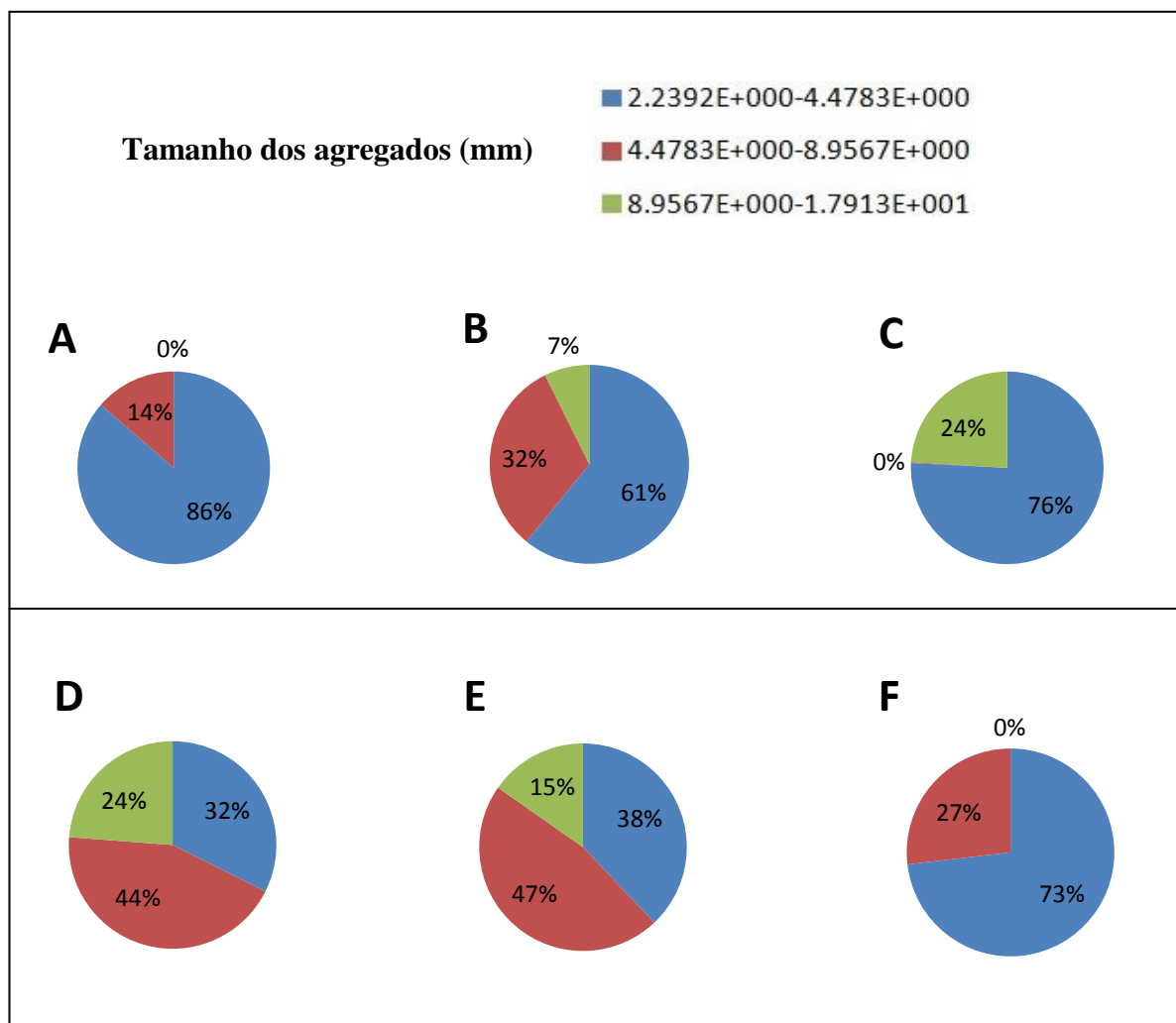


Gráfico 9- Distribuição de quantidade dos macroagregados (A: Solo degradado; B: Solo tratado com LE+AF+B; C: Pastagem degradada; D: Cerrado; E: Solo recuperado; F: Pastagem recuperada)

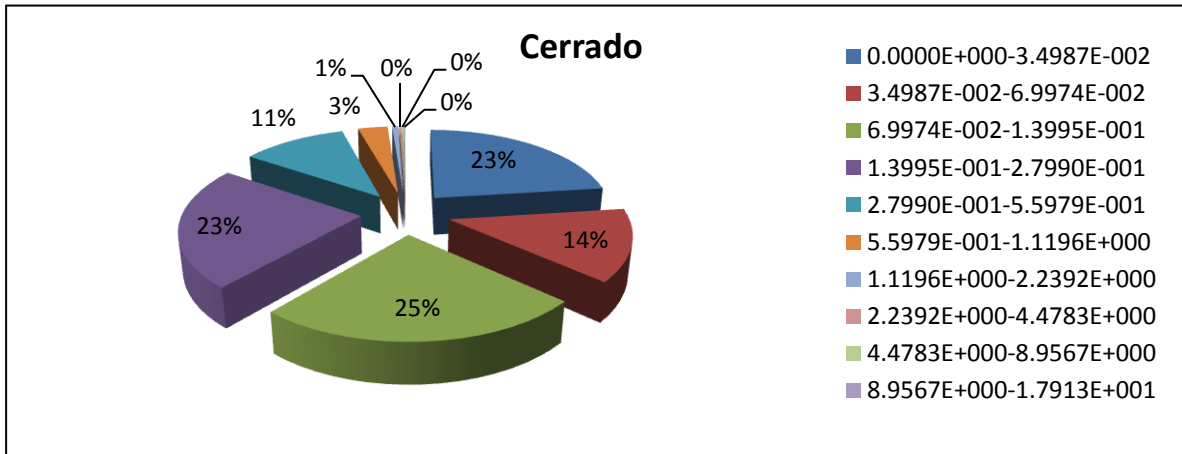


Gráfico 10 - Distribuição de tamanhos dos agregados nos solos de Cerrado, na camada I

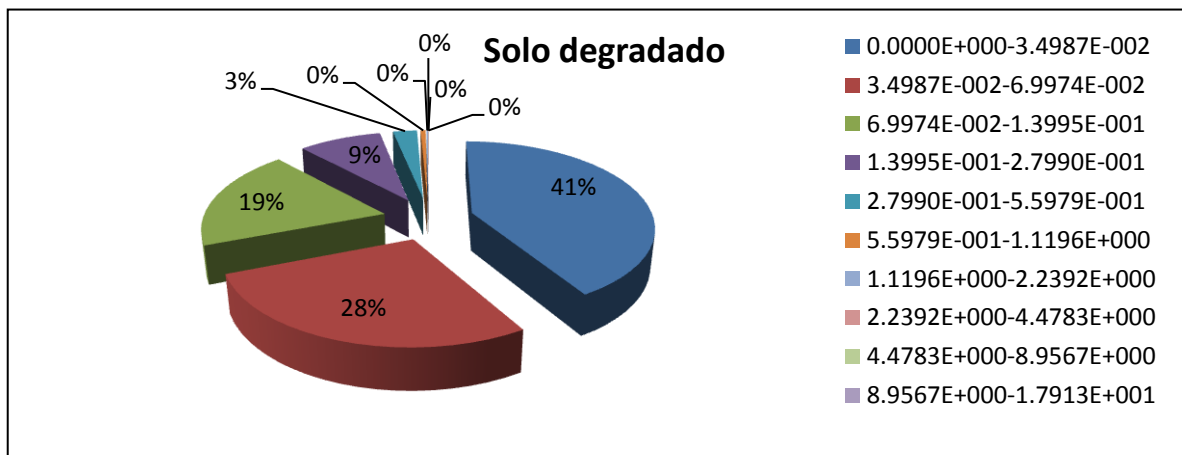


Gráfico 11 - Distribuição de tamanhos dos agregados nos solos degradados, na camada I

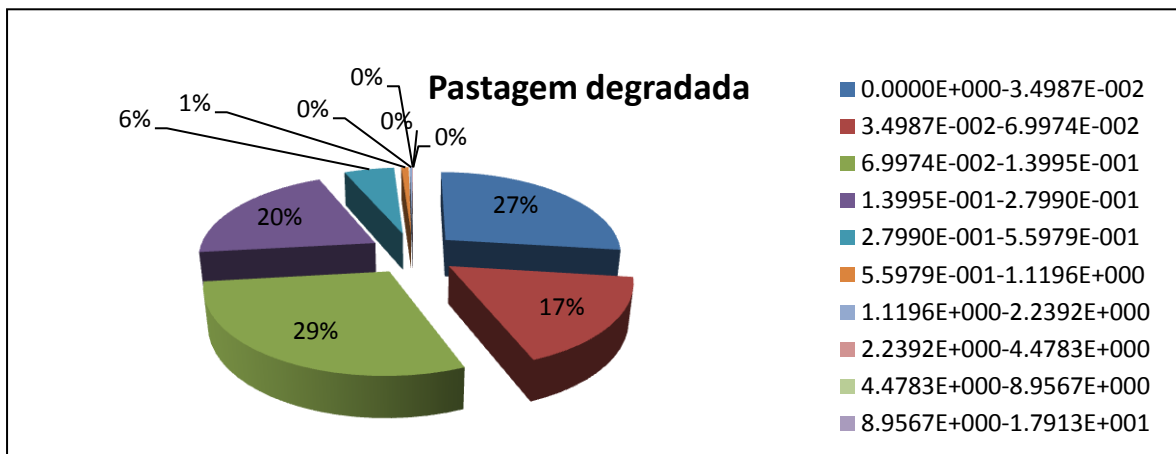


Gráfico 12 - Distribuição de tamanhos dos agregados nos solos de pastagem degradada, na camada I

Pode-se observar, ainda no gráfico, que houve uma melhora na distribuição de agregados do solo tratado com LE+AF+B (Gráfico 13) em relação ao solo degradado (Gráfico 11). Todavia os agregados ainda estão concentrado na faixa de 0.034987 a 0.2799 mm. Tal como acontece com o solo recuperado (Gráfico 14). No entanto, esse último já apresenta a presença de macroagregados. No caso das pastagens degradadas (Gráfico 12) e recuperadas (Gráfico 15),

embora possuam porcentagens próximas, contudo, a pastagem recuperada mostra a diminuição de agregados de tamanhos menores.

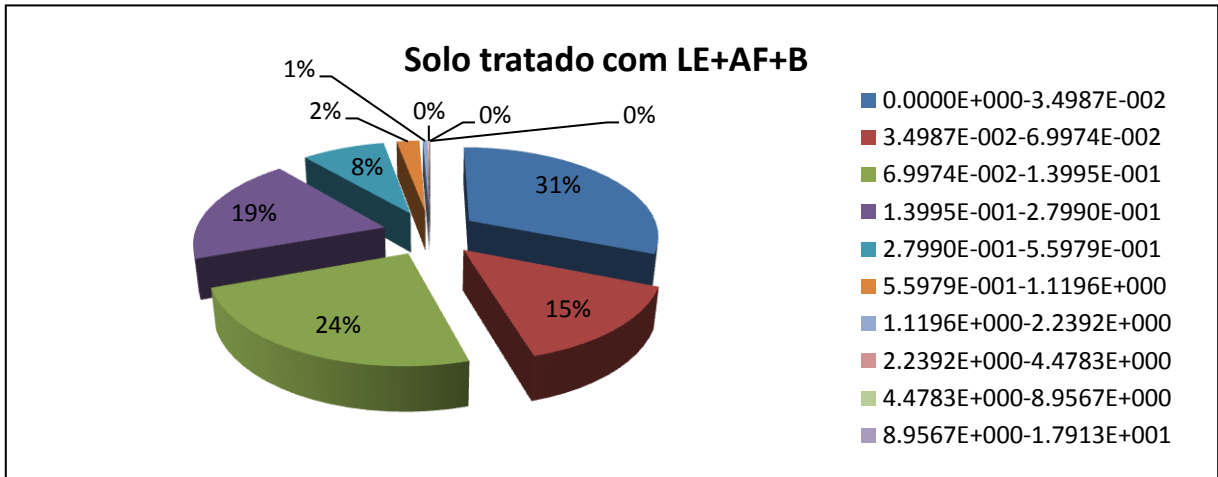


Gráfico 13 - Distribuição de tamanhos dos agregado nos solos recuperado com LE+AF+B, na camada I

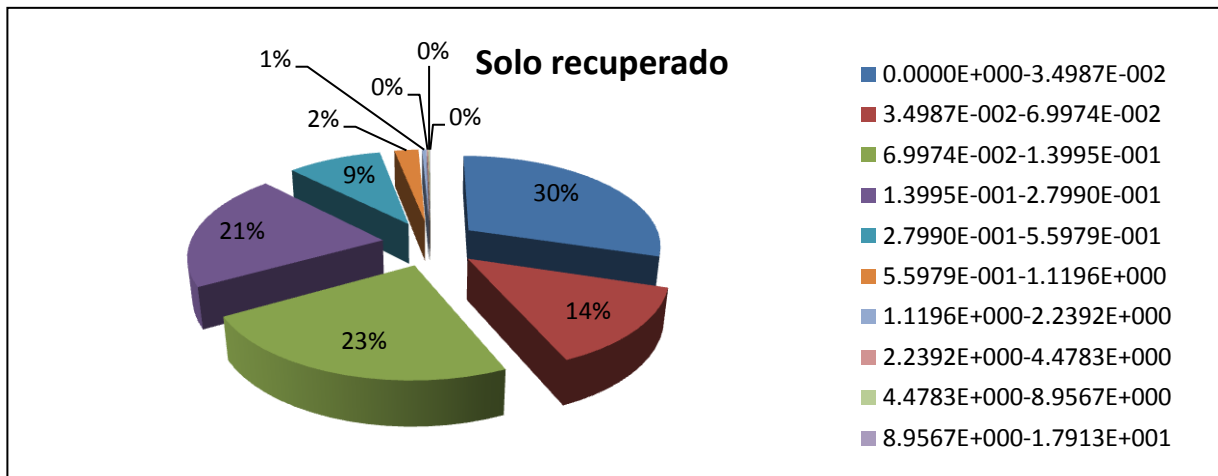


Gráfico 14 - Distribuição de tamanhos dos agregado nos solos recuperado, na camada I

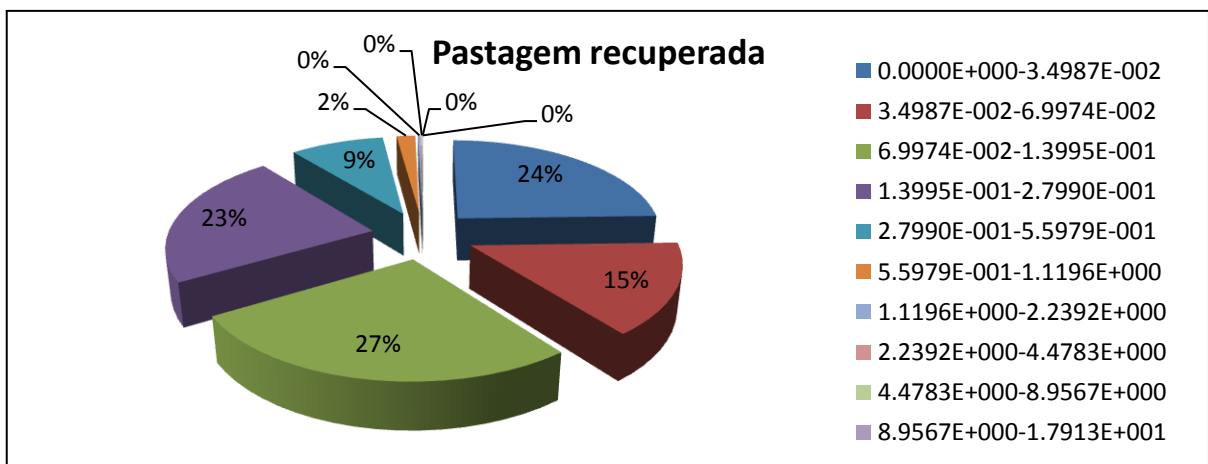


Gráfico 15 - Distribuição de tamanhos dos agregado na pastagem recuperada, na camada I

Houve pequenas alterações no comportamento do solo na camada II, devido à compactação da camada de solo superior e às atividades na superfície. Foi detectada nessa camada uma diminuição geral de agregados grandes (Gráfico 16) e aumento de agregados pequenos para cerrado, comparando com a camada I (Gráfico 17). Além disso, houve um decréscimo na soma de quantidade de agregados maiores no solo recuperado, embora esses continuem existindo (Gráfico 18). Enquanto isso, os solos das pastagens apresentaram distribuições semelhantes até 0,2799 mm, sinal de que os dois manejos estão se aproximando nesta camada (Gráfico 19). O solo tratado com LE+AF+B começou a ficar uniformemente distribuído a partir de 1,1196 mm, aproximando-se do solo degradado (Gráfico 20).

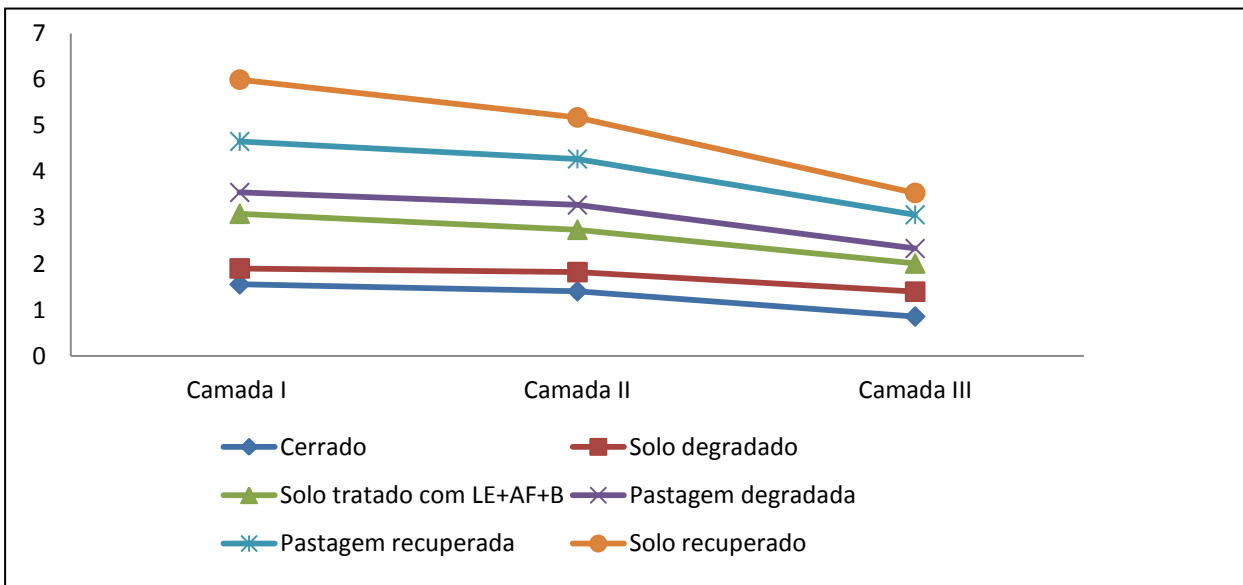


Gráfico 16 - Distribuição de tamanhos dos agregados grandes nas três camadas

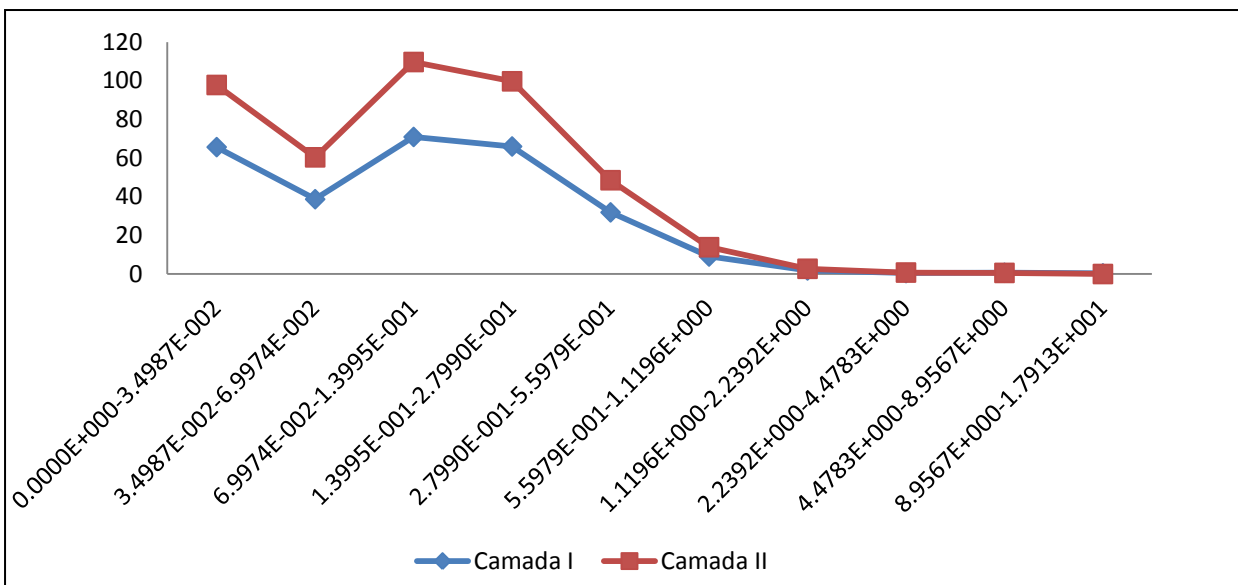


Gráfico 17 - Distribuição de tamanhos dos agregados no Cerrado, na camada I e II

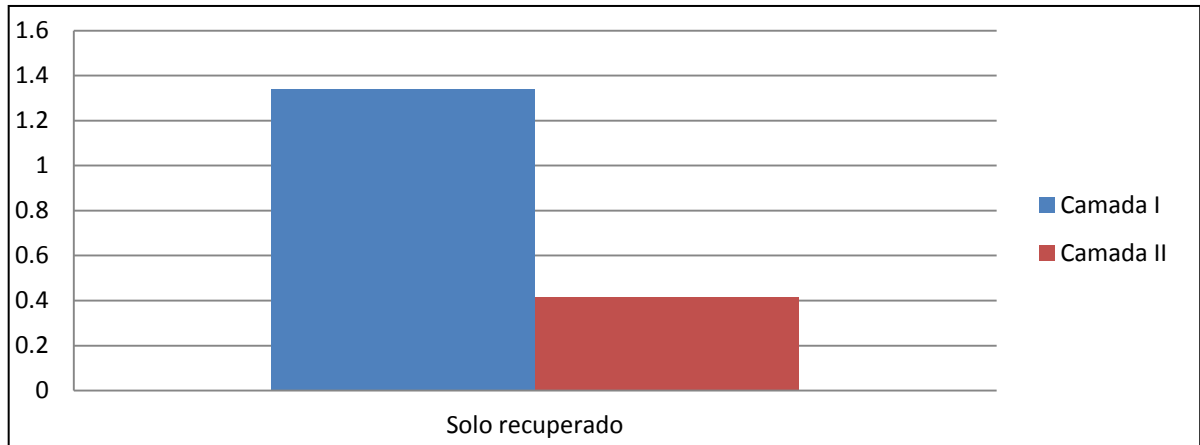


Gráfico18 - Soma dos agregados grandes de um solo recuperado, na camda I e II

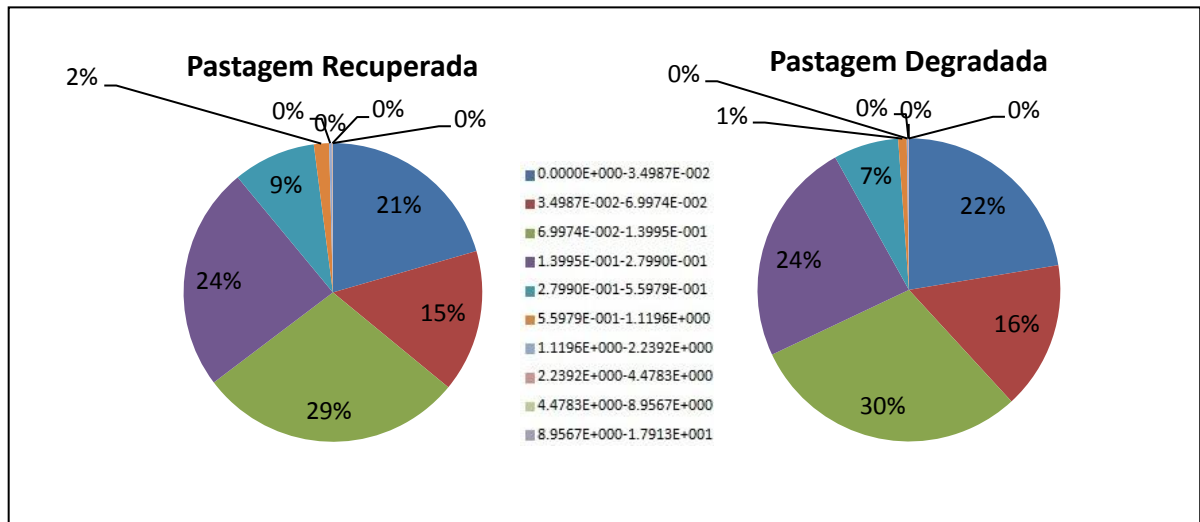


Gráfico19 - distribuição dos agregados nos solos de pastagem recuperada e degradada recuperado, na camda II

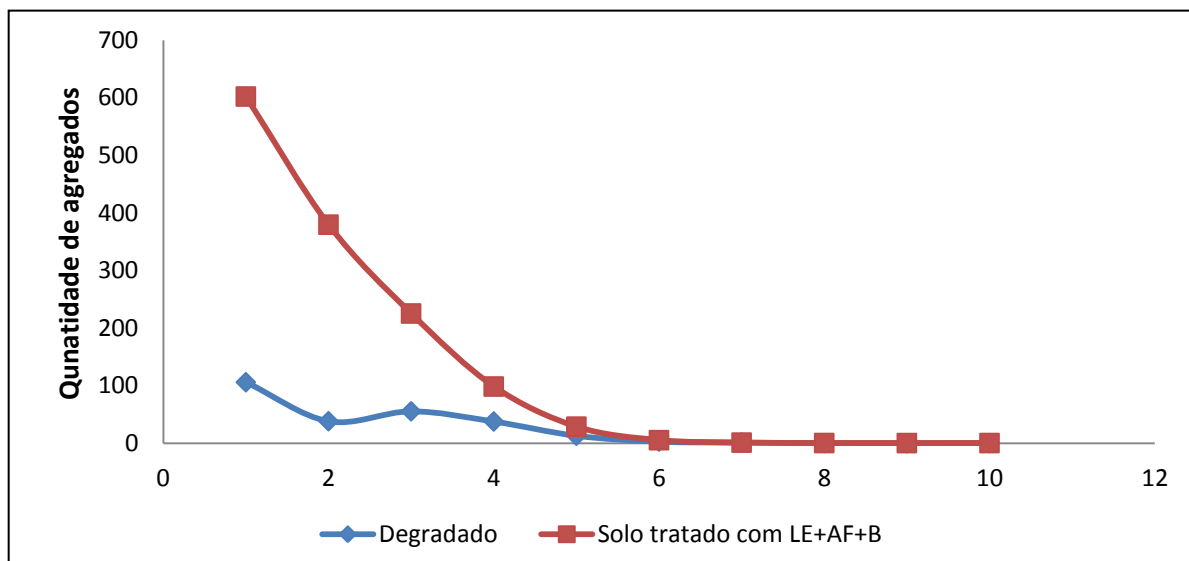


Gráfico20 - Distribuição de tamanhos dos agregados no solo degradado e tratado com LE+AF+B, na camada II

Por último, a camada III apresentou uma conduta distinta das outras camadas superiores. Em primeiro lugar, a distribuição de porcentagem dos agregados pequenos de cerrado começou a aumentar a quantidade (Gráfico 21), enquanto a do solo degradado e aquele tratado com LE+AF+B apresentaram quantidades de agregados bem próximas, sinal de que os dois solos estão cada vez mais semelhantes uns aos outros, conforme a profundidade (Gráfico 20 e 22). Em seguida, foi observado que o tamanho dos solos começaram a se concentrar e a se uniformizar, a partir da faixa de 0,55979 a 1.1196 mm. Esse mesmo fenômeno tende a progredir nas classes de maior tamanho (Gráfico 23). Vale a pena lembrar a questão da rachadura na última classe de agregados para os solos degradado e do cerrado que discordaram da maioria.

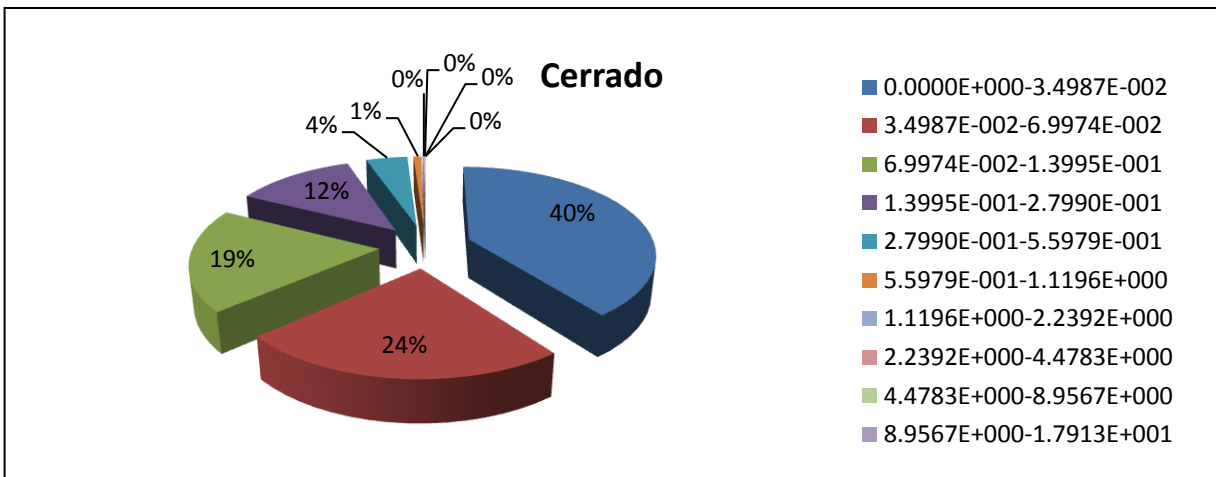


Gráfico21 - Distribuição de tamanhos dos agregados no solo de Cerrado na camada II

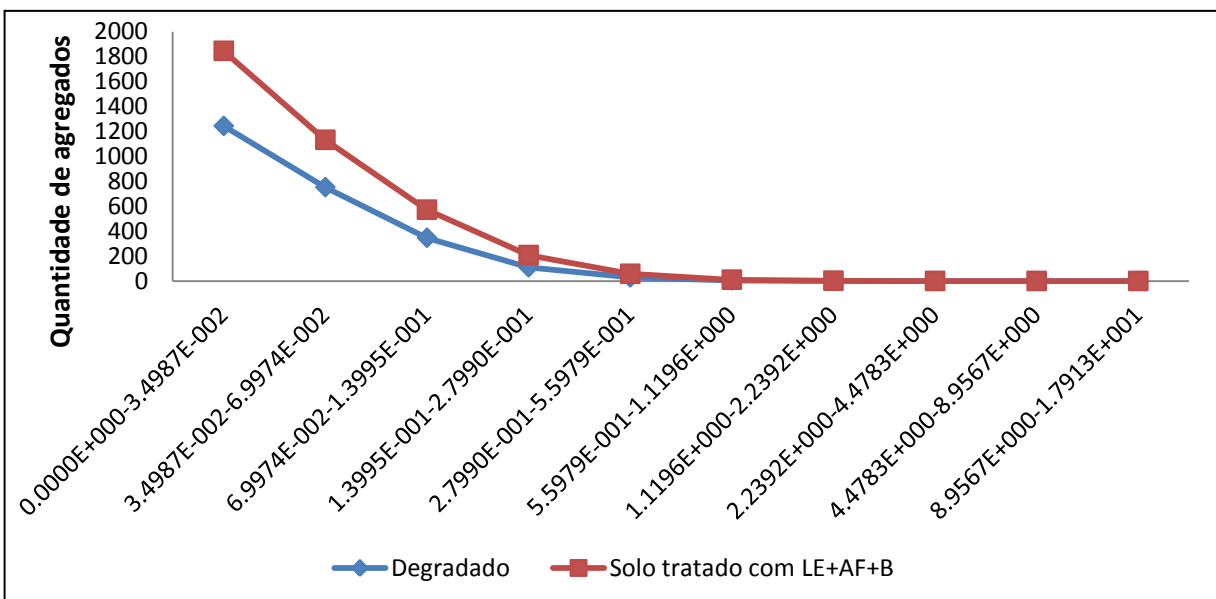


Gráfico22 - Distribuição de tamanhos dos agregados no solo degradados e tratado com LE+AF+B na camada II

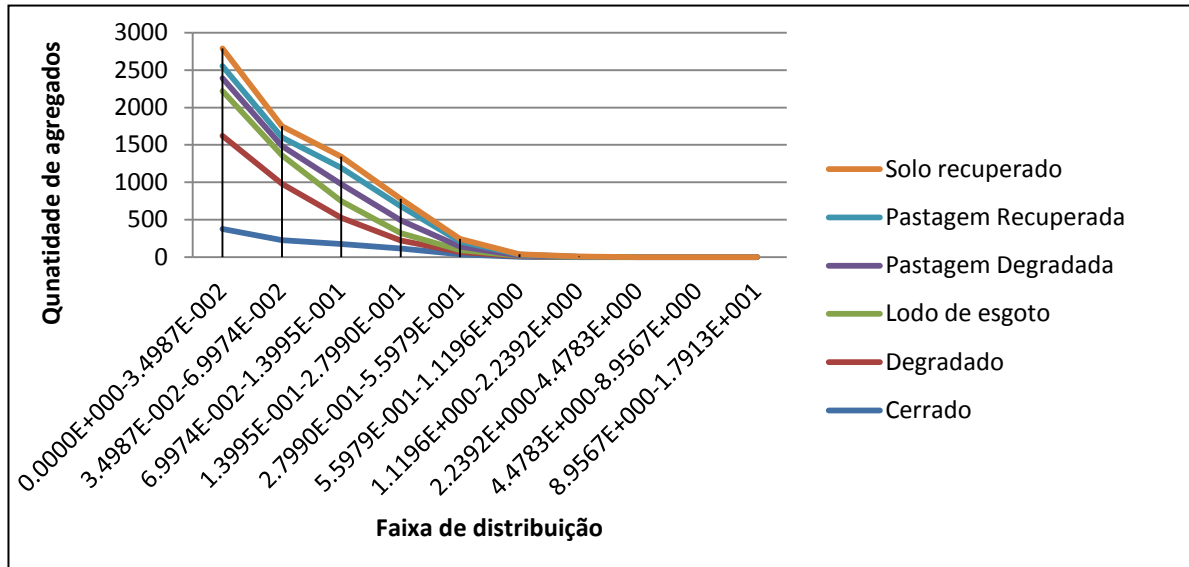


Gráfico23 - Distribuição de tamanho dos agregados dos solos na camda III

Pode-se dizer que a distribuição de tamanhos dos agregados é realmente um indicativo bastante útil e importante para extrair as informações contidas no interior do solo (MILLER; GARDINER, 1997) e, dessa maneira auxiliar na compreensão e interpretação da qualidade ambiental de solo.

5.2.3 Porosidade

Nesta parte da pesquisa, constatou-se que a média de volume dos poros nas três camadas do solo de Cerrado, de recuperado e de pastagem recuperada possuem maior valor de espaço poroso. Vem, em seguida, o solo tratado com LE+AF+B, pastagem degradada e, por último, o solo degradado (Gráficos 24, 25 e 26). Isto é totalmente correspondente aos resultados obtidos anteriormente, numa visão generalizada. Entretanto ao analisar as distintas parcelas, observa-se que, dentre elas, pode-se encontrar resultados particulares.

Foi observado um decréscimo geral do volume de poros na mesma parcela conforme a profundidade. Houve somente algumas diferenças para cerrado e solo degradado na camada III.

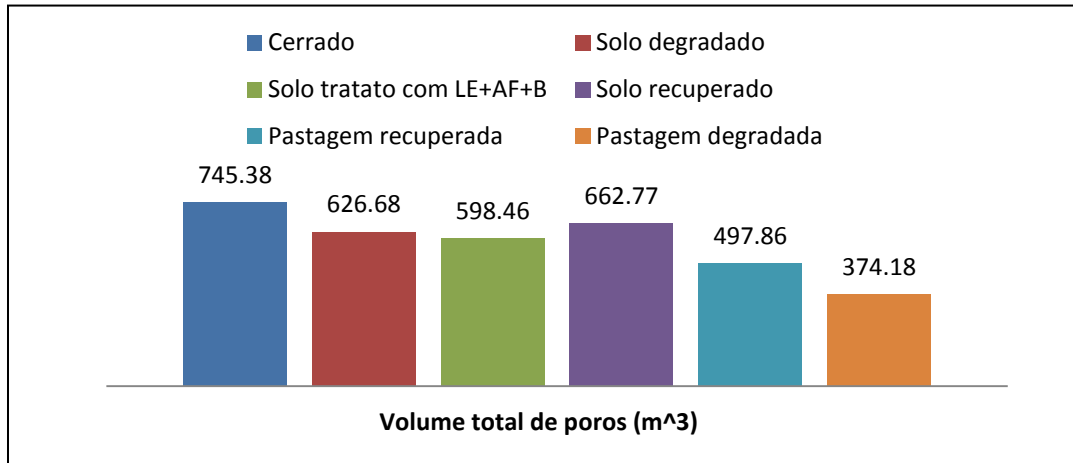


Gráfico24 - Média de volume total de poros na camada I

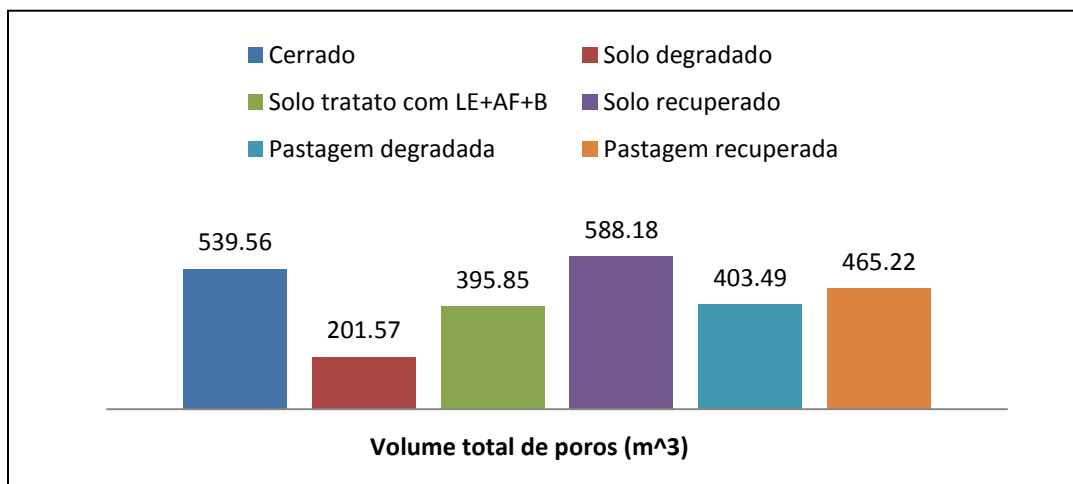


Gráfico25 - Média de volume total de poros na camada II

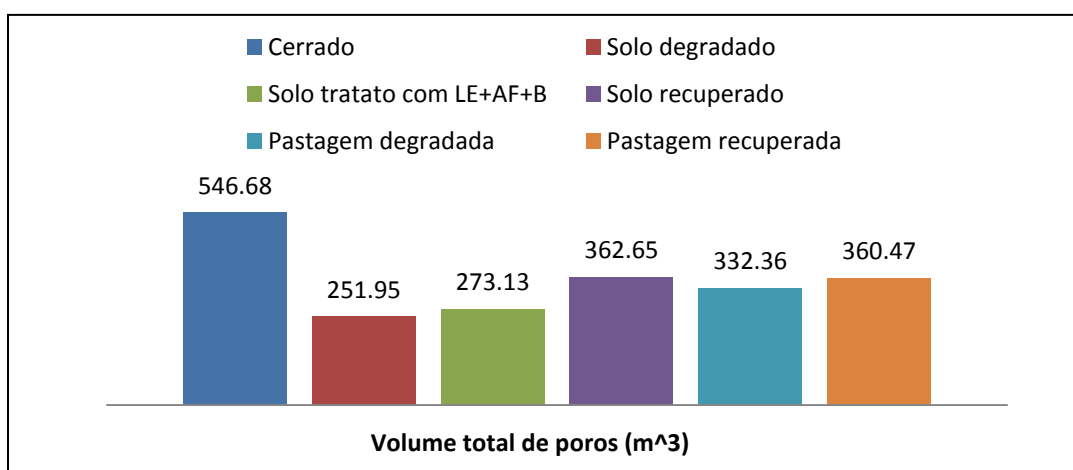


Gráfico26 - Média de volume total de poros na camada III

5.3 Comparação entre os métodos de tomografia computadorizada e convencional

Para esta seção serão realizadas comparações quantitativas e qualitativas e imagens tomográficas, entre os dois métodos de análise.

5.3.1 Distribuição de tamanho dos agregados

Foi mostrada no item 5.2.2 a distribuição de tamanho dos agregados por meio de um método não convencional. Será feita nos itens 5.3.1 e 5.3.2 uma comparação quantitativa do método convencional de peneira, com as análises de imagens tomográficas.

Segundo a pesquisa de Dos Santos Batista Bonini e Alves (2011), as amostras de solo (torrão) foram coletadas com enxadão e os agregados foram levados ao laboratório e separados em peneiras com abertura de 6-4 mm. Os agregados foram classificados com intervalo de <0,25 a 6 mm. Diferente disso, o método de análise por meio de imagens tomográficas permitiu uma escala de intervalo entre 0.0034987 a 17.913 mm, ou seja, na casa de micrômetro a centímetro, praticamente setenta vezes menor no inferior da escala. Para efetuar uma comparação coerente, foi selecionada apenas uma parte aproximada dessa escala micrométrica para esse fim.

Embora seja uma comparação qualitativa, precisa-se considerar a diferença de tempo dos dois experimentos. Neste caso, foi em torno de quatro anos, e a diferença entre as duas escalas no momento de aproximação.

No Gráfico 26 mostrou-se a porcentagem de distribuição de agregados adquiridos pelo método convencional em 2008 (Figura 27). Percebe-se que os agregados abaixo de 2 mm do cerrado são apenas a minoria, enquanto pela análise das imagens tomográficas (Gráfico 28), a sensibilidade dos agregados pequenos cresceu tremendamente nesse intervalo. Desse modo, as análises pelas tomografias são bastante interessantes para realizar uma avaliação mais minuciosa nas classes de agregados de tamanho pequeno.

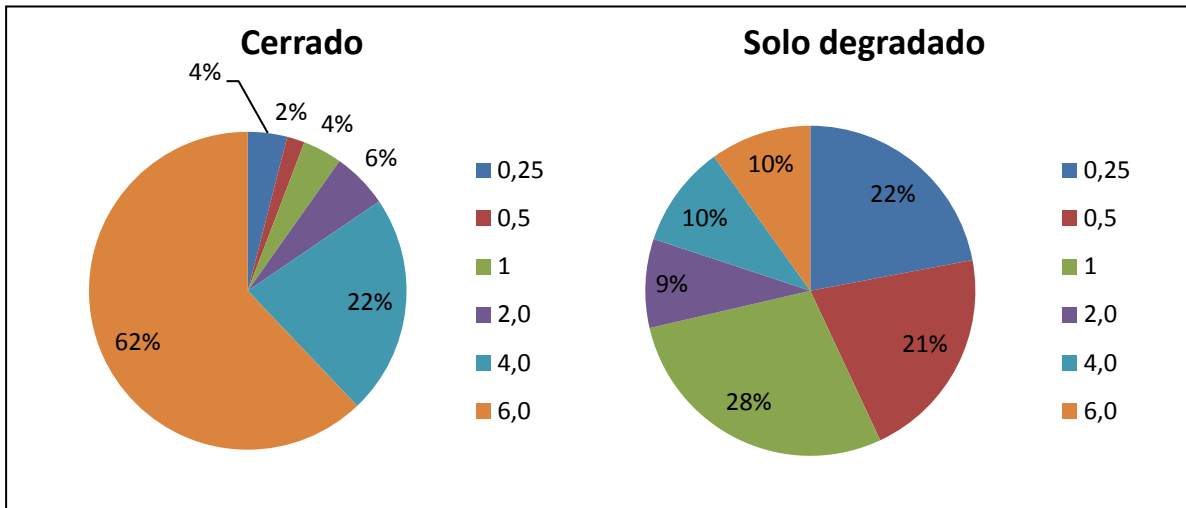


Gráfico 27 - Porcentagem de distribuição de agregados no solo de Cerrado e degradado pelo método convencional

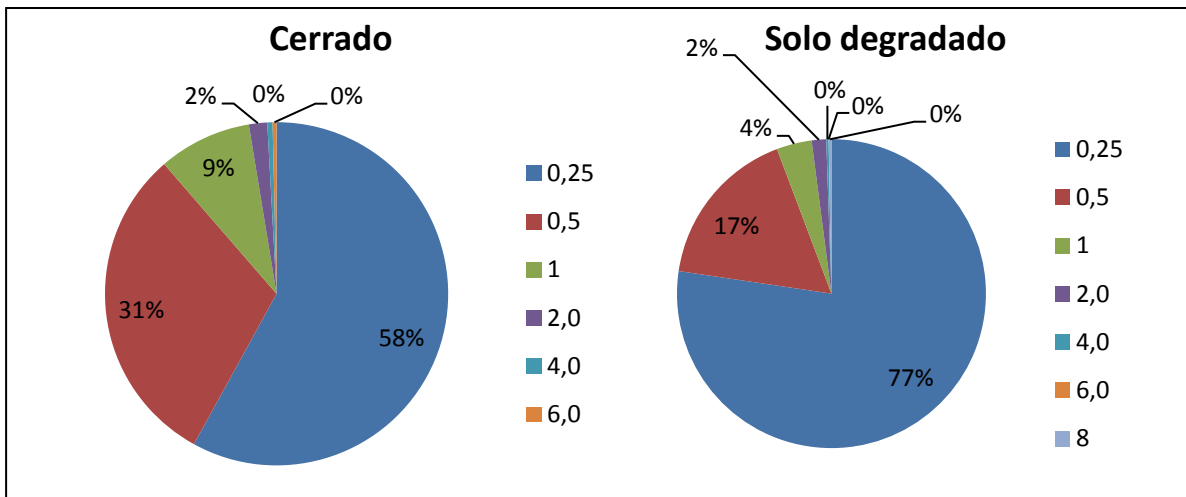


Gráfico 28 - Porcentagem de distribuição de agregados no solo de Cerrado e degradado pelo método de tomografia computadorizada (não-convencional)

5.3.2 Porosidade

Embora tenha sido feita a análise de volume total de poros no ítem 5.2.3, constatou-se que esta análise não é a mais apropriada para efetuar uma comparação quantitativa com o método convencional (KITAMURA et al., 2008), devido às definições de porosidade entre os dois métodos. Entretanto, em termos de comportamento, os dois métodos são semelhantes (Gráfico 29 e 30).

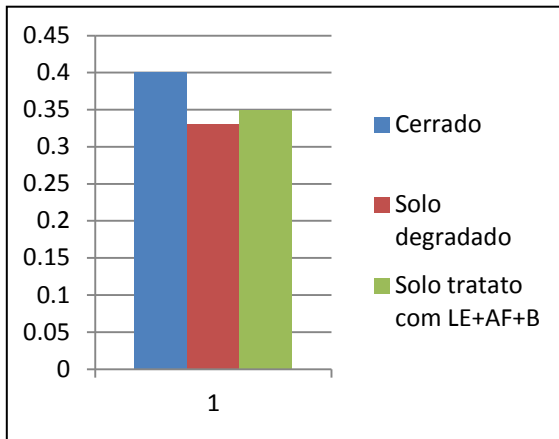


Gráfico 29 - Valores médios obtidos pelo método convencional

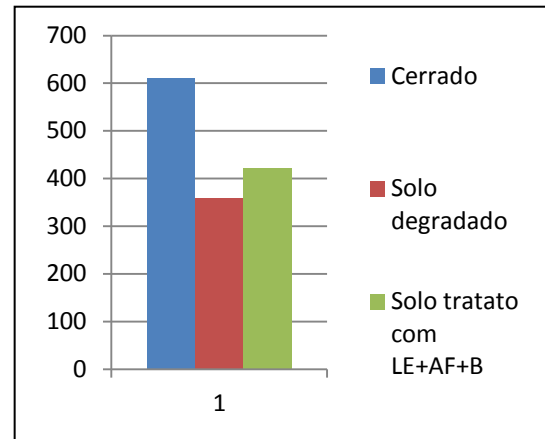


Gráfico 30 - Valores médios obtidos pelas imagens tomográficas

5.3.3 Visualização qualitativa das estruturas internas do solo

As imagens tomográficas permitiram uma visualização clara das estruturas morfológicas dos solos. Com o auxílio de software *DataViewer*, foi possível fazer cortes em três planos distintos: transversal, sagital e coronal, o que significa a possibilidade de escolha da seção de cortes interessados. Notou-se que, não importa qual tipo de plano utilizado, as características físicas e ambientais da amostra permanecem as mesmas.

Ao comparar o solo do cerrado (Figura 28) com os demais solos (Figuras 29 a 33) percebe-se claramente a aparente diferença entre as distribuições de tamanho de agregado e dos poros, pois o solo de cerrado é muito mais variado nesses aspectos, ao contrário do solo degradado que apresenta uniformidade nesse sentido.

Segundo os dados obtidos, foi constatada nesta parte a real evolução dos solos que receberam tratamento de recuperação. O solo recuperado (Figura 33) é o mais próximo do solo natural de cerrado (Figura 28); em seguida, vem o solo tratado com LE+AF+B (Figura 30) e, por último, a pastagem recuperada (Figura 32). O solo retirado da pastagem degradada apresenta uma aparência semelhante à do solo degradado (Figuras 31 a 29).

Em termos da existência de partículas densas no solo, foi observada uma maior quantidade dessas partículas nos solos degradados e tratados com LE+AF+B (Figura 30) e em algumas amostras de cerrado (Figura 28). No entanto a maior parte das amostras apresentam partículas pequenas e bastante espalhadas.

Nos planos sagitais e coronais foram identificadas diversas rachaduras no solo degradado (Figura 35 e 41) e tratado com LE+AF+B (Figura 36 e 42) devido à ação de ressecamento e transporte, porém, no caso de solo tratado deve associar-se, ainda, a ação desintegradora da planta nativa *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves), adição de matéria orgânica proveniente do lodo de esgoto e rendimento de matéria verde da *Brachiaria decumbens* (ALVES; CAMPOS, 2008).

5.3.3.1 Plano Transversal

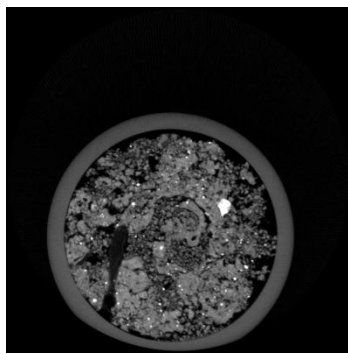


Figura 28 - Cerrado (a)

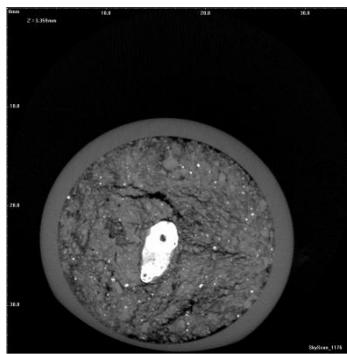


Figura 29 - Solo degradado (a)

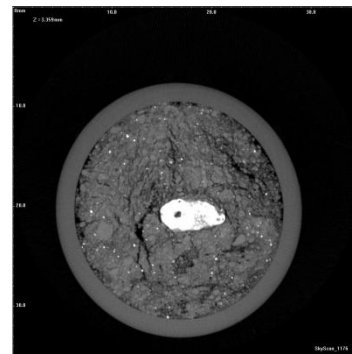


Figura 30 - Solo tratado com LE+AF+B (a)

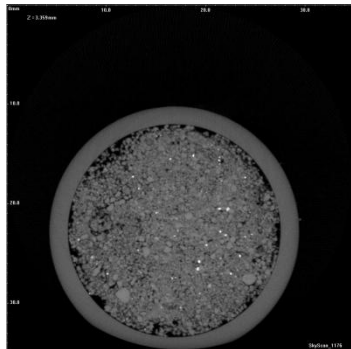


Figura 31 - Pastagem degradada (a)

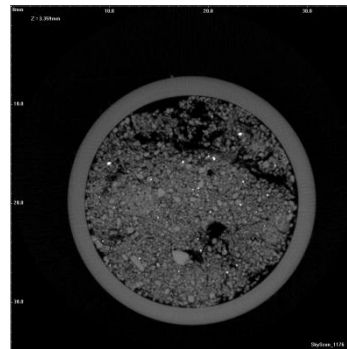


Figura 32 - Pastagem recuperada (a)

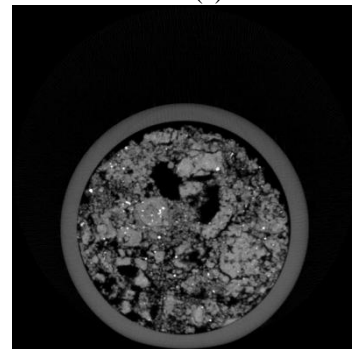


Figura 33 - Solo recuperado (a)

5.3.3.2 Plano Sagital

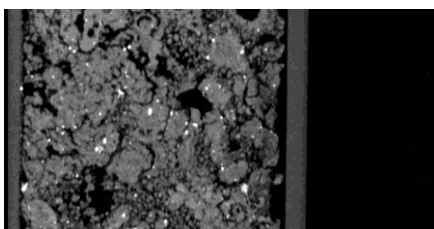


Figura 34 - Cerrado (b)

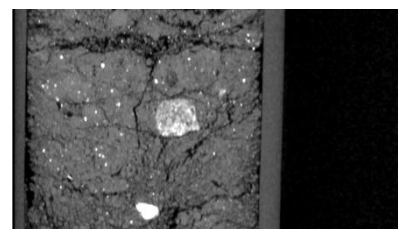


Figura 35 - Solo degradado (b)

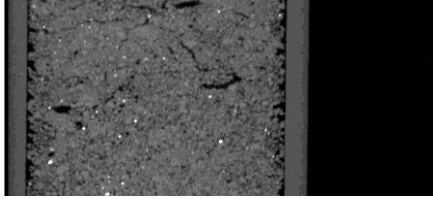


Figura 36 - Solo tratado com
LE+AF+B (b)

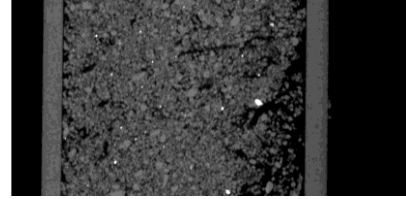


Figura 37 - Pastagem degradada (b)

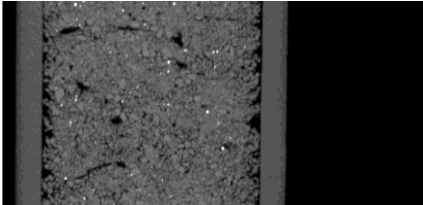


Figura 38 - Pastagem recuperada (b)

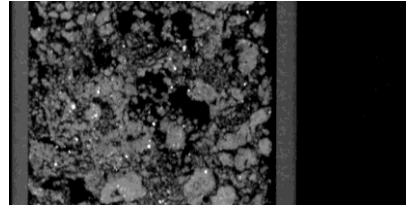


Figura 39 - Solo recuperado (b)

5.3.3.3 Plano Coronal

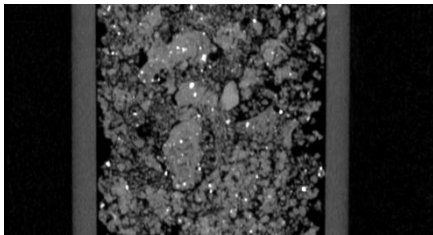


Figura 40 - Cerrado (c)

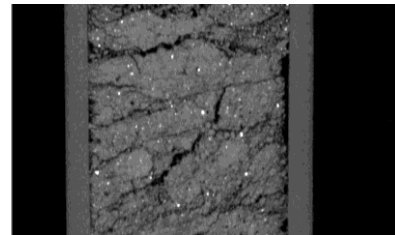


Figura 41 - Solo degradado (c)

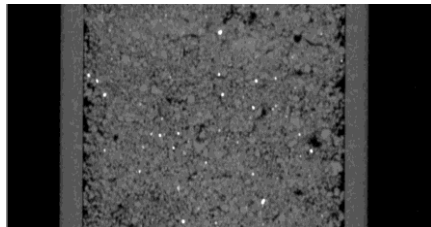


Figura 42 - Solo tratado com LE+AF+B
(c)

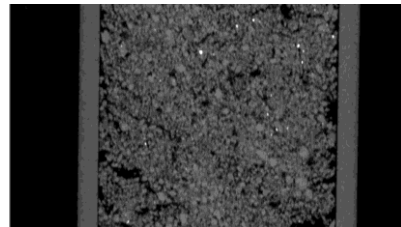


Figura 43 - Pastagem degradada (c)

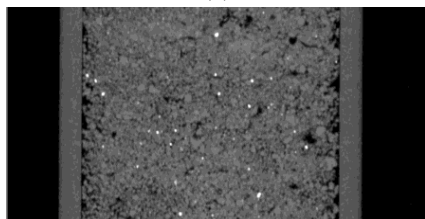


Figura 44 - Pastagem recuperada (c)

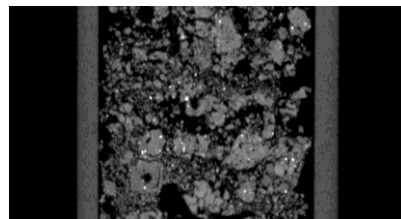


Figura 45 - Solo recuperado (c)

5.3.3.4 Camadas diferentes

- Cerrado

A distribuição de agregados é nítida na camada I (Figura 46 a 48), porém, conforme a profundidade, diminuiu-se essa característica devido à compactação das camadas superficiais. Esse mesmo raciocínio é válido também em termos de porosidade.

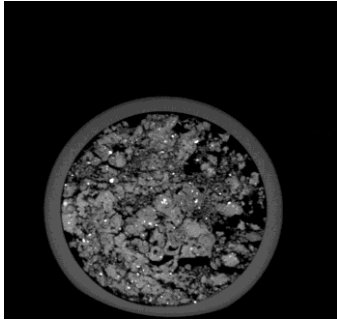


Figura 46 - Cerrado - camada I

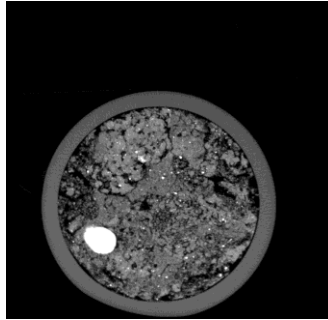


Figura 47 - Cerrado - camada II

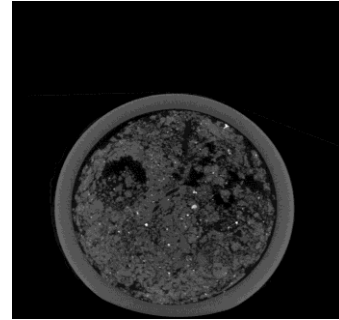


Figura 48 - Cerrado - camada III

- **Solo degradado**

Estes solos (Figura 49 a 51) apresentam alto grau de compactação, impedindo a circulação de ar e água no seu meio, gerando assim, um solo praticamente impermeável que inviabiliza o acúmulo de matérias orgânicas e, conseqüentemente, impossibilidade do crescimento de plantas. Foram detectadas grandes rachaduras na camada I e poucas em II e III. Essa ocorrência é devido ao ressecamento das amostras.

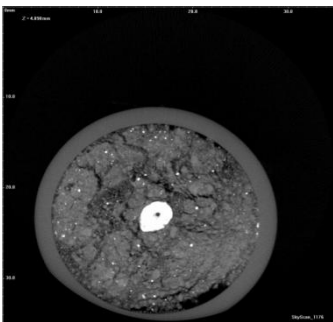


Figura 49 - Solo degradado
- camada I

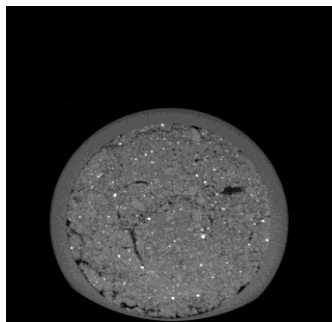


Figura 50 - Solo degradado
- camada II

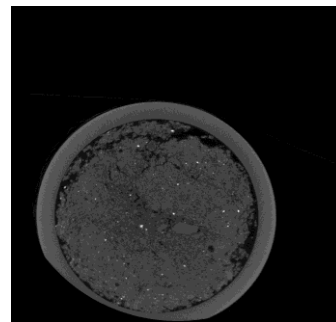


Figura 51 - Solo degradado
- camada III

- **Solo tratado com LE+AF+B**

Foi detectada nas duas primeiras camadas a descompactação dos solos (Figura 52 a 54) e a formação de macro e médio agregados. Em outras palavras, o lodo de esgoto influenciou os atributos físicos destes, assim como a ação descompactadora da planta nativa *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves) e também de *Brachiaria decumbens*.

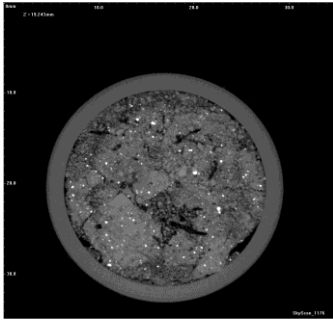


Figura 52 - Solo tratado com LE+AF+B - Camada I

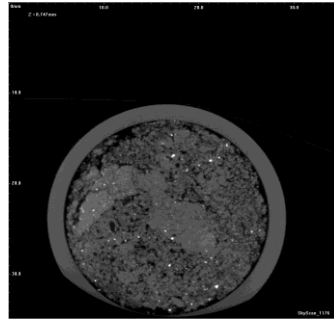


Figura 53 - Solo tratado com LE+AF+B - Camada II

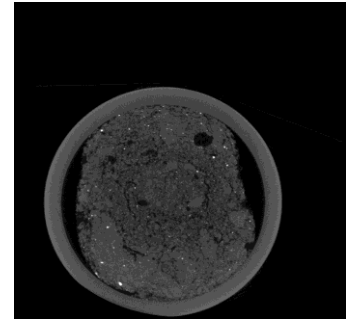


Figura 54 - Solo tratado com LE+AF+B - Camada III

- **Solo recuperado**

Houve a diferença significativa de recuperação na camada I (Figura 55), porém foram observadas também alterações em outras duas camadas de ordem decrescente (Figura 56 e 57). Inclusive a presença de buraco das raízes nas camadas iniciais. Enfim, foi confirmado que esse solo possui um comportamento semelhante ao do solo de cerrado.

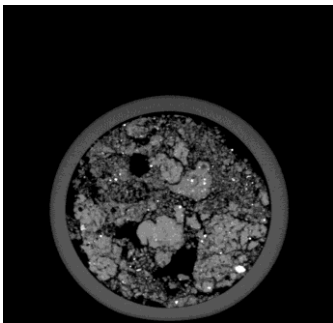


Figura 55 - Solo recuperado - camada I

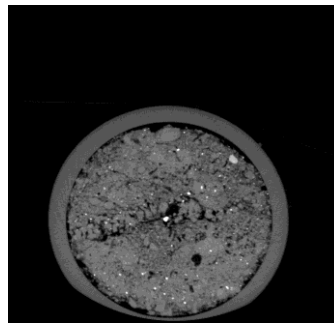


Figura 56 - Solo recuperado - camada II

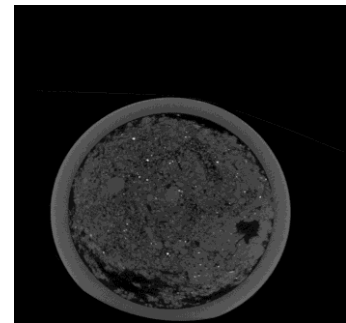


Figura 57 - Solo recuperado - camada III

- **Pastagem degradada**

Pela visualização, as três camadas possuem igual aparência (Figura 58 a 60), caracterizada pela presença de aglomeração de agregados pequenos e poros. Este solo é considerado como sendo o solo mais próximo de solo degradado.

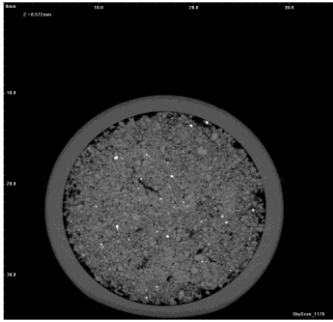


Figura 58 -Pastagem degradada-
camda I

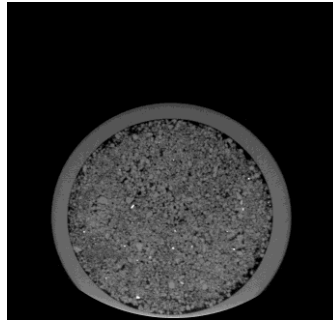


Figura 59 -Pastagem degradada-
camda II

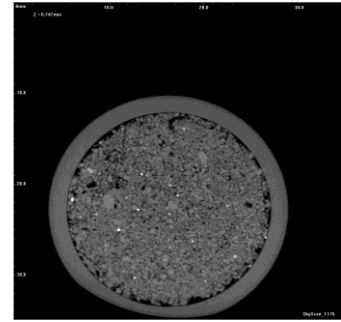


Figura 60 -Pastagem degradada-
camda III

- **Pastagem recuperada**

As pastagens recuperadas (Figura 61 a 63) mostraram a presença de diversos tamanhos de aglomerados e poros, embora não tão variada quanto no solo recuperado e no solo tratado com LE+AF+B, porém, comprovaram a eficiência da técnica de recuperação. No entanto vale ressaltar a questão de profundidade aqui, pois este solo comporta-se como os outros: conforme a profundidade aumenta o grau de compactação. Por último, foram detectadas algumas rachaduras na primeira camada.

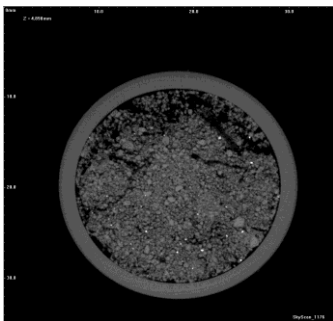


Figura 61 -Pastagem recuperada
- camada I

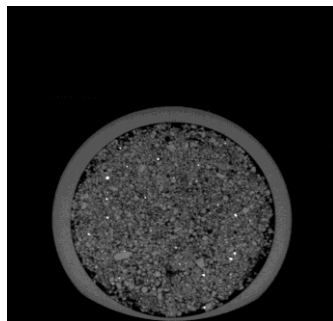


Figura 62 -Pastagem recuperada
- camada II

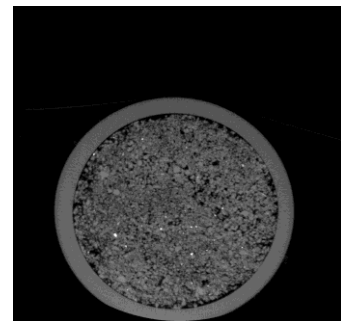


Figura 63 -Pastagem recuperada
- camada III

5.4 Contribuição do modelo 3D nos estudos de solo

Do ponto de vista da análise ambiental de solos, as informações extraídas em 2D foram enriquecedoras e proveitosas. Porém a presença de uma ferramenta que permite uma visualização em 3D no interior do solo é uma opção interessante para muitos tomadores de decisão. Assim, será discutida o tópico sobre essa visualização em 3D.

Baseado nas imagens obtidas por meio de software CT-Analyser foi construído o modelo em 3D com o auxílio de CT-Vox. Esse último software permitiu a construção de modelo 3D

utilizando as imagens tomográficas e binarizadas. Para melhor proveito em termos de visualização, foram utilizadas as imagens binarizadas, pois suas bordas são melhor definidas do que em imagem normal. Conseqüentemente, foi possível construir modelos de solo mostrando as conexões de poros internos (Figuras 64 a 71) e, adicionalmente, pode-se construir modelo com cortes na camadas ou no plano de interesse (Figura 70 e 71).

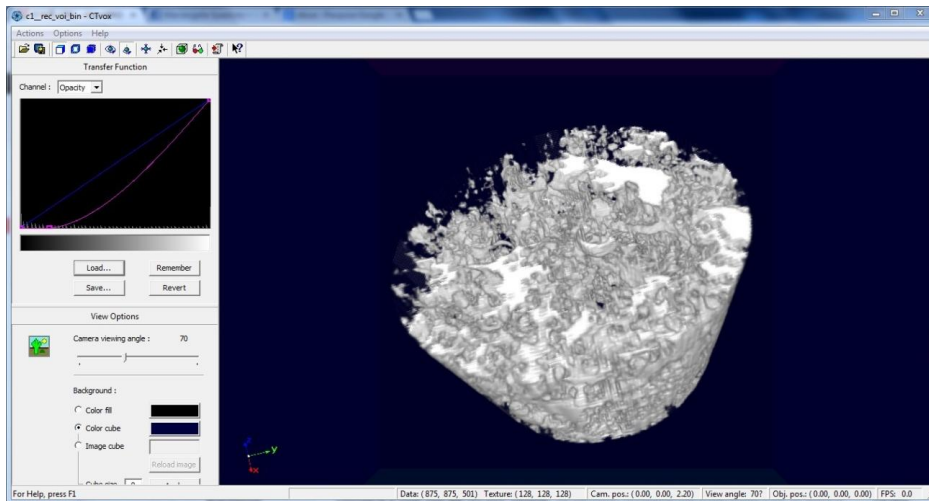


Figura 64 - Solo de Cerrado em 3D

No solo de Cerrado (Figura 64) foi observada uma quantidade grande de conexões entre poros, e, ao mesmo tempo, predominância de poros grandes, comprovando os itens anteriores referentes à porosidade.

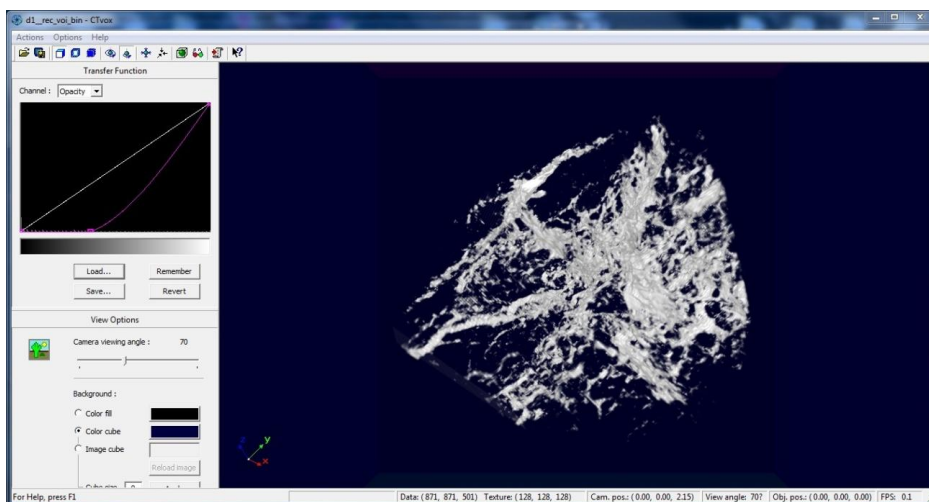


Figura 65 - Solo degradado em 3D

No solo degradado (Figura 65), a conectividade dos poros apresentou um caráter disperso, ou seja, os agregados desse solo são bastante compactados entre si. As conexões desse solo são formadas pela ligação de microporos e rachaduras por terem formatos achatados e uniformes.

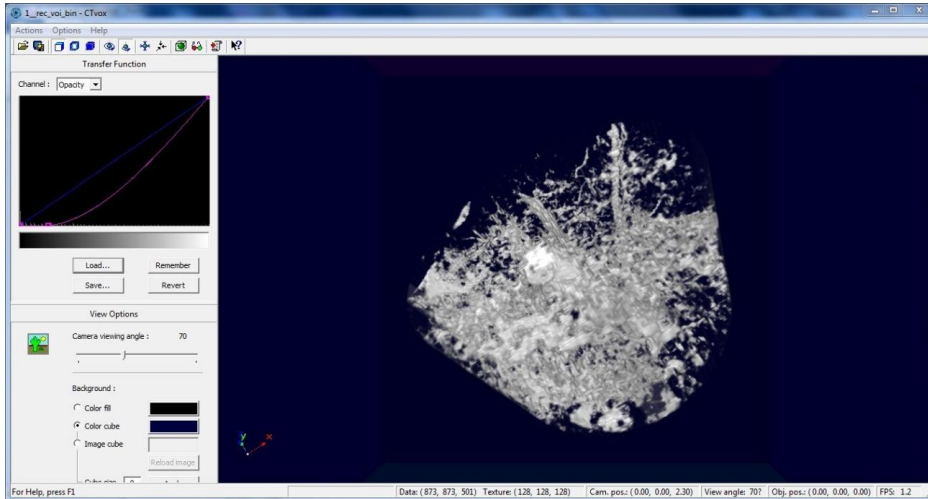


Figura 66 - Solo tratado com LE+AF+B em 3D

Em relação ao solo tratado com lodo de esgoto (LE) *Astronium fraxinifolium* (Gonçalo-alves) + *Brachiaria decumbens* (Figura 66), foi notado um aumento de conexões, mais concentradas e grandes. A técnica de recuperação foi eficiente fisicamente e esse solo está se aproximando do Cerrado natural (Figura 64).

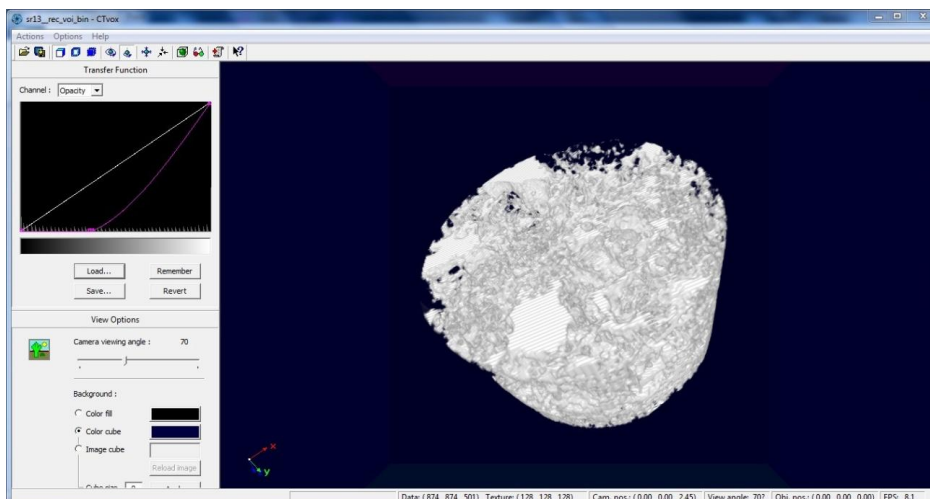


Figura 67 - Solo recuperado em 3D

O aspecto visual do solo recuperado (Figura 67) apontou uma grande semelhança com o solo de Cerrado (Figura 64), em termos de concentração de poros e suas conexões. Esse resultado foi satisfatório pois comprovou a eficiência e a qualidade da técnica de recuperação.

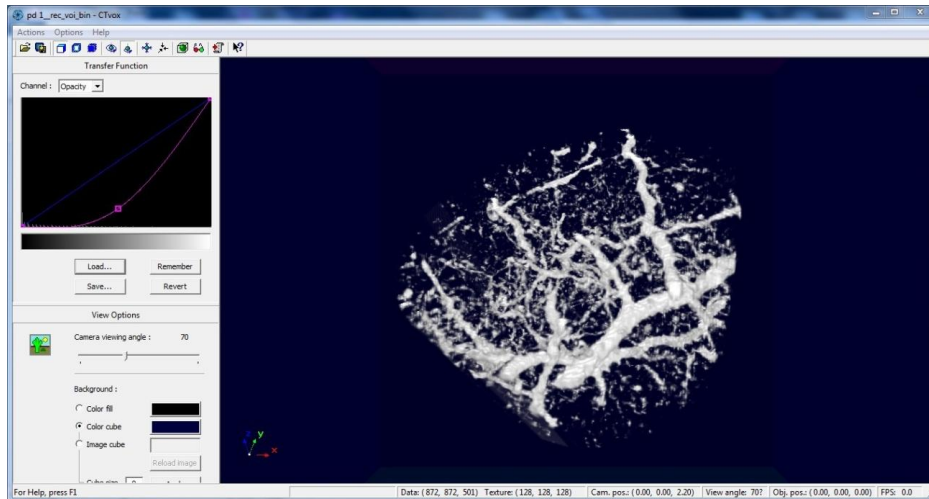


Figura 68 - Pastagem degradada em 3D

O solo de pastagem degradada (Figura 68) é semelhante ao solo degradado (Figura 65) em termos de quantidade de conexões. Entretanto percebeu-se que as conexões desse solo são mais arredondados e contínuas, devendo-se lembrar que esse solo ainda possui cultivo de grama embora degradada. Baseado no formato das conexões pode-se estimar que elas sejam as raízes secas da planta que continuam existindo no meio da amostra. A questão ainda exige melhores investigações futuras.

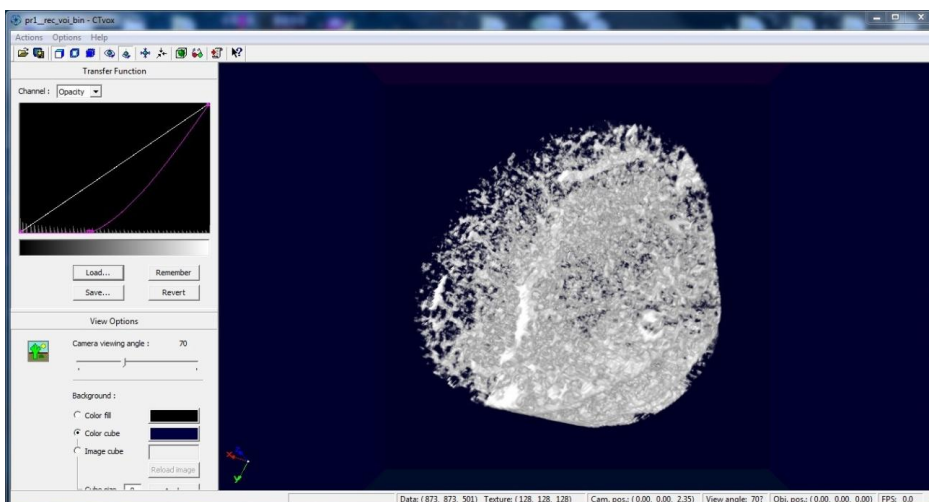


Figura 69 - Pastagem recuperada em 3D

A pastagem recuperada (Figura 69) mostrou uma boa evolução da quantidade de conexão e da concentração. Embora ainda haja presença de muitas conexões finas, dos microporos, em geral destacou-se uma melhora notável. A técnica de recuperação utilizada, mais um vez, obteve um bom resultado.

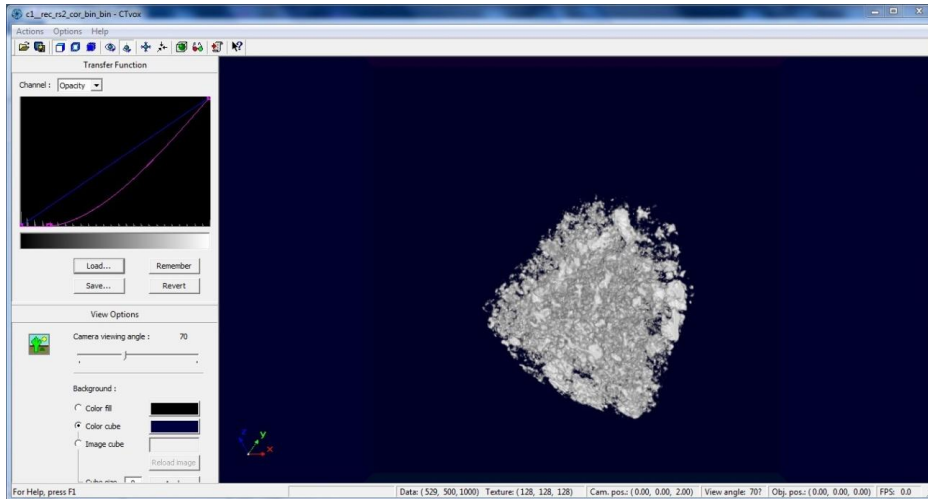


Figura 70 - Corte no plano sagital em 3D

O corte no plano sagital (Figura 70) e na camada de interesse (Figura 71) são outras opções para visualizar o interior do solo, dependendo da necessidade de análise.

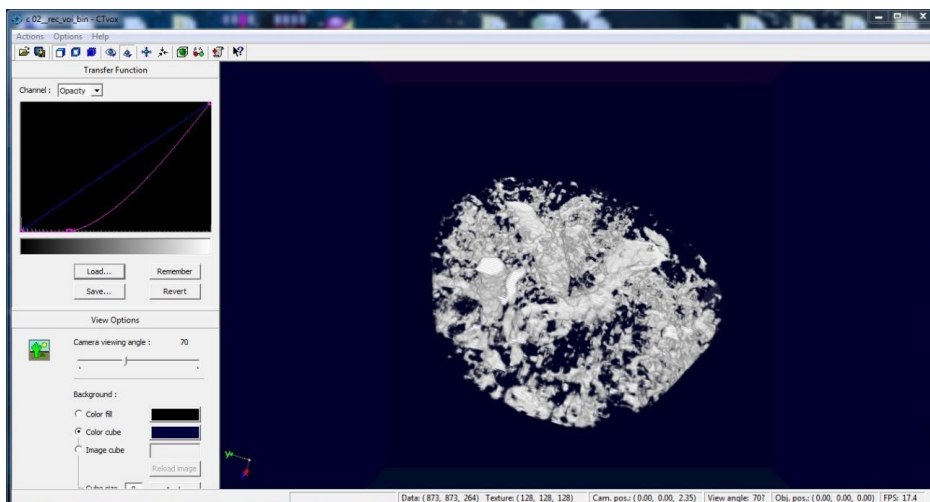


Figura 71 - Corte da camada de interesse em 3D

Vale a pena ressaltar que o modelo em 3D apresentado nesta seção ainda exige melhor exploração, porque embora permita a visualização geral das conexões, ainda não é possível

classificar os tipos de conexões, sejam elas da própria estrutura do solo, da planta ou provenientes das atividades biológicas.

5.5 Novas oportunidades para uso de microtomógrafo de raios-x na investigação de solo

Os resultados apresentados foram baseados na escala micrométrica, apresentando informações precisas e próximas do real. Porém isso ainda não é o suficiente para obtermos uma compreensão total sobre o solo e o meio ambiente. Dentro desse meio poroso ainda há muitos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem numa escala nanométrica que não foram explorados nesta pesquisa, bem como uma comparação e investigação sobre os fenômenos resultantes das análises baseadas em imageamento 2D e 3D e suas correlações. Devem ainda ser considerados outros fenômenos, como por exemplo, a infiltração de água e soluto e seus respectivos caminhos preferenciais de percolação. Há um conjunto amplo de possibilidades de estudos sobre esse meio poroso, assim como aplicações desses estudos. Por isso o uso de microtomógrafo de raios-x abre um novo horizonte para o estudo e a investigação do solo, possibilitando uma compreensão cada vez mais real e, consequentemente, gerando novas interpretações que ocorre com ele na Natureza.

6 Conclusão

Em seguida, são enunciadas as principais conclusões desta pesquisa:

- ✓ O método de Tomografia Computadorizada (T.C.) mostrou-se útil na avaliação dos parâmetros físicos e indicadores da qualidade ambiental de solos, tais como : densidade global média, porosidade e tamanho dos agregados.
- ✓ Os softwares de NRCon, CT-Analyser e CT-Vox mostraram-se ferramentas valiosas para determinação de atributos físicos dos solos por meio das imagens tomográficas.
- ✓ A unidade de Hounsfield cresce de acordo com o aumento da densidade global média dos solos e a profundidade das camadas edáficas, confirmando os resultados obtidos por outros autores como Crestana et al. (1992).
- ✓ Os macrogregados são predominantes nos solos próximos do natural (Cerrado), enquanto nos solos degradados eles se tornaram praticamente inexistentes. Conforme a profundidade as distribuições do tamanho dos agregados, tendem a ficar semelhantes entre si.
- ✓ O volume total de poros é maior nos solos de Cerrado, dos recuperados e em recuperação. Em geral, houve um decréscimo do volume de poros conforme a profundidade.
- ✓ Os resultados obtidos pelo método de Tomografia Computadorizada (T.C.) mostraram-se qualitativamente semelhantes aqueles obtidos pelo método convencional, conforme adquiridos por Kitamura et al. (2008) e Dos Santos Batista Bonini e Alves (2011). Do ponto de vista quantitativo em geral, mostraram-se igualmente compatíveis.
- ✓ O modelo 3D, construído a partir das imagens tomográficas, possibilitou a visualização das conectividades entre poros no interior das amostras de solo. Isto é

uma evidência de seu potencial e adequabilidade em estudos e análises de qualidade física e ambiental de solos.

7 Sugestões

Este trabalho trata da aplicação do método de Tomografia Computadorizada no solo, com intuito de fornecer dados consistentes para alguns indicadores principais de qualidade física ambiental. Portanto sugere-se em futuras pesquisas:

- ✓ Explorar os limites da técnica de tomografia na escala nanométrica com intuito de obter os indicadores físicos ambientais, semelhantes àqueles resultados deste trabalho.
- ✓ Explorar e interpretar outros recursos fornecidos pelos softwares CT-Analyser e correlacionar os resultados em 2D e 3D.
- ✓ Estudar o fenômeno de infiltração de água e soluto utilizando microtomógrafo ou nanotomógrafo de raios-x.
- ✓ Desenvolver metodologia capaz de distinguir e classificar materiais e outros possíveis objetos contidos no interior do solo.
- ✓ Simular as estruturas morfológicas e processos físicos que ocorrem no solo.

Referências

Como atender à demanda mundial. (2011). AGROANALYSIS - A Revista de Agronegócios da FGV. Disponível em: <http://www.agroanalysis.com.br/materia_detalhe.php?idMateria=1060>. Acesso em: 14 out. 2011.

ALVES, M. C.; CAMPOS, F. S. (2008). Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4 p. 1389-1397.

ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. (2011). Recuperação do subsolo em área de empréstimo usada para construção de hidrelétrica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 301-309.

ALVES, M. C. et al. (2008). Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 405-416.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. (2007). Densidade do solo e infiltração de água como indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 617-625.

APPOLONI, C. R. et al. (2002). **Characterization of porous microstructure by x-ray microtomography**. X-ray Spectrometry 2002, p. 124-127. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/xrs.560/pdf>>. Acesso em: 14 Oct. 2011.

ARGENTA, M. A.; BURIOL T. M.; HECKE, M. B (2010) Metodologia para a obtenção de parâmetros físicos e geométricos do osso trabacular função de imagens de micro tomografia. **Mecânica Computacional**, v. 29, p. 6363-6381, nov.

BALOGUN, F. A.; CRUVINEL, P. E. (2003). Compton scattering tomography in soil compaction study. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 505, p.502-507, June.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2011). **Plano agrícola e pecuária 2011/2012**. Brasília, DF.

BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos. (2009). **Agricultura brasileira no século XXI: documento preliminar versão para discussão**. Brasília, DF.

CIIAGRO Disponível em:<

<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Graficos/GraficosBH.asp?Fator=Chuva&Tipo=Diaria>>. Acesso em: 12 abril 2013.

CORMACK, A. M. (1963). Representation of a function by its line with some radiological application. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 34, n. 9, p. 2722–2727.

_____. (1964). Representation of a function by its line with some radiological application II. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 35, n. 10, p. 2908-2913.

CRESTANA, S. (1985). **A Tomografia computadorizada como um novo método para estudos da física da água no solo**. 140f. Tese (Doutorado) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

_____. (2010). **Internacionalização da inovação brasileira caso agricultura tropical**. Disponível em: <cncti4.cgee.org.br/index.php/.../118-apresentacao-de-silvio-crestana>. Acesso em: 14 out. 2011.

_____. (2011a). **Inovação tecnológica em agroenergia**. Disponível em: <http://www.npa.net.br/useruploads/files/apresenta_silvio_crestana.pdf>. Acesso em: 14 out. 2011.

_____. (2011b). Alimentos na próxima década: um olhar sobre o cenário mundial, brasileiro e principais tendências tecnológicas. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Tecnologias pós-colheita em frutas e hortaliças**. São Carlos: Embrapa. p.33-66.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. (1985). Statical and dynamical three dimensional studies of water in soil using computed tomography scanning. **Soil Science**, Baltimore, v. 140, p. 326-332.

CRESTANA, S. et al. (1992). Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, n. 2, p. 161-167.

CRUVINEL, P. E. (1987). **Minitomógrafo de raio X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares**. 329f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Viçosa, Viçosa, 1987.

CRUVINEL, P. E. et al. (1990). X- and gamma rays computerized minitomography scanner for soil science. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements**, New York, v. 39, n. 5, p. 745-750.

CURSO de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. (2008). Rio de Janeiro: Centro de Treinamento da Petrobrás.

DEMATTÊ, J. L. I. (1980) Levantamento detalhado dos solos dos campus experimental de Ilha Solteira. **Piracicaba: Esalq**, p. 11-31.

DEXTER, A. R. (2004a). Soil physical quality: part I - theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geodema**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214.

_____. (2004b). Soil physical quality: part II - friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geodema**, Amsterdam, v. 120, p. 215-225.

_____. (2004c). Soil physical quality: part III - unsaturated hydraulic conductivity and general conclusion about S-Theory. **Geodema**, Amsterdam, v. 120, p. 227-239.

DEXTER, A. R. et al. (2005). Project part 3: the optimum and the range of water content for tillage - further developments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 29-37.

DONAGEMMA, G. K. (2008). Fundamentos das propriedades físicas do sol. In: CURSO de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro: Centro de Treinamento da Petrobrás. p. 65-93.

DOS SANTOS BATISTA BONINI; ALVES, M. C. (2011) Estabilidade de agregados de um latossolo vermelho degradado em recuperação com adubos verdes, calcário e gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n 4, p. 1263-1270.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (1999). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

FANTE JÚNIOR, L. et al. (2002). Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 26, p. 835-842.

FERRAZ, R. P. D. (2008). Fundamentos de pedologia e geologia de interesse no processo de recuperação de uma área degradada. In: CURSO de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro: Centro de Treinamento da Petrobrás. p. 9-30.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION (2013). **Food and agricultural commodities production**. Disponível em:

<<http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=339&lang=en&country=21>>.

Acesso em: 23 Mar. 2013.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. (2011). **Food outlook - global market analysis**. Disponível em:

<<http://www.fao.org/worldfoodsituation/wfs-home/en/>>. Acesso em: 12 Nov. 2011.

GALDOS, M. V.; DE MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A. (2004). Atributos químicos e produção de milho em um latossolo vermelho eutroférrico tratado com lodo de esgoto.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 569-577.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. (2006). **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Disponível em:

<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Gomes_Filizola_indicadoresID-u1keja1HAN.pdf>. Acesso em: 24 out. 2011.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. (2010). **Processamento digital de imagens**. 3.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.

GOOGLE MAPS. Disponível em:<<https://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl>>.

Acesso em: 12 abril 2013.

HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. (1983). Water extraction by single plant roots. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 21, p. 435-440.

HEERAMAN, D. A.; HOPMANS, J. W.; CLAUSNITZER, V. (1997) Three dimensional imaging of plant roots in situ with -ray computed tomography. **Plant and Soil**, v. 189, n. 2, p. 167-179.

HILLEL, D. (1982). **Introduction to soil physics**. Orlando: Academic Press.

_____. (1998). **Environmental soil physics**. California: Academic Press.

_____. (2003). **Introduction to environmental soil physics**. California: Academic Press.

HOUNSFIELD, G. N. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography): part I - description of system. **British Journal of Radiology**, London, v. 46, p. 1016-1022.

INSTITUTO BRASILEIRA DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2006). **Censo agropecuário 2006**. Rio de Janeiro.

JENNY, H. (1941). **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill.

KITAMURA, A. E. (2007). **Recuperação de um subsolo de cerrado com cultivo de plantas nativa e introduzida**. 113f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2007.

KITAMURA, A.E. et al. (2008) Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v 32, n. 1, p. 405-416, 2008.

KUNZIG, R. (2011). Somos 7 bilhões de pessoas no mundo - a população mundial pode chegar à marca dos 9 bilhões até 2045. O planeta vai conseguir sustentar tanta gente?. **NATIONAL Geographic – Brasil**, ed.130, jan. Disponível em:<<http://viajeaquibril.com.br/materias/logo-mais-seremos-7-bilhoes-de-pessoas-no-mundo>>. Acesso em: 14 out. 2011.

LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M. I. (1994). **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. Campinas: Cati. v.3.

MACEDO, A. S. (1997). **Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em ciência do solo e meio ambiente**. 129f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. (2005). **Ecosystems and human well-being: general synthesis report**. Washington: Island Press. Disponível em: <<http://www.who.int/globalchange/ecosystems/ecosys.pdf>>. Acesso em: 24 Oct. 2011.

MILLER, R. W.; GARDINER, D. T. (1997). **SOILS: in our environment**. 9thed. New Jersey: Prentice Hall.

MODOLO, A. J. et al. (2008) Evaluation of the soil seed environment through computerized tomography. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 525-532

MOONEY, S. J. (2002). Three-dimensional visualization and quantification of soil macroporosity and water flow patterns using computed tomography. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 142-151.

MOONEY, S. J.; NIPATTASUK, W. (2003). Quantification of the effects of soil compaction water flow using dye tracers and image analysis. **Soil Use and Management**, v. 19, p. 356-363.

MORAES, V. (2007). Fotografia. Disponível em: <http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=786>. Acesso em: 12 abril 2013.

MORETI, D. et al. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubação e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 167-175.

NAIME, J. M. (1994). **Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de Ciência do Solo e plantas, em campo**. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

_____. (2001). **Um Novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo**. 146f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PEDROTTI, A. et al. (2003). Tomografia computadorizada aplicada a estudo de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 819-826, jul.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. (1982). Soil bulk density in three dimension by computed tomography scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p. 445-450.

PIERRET, A. et al. (2002). 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. **Geodema**, Amsterdam, v. 106, p. 247-171.

PIRES, L. F. (2010). Soil crust changes due to wetting and drying analyzed by non-invasive images In: LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON NUCLEAR PHYSICS AND APPLICATIONS, 8., Santiago, 2009. **Proceedings...** Maryland: AIP, 2010. p. 463-464.

PIRES, L. F. et al. (2005). Application of γ -ray computed tomography to analysis of soil structure before density evaluations. **Applied radiation and Isotopes**, v. 63, p. 505-511.

PIRES, L. F. et al. (2010). Twenty-five years of computed tomography in soil physics: a literature review of Brazilian contribution. **Soil & Tillage Research**, v. 110, p. 197-210.

PORTAL BRASIL (2011). **Agronegócio**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/setores-da-economia/agronegocio>>. Acesso em: 23 mar. 2013.

RADON, J. H. (1917). In The Determination of function from their integrals along certain main folds. **Berchte über die Verhandlugen**, Berlin, v.69, p. 262-277.

- SILVA, A. M. et al. (2007). Tomografia computadorizada de raios X e gama para investigação não-invasiva. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Instrumentação avançada em ciência do solo**. São Carlos: Embrapa. p. 159-225.
- SILVA, A. M. H. (2009). **Análise morfológica 2D e 3D de amostras de osso trabecular utilizando microtomografia tridimensional por raio-X**. 78f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos; Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto; Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- SILVA, R. G. et al. (2000). Effect of macropore flow on the transport of surface-applied cow urine through a soil profile, **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 13-23.
- SKYSCAN. (2011a). **Manual for Skyscan CT-Analyser v. 1.10**. Disponível em: <http://www.skyscan.be/next/CTan_UserManual.pdf>. Acesso em: 24 Oct. 2011.
- _____. (2011b). **Skyscan CT-volume manual**. Disponível em: <http://www.skyscan.be/next/CTvol_UserManual.pdf>. Acesso em: 24 cut. 2011.
- SKYSSCAN. ([200-?]). **Applying Hounsfield unit density calibration in Skyscan CT-analyser**. [S.L.:s.n.].
- SCOTT, N. et al. (2007) Non-invasive techniques for investigating and modelling root-feeding insects in managed and antural systems. **Agricultural and Forest Entomology** , v. 9, n. 1, p. 39-46.
- STOCK, S. R. (2008). Recent advances in X-ray microtomography applied to materials. **Internacional Materials Reviews**, v.53, p.129-181.
- STUPPY, W. H. (2003) Three-dimensional analysis of plant structure using high-resolution X-computed tomography. **Trends in plant science**, v. 8, n. 1, p. 2-6.
- TAVARES, S. R. L. (2008). Conceito e caracterização de áreas degradadas. In: CURSO de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro: Centro de Treinamento da Petrobrás. p.1-8.
- TIMM, L. C. et al. (2005). Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 1, p. 97-103.
- TORMENA, C. A. et al. (2008). Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Science Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 56-60.
- TSUTIYA, M. T. (2001). Alternativa de disposição final de biossólido. In: TSUTIYA, M.T. et al. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP; EP/USP; ESALQ/USP; UNESP. p. 133-180.
- VARANDAS, J. M. M. (2011). **Avaliação da qualidade física do solo em uma escala de microbacia**. 88f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

VAZ, C. M. P. et al. (2009). Application of Benchtop microCT scanner to determine soil pore size and aggregate distributions at different scales and resolutions. **American Geophysical Union**, San Francisco, v.90, n.52, Fall Meeting, Abstract H23F-1031.

VAZ, C. M. P. et al. (2007). Equipamento e métodos para análise física dos solos. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Instrumentação avançada em ciência do solo**. São Carlos: Embrapa. p. 93-153.

VAZ, C. M. P. ; CRESTANA, S. ; REICHARDT, K. . Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 153-159, 1992.