

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Área de Concentração: Solos



Dissertação

Avaliação da densidade de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo ao longo do tempo através da Tomografia Computadorizada

Adilson Luís Bamberg

Pelotas, 2007.

ADILSON LUÍS BAMBERG

**AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE UM PLANOSSOLO SUBMETIDO A
DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO AO LONGO DO TEMPO
ATRAVÉS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientador: Professor Dr. Eloy Antonio Pauletto

Co-orientadores: Pesquisador M.Sc. Algenor da Silva Gomes
Professor Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto
Professor Dr. Luís Carlos Timm

Pelotas, 2007.

ADILSON LUÍS BAMBERG

**AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE UM PLANOSSOLO SUBMETIDO A
DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO AO LONGO DO TEMPO
ATRAVÉS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

Aprovada em: 15/02/2007

Banca examinadora:

Dr. Eloy Antonio Pauletto (Orientador)
Depto. Solos - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel" – UFPel

Dr. Alceu Pedrotti
Depto. de Engenharia Agrônômica - NEREN - UFS

Dra. Claudia Fernanda Almeida Teixeira
Faculdade de Engenharia Agrícola – UFPel

Dr. Rogério Oliveira de Sousa
Depto. Solos - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel" - UFPel

Dedico:

À esposa Jane e à filha Fernanda, minhas inspirações;
Aos pais Roque e Lucia, pelo amor, educação e apoio;
Aos irmãos César, Rogério e Igor, pela motivação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Eloy Antonio Pauletto, pela orientação, dedicação, sabedoria e experiências repassadas e, sobretudo pela amizade gerada.

Ao professor Luiz Fernando Spinelli Pinto, pela co-orientação, pelos ensinamentos e seu admirável espírito científico.

Ao professor Luís Carlos Timm, pela co-orientação e grande conhecimento repassado.

Ao pesquisador/professor Algenor da Silva Gomes, pela co-orientação e por ceder a área experimental para a realização deste estudo na Embrapa – Estação Experimental de Terras Baixas.

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-graduação em Agronomia e ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela concessão da bolsa.

Aos funcionários e estagiários do Departamento de Solos, principalmente ao Paulo Antunes e Leonardo Furtado pelo auxílio nos trabalhos.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela amizade, convívio e apoio em todos os momentos. Em especial, ao colega Tiago Zschornack, pela forte amizade.

Ao colega Dioni, pela amizade e trabalhos realizados em conjunto.

Especialmente à minha esposa Jane, pelo carinho, compreensão, apoio incondicional mesmo diante das grandes dificuldades e, principalmente, por trazer ao mundo nossa querida Fernanda.

Aos parentes, demais amigos e a todos que de alguma forma contribuíram para a viabilização deste sonho, um sincero muito obrigado.

Resumo

BAMBERG, Adilson Luís. **Avaliação da densidade de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo ao longo do tempo através da Tomografia Computadorizada.** 2007. 97p. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

A sustentabilidade dos solos de várzea cultivados com arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado está alicerçada na utilização de diferentes sistemas de cultivo e de culturas, fundamentais para um adequado controle do arroz vermelho e preto. Os reflexos desses sistemas nos atributos do solo, principalmente ao longo do tempo merecem maiores estudos, especialmente relacionados à compactação do solo. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a densidade de um Planossolo Háplico Eutrófico solódico submetido a diferentes sistemas de cultivo, obtida aos 19 anos de condução do experimento, através dos Métodos do Anel Volumétrico e da Tomografia Computadorizada, e comparar com os dados obtidos por Pedrotti (1996) aos 10 anos de condução. O experimento vem sendo conduzido desde 1985, na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, num experimento de blocos ao acaso com 8 tratamentos e 4 repetições. Concluiu-se que o Método da Tomografia Computadorizada permitiu identificar a presença de uma camada superficial compactada (0,005 a 0,02m) nos tratamentos T1 (um ano com arroz em preparo convencional do solo seguido de dois anos de pousio), T4 (rotação de arroz x soja (*Glicine Max* L.) com preparo convencional do solo), T5 (rotação de arroz x soja x milho (*Zea maiz* L.) em preparo convencional do solo) e T7 (rotação de arroz sob plantio direto x soja sob preparo convencional do solo), e outra na camada de 0,08 a 0,14m, nos tratamentos T1, T2 (cultivo contínuo de arroz com preparo convencional do solo), T4 e T5, em relação à testemunha, o que não pôde ser detectado pelo Método do Anel Volumétrico. Na camada de 0,04 a 0,08m, por outro lado, todos os tratamentos apresentaram valores de densidade significativamente menores ou iguais em relação à testemunha, invertendo-se a situação na camada de 0,12 a 0,18m, com exceção do T6 (sucessão de azevém (*Lolium multiflorum* L.) x arroz sob plantio direto). O T5 apresentou os maiores valores de densidade ao longo de praticamente todo o perfil estudado (0-0,20m), enquanto que o T6 apresentou os valores mais próximos aos da testemunha. Os valores de densidade obtidos aos 19 anos de condução do experimento foram sistematicamente inferiores aos obtidos por Pedrotti (1996) aos 10 anos de condução neste mesmo experimento.

Palavras-chave: compactação, sistemas de cultivo, solos de várzea, experimentos de longa duração.

Abstract

BAMBERG, Adilson Luís. **Long-term evaluation of the bulk density of an Albaqualf submitted to different cultivation systems with Computerized Tomography**. 2007. 97p. Master Dissertation – Post-Graduation in Agronomy, Area of Concentration: Soils. Federal University of Pelotas, Pelotas-Brazil.

The agricultural sustainability of the rice (*Oryza sativa L.*) cultivation in lowland soils is based on the use of different cultivation systems and cultures, needed for a more efficient red and black rice control. The effects of these systems on the soil attributes, mainly in the long run, deserve deeper studies, particularly compaction. The present work had the objective of evaluating the bulk density of an Albaqualf submitted to different cultivation systems, in 19 years of a long-term experiment, through the use of the Volumetric Ring and the Computerized Tomography Methods, and compared the results obtained with that obtained from Pedrotti (1996) at 10 years of the experiment conduction. The experiment has been conducted since 1985, in the Lowland Experimental Field of the Embrapa Clima Temperado, in a random box plot with 8 treatments and 4 replications. It was concluded that the Computerized Tomography Method allowed the identification of a soil surface sealing (0,005 a 0,02m), mainly in the T1 (one year rice with conventional tillage followed by two years of fallow), T4 (rice x soybeans (*Glicine Max L.*) rotation under conventional tillage), T5 (soybeans x corn (*Zea maiz L.*) x rice rotation under conventional tillage), and T7 (soybeans under conventional tillage x rice under no-tillage rotation), and other in the 0,08 to 0,14m layer (plow pan), in the T1, T2 (continuous rice under conventional tillage), T4 and T5 treatments, in comparison to the control treatment (T8), that was not detected by the Volumetric Ring Method. In the 0,04 to 0,08m layer, in the other hand, all treatments presented bulk density values significantly lower or similar to the control treatment, with the opposite situation in the 0,12 to 0,18m layer, except to the T6 treatment (rye-grass (*Lolium multiflorum L.*) and rice under no-tillage succession). The T5 treatment showed higher bulk density values along the entire studied layer (0-0,20m), while the T6 treatment showed values closer to the control treatment. The bulk density values obtained after 19 years of the experiment conduction were systematically lower than those obtained by Pedrotti (1996) at 10 years of conduction in the same experiment.

Key words: compaction, cultivation systems, lowland soils, long-term experiment.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Atenuação de um feixe de fótons que passa por um volume elementar de uma amostra homogênea..... | 30 |
| Figura 2 – Sistema de coordenadas utilizadas para descrever o método de reconstrução de imagens tomográficas..... | 33 |
| Figura 3 – Seção virtual da amostra explorada pela tomografia e a obtenção da matriz de pixels (imagem tomográfica). | 36 |
| Figura 4 – Vista da área experimental, objeto deste estudo..... | 39 |
| Figura 5 – Distribuição espacial dos tratamentos na área experimental em estudo. | 42 |
| Figura 6 – (a) Método do Macaco Hdráulico utilizado na coleta de amostras com estrutura preservada e (b) procedimento de embalagem para o transporte. | 43 |
| Figura 7 – Preparo de amostras: a) cilindro usado na coleta; b) vista do topo da amostra preenchido com parafina; e c) serra e moldura de madeira utilizados para seccionar a amostra..... | 44 |
| Figura 8 – (a) Minitomógrafo instalado no Laboratório de Tomografia de Solos junto ao Departamento de Solos da FAEM – UFPel e (b) detalhe da mesa com prato rotatório..... | 45 |
| Figura 9 – Diagrama esquemático demonstrando as partes componentes do Minitomógrafo de solos onde: 1 - Colimadores; 2 - Detector; 3 - Tubo fotomultiplicador; 4 - Unidade de alta voltagem; 5 - Fonte de Amerício (^{241}Am); 6 - Amplificador; 7 - Analisador monocal; 8 - Contador; 9 - Timer; 10 - Microcomputador; 11 - Motor de passo; 12 - Amostra. | 45 |
| Figura 10 – Espectro de energia, obtido no ajuste do amplificador e do monocal..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 11 – Imagem tomográfica de uma amostra de solo, visualizada com o MicroVis..... | 48 |
| Figura 12 – Regressão linear entre UT e μ das amostras de prova utilizadas neste estudo. | 52 |
| Figura 13 – Variação dos valores de densidade ao longo do comprimento de uma amostra de acrílico, em relação à densidade do material. | 55 |
| Figura 14 – Ajuste dos dados de densidade em função do comprimento da amostra de prova ao modelo polinomial quadrático. | 55 |
| Figura 15 – Densidade corrigida da amostra de prova de solo, em diferentes escalas do eixo y.. | 56 |
| Figura 16 – Variação dos valores de densidade obtidos pela Tomografia Computadorizada, dos diferentes tratamentos ao longo do perfil do solo, aos 19 anos de condução do experimento. | 62 |
| Figura 17 – Correlação dos dados de densidade obtidos com Método do Anel Volumétrico e do Método da Tomografia Computadorizada..... | 66 |
| Figura 18 – Variação de densidade ao longo do perfil aos 10 e 19 anos de condução do experimento. | 69 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Cronograma temporal do experimento apresentando os diferentes sistemas de cultivo (tratamentos) e culturas utilizados, ao longo dos anos agrícolas..... | 41 |
| Tabela 2 – Exemplo de uma matriz de dados de UT, resultante da varredura completa de uma amostra..... | 49 |
| Tabela 3 – Coeficientes de atenuação linear e UT das amostras de prova utilizadas neste estudo | 52 |
| Tabela 4 – Coeficientes de atenuação linear (μ) e Unidades Tomográficas (UT) das amostras de prova utilizadas neste estudo..... | 54 |
| Tabela 5 – Comparações de médias de densidade do solo (Mg.m^{-3}), obtidas pelo Método do Anel Volumétrico, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20m, dos diferentes tratamentos após 19 anos de condução do experimento..... | 59 |
| Tabela 6 – Comparações de médias de valores de densidade do solo (Mg.m^{-3}) obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada em cada tratamento, em seis diferentes profundidades, após 19 anos de condução do experimento. | 64 |
| Tabela 7 – Comparações de médias de valores de densidade (Mg. m^{-3}) obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada, de cada tratamento, em seis diferentes profundidades, aos 10 e 19 anos de condução do experimento..... | 68 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 14 |
| 2.1 Aspectos gerais dos solos de várzea | 14 |
| 2.2 Sistemas de cultivo e preparo do solo..... | 15 |
| 2.1.1 Sistema Convencional | 16 |
| 2.1.2 Sistema Plantio Direto | 18 |
| 2.1.3 Sistema Pré-Germinado..... | 19 |
| 2.1.4 Sistema Cultivo Mínimo | 21 |
| 2.2 Alterações dos atributos físicos dos solos de várzea..... | 22 |
| 2.3 Métodos de avaliação da densidade do solo | 28 |
| 2.3.1 Método do Anel Volumétrico | 29 |
| 2.3.2 Método da Tomografia Computadorizada..... | 29 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 39 |
| 3.1 Localização da área experimental | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2 Coleta e preparo das amostras..... | 42 |
| 3.3 Determinação da densidade do solo..... | 44 |
| 3.3.1 Método do Anel Volumétrico..... | 44 |
| 3.3.2 Método da Tomografia Computadorizada..... | 44 |
| 3.4 Análise estatística..... | 57 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 58 |
| 4.1 Densidade do solo..... | 58 |
| 4.1.1 Método do Anel Volumétrico..... | 58 |
| 4.1.2 Método da Tomografia Computadorizada..... | 61 |
| 4.1.3 Comparação dos valores de densidade do solo obtidos aos 10 e 19 anos de condução do experimento..... | 67 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 58 |
| 6 REFERÊNCIAS..... | 72 |
| ANEXOS..... | 80 |
| APÊNDICES..... | 84 |

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos em que o homem deixou de ser nômade, passando a explorar e usufruir do solo no intuito de produzir alimentos que consome, o solo tem sido elemento crucial para o desenvolvimento dos povos. Tanto é que grandes nações se ergueram sobre solos naturalmente férteis. Porém, aquelas civilizações que não souberam explorá-los de forma consciente, deteriorando-os sob diversas formas, entraram em colapso por má administração dos recursos naturais.

Hoje, mais do que nunca, a racionalização da exploração dos solos é a condição que a sociedade vem impondo aos setores de produção agrícola, dado o nível de conscientização desenvolvido nos últimos tempos, motivado por processos de degradação ambiental que atingem hoje grandes proporções. Danos físicos ao ambiente solo como a erosão, desagregação, desestruturação, encrostamento superficial e a compactação são decorrentes da utilização de sistemas de cultivo que empregam técnicas que se contrapõem à conservação dos solos e, conseqüentemente, à sustentabilidade da agricultura.

Nos solos das várzeas do Rio Grande do Sul, explorados essencialmente através do binômio arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado e pecuária de corte, a ocorrência de fatos negativos está promovendo a limitação dos sistemas de produção. A situação tornou-se crítica a partir do aumento da competitividade nos setores orizícola e pecuário e a conseqüente diminuição da margem de lucro dos agricultores, além da alta infestação das lavouras por invasoras. Em razão disso, muitos agricultores abandonaram o campo, alguns mudaram de atividade e outros passaram a arrendar suas terras. Sensibilizados com esta situação, pesquisadores e produtores têm destinado atenção especial no sentido de retomar e preservar a

qualidade destes solos, buscando alternativas eficientes que viabilizem a atividade agrícola ao longo do tempo.

Entre as alternativas propostas estão: a implementação de sistemas de cultivo com menor revolvimento do solo como o Plantio Direto e Cultivo Mínimo na semeadura do arroz irrigado; a adoção da rotação do arroz irrigado com culturas de sequeiro como a soja (*Glicine Max L.*), o milho (*Zea maiz L.*) e o sorgo (*Sorghum bicolor L.*), e o cultivo de arroz irrigado no verão em sucessão com pastagens cultivadas de inverno como, por exemplo, o azevém (*Lolium multiflorum L.*). Estas alternativas têm sido estudadas, com resultados positivos em muitos casos. Atributos do solo como a agregação, grau de compactação, porosidade, armazenamento e disponibilidade de água às plantas, conteúdo de matéria orgânica entre outros, têm se mostrado, em tratamentos que preconizam menor revolvimento, mais próximos aos atributos de solos mantidos sem cultivo.

Desta forma, é imprescindível inferir sobre quais os sistemas de cultivo mais eficientes quanto à preservação da integridade do solo ao longo do tempo, visando contribuir ao desenvolvimento sustentável da agricultura em áreas de várzea. Acredita-se que os sistemas de cultivo e preparo utilizados nestas áreas, de forma continuada e por longo tempo, afetam a densidade e conseqüentemente o estado de compactação dos solos de forma diferenciada, de modo que, sistemas que envolvam menor mobilização do solo resultam em condições físicas, químicas e biológicas mais satisfatórias e sustentáveis ao longo do tempo.

Porém, as metodologias tradicionais disponíveis para a avaliação do estado físico do solo e suas modificações ao longo do tempo, não conseguem identificar, de forma detalhada, problemas como a presença de finas camadas compactadas. Neste sentido, o Método da Tomografia Computadorizada é tido como promissor e eficiente.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a densidade de um Planossolo Háplico Eutrófico solódico cultivado sob diferentes sistemas de cultivo por um período de 19 anos, através dos Métodos do Anel Volumétrico e da Tomografia Computadorizada e comparar os resultados com aqueles obtidos por Pedrotti (1996) neste mesmo experimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais dos solos de várzea

As várzeas são regiões planas a levemente onduladas, situadas em planícies litorâneas e margens de rios, lagoas e lagunas. No RS, os tipos de solo que recobrem estas regiões são idênticos quanto a sua formação, que se dá em condições de drenagem natural deficiente (hidromorfismo). Dentre as classes que se incluem nos solos de várzea do RS, em termos de área, os Planossolos predominam, compondo 56% delas, perfazendo 11% da área total, correspondendo a aproximadamente 3 milhões de hectares (PINTO et al., 2004; PINTO et al., 2006). Nestes, o cultivo de arroz e a pecuária são as atividades principais exercidas pelo homem. Em se tratando somente da cultura do arroz no RS, a área cultivada na safra 2004/2005 foi de 1.034.820ha, com uma produtividade média de 6.041kg ha⁻¹ (IRGA, 2006), respondendo por cerca de 46,7% da produção nacional (CONAB, 2005).

Para fins de levantamento e classificação, os Planossolos do RS são subdivididos em: Planossolo Háplico Eutrófico típico, originado de sedimentos quaternários provenientes de rochas sedimentares das formações geológicas da Bacia do Paraná e de folhelhos e siltitos da formação Palermo (Grupo Guatá); Planossolo Háplico Eutrófico solódico, formado a partir de sedimentos lagunares, lacustres e arenosos das formações Chuí e Graxaim, na planície costeira; e Planossolo Háplico Eutrófico vértico, desenvolvido a partir de arenitos finos, siltitos argilosos e folhelhos do grupo Guatá e de siltitos arenosos do grupo Passo-Dois (formação Rio do Rasto) (EMBRAPA, 2006; PINTO et al., 2004).

O fato de estes solos serem oriundos de diferentes materiais de origem e de serem submetidos a diferentes graus de hidromorfismo (GOMES et al., 1992) e de serem explorados usando diferentes sistemas de cultivo, leva à ocorrência de variações significativas em seus atributos físicos ao longo do tempo (PEDROTTI et al., 2001).

Do ponto de vista físico e morfológico, os Planossolos possuem características marcantes, como a presença de um horizonte B com mudança textural abrupta, causada pelo incremento de argila em pequena distância, e a ocorrência de cores acinzentadas, indicando uma baixa permeabilidade (PINTO et al., 1999). Neste tipo de solo e em outros situados nas várzeas ocorrem situações peculiares, diferenciando-o de outras áreas, a citar: baixa velocidade de infiltração e baixa condutividade hidráulica no horizonte B, sendo praticamente nulas e relacionadas à presença de uma camada adensada e argilosa; alta densidade; alta relação micro/macroporos e pequena capacidade de armazenagem de água no solo (PINTO et al., 2004).

Pauletto et al. (2004) ressaltam que os solos de várzea apresentam várias condições favoráveis à agricultura, pois são áreas planas a suavemente onduladas, extensas e contínuas, amplamente mecanizáveis, com baixa suscetibilidade à erosão e às perdas por lixiviação. Porém, são complexos do ponto de vista de manejo e cultivo, possuindo freqüentemente argilas expansivas, alta infestação de plantas daninhas, além dos problemas de sustentabilidade econômica como a baixa rentabilidade e a subutilização do solo quando ocupado com a pecuária extensiva. Diante disso, têm-se priorizado estudos no intuito de aperfeiçoar as técnicas de manejo, utilizadas a fim de otimizar o uso desses solos, reduzir custos, controlar as plantas daninhas quanto à infestação e melhorar suas qualidades químicas, físicas e biológicas.

2.2 Sistemas de cultivo e preparo do solo

A iniciativa de preparar o solo para a semeadura está ligada ao surgimento da agricultura moderna. Porém, técnicas mais sofisticadas de preparo do solo surgiram no século XVIII, com a invenção do arado de aivecas (CASTRO, 1989). O preparo do solo consiste de técnicas utilizadas pelo homem que modificam as

condições naturais do solo para tentar melhorar a germinação das sementes e o desenvolvimento das plantas. A produtividade depende diretamente de quais técnicas são utilizadas e como são executadas e, dependendo também do tipo de solo, clima e cultura explorada, sistemas de preparo inadequados podem levar à degradação da qualidade física do solo (VERNETTI JR.; GOMES, 2004). Por conseguinte, a produtividade de grãos está intimamente relacionada às modificações físicas como agregação, aeração, infiltração e movimento de água no solo, provocadas principalmente pela ação antrópica, as quais prejudicam ou favorecem o uso e a conservação do solo, dependendo da forma e intensidade de manejo.

Independentemente de qualquer sistema de preparo do solo adotado, a sistematização dos solos de várzea, que consiste em adequar a superfície natural do terreno de forma a transformá-la num plano (com ou sem declive) ou numa superfície curva organizada, promove diversos benefícios como: menor consumo de água; maior eficiência no uso de máquinas e na aplicação de insumos; diminuição das perdas na colheita; melhor controle de invasoras e de insetos-praga e o favorecimento das práticas de irrigação e drenagem (PARFITT et al., 2004).

Neste contexto é fundamental entender as conseqüências que cada sistema de cultivo acarreta aos atributos físicos do solo.

2.1.1 Sistema Convencional

O sistema de cultivo convencional surgiu na Europa, da necessidade de se interromper a ação estagnante do frio sobre a germinação das culturas entre o inverno e a primavera, expondo os solos das regiões temperadas à ação direta dos raios solares, proporcionando condições favoráveis ao desenvolvimento de culturas de verão (VERNETTI JR.; GOMES, 2004).

Pelo fato do sistema de cultivo convencional em regiões temperadas ter alavancado a produtividade agrícola, ele também se espalhou para regiões tropicais e subtropicais. No entanto, os agentes climáticos que agem sobre os solos que cobrem as regiões mais quentes são mais intensos. Nessas condições, a taxa de decomposição de resíduos orgânicos é maior que a sua reposição, promovendo a perda de matéria orgânica e acarretando a degradação destas áreas, especialmente quando o solo é utilizado intensivamente sob monocultura.

Apesar de ser bastante conhecido e precursor na lavoura orizícola, o sistema convencional tem perdido terreno para sistemas menos onerosos e que, principalmente, controlam melhor o arroz vermelho, como é o caso do cultivo mínimo e o plantio direto. O que representava na safra 1999/2000 53,3% da área total cultivada com arroz no RS, na safra 2004/2005 totalizou apenas 22% do total cultivado no estado (IRGA, 2006).

O sistema convencional compreende o preparo primário e o secundário. O primário consiste em utilizar implementos para eliminar ou enterrar plantas indesejáveis e soltar o solo para permitir melhor aeração e maior facilidade de penetração radicular. Usam-se arados de disco ou de aivecas ou grades aradoras para revolver e incorporar a cobertura vegetal existente. No preparo secundário, realizam-se o nivelamento e o destorroamento com grades de discos e, em poucos casos, com grades de dentes. Portanto, buscam-se condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas mediante a colocação de sementes ou partes de plantas no solo, além de nivelar e destorroar o solo (PETRINI; FRANCO, 2006).

Alguns atributos do solo são beneficiados pelo sistema convencional, como a eliminação da compactação em camadas superficiais, o aumento da infiltração de água, a incorporação de resíduos de plantas indesejáveis, herbicidas, calcário e fertilizantes, além da otimização da temperatura e umidade no solo. Por outro lado, pode ter conseqüências negativas como: a diminuição do conteúdo de matéria orgânica; os elevados custos devido ao uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas; a formação de camada compactada ou “pé-de-grade” abaixo da profundidade de corte, especialmente quando a grade aradora de discos é utilizada; além da diminuição da estabilidade de agregados em água e a sua destruição devido à pulverização do solo (VERNETTI JR.; GOMES, 2004).

A utilização do sistema convencional de forma intensiva e continuada, em terras altas, degrada o solo através da redução da matéria orgânica, ocasiona perda de fertilidade, desestruturação e intensificação dos processos erosivos (GLIESSMAN, 2000). Dessa maneira, a grande desestruturação provocada pelo intenso revolvimento do solo impossibilita a ocorrência de níveis desejáveis das características físicas, químicas e biológicas, necessários ao adequado desenvolvimento da cultura do arroz. As culturas respondem a fatores que são modificados ao longo do tempo num dado solo, especialmente no que diz respeito ao conteúdo de água, temperatura, disponibilidade de nutrientes, composição e

disponibilidade de ar e densidade do solo. Peña et al. (1996) constataram que, de modo continuado, o sistema convencional em terras baixas aumentou a densidade, que nestas regiões já é mais alta por natureza e, conseqüentemente, diminuiu a porosidade total do solo.

2.1.2 Sistema Plantio Direto

Em termos gerais, nas terras altas este sistema consiste na semeadura direta de uma cultura no solo com resíduos de uma cultura anterior ou previamente dessecada, sem que haja o revolvimento mecânico da área por completo. Em arroz irrigado por inundação, o plantio direto tem diferenças, principalmente porque há, em muitos casos, algum tipo de revolvimento. Neste caso, o preparo do solo é realizado, em áreas de pousio, nos meses de janeiro a março (preparo de verão), através de uma aração, uma ou duas gradagens e o aplainamento. Após o preparo do solo, este pode permanecer em pousio até a época da semeadura ou pode receber uma pastagem de inverno, que se constituirá em elemento de melhor qualidade para a pecuária. De setembro a novembro, dependendo da região, é realizada a semeadura do arroz diretamente sobre a cobertura vegetal, previamente dessecada (GOMES et al., 2004; PAULETTO et al., 1999).

Com o passar do tempo, o sistema plantio direto foi evoluindo, incluindo a combinação de outras práticas agrícolas, como a rotação de culturas, assumindo uma visão sistêmica. Passou, então, a ser considerado como um sistema de produção agropecuária que deve envolver a diversificação de espécies via rotação de culturas, cujo processo de semeadura ocorre com um mínimo de movimento de solo (20 a 30%), feito sobre a resteva de uma cultura anterior, pastagem ou flora de sucessão, dessecadas com herbicidas de ação total, ou mecanicamente (GOMES et al., 2004).

De forma global, considerando vários tipos de solos e culturas, a ampla adoção do sistema de plantio direto se deveu principalmente pela redução no tempo de preparo e nos custos operacionais da lavoura, além da menor perda de matéria orgânica para a atmosfera sob a forma de CO₂. No caso mais específico de cultivo de arroz irrigado nas várzeas, o plantio direto foi adotado somente a partir da necessidade de combater o problema da alta infestação com cultivares de arroz

vermelho e preto que, por serem da mesma espécie dos cultivares de arroz comercial, não são passíveis de um combate eficiente somente através do uso de herbicidas e sementes convencionais.

As maiores vantagens desta visão sistêmica de plantio direto consistem na redução do banco de sementes de arroz daninho, desde que, conjuntamente, aplique-se: a possibilidade de diversificação através da implementação da rotação de culturas, favorecendo a quebra do ciclo de doenças e insetos-praga atuantes na lavoura do arroz, melhor rentabilidade nos casos de uso do binômio lavoura x pecuária extensiva, pela possibilidade de introdução de pastagens de inverno melhoradas e não espontâneas como o azevém (GOMES et al., 2006; PAULETTO et al., 1999).

Entre as desvantagens deste sistema podem ser mencionadas: o uso de agrotóxicos em maior escala; o surgimento de camadas compactadas; e a alta concentração de palha na superfície, dificultando em muitos casos o trabalho das semeadoras (GOMES et al., 2004). No caso específico do arroz irrigado, a alta concentração de palha na superfície favorece a produção de ácidos orgânicos oriundos da decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Esses ácidos prejudicam o bom desenvolvimento da cultura, pois inibem a elongação das raízes e a absorção de nutrientes (VAHL; SOUSA, 2004).

2.1.3 Sistema Pré-Germinado

Este sistema é definido como sendo o conjunto de técnicas de cultivo de arroz irrigado onde sementes previamente germinadas são lançadas em quadros nivelados e inundados, os quais tenham sido previamente sistematizados (PETRINI et al., 2004).

O preparo do solo do sistema pré-germinado é compreendido por duas fases: primeiro, através da aração a seco, as invasoras são destruídas e os resíduos orgânicos são incorporados, bem como são eliminados os insetos-praga e inóculos de microorganismos causadores de doenças. Alternativamente, nesta fase podem ser adotados outros procedimentos como: a) aração em solo úmido e posterior destorroamento com grade de discos, grade hidráulica ou de arrasto em solo inundado; b) aração e depois o destorroamento com grade de discos ou enxada

rotativa em solo seco, utilizando a enxada rotativa para formação da lama após a inundação; c) enxada rotativa diretamente em solo não inundado com ações sucessivas na entressafra e, posteriormente, em solo inundado para a formação de lama e d) uso da enxada rotativa em solo inundado por duas vezes, de modo a formar lama e eliminar as plantas daninhas. Na segunda fase, após a formação da lama, renivela-se e alisa-se (opcional) o terreno para receber as plântulas (PETRINI; FRANCO, 2006).

De acordo com os mesmos autores, o sistema pré-germinado surgiu principalmente da necessidade de se combater a alta infestação das lavouras com arroz daninho. É muito utilizado na Europa, ocupando 90% das lavouras de arroz irrigado. No Brasil ele ocupa 20% das lavouras com arroz irrigado, destacando-se Santa Catarina, onde este sistema é aplicado em quase 100% da área total cultivada com arroz.

Este sistema oferece vantagens em relação aos demais, como a facilidade de reestruturação da lavoura, menor dependência do clima para o preparo do solo e plantio, planejamento mais efetivo, redução do ciclo da cultura, pois a etapa da germinação ocorre anteriormente ao plantio, menor consumo de água e a antecipação da reação de redução do solo e liberação de nutrientes (PETRINI et al., 2004; PETRINI; FRANCO, 2006).

Porém, um dos principais problemas físicos no solo decorrente deste sistema, principalmente se for empregado ao longo de vários anos, é a completa desestruturação do solo pela dispersão de partículas finas da fração argila e a destruição dos agregados de maior tamanho (RICE-WHEAT CONSORTIUM, 2006), levando a uma maior concentração de agregados na classe de menor tamanho (BORGES et al., 2003; PALMEIRA et al., 1999), maior densidade (TRIPATHI et al., 2007), menor porosidade total e macroporosidade.

Em relação aos sistemas convencional, cultivo mínimo e plantio direto, outro grande problema desse sistema é a perda considerável de nutrientes importantes como N, P, K, Ca, Mg e Fe, além da argila dispersa em água, os quais se encontram em suspensão na solução de drenagem. Esse problema é causado pela necessidade de se drenar as áreas com o sistema pré-germinado geralmente aos 3 dias após a semeadura do arroz (WEBER et. al., 2003).

2.1.4 Sistema Cultivo Mínimo

O sistema de cultivo mínimo para o arroz irrigado baseia-se no preparo completo do solo de forma antecipada para que possa existir um espaço de tempo (no mínimo entre 45 e 60 dias) entre o preparo e semeadura. As operações de preparo do solo são semelhantes às do sistema de plantio direto, diferindo apenas quanto à época de realização, sendo esta entre o final do inverno e início da primavera. Este tempo permite a germinação das plantas invasoras, especialmente do arroz vermelho. Procedese então uma dessecação com herbicida, promovendo a formação de uma cobertura de palhada e sobre esta é executada a semeadura (GOMES et al., 2006; PAULETTO et al., 1999). Em áreas não sistematizadas é conveniente fazer o entaipamento logo após o preparo do solo usando, de preferência, taipas de base larga e menor altura, de forma que permitam a passagem das máquinas sobre elas sem destruí-las (SOSBAI, 2005).

Por ser denominado um dos sistemas conservacionistas do solo, este sistema surgiu concomitantemente com o plantio direto, tendo praticamente os mesmos objetivos. A necessidade de combater a alta infestação das lavouras com arroz daninho, de elevar a capacidade de uso das terras nos períodos de pousio, além de melhorar os atributos físicos relacionados à densidade do solo, distribuição e continuidade dos poros, e diminuir custos de produção, promoveram sua crescente adoção, em conjunto com a rotação e sucessão de culturas ao longo do tempo.

Muitas das vantagens e desvantagens deste sistema são semelhantes às aquelas apresentadas pelo sistema direto. Podem ser citadas: o eficiente controle de plantas daninhas e do manejo de água; a oportunidade de semear na época requerida, visto que a lavoura é preparada antecipadamente; em relação ao sistema convencional, há a redução de custos; redução de uso de máquinas e implementos agrícolas, podendo abranger maior área com um mesmo número de máquinas e implementos; melhoria de atributos do solo pela redução da mobilização do solo e do tráfego de máquinas; em solos com baixo conteúdo de carbono orgânico, a presença de maior quantidade de palha na superfície associada ao baixo revolvimento promovem a formação de agregados maiores, melhorando a estrutura do solo (GOMES et al., 2004; GOMES et al., 2006; PAULETTO et al., 1999).

As principais desvantagens são: o investimento inicial em semeadoras específicas para plantio direto ou na adaptação destes equipamentos da linha

convencional; a formação de ácidos orgânicos tóxicos ao arroz, oriundos da decomposição anaeróbia da palha, provocando estande inicial baixo, menor perfilhamento e rendimento de grãos; a tendência de aumento da quantidade de plantas daninhas do tipo perenes como a grama boiadeira (*Luziola peruviana* L), sendo de difícil combate; problemas de drenagem para culturas de sequeiro, entre outros (GOMES et al., 2004; GOMES et al., 2006).

Segundo Gomes et al. (2004), os solos de várzea, por terem condições físicas desfavoráveis às culturas de sequeiro, são mais exigentes em termos de manejo que os solos de terras altas quando se deseja introduzir espécies alternativas ao arroz, levando os orizicultores a adotarem preferencialmente o sistema de cultivo mínimo do que o sistema de plantio direto.

Existem outros sistemas de manejo, como o sistema mix que é considerado por alguns autores uma variante do sistema pré-germinado. Outros autores o consideram como uma mistura entre o sistema plantio direto com preparo de verão ou sistema cultivo mínimo (com a posterior aplicação de herbicida de ação total) e o sistema pré-germinado. Outro sistema pouco usado no Brasil, a não ser por órgãos de pesquisa é o transplante de mudas, apesar de ser muito utilizado por produtores em países da Ásia. Neste sistema as sementes são estimuladas à germinação e depois cultivadas em viveiro de mudas. Após o período de desenvolvimento inicial, é efetuado o plantio direto das mudas no solo através de máquina específica (PETRINI et al., 2004; PETRINI; FRANCO, 2006).

2.2 Alterações dos atributos físicos dos solos de várzea

A qualidade física dos solos de várzea é avaliada, entre outras formas, mediante a caracterização dos seus atributos físicos. No entanto, sabe-se de antemão que, naturalmente, estes solos apresentam características marcantes como: alta densidade, baixa porosidade, alta relação micro/macroporos, baixa capacidade de armazenagem de água, além de possuir um horizonte B plânico com baixa infiltração, condutividade hidráulica quase nula, presença de camada compactada e consistência desfavorável (PAULETTO et al., 2004).

Com relação à condutividade hidráulica do horizonte B dos solos cultivados com arroz irrigado por inundação, seus valores são baixos devido aos elevados

teores de argila, às altas quantidades de argilas dispersas em água e à baixa estabilidade de agregados em água, fatores que favorecem a obstrução e descontinuidade dos poros.

Com o objetivo de estudar o efeito de diferentes sistemas de manejo sobre alguns parâmetros hidráulicos de um Planossolo, Lima, et al. (2002) determinaram a condutividade hidráulica (K), usando o infiltrômetro de tensão nas tensões de 0; 0,25; 0,5 e 1kPa, no mesmo experimento objeto desta dissertação, após 13 anos de cultivo. Os autores utilizaram 5 tratamentos que englobaram o sistema de cultivo convencional e sistema plantio direto, associados a rotação e sucessão de culturas como o arroz, milho, soja e azevém, além da testemunha. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que, para todas as tensões analisadas, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Apesar disso, em termos de valores absolutos, aconteceram grandes diferenças entre as médias dos tratamentos, como é o caso do tratamento com o solo mantido sem cultivo (testemunha) que, para a tensão de 0kPa, apresentou maior valor médio de K ($14,65\text{mm.h}^{-1}$). Este valor corresponde a mais que o dobro do valor de K ($6,37\text{mm.h}^{-1}$), obtido no tratamento com o solo sob o sistema de cultivo tradicional de arroz (um ano com arroz usando o sistema de preparo convencional do solo, intercalado com dois anos de pousio), sendo esta diferença praticamente mantida entre estes dois tratamentos nas outras tensões.

Em se tratando de consistência, os solos de várzeas originados de rochas sedimentares como os argilitos e siltitos (Planossolo Háplico Eutrófico típico e Planossolo Háplico Eutrófico vértico) apresentam comportamentos que dificultam seu preparo, já que apresentam alto índice de plasticidade. Em termos práticos, são muito duros e resistentes ao destorroamento quando trabalhados em condições de baixa umidade, ou muito plásticos quando trabalhados em altos níveis de umidade, Estes fatores facilitam a compactação dos solos devido a um rearranjo das suas partículas, além de provocar alta aderência aos implementos agrícolas.

Palmeira et al. (1999) estudaram a influência de diferentes sistemas de cultivo em um Planossolo Hidromórfico Eutrófico solódico cultivado por um período de 10 anos, no mesmo experimento objeto desta dissertação, sobre a distribuição dos agregados estáveis em água e concluíram que, sistemas de cultivo que envolveram menor mobilização do solo (sistema plantio direto de arroz no verão com

sucessão de azevém no inverno, bem como solo mantido sem cultivo) tiveram a maior concentração de agregados estáveis em água na classe de maior tamanho.

Resultados semelhantes foram obtidos por Borges et al. (2003), trabalhando num experimento instalado num Gleissolo situado na Fazenda da Palma - UFPel, próximo ao local do experimento objeto desta dissertação. Os autores avaliaram 9 tratamentos que compreenderam diversas culturas de verão (arroz, soja e milho) e de inverno (azevém, aveia (*Avena sativa* L.) e ervilhaca (*Vicia sativa* L.) como plantas de cobertura), além da testemunha (solo mantido sem cultivo por mais de vinte anos), em diferentes sistemas de preparo do solo (sistema convencional, plantio direto e cultivo mínimo), por um período consecutivo de três anos. Concluíram que a distribuição dos agregados estáveis em água da maioria dos sistemas de cultivo adotados foi afetada negativamente, quando comparados com a testemunha. Além disso, os tratamentos que envolveram sucessão e rotação de culturas, em plantio direto, foram os que mais contribuíram para a obtenção de macroagregados, e dos maiores valores do diâmetro médio ponderado na superfície, assemelhando-se à testemunha.

De acordo com Jury et al. (1991), a macroporosidade não deve ser inferior a 10% do volume total de solo, pois a partir daí ocorre uma grande redução na taxa de difusão de oxigênio, comprometendo o desenvolvimento das culturas de sequeiro. Em estudo conduzido com três diferentes solos, Vasconcellos (1993), constatou que os planossolos apresentam, de forma geral, baixa macroporosidade e porosidade total, com predominância de microporos, dificultando o desenvolvimento ideal de culturas de sequeiro sensíveis às baixas taxas de difusão de oxigênio no solo.

Logo abaixo da camada arável muitas vezes desenvolve-se uma camada de maior densidade que é, em grande parte, decorrente do manejo inadequado ao longo dos anos, mesmo que este comportamento possa estar associado ou confundido com a influência da granulometria (baixo teor de argila ou grande presença de silte e/ou areia) e/ou com um reduzido teor de matéria orgânica. No entanto, processos de compactação são gerados por ações de forças externas, como o pisoteio de animais, excessivo tráfego de máquinas ou o uso e o preparo do solo de forma inadequada, principalmente em conteúdos de água no solo incorretos, ou seja, em conteúdos de água no solo propícios à máxima compactação, considerado quando o solo adquire consistência plástica, ou também como o

conteúdo de água correspondente à capacidade de campo (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Para avaliar o impacto das práticas de manejo sobre o sistema solo, é necessário quantificar as modificações da estrutura do solo (PAGLIAI et al., 2004). Cada atributo físico pode ser alterado de forma diferente, principalmente conforme o sistema de manejo adotado. Para a avaliação do comportamento de solos de várzea, com relação ao efeito dos diferentes sistemas de cultivo sobre a estrutura, a densidade do solo é um atributo físico muito importante, principalmente quando se pretende avaliar a compactação (PEDROTTI; DIAS JR., 1996). De uma forma geral, a compactação significa um rearranjo das partículas, que resultam em redução da porosidade total, aumentando a densidade em relação ao seu estado natural.

Como conseqüência do aumento considerável do peso das máquinas agrícolas, aliado a sua intensa utilização, sérios problemas relacionados à compactação têm sido observados em diversas regiões com vocação agrícola, reduzindo consideravelmente a produtividade dessas áreas, especialmente quando o solo é trabalhado fora dos limites adequados de conteúdo de água.

Nas várzeas, ocupadas essencialmente com arroz, isto não é diferente, pois são utilizadas máquinas de grande porte para viabilizar o cultivo de grandes áreas, no preparo do solo e na colheita. Segundo Mantovani (1987), a aplicação de uma força externa em materiais arenosos, pode rearranjar facilmente as partículas mais finas, forçando-as a se assentarem nos vazios do solo, podendo elevar a densidade até 2 Mg.m^{-3} .

Na resteva do arroz, muitas vezes são colocados bovinos e bufalinos para o pastoreio da cobertura vegetal. Camadas compactadas nestas áreas podem surgir devido ao pisoteio destes animais, que compactam o solo devido ao peso deles ser concentrado apenas na área sob suas quatro patas.

Em solos descobertos, pode ocorrer o encrostamento superficial, provocado pelo impacto das gotas de chuvas torrenciais que desestruturam os agregados, carregando uma parte do silte ali presente para dentro dos poros de diâmetro equivalente ou maior a este, resultando no selamento superficial. Isso diminui a velocidade de infiltração, aumenta o escoamento superficial e dificulta a emergência das sementes.

Canillas e Salokhe (2001) conduziram experimentos numa caixa preenchida com um solo considerado de textura franco argilo siltosa, com o objetivo de

desenvolver modelos que descrevessem a compactação causada por rodas de máquinas agrícolas. Utilizando técnicas de análise dimensional, os autores consideraram como parâmetros independentes as variáveis do pneu (seção transversal, diâmetro e pressão de insuflação), as variáveis do solo (conteúdo de água volumétrico, índice de cone inicial) e variáveis externas (velocidade de deslocamento da roda, carregamento sobre a roda e número de passadas sobre o solo). Como variáveis dependentes consideraram a densidade do solo e o índice de cone. Concluíram que o carregamento sobre a roda e o número de passadas do pneu no solo são as variáveis que mais influenciam na compactação artificial do solo, sendo que o efeito mais significativo com relação à compactação é obtido com as três primeiras passadas do pneu sobre o solo num mesmo local.

Pedrotti et al. (2001) avaliaram a influência de diferentes sistemas de cultivo de arroz irrigado na compactação de um Planossolo localizado na Embrapa - Estação Experimental de Terras Baixas, no mesmo experimento objeto desta dissertação. Para isso, após 10 anos de cultivo, os autores quantificaram a densidade através do Método da Tomografia Computadorizada e do Anel Volumétrico. Concluíram que, em geral, todos os sistemas que sofreram alguma ação antrópica, ou seja, os sistemas que envolveram maior mobilização do solo apresentaram maiores valores de densidades e de resistência à penetração em relação a testemunha, sendo mais perceptível na camada compreendida entre as profundidades de 0,10 a 0,20m, principalmente quando o solo foi submetido ao sistema de cultivo contínuo de arroz.

Além disso, estes mesmos autores encontraram, de uma maneira geral, valores altos de densidade do solo em relação aos limites toleráveis pelas plantas quanto ao seu normal desenvolvimento radicular. Observaram também que os sistemas de preparo reduzido do solo e principalmente o cultivo de arroz em plantio direto sobre resteva de azevém, apresentaram as melhores condições físicas em termos de densidade e resistência à penetração. No entanto, os sistemas de preparo convencional do solo contribuíram para a degradação física do solo, ocasionando o surgimento de camadas compactadas.

Por outro lado, Palmeira et al. (1999) salientam que para cada solo existe um sistema de cultivo mais adequado, sendo que de um modo geral, sistemas de cultivo que aumentam os resíduos vegetais, resultando em incremento de matéria orgânica, que diminuem a mobilização do solo, e que ajudam no controle de plantas

indesejáveis, especialmente o arroz vermelho e preto, são os mais promissores no sentido de aumentar a produtividade das culturas e melhorar a qualidade dos solos.

Para Pauletto et al. (2004), a compactação está relacionada com a porosidade total e relação micro/macroporos, densidade e resistência mecânica do solo à penetração, variando em função do tipo de solo e conteúdo de água.

Silva et al. (1986) estudaram a influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos sob condições de floresta e cultivo e verificaram que ocorreu, em ambos, uma diminuição dos poros com diâmetro maior que 0,05 mm, com conseqüente aumento daqueles com diâmetro menor, da porcentagem de água retida, da água disponível entre 0,01 e 0,1MPa e uma redução da condutividade hidráulica. Dentre os fatores que causam a compactação, os autores citam: a utilização de equipamentos pesados, a intensa mobilização do solo e o preparo de solo realizado em valores de conteúdo de água inadequados, que alteram muitas propriedades físicas do solo, destacando-se a densidade e a porosidade. Para Vaz et al. (1992), isso ocorre devido às características do próprio solo, que é um meio poroso não elástico.

Segundo Goedert et al. (2002), as principais conseqüências negativas da compactação do solo são: o aumento da resistência mecânica à penetração radicular, a redução da capacidade de aeração e da disponibilidade de água e nutrientes.

Silva et al. (1997) chamam a atenção quando se quer avaliar a compactação de diferentes solos, ressaltando a extrema importância de se conhecer os diferentes efeitos que ela causa. Para isso, determinaram os valores de densidade volumétrica e densidade relativa. Esta última foi relacionada com valores de densidade de referência, obtidos a partir de valores de densidade do solo submetido a um nível de compactação padrão. Utilizaram também a análise de regressão múltipla, como ferramenta para separar os efeitos de sistemas de manejo, dos efeitos das propriedades inerentes de solos, com diferentes origens. Segundo eles, a densidade do solo está diretamente relacionada com atributos físicos do solo como granulometria, conteúdo de matéria orgânica e estrutura do solo manifestada pela porosidade total.

Quando se pretende quantificar o grau de compactação provocado por sistemas de manejo, é de se esperar ou admitir que as amostras indeformadas coletadas para a determinação da distribuição dos valores de densidade, na

verdade, sofram deformações que devem ser levadas em conta, o que já era suposto por alguns pesquisadores. Em trabalhos desenvolvidos por Pires et al. (2004) e Pires et al. (2005), buscando identificar regiões compactadas no ato da amostragem, foi comprovada, através de imagens tomográficas uma maior compactação nas bordas de contato da amostra com a parede do cilindro e na parte inferior da amostra.

Esta compactação decorrente do método de amostragem já deve ocorrer no momento da entrada do cilindro no solo, ou seja, até que se rompa a resistência oferecida pela camada superficial do solo, ocasionada geralmente pela grande quantidade de raízes na superfície das áreas amostradas, resultando em aumento de densidade nas laterais superiores da amostra. Durante o restante da penetração, ao longo do comprimento do cilindro no solo, ocorre compactação ao longo de toda a lateral da amostra, provocada pelo atrito da borda inferior do cilindro, responsável pelo corte do solo. Por final, na retirada do cilindro com a amostra do solo e a posterior retirada do excesso de solo, retido na extremidade inferior, acontece nova compactação na parte inferior da amostra.

Vaz (1989) acredita que evitar este tipo de perturbação é difícil, senão impossível. Isso porque não há como introduzir o cilindro sem deformar a estrutura do solo, mesmo que a intensidade deste efeito seja muito variável com as condições de conteúdo de água na ocasião da amostragem, e do próprio método empregado.

2.3 Métodos de avaliação da densidade do solo

Dentre os métodos empregados na maioria dos trabalhos técnicos e científicos encontrados na literatura e destinados à quantificação e avaliação dos valores de densidade ao longo do perfil, o Método da Tomografia Computadorizada tem se destacado, especialmente pelo maior detalhamento dos resultados. No entanto, o Método do Anel Volumétrico ainda predomina em relação aos demais, sendo considerado o método padrão para esta determinação.

2.3.1 Método do Anel Volumétrico

Esta metodologia é bastante simples e amplamente utilizada pela comunidade científica da área de Física do Solo. Neste método, são empregadas amostras de solo com estrutura preservada, coletadas com cilindros conhecidos como anéis volumétricos. Após a coleta e procedimento de limpeza, as amostras são submetidas à secagem em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24hs. Após a secagem e resfriamento até a temperatura ambiente em dessecador, as amostras são pesadas, obtendo-se a massa de solo seco (M_{ss}). A partir das dimensões do anel é calculado seu volume total (V_t) e, dividindo M_{ss} por V_t , obtém-se a densidade do solo.

Os solos de várzea, por apresentarem argilas expansivas que fazem variar consideravelmente seu volume quando submetidos à secagem, ocasionam diferenças nos valores de densidade obtidos por metodologias tradicionais, como o Método do Anel Volumétrico (BIASSUSI, 1996). Além disso, este método e outros tantos pressupõem a existência da isotropia espacial na amostra e, dessa forma, assume-se que apenas um valor é representativo da camada em estudo, sendo insensível à variabilidade interna (CRESTANA et al., 1991).

Assim, as medidas para caracterização física desses solos, feitas para tentar entender melhor seu comportamento, principalmente em função dos sistemas de cultivo e culturas utilizadas, esbarram em métodos tradicionalmente utilizados, os quais nem sempre são os mais adequados, eficientes e sensíveis. O Método da Tomografia Computadorizada de raios X e gama destaca-se, pois contorna essas limitações e possibilita um melhor detalhamento dos resultados (PEDROTTI, 1996).

2.3.2 Método da Tomografia Computadorizada

Resultado de um imenso esforço de muitos pesquisadores de diversas áreas, o Método da Tomografia Computadorizada, segundo Crestana et al. (1996) e Macedo et al. (2002), começou a se desenvolver primeiramente no campo da gravitação com Radon em 1917, que desenvolveu algoritmos de reconstrução de imagens e na radioastronomia com Bracewell em 1956. No entanto, a metodologia só tomou impulso quando Cormack em 1963 atentou para a necessidade de desenvolvê-la com base na matemática, a fim de se obterem imagens internas de

corpos humanos, de forma não destrutiva e não invasiva. Hoje esta metodologia é amplamente utilizada na área da medicina, com emprego de equipamentos muito sofisticados. Na área de solos, utilizando raios X e gama para medir a densidade e o conteúdo de água no solo, Petrovic et al. (1982), Hainsworth e Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985) apresentaram estudos pioneiros.

Para melhor entender o método, é preciso conhecer seus aspectos básicos. Ela baseia-se na obtenção de uma imagem ou mapa da distribuição espacial dos coeficientes de atenuação lineares de uma dada fatia da amostra, que é exposta a um feixe de raios X ou gama (CRESTANA et al., 1992). Este feixe é emitido por uma fonte radioativa, usualmente composta por ^{241}Am , de energia 59,54keV e atividade 300mCi para estudos relacionados à densidade, conteúdo de água (CRESTANA et al., 1991; CRESTANA et al., 1992; PEDROTTI et al., 2003), porosidade (OLIVEIRA et al., 1998) e granulometria do solo (OLIVEIRA et al., 1994; VAZ, et al., 1997), ou ^{137}Cs , com energia de 661keV e atividade 100mCi (CRESTANA et al., 1991).

Na interação da radiação com a matéria de um corpo, considerando este corpo como sendo uma amostra homogênea e de comprimento infinitesimal (dx), um feixe de fótons (I_0) emitido por uma fonte de energia (por exemplo, o radioisótopo ^{241}Am) imerge num determinado corpo. Parte dele pode interagir com sua matéria, e alterar a intensidade e espectro de energia, sendo absorvido e/ou sofrendo colisão com a matéria (atenuação), outra parte do feixe emerge, ou seja, é transmitido (I) (fig. 1):

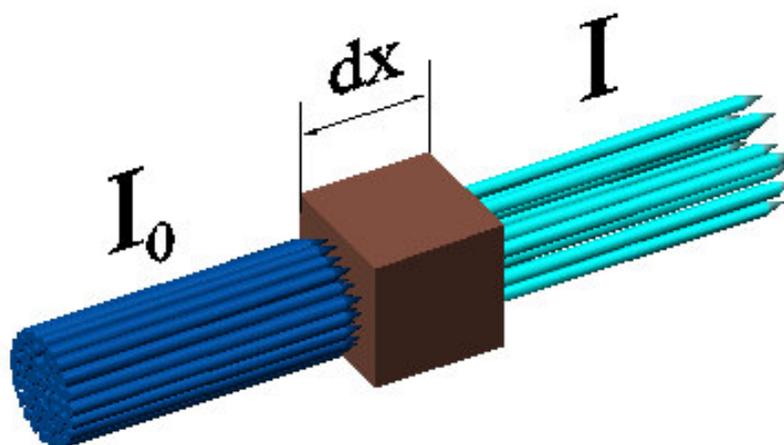


Figura 1 - Atenuação de um feixe de fótons que passa por um volume elementar de uma amostra homogênea.

Considerando $-dI/dx$ como a taxa de decréscimo da intensidade do feixe, e definindo-se μ como uma constante de proporcionalidade, ou melhor, como a probabilidade dos fótons emitidos serem absorvidos ou espalhados pelo meio atenuante, têm-se que:

$$-\frac{dI}{dx} = \mu \cdot I \quad (1)$$

Arranjando e integrando a equação acima:

$$-\frac{dI}{I} = \mu \cdot dx \quad \therefore -\int_{I_0}^I \frac{1}{I} dI = \mu \int_{x_0}^x dx \quad \therefore$$

$$-\left[\text{Ln } I \right]_{I_0}^I + C = \mu \left[x \right]_{x_0}^x + C \quad \therefore \text{ se } C = 0, \text{ então:}$$

$$-\left[\text{Ln } I - \text{Ln } I_0 \right] = \mu \cdot [x - x_0] \quad \therefore -\left[\text{Ln } I - \text{Ln } I_0 \right] = \mu \cdot [x - x_0] \quad \therefore$$

$$\text{aplicando a propriedade: } \text{Ln } a - \text{Ln } b = \text{Ln } \frac{a}{b} \text{ e}$$

considerando $x_0 = 0$ e $x = x$, então:

$$-\text{Ln } \frac{I}{I_0} = \mu \cdot x \quad (-1) \quad \therefore$$

$$\text{se: } a = \frac{I}{I_0} \text{ e } b = -\mu \cdot x, \text{ aplica-se: } \text{Ln } a = b,$$

$$\text{então } a = e^b, \text{ e portanto } \frac{I}{I_0} = e^{-\mu \cdot x}$$

rearranjando, obtém-se:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (\text{Lei de Lambert - Beer}) \quad (2)$$

onde:

I = intensidade do feixe emergente (fótons. s^{-1});

I_0 = intensidade do feixe incidente (fótons. s^{-1});

μ = coeficiente de atenuação linear (cm^{-1});

x = espessura do corpo (cm).

Para cada incremento de espessura x , há um correspondente decréscimo da intensidade I , representado pelo sinal negativo.

A interação da radiação com a matéria emitida por fontes que utilizam isótopos radioativos de baixas e médias energias ($E \leq 1MeV$) com a matéria, levadas em consideração pela Tomografia Computadorizada de solos são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e espalhamento coerente. Para o caso de se trabalhar com uma fonte de ^{241}Am , cuja energia é baixa ($E \leq 100keV$), o efeito fotoelétrico prevalece, sendo μ variável em função da densidade e da composição química da amostra, a qual é considerada constante para um determinado tipo e camada de solo. Diferentemente, quando elementos de média energia como o ^{137}Cs são empregados, o efeito Compton é predominante, sendo μ dependente apenas da densidade do material (DULIU, 1999; MACEDO et al., 2002; VAZ, 1989). Em Biassusi (1996); Macedo et al. (2002) e Vaz (1989) encontram-se explicadas estas interações de forma bem detalhada.

A idéia central da metodologia é que μ é variável em função de: a) quantidade de energia emitida pela fonte, considerada constante para um determinado elemento radioativo; b) da composição química dos materiais que compõem a amostra, considerada constante para um mesmo tipo e horizonte de solo; e c) da distribuição espacial dos valores de densidade da amostra. Uma vez que as duas primeiras sejam de valor conhecido, e considerando-as como constantes, para o caso de se usar uma fonte de ^{241}Am , μ é então variável apenas em função dos valores de densidade (CRESTANA et al., 1996).

O método da tomografia baseia-se na atenuação de raios X ou gama. Ele torna possível a visualização da distribuição dos coeficientes de atenuação lineares ao longo da amostra numa matriz de dados, que se refere a uma fatia do corpo em estudo, a qual tem espessura igual ao diâmetro do feixe de fótons emitido pela fonte.

Para um meio heterogêneo e real como o solo, o comprimento L é a soma dos comprimentos (dx), sendo que cada um destes tem um coeficiente de atenuação

linear diferente. Assim, a atenuação do comprimento L pode ser descrita pela equação:

$$I = I_0 \cdot e^{\left(-x \sum_{i=1}^n \mu_i\right)} \quad (3)$$

Sendo n o número de subdivisões ao longo de L . Para a representação contínua da atenuação, é conveniente expressar a atenuação em L na forma integral:

$$I = I_0 \cdot e^{-\int_0^L \mu(x,y) dx} \quad (4)$$

Para a reconstrução de uma imagem tomográfica a fim de obter a distribuição dos coeficientes de atenuação lineares da fatia requerida, um sistema de coordenadas (x,y) é usado para localizar os pontos das medições de μ . A representação da distribuição completa dos coeficientes de atenuação linear de uma fatia da amostra é obtida a partir de diversas medidas paralelas, espaçadas entre si por distâncias Δr (passos lineares), e em diversas posições angulares da amostra de 0° até 180° , dadas por variações angulares $\Delta\phi$ (passos angulares) (fig. 2).

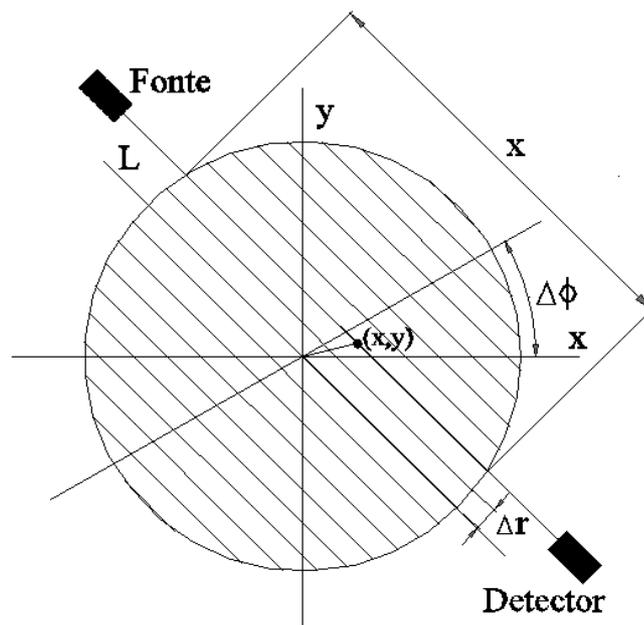


Figura 2 – Sistema de coordenadas utilizadas para descrever o método de reconstrução de imagens tomográficas.

A integral de linha a seguir representa o valor parcial da projeção $P(r, \Phi)$, sendo mais conhecida como raio soma.

$$P(r, \phi) = L \ln \frac{I_0}{I_{r, \phi}} = \int_{r, \phi} \mu(x, y) dx \quad (5)$$

Um conjunto completo de raios soma, para um ângulo Φ específico, é definido como uma projeção. Obtendo-se várias projeções em diferentes valores de Φ e utilizando um algoritmo apropriado para reconstrução de imagens, é possível obter uma imagem que representa a distribuição de densidade numa fatia da amostra.

A distribuição dos $\mu(x, y)$ é contínua em toda a fatia da amostra. No entanto, para possibilitar a reconstrução da imagem tomográfica, a distribuição de $\mu(x, y)$ passa a ser discreta, sendo descrita matematicamente por uma função $\hat{f}(x, y)$:

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{j=1}^m P^*(r_j, \phi_j) \Delta\phi \quad (6)$$

onde $r_j = x \cos \phi_j + y \sin \phi_j$ é a distância do raio em relação à origem, ϕ_j é a j ésima projeção angular de todas as m projeções. A sinalização " $\hat{}$ " sobre $f(x, y)$ indica que seus valores são resultado de uma estimativa, esperando que estejam próximos dos valores reais de $\mu(x, y)$ (AYLMORE, 1993).

A função acima é responsável pela reconstrução da imagem através do Método da Retroprojeção Filtrada. Este método é baseado em soluções matemáticas exatas, por isso é rápido e de boa qualidade de imagens, sendo utilizado em muitos tomógrafos de raios X e gama. Desenvolvido por Bracewell e Riddle em 1967, é conhecido como um método de reconstrução analítica, sugerindo que, antes de reconstruir a imagem a partir de suas projeções, ocorra um processo de filtragem representada por $*$ na equação acima, destinada à eliminação de artefatos (borrões), que o método de Retroprojeção Simples não consegue eliminar (BROOKS; DI CHIRO, 1976). Existem diversas técnicas de filtragem, entre as quais se destacam as transformadas de Fourier e Radon, além da filtragem por convolução (AYLMORE, 1993). Maiores detalhes sobre o método da Retroprojeção

Filtrada e a filtragem de imagens podem ser vistos em: Aylmore (1993); Biassusi (1996); Brooks e Di Chiro (1976) e Cruvinel et al. (1996).

Após a reconstrução, obtém-se uma imagem ou mapa da distribuição espacial dos coeficientes de atenuação lineares de uma dada seção da amostra. Mas, de acordo com Crestana et al. (1991), é preciso encontrar a relação entre UT (Unidades Tomográficas, geradas pelo método de reconstrução, formando um mapa de valores) e os $\mu(x, y)$ obtidos de amostras conhecidas a partir de dados de I e I_0 . A partir da correlação linear, obtém-se para uma mesma energia, uma equação que relaciona UT e $\mu(x, y)$.

O tamanho da matriz é definido a partir das dimensões da amostra e da resolução desejada. Como resultado de um algoritmo de reconstrução, a fatia é decomposta em volumes elementares ou *voxels*. Cada *voxel*, de um total de uma matriz de *voxels*, é caracterizado por um valor médio de coeficiente de atenuação linear (expresso em UH - Unidades Hounsfield ou UT - Unidades Tomográficas). Um mapa ou imagem bidimensional desses valores é representado numa escala de tons de cinza, assim como cada *voxel* é representado por um *pixel*, formando uma imagem tomográfica (DULIU, 1999). Na fig. 3 é possível visualizar os principais passos da tomografia de forma resumida.

Para Vaz et al. (1992), certas variáveis necessitam de metodologias aplicáveis de forma não invasiva e com alta resolução espacial, para permitir melhores inferências a seu respeito.

Tomografias Computadorizadas de raios X, gama e Ressonância Magnética Nuclear (RMN) têm obtido boa repercussão quanto ao seu uso na área de solos, devido à possibilidade de obterem-se altas resoluções nas imagens geradas (usualmente de 0,5 a 4mm, podendo chegar até a ordem de micrômetros) (MACEDO; CRESTANA, 1999) e a exploração das amostras ser de forma não invasiva. Ou seja, é possível obterem-se imagens de seções transversais de objetos opacos, sem perturbar a amostra, ou seja, de forma não destrutiva (CRESTANA; NIELSEN, 1990). Isto atribui ao método elevada precisão e sensibilidade, podendo ser obtida não só a densidade média, mas também a sua distribuição espacial em volumes infinitesimais, além da possibilidade de se trabalhar com amostras indeformadas (análise de torrões), excluindo eventuais problemas de deformação da amostra, causados durante a amostragem (VAZ et al., 1992). Só que Tomografias Computadorizadas de raios X ou gama são superiores quando comparadas à

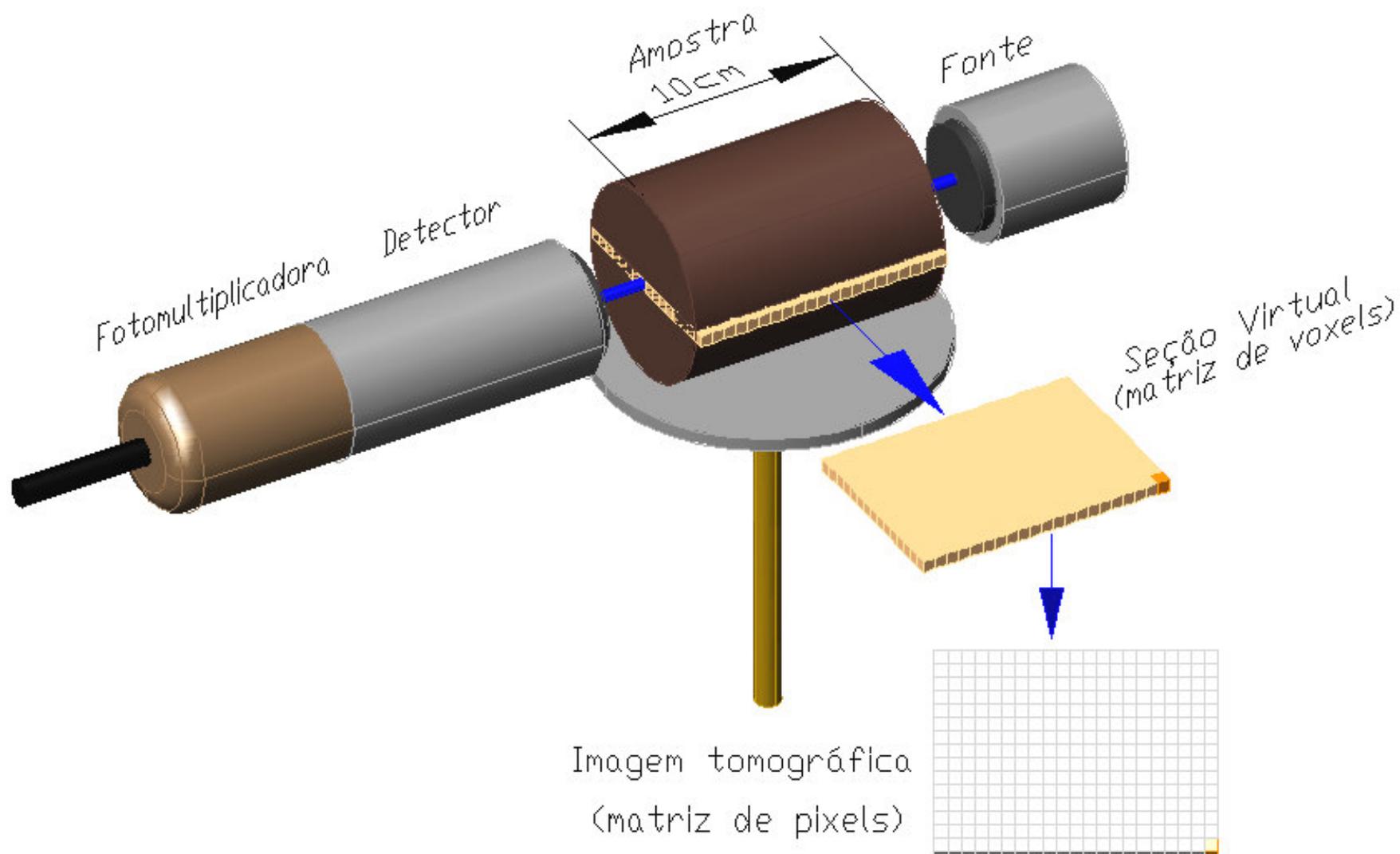


Figura 3 – Seção virtual da amostra explorada pela tomografia e a obtenção da matriz de pixels (imagem tomográfica).

mesma metodologia por RMN, pois quando se deseja analisar corpos com materiais paramagnéticos, é quase impossível correlacionar o sinal de RMN com as variáveis de solo geralmente requeridas, como o conteúdo de água volumétrico, por exemplo. Em relação à Tomografia Computadorizada de raios X, a Tomografia Computadorizada de raios gama resulta em determinações de valores de densidade de amostras de forma mais precisa, pois as curvas de calibração desta metodologia apresentam maior dependência entre os coeficientes de atenuação linear e as unidades tomográficas.

As desvantagens da Tomografia Computadorizada de raios gama são: o alto custo e a demora para obtenção dos dados, principalmente em resoluções espaciais maiores e a exposição do operador à radiação (PEDROTTI et al., 2003; VAZ, 1989).

Já para Duluiu (1999), a Tomografia Computadorizada, feita com o Minitomógrafo de solos, necessita de tempos relativamente longos (na ordem de horas) para a aquisição completa de uma imagem de resolução aceitável, se comparada com tomógrafos utilizados pela medicina. Isso porque os tomógrafos médicos demandam apenas alguns segundos para obterem resultados semelhantes.

Esta grande redução de tempo dos tomógrafos médicos atuais surgiu, principalmente, pela necessidade de diminuir a exposição dos corpos humanos à radiação. Isso ocorre devido às fontes de raios gama utilizadas em estudos de variáveis de solos, como o ^{241}Am , terem sua atividade algumas vezes menor em relação aos tubos de raios X, usualmente utilizados em tomógrafos médicos. Em princípio isto é bom, se for analisado somente a intensidade de radiação de exposição dos corpos. Porém, esta atividade está relacionada com o tempo de aquisição da imagem de forma inversamente proporcional, ou seja, de uma forma geral, quanto maior a atividade, menor o tempo necessário para a aquisição das unidades tomográficas (AYLMORE, 1993).

Vaz et al. (1992), avaliando a compactação de um Latossolo Vermelho da região de São Carlos-SP, concluíram que a Tomografia Computadorizada é sensível e precisa, podendo quantificar camadas compactadas de até 2 mm. Os autores, através de comparação entre a Tomografia Computadorizada e o Penetrômetro de Impacto, com três diferentes níveis de conteúdo de água do solo, observaram também que os perfis avaliados com o Penetrômetro de Impacto apresentaram grande variação da densidade quando se variava o conteúdo de água. Em valores mais altos de conteúdo de água, a existência de regiões compactadas e

evidenciadas pela Tomografia Computadorizada foi mascarada pelos valores de resistência à penetração encontrados com o Penetrômetro de Impacto.

Oliveira et al. (1998) utilizaram a Tomografia Computadorizada para avaliar a estrutura do solo, pela teoria da atenuação da radiação gama. Concluíram que esta é uma poderosa ferramenta aplicável a estudos de degradação da estrutura de solos, além da possibilidade de monitorar a porosidade inter e intra-agregados.

Num estudo feito por Pedrotti et al. (2003), utilizando amostras coletadas no mesmo experimento do presente trabalho, na avaliação dos 10 anos de condução do experimento, foram descritos os principais aspectos para adequação do tamanho das amostras e os procedimentos de avaliação e estudos por análise estatística dos parâmetros físicos. Os autores concluíram que, mesmo havendo uma espessura teórica ideal em torno de 0,04m, apresentada por Ferraz e Mansell (1979), para a geração, tipo de tomógrafo e tipo de solo empregados no presente trabalho, a espessura de amostras de Planossolos, obtida a partir de parâmetros estatísticos, é de 0,06m para o horizonte A e 0,04m para o horizonte B. No entanto, segundo Borca e Dului (1997), para o mesmo tipo e geração de tomógrafo, a precisão ideal é obtida quando o comprimento linear da amostra atravessado pelo feixe de fótons for maior ou igual a $0,8/\mu_l$ e menor ou igual a $4,4/\mu_l$, sendo este o intervalo em que há susceptibilidade adequada da amostra à passagem do feixe de fótons.

Por fim, exemplos de aplicações nesta área podem ser citados: a distribuição, variabilidade espacial e temporal da densidade e conteúdo de água (HARTWIG, 2004; PHOGAT et al., 1991), na quantificação da porosidade e sua distribuição espacial nos espaços inter e intra-agregados (OLIVEIRA et al, 1998), compreensão dos fenômenos de expansão e contração em solos expansivos (BIASSUSI, 1996), estudo do fenômeno de selagem superficial de poros (PIRES et al, 2002), entre outras.

Ademais, pelo fato da Tomografia Computadorizada detectar pequenas variações de densidade em curtas distâncias, esta metodologia se habilita como uma ferramenta de amplo uso na caracterização do grau de compactação do solo (VAZ, 1989).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área experimental

O experimento onde foi realizado o presente estudo está localizado na Estação Experimental de Terras Baixas (EETB) da Embrapa Clima Temperado pertencente ao município de Capão do Leão – RS, distante 2km a sudeste da Faculdade de Medicina Veterinária - UFPel e 5km ao sul da FAEM - UFPel, cujas coordenadas são: 31°49'27" S e 52°26'35" W (fig. 4).



Figura 4 - Vista da área experimental, objeto deste estudo.

Fonte: Software Google Earth.

A área estudada situa-se na região fisiográfica da Planície Costeira, numa zona de deposições lagunares e fluviais, situada no início da planície alta, com uma altitude que varia em torno de 13m. O solo do local foi classificado como Planossolo

Háplico Eutrófico solódico, com argila de atividade alta, textura média/argilosa e relevo plano (EMBRAPA, 2006; PINTO et al., 1999), pertencente à área de mapeamento Pelotas (BRASIL, 1973).

A descrição geral e morfológica de um perfil do solo da área experimental e a determinação de algumas características físicas foram realizadas por Vasconcellos (1993) cujos dados obtidos são mostrados nos anexos A, B e C.

O clima da região em que se localiza o experimento conforme a classificação de Köppen é o *Cfa* (*C* - clima mesotérmico quente, com média do mês mais frio entre 3°C e 18°C; *f* – precipitação média mensal não inferior a 60mm em todos os meses (sempre úmido); *a* – temperatura do mês mais quente do ano superior a 22°C (verão quente)). O local é representativo de um ambiente subtropical, marítimo, de verão subúmido e o resto do ano úmido ou superúmido.

Este experimento vem sendo conduzido desde o ano agrícola de 1985/1986 e o presente ano agrícola (2006/2007) representa o 22º ano de sua condução (tab. 1). O delineamento experimental empregado é o de blocos inteiramente casualizados com 4 repetições. Cada bloco é constituído por 8 diferentes sistemas de cultivo (tratamentos), perfazendo um total de 32 parcelas. Cada parcela possui uma área de 600m² (30 x 20m), sendo que subáreas de 200m² (20 x 10m) foram utilizadas para as diferentes determinações. O tamanho relativamente grande das parcelas se justifica, uma vez que as operações de cultivo são realizadas com máquinas agrícolas, procurando refletir a situação real do agricultor.

Na fig. 5, é apresentada a distribuição espacial dos tratamentos na área experimental. Para o presente trabalho, o T3 (APCHM) foi eliminado face às suas semelhanças com o T2 (APC).

A condução do experimento foi executada de acordo com os diferentes sistemas de manejo e culturas. Para o preparo convencional, fez-se uma aração, normalmente executada nos meses de setembro ou outubro, seguida de uma ou duas gradagens, sendo a semeadura realizada com uma semeadora de plantio convencional. Para o plantio direto, utilizou-se uma semeadora específica nos tratamentos T6 (APD) e T7 (APD-SPC), após a dessecação do azevém, e da flora natural (que sucedeu a cultura da soja), respectivamente.

As adubações e calagens foram baseadas em função dos resultados obtidos das análises de solo realizadas em cada tratamento, e das exigências nutricionais das diferentes culturas.

Tabela 1 - Cronograma temporal do experimento apresentando os diferentes sistemas de cultivo (tratamentos) e culturas utilizadas, ao longo dos anos agrícolas.

| Tratamento | Anos Agrícolas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 85/86 | 86/87 | 87/88 | 88/89 | 89/90 | 90/91 | 91/92 | 92/93 | 93/94 | 94/95 | 95/96 | 96/97 | 97/98 | 99/00 | 00/01 | 01/02 | 02/03 | 03/04 | 04/05 | 05/06 | 06/07 |
| T1 | arroz | pousio | pousio | arroz | pousio | pousio | arroz | pousio | pousio | arroz | pousio | pousio | arroz | pousio | pousio | arroz | pousio | pousio | arroz | pousio | pousio |
| T2 | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz |
| T3 | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz | arroz |
| T4 | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz |
| T5 | arroz | soja | milho | arroz | soja | milho | arroz | soja | milho | arroz | soja | milho | arroz | soja | milho | arroz | soja | milho | arroz | soja | milho |
| T6 | arroz | azev./ arroz |
| T7 | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz | soja | arroz |
| T8 | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | test. | Test. |

T1 – Sistema tradicional de cultivo de arroz (ST): um ano com preparo convencional do solo seguido de dois anos de pousio;

T2 – Sistema de cultivo contínuo de arroz com preparo convencional do solo e controle de invasoras com herbicida (APC);

T3 – Sistema de cultivo contínuo de arroz com preparo convencional do solo e controle total de invasoras com herbicidas + manual (APCHM);

T4 – Rotação de arroz x soja com preparo convencional do solo (RAS);

T5 – Rotação de arroz x soja x milho com preparo convencional do solo (RASM);

T6 – Sucessão de azevém no inverno x arroz no verão sob plantio direto (APD);

T7 – Rotação de arroz sob plantio direto x soja sob preparo convencional do solo (APD – SPC);

T8 – Testemunha: Solo mantido sem cultivo por aproximadamente 40 anos (SN).

O controle de plantas daninhas, de doenças e pragas foi realizado conforme a necessidade, acompanhando a evolução dos agroquímicos lançados no mercado.

| | | | | |
|------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| BLOCO IV | RC - T₅ | APC - T₂ | APD - T₆ | SN - T₈ |
| | AS - T₇ | ST - T₁ | SAS - T₄ | APCHM - T₃ |
| BLOCO III | AS - T₇ | SAS - T₄ | RC - T₅ | APD - T₆ |
| | APCHM - T₃ | SN - T₈ | ST - T₁ | APC - T₂ |
| BLOCO II | SAS - T₄ | APC - T₂ | APCHM - T₃ | ST - T₁ |
| | APD - T₆ | RC - T₅ | AS - T₇ | SN - T₈ |
| BLOCO I | SN - T₈ | SAS - T₄ | ST - T₁ | APD - T₆ |
| | AS - T₇ | APC - T₂ | APCHM - T₃ | RC - T₅ |

Figura 5 – Distribuição espacial dos tratamentos na área experimental em estudo.

Fonte: Lima, 2001.

3.2 Coleta e preparo das amostras

A coleta das amostras de solo foi realizada nos meses de agosto e setembro de 2004, portanto, antes do início da implantação das culturas para a safra agrícola 2004/2005. Esta data antecede ao início do 4º ano agrícola em que todos os tratamentos são cultivados com a cultura do arroz. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho refletem a influência de 3 períodos agrícolas, nos quais, no 6º ano todas as parcelas são cultivadas com a cultura do arroz.

Em cada parcela as amostras com estrutura preservada foram coletadas utilizando o Método do Macaco Hidráulico (PAULETTO, 1997; PEDROTTI et al., 1996) (fig. 6). Na coleta das amostras com estrutura preservada, foram utilizados tubos cilíndricos de PVC (0,22m de altura e 0,07785m de diâmetro interno), para a

determinação da densidade do solo pelo Método da Tomografia Computadorizada (CRESTANA, 1985; PETROVIC et al., 1982; VAZ, 1989), e cilindros de inox com volume de aproximadamente 5.10^{-4} m^3 para a determinação da curva de retenção de água no solo. As amostras com estrutura deformada foram coletadas com auxílio de pá-de-corte, nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m.

a)



b)



Figura 6 – (a) Método do Macaco Hidráulico utilizado na coleta de amostras com estrutura preservada e (b) procedimento de embalagem para o transporte.

Em cada parcela foram coletados três cilindros da camada 0 – 0,22m (altura do cilindro), que em 28 parcelas totalizaram 84 cilindros e, por sua vez, seccionados ao meio resultaram em 168 amostras. No laboratório, cada cilindro foi limpo, embalado e identificado quanto à sua orientação em relação ao perfil do solo e, então, vedado nas extremidades com parafina. Por ocasião da determinação, o cilindro de PVC foi seccionado na distância de 0,11m em relação ao topo, utilizando uma serra específica para corte de materiais metálicos e PVC. Para cortar no ponto certo e com maior segurança, foi utilizada uma moldura de madeira, como pode ser visto em detalhe na fig. 7. Este procedimento de corte do cilindro se faz necessário em virtude da limitação quanto ao comprimento máximo das amostras, imposta pelo próprio Método da Tomografia Computadorizada.

Das amostras de solo coletadas com estrutura deformada foram retiradas aproximadamente 200g, passadas em peneira de 1mm de abertura de malha e secadas em estufa na temperatura de 105°C por 24hs. Essas amostras serviram para determinação dos coeficientes de atenuação linear dos diferentes tratamentos e camadas.



Figura 7 – Preparo de amostras: a) cilindro usado na coleta; b) vista do topo da amostra preenchido com parafina; e c) serra e moldura de madeira, utilizadas para seccionar a amostra.

3.3 Determinação da densidade do solo

3.3.1 Método do Anel Volumétrico

A densidade do solo pelo Método do Anel Volumétrico (EMBRAPA, 1997) foi determinada nos mesmos cilindros de PVC, após terem sido utilizados na determinação da densidade pelo Método da Tomografia Computadorizada.

3.3.2 Método da Tomografia Computadorizada

As determinações tomográficas foram executadas com o Minitomógrafo instalado no Laboratório de Tomografia de Solos da FAEM – UFPel (fig. 8), inaugurado em 2001, utilizando como base as publicações de Crestana et al. (1992); Macedo et al. (2002); Pedrotti (1996) e Vaz et al. (1989). Este aparelho é considerado de primeira geração, pois um único feixe unidirecional é emitido em cada posição da amostra. Além disso, a fonte e o detector são fixos, enquanto que a amostra é transladada e rotacionada pelo prato rotatório existente na mesa de suporte.

Cada amostra foi convenientemente posicionada no prato de rotação e translação para a contagem dos fótons que atravessam o meio em questão (emergentes). Esta contagem realizada a cada passo linear, é feita por um detector de cristal cintilador que possui no seu interior Iodeto de Sódio e Tálcio [NaI(Tl)].

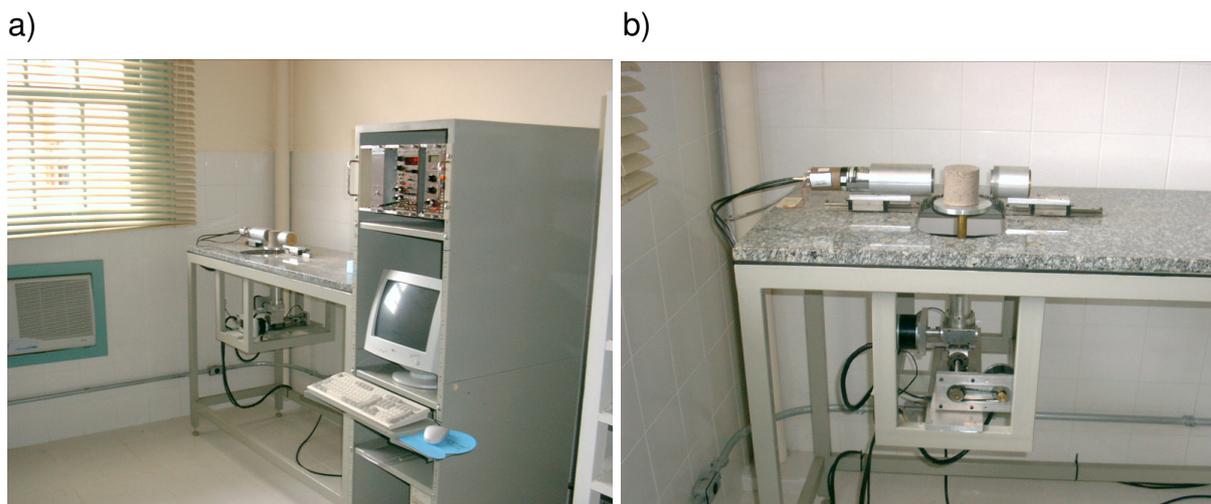


Figura 8 – (a) Minitomógrafo instalado no Laboratório de Tomografia de Solos junto ao Departamento de Solos da FAEM – UFPel e (b) detalhe da mesa com prato rotatório.

Acoplado a este detector, existe uma fotomultiplicadora que transformou os fótons detectados em pulsos elétricos, os quais foram enviados a um sistema de discriminação e contagem dos pulsos gerados, composto por um amplificador e analisador monocanal. A fig. 9 mostra o diagrama esquemático das partes componentes do Minitomógrafo.

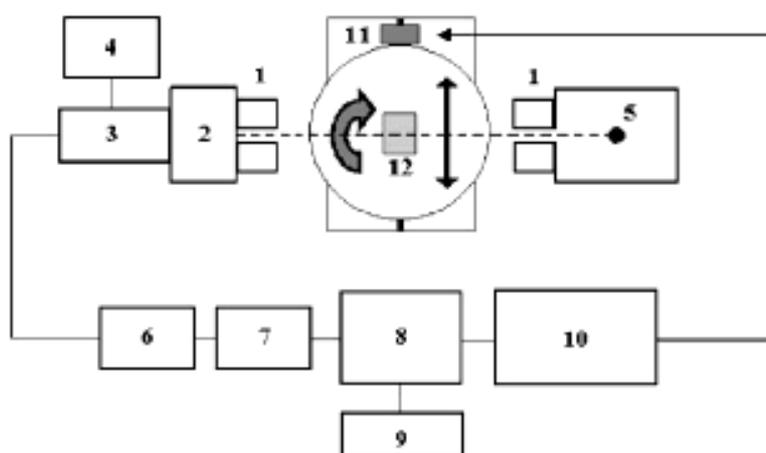


Figura 9 - Diagrama esquemático das partes componentes do Minitomógrafo de solos, onde: 1 - Colimadores; 2 - Detector; 3 - Tubo fotomultiplicador; 4 - Unidade de alta voltagem; 5 - Fonte de Amerício (^{241}Am); 6 - Amplificador; 7 - Analisador monocanal; 8 - Contador; 9 - Timer; 10 - Microcomputador; 11 - Motor de passo; 12 - Amostra.

O amplificador e analisador monocanal precisam ser corretamente ajustados para que sejam contados apenas os fótons correspondentes à energia do ^{241}Am . Para isso, o ajuste destes é feito a partir do espectro de energia característico da fonte radioativa. O espectro é obtido através da confecção de um gráfico que relaciona os valores de contagem de fótons em função da energia (keV) da fonte radioativa. Analogamente, para o sistema eletrônico de discriminação e contagem, a obtenção do espectro de energia do ^{241}Am é feita a partir da contagem de fótons realizada pelo aparelho quando se varia a tensão de saída (V) do amplificador. Partindo-se do conhecimento dos picos de energia do conjunto fonte-detector, pode ser feita a sincronização do conjunto através do ajuste da janela (intervalo) de tensões do amplificador, que corresponda ao pico de energia do ^{241}Am .

O espectro de energia para o Minitomógrafo da UFPel, determinado de acordo com os passos propostos por Macedo et al. (2000), é apresentado na fig. 10.

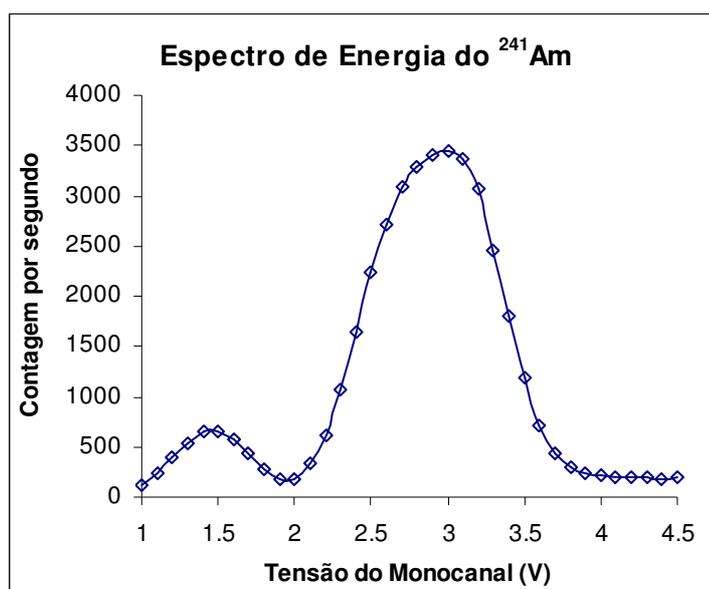


Figura 10 - Espectro de energia, obtido no ajuste do amplificador e do monocanal.

Apesar deste ajuste ter sido feito pela Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa, Desenvolvimento e Instrumentação Agropecuária (CNPDI) quando o aparelho foi construído, é possível ocorrerem alterações no comportamento do amplificador e analisador monocanal provocadas, ou por alterações acidentais nos botões de ajuste do painel de comando, ou por variações bruscas na tensão de alimentação do equipamento. Em virtude disso, é necessário ter cuidado com o

ajuste destes componentes e, somente, deve ser feito caso seja necessário. Porém, é recomendável conferi-lo periodicamente para não desperdiçar o trabalho.

Deve-se também manter a atenção quanto à intensidade do feixe livre. Este deve ter valores em torno de 10000 fótons/minuto (FERRAZ, 1974). Além disso, a intensidade do feixe livre deve manter um padrão de variação das contagens. Este comportamento é regido pela natureza randômica da fonte radioativa de ^{241}Am , i. e., cada nova leitura no aparelho corresponde a uma quantidade aleatória de fótons emitida pela fonte radioativa (GARDNER et al., 1972).

Visando obter outra comprovação, foi realizado um teste de acordo com a recomendação de Pedrotti et al. (2003), fazendo uma tomografia com tempo de contagem de 15s e outra com 30s. Chegou-se à conclusão de que a variação dos valores de densidade, para um mesmo ponto na amostra, entre um tempo de contagem e outro é insignificante, estando dentro dos padrões recomendados. A vantagem de se usar o tempo de contagem de 15s em relação a um tempo de contagem maior é a diminuição (cai pela metade) do tempo necessário para totalizar a varredura numa amostra, que nestas determinações foi de aproximadamente 4h37min. No entanto, o problema de usar um tempo de contagem muito baixo reside em se obter baixas contagens de fótons após a atenuação do feixe pela amostra, principalmente em amostra de alta densidade e com espessura superior a 0,06m (PEDROTTI et al., 2003). Dessa forma, a variação entre dois valores de contagem para um mesmo ponto da amostra é menor, podendo assim não representar com boa sensibilidade a variação real da densidade entre dois pixels da imagem.

Já o tempo de varredura depende de outros parâmetros de entrada informados pelo usuário ao programa de controle do equipamento, tais como: a distância de translação da amostra, a qual deve superar a medida da diagonal da amostra em, no mínimo 0,01m; o tamanho do pixel da imagem que, por sua vez, deve ter a medida do seu lado como sendo no mínimo o equivalente ao diâmetro do orifício do colimador; e a energia do analisador e monocanal, tendo para este equipamento valor fixo em 1keV.

Em função do acima exposto, foram adotados para este trabalho os seguintes parâmetros de ajuste: distância de translação igual a 0,15m, rotação igual a $5,625^\circ$, tamanho do pixel igual a 4,688mm e colimadores com diâmetro de orifício de 4mm, tanto no detector como na fonte. O tempo de contagem utilizado foi de 15s,

pois segundo Biassusi (1996), nesta configuração são obtidos as melhores taxas de contagens (contagens/segundo) com feixe livre.

Assim, a partir da varredura completa de uma amostra, o programa de controle do Minitomógrafo gerou uma matriz de dados com os fótons emergentes, armazenando-a num arquivo de extensão “*.dat”, cujo nome é fornecido ao programa de controle do sistema antes do início de cada tomografia. Cada conjunto de uma linha da matriz correspondeu a uma projeção completa, ou seja, um passo angular. Por sua vez, cada valor dentro de uma determinada linha de valores correspondeu a uma leitura de fótons transmitidos dentro de uma projeção, ou seja, um passo linear.

A partir da matriz de valores, procede-se a reconstrução da imagem utilizando o Método da Retroprojeção Filtrada, implementado como um algoritmo no software MicroVis, desenvolvido pelo Embrapa - CNPDIA por Macedo et al. (2000). A função deste programa é, primeiramente, proceder a reconstrução e visualização da imagem, além de fornecer alguns parâmetros estatísticos. O MicroVis busca o arquivo de dados “*.dat” armazenado no disco rígido do computador, faz a sua reconstrução, resultando em dois novos arquivos: um arquivo com a imagem tomográfica em formato “*.bmp” (fig. 11) e outro com a matriz de dados de Unidades Tomográficas - UT em formato “*.txt” (tab. 2).

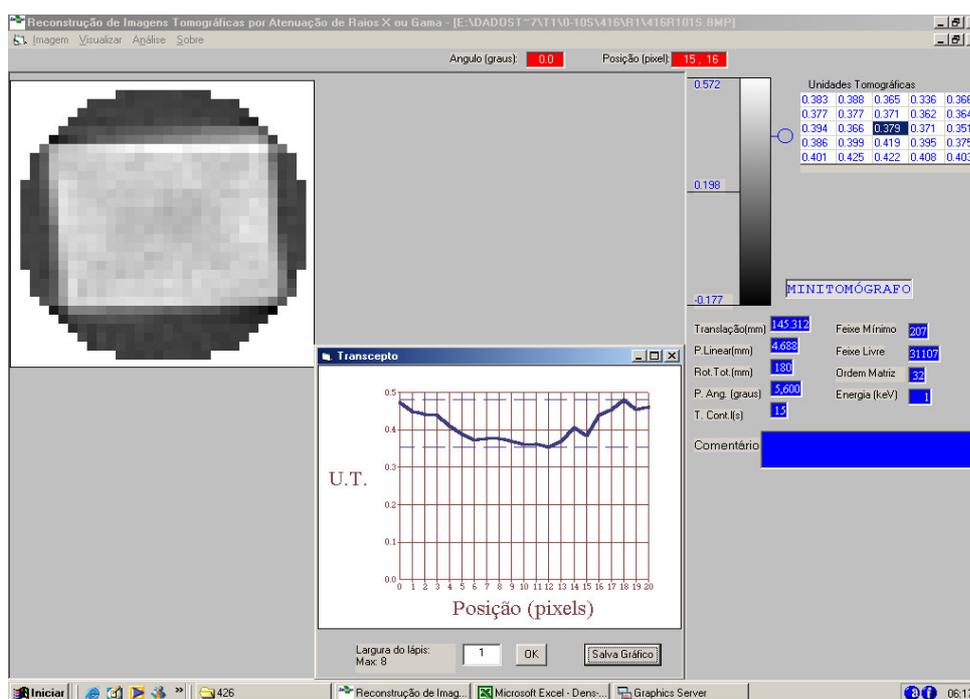


Figura 11 – Imagem tomográfica de uma amostra de solo, visualizada com o MicroVis.

É importante observar também que, ao proceder a reconstrução de uma imagem tomográfica, a distribuição dos valores de UT é invertida em relação ao posicionamento inicial da amostra no aparelho, ou seja, se o topo da amostra for colocado em frente do detector, após a realização total da tomografia (a amostra gira 180 graus), o topo da amostra estará em frente da fonte. Portanto, para obter-se a distribuição de UT ao longo do perfil de forma correta é necessário inverter a posição dos valores na matriz de dados.

A partir da matriz dos dados de UT, foram selecionadas 10 linhas e 22 colunas de pixels centrais da amostra, para eliminar os pixels que não correspondem à amostra e aqueles que correspondem à bordadura das paredes do tubo de PVC, onde poderia ter ocorrido alguma compactação decorrente da amostragem e também devido a artefatos resultantes da própria reconstrução das imagens (tab. 2).

Para transformar os dados de UT em valores de coeficientes de atenuação lineares da amostra, é necessário obter anteriormente a reta de calibração do tomógrafo com sua respectiva equação. Esses coeficientes são obtidos a partir da regressão linear entre os coeficientes de atenuação linear de amostras de prova homogêneas de diferentes materiais (obtidos a partir do método da transmissão direta), com os valores médios de UT dessas amostras.

Para a obtenção da reta de calibração, inicialmente utilizaram-se amostras homogêneas quanto a sua constituição e de dimensões conhecidas. Neste caso, usaram-se amostras sugeridas por outros autores (FERRAZ, 1979; PEDROTTI et al., 2001; PIRES et al., 2005), como água destilada, álcool, acrílico e o solo das duas camadas em estudo. As amostras de solo foram secas ao ar, passadas em peneira de abertura de 1mm e, então, secas em estufa a 105°C por 24hs.

Cada amostra de prova foi então colocada dentro de um recipiente de acrílico de dimensões conhecidas (0,05m x 0,03m x 0,04m). Pesou-se o mesmo recipiente com solo e depois sem solo. Descontou-se a massa do recipiente vazio da do cheio e dividiu-se o valor obtido pelo volume do recipiente, obtendo-se a densidade da amostra de prova. Em seguida, submeteu-se o recipiente com a amostra de prova ao feixe de fótons e realizou-se um total de 15 contagens de fótons emergentes (I_g) por 15s, em três diferentes posições verticais da amostra de prova. Após, calculou-se o valor médio das 15 contagens. O mesmo procedimento foi utilizado com o recipiente vazio, obtendo-se os fótons emitidos (I_e). O coeficiente

de atenuação linear (μ) de cada amostra de prova foi obtido a partir da seguinte relação:

$$\mu = \frac{1}{x} \cdot \text{Ln} \left(\frac{I_0 - I_B}{I - I_B} \right) \quad (7)$$

onde:

μ = coeficiente de atenuação linear da amostra tomografada (cm^{-1}),

x = comprimento da amostra atravessada pelo feixe (cm);

I_0 = intensidade do feixe livre (fótons. s^{-1});

I = intensidade do feixe emergente, registrado no contador (fótons. s^{-1});

I_B = intensidade do background (fótons. s^{-1}).

Para a obtenção de I_0 , I e I_B , usados na equação 7, aplica-se:

$$I_0 = \frac{\frac{I_g}{t}}{1 - \text{tm} \cdot \left(\frac{I_g}{t} \right)} \quad ; \quad I = \frac{\frac{I_e}{t}}{1 - \text{tm} \cdot \left(\frac{I_e}{t} \right)} \quad \text{e} \quad I_B = \frac{\frac{I_b}{t}}{1 - \text{tm} \cdot \left(\frac{I_b}{t} \right)}$$

onde:

tm = tempo morto (0,000011s);

I_b = contagem do background (fótons);

t = tempo de contagem (s);

I_g = contagem dos fótons emergentes (fótons);

I_e = contagem dos fótons emitidos (fótons).

O tempo morto é uma fração de tempo que o sistema de detecção leva para iniciar a contagem dos fótons incidentes no detector, podendo ser obtido experimentalmente (GARDNER et al., 1972). Para o Minitomógrafo da UFPel, o tempo morto é igual a $11 \mu\text{s}$. Já o background trata-se de uma perturbação causada sobre o sistema de detecção de fótons, oriunda da radiação cósmica e pelo próprio sistema, também denominada de ruído. A contagem de fótons do background (I_b) foi realizada a partir da substituição do colimador da fonte por um colimador sem

orifício, para isolar a fonte de radiação. Procederam-se então 15 contagens obtidas diretamente no visor do equipamento.

Para cada recipiente com a amostra de prova, foram realizadas uma varredura e a reconstrução da sua imagem, obtendo-se uma matriz dos valores de UT. Selecionaram-se os valores da região central, excluindo os pixels das bordas. A partir daí, efetuou-se o cálculo de um valor médio de UT para representar a amostra de prova do respectivo material. Os valores médios de μ e de UT das amostras de prova são apresentados na tab. 3.

Tabela 3 – Coeficientes de atenuação linear (μ) e Unidades Tomográficas (UT) das amostras de prova utilizadas neste estudo. ¹ Média de 20 repetições. ² Média de 50 repetições.

| Material | μ (cm ⁻¹) ¹ | UT ² |
|-------------------|--|-----------------|
| Água | 0,2016 | 0,2085 |
| Álcool | 0,1689 | 0,1624 |
| Acrílico | 0,2267 | 0,2180 |
| Solo 0 – 0,10m | 0,3549 | 0,3592 |
| Solo 0,10 – 0,20m | 0,3635 | 0,3657 |

Em seguida, os pares de valores de μ e UT (tab. 3) foram plotados num sistema de eixos cartesianos (x,y) e ajustados a um modelo de regressão linear, como mostra a fig. 12.

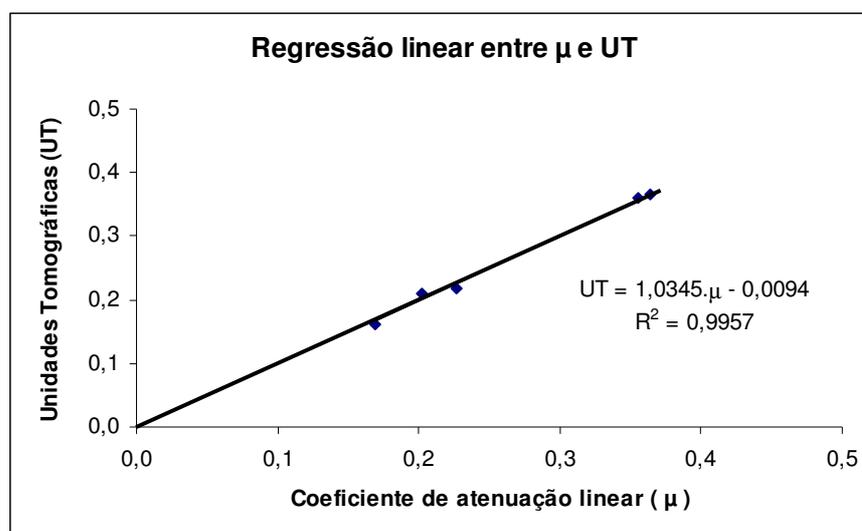


Figura 12 – Regressão linear entre UT e μ das amostras de prova utilizadas neste estudo.

Para a obtenção dos valores de coeficiente de atenuação linear (μ_l) em cada pixel das amostras tomografadas a partir dos valores das UTs, utilizou-se a seguinte equação:

$$\mu_l = \frac{UT - a}{b} \quad (8)$$

onde:

μ_l = coeficiente de atenuação linear da amostra tomografada (cm^{-1});

a = coeficiente linear da regressão;

b = coeficiente angular da regressão.

Pelo fato do solo ser um sistema trifásico (fase sólida, líquida e gasosa), torna-se conveniente expressar o coeficiente de atenuação linear em termos de coeficiente de atenuação em massa (μ_m), que é tido como constante para uma camada de um determinado tipo de solo e para um mesmo nível de energia, pois independe do estado físico (CRESTANA et al., 1992). Como o coeficiente de atenuação linear da fase gasosa é considerado desprezível, o μ_l do solo é função apenas da fase sólida e líquida, ou seja:

$$\mu_l = \mu_{ms} \cdot \rho_s + \mu_{ma} \cdot \theta \quad (9)$$

onde:

μ_{ms} = coeficiente de atenuação em massa da amostra de prova do solo ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);

μ_{ma} = coeficiente de atenuação em massa da amostra de prova de água ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);

ρ_s = densidade do solo da amostra de prova ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

θ = conteúdo de água volumétrico ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Como neste trabalho determinou-se a densidade de amostras secas apenas, então $\theta = 0$, resultando que:

$$\mu_l = \mu_{ms} \cdot \rho_s + 0 \quad ; \quad e \quad \mu_{ms} = \frac{\mu_l}{\rho_s} \quad (10)$$

Para se obter um dado de densidade a partir das UTs da matriz, dividiu-se o coeficiente de atenuação linear deste ponto pelo coeficiente de atenuação em massa do mesmo tipo de solo. Para este trabalho, foram determinados os μ_{ms} para cada tratamento, nas camadas de 0 – 0,10m e 0,10 – 0,20m (tab. 4).

Tabela 4 - Coeficientes de atenuação linear (μ_l) e de atenuação em massa (μ_{ms}) dos sete tratamentos avaliados neste trabalho, nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m. Média de 20 valores.

| Tratamento | 0 – 0,10m | | 0,10 – 0,20m | |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | μ_l | μ_{ms} | μ_l | μ_{ms} |
| T1 | 0,3645 | 0,2672 | 0,3594 | 0,2681 |
| T2 | 0,3442 | 0,2653 | 0,3511 | 0,2649 |
| T4 | 0,3611 | 0,2617 | 0,3506 | 0,2603 |
| T5 | 0,3508 | 0,2633 | 0,3480 | 0,2610 |
| T6 | 0,3646 | 0,2667 | 0,3578 | 0,2691 |
| T7 | 0,3468 | 0,2637 | 0,3607 | 0,2638 |
| T8 | 0,3552 | 0,2652 | 0,3635 | 0,2641 |
| Média = | 0,3553 | 0,2647 | 0,3559 | 0,2645 |

T1 - Um ano com preparo convencional do solo seguido de dois anos de pousio; **T2** - Sistema de cultivo contínuo de arroz com preparo convencional do solo; **T4** - Rotação de arroz x soja com preparo convencional do solo; **T5** - Rotação de arroz x soja x milho com preparo convencional do solo; **T6** - Sucessão de azevém no inverno x arroz no verão sob plantio direto; **T7** - Rotação de arroz sob plantio direto x soja sob preparo convencional do solo; **T8** - Testemunha: Solo mantido sem cultivo.

Em todas as amostras de solo analisadas, a distribuição dos valores de UT apresentou um comportamento sistemático de diminuição na região central da amostra. Foi realizada então uma tomografia de um corpo de acrílico de formato retangular (0,145 x 0,0318m), com densidade presumida homogênea (fig. 13), que comprovou a tendência observada nas amostras de solo.

Em face da tendência citada acima e visando corrigir este efeito, fez-se uma tomografia numa caixa de acrílico preenchida com um solo homogêneo, tendo como dimensões aproximadas de: largura de 0,07785m e comprimento de 0,10m, ou seja, de mesma largura e altura da fatia das amostras nos cilindros de PVC. O solo utilizado foi seco ao ar, passado em peneira de 1mm e então seco em estufa a

105°C por 24hs. Dividiu-se a massa de solo seco pelo volume da caixa, obtendo-se sua densidade. Os dados de UT foram transformados em dados de densidade e plotados num gráfico em função do comprimento da amostra (fig. 14). Analisando o comportamento apresentado, os dados foram ajustados a um modelo polinomial quadrático, observando um bom ajuste ($R^2 \cong 0,89$).

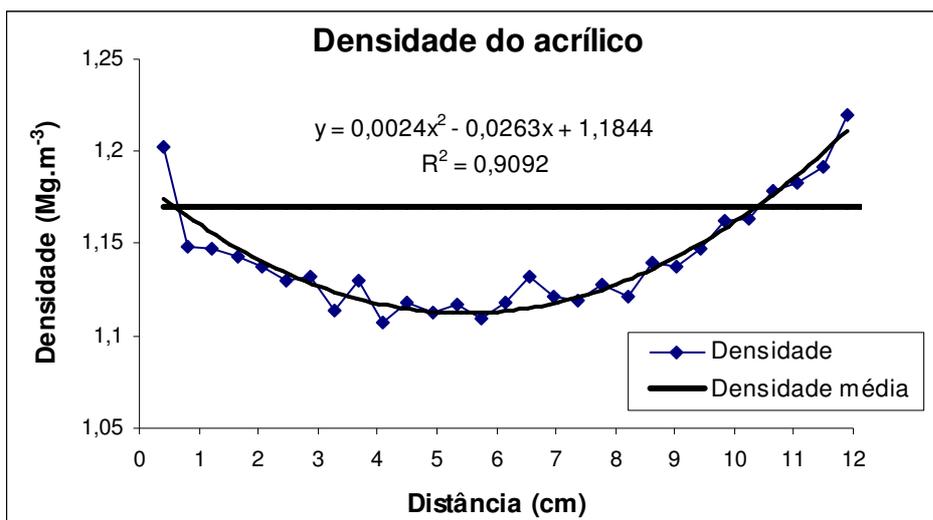


Figura 13 – Variação dos valores de densidade ao longo do comprimento de uma amostra de acrílico, em relação à densidade do material.

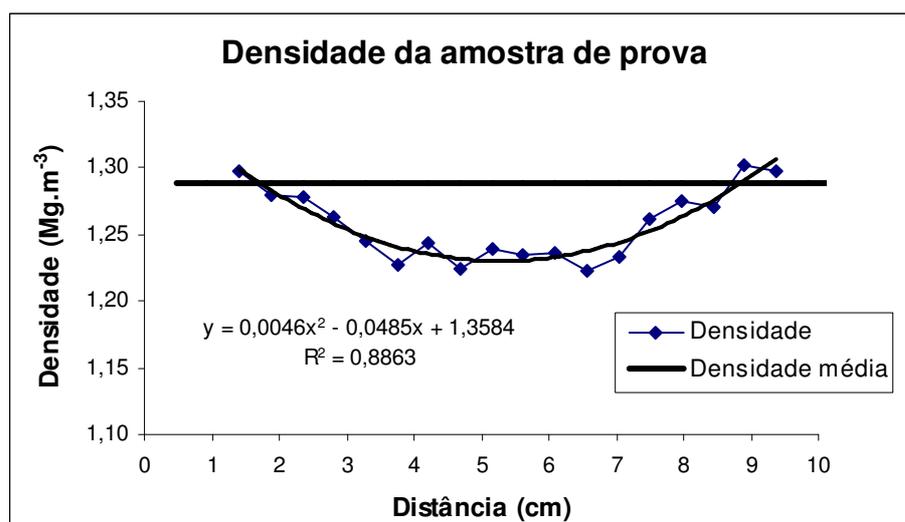


Figura 14 – Ajuste dos dados de densidade em função do comprimento da amostra de prova ao modelo polinomial quadrático.

A partir do modelo ajustado, foram estimados novos valores de densidade em função do comprimento da amostra de prova. O fator de correção, para cada intervalo de 0,0047m (C_i), foi obtido a partir da equação 11. Os fatores de correção resultantes encontram-se no Apêndice L.

$$C_i = \frac{\rho_s}{\hat{\rho}_i} \quad (11)$$

onde:

C_i = Fator de correção em função do comprimento da amostra;

ρ_s = densidade do solo na caixa de acrílico;

$\hat{\rho}_i$ = densidade estimada pela equação da curva de ajuste na posição i .

Para verificar a correção dos valores de densidade a partir dos fatores de correção, os valores de densidade corrigidos da amostra de prova de solo foram plotados num gráfico (fig. 15). Dessa forma, pôde ser verificada a eliminação da tendência sistemática de diminuição dos valores de densidade na região central da amostra, prevalecendo apenas a variação natural dos valores de densidade em função do comprimento da amostra, em torno da densidade média ($1,284 \text{ Mg.m}^{-3}$). Assim, os valores de densidade obtidos nas amostras coletadas no campo foram multiplicados pelos fatores de correção, de acordo a posição i na amostra.

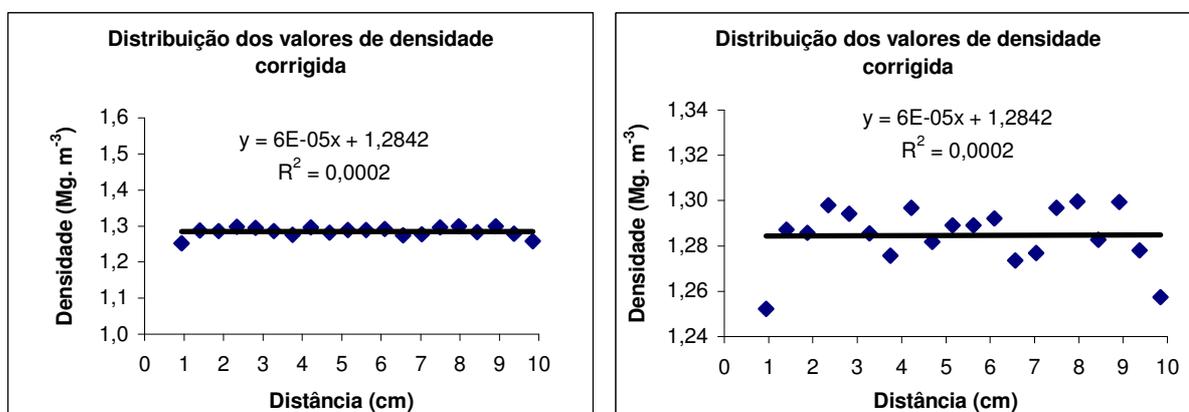


Figura 15 – Densidade corrigida da amostra de prova de solo, em diferentes escalas do eixo y.

3.4 Análise estatística

Os resultados obtidos foram analisados através da verificação da normalidade dos dados, análise da variância e comparação de médias pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade de erro, utilizando o programa Winstat (MACHADO, 2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade do solo

Com os dados obtidos, procedeu-se a verificação da normalidade da distribuição e a análise da variação (Apêndice A e C). Constatou-se o efeito altamente significativo dos diferentes sistemas de cultivo sobre a densidade do solo, tanto para o Método do Anel Volumétrico quanto para o da Tomografia Computadorizada. Procederam-se então comparações entre as médias dos tratamentos para cada método de determinação.

4.1.1 Método do Anel Volumétrico

As comparações das médias dos valores de densidade do solo, obtidos com o Método do Anel Volumétrico, após 19 anos de condução do experimento são apresentados na tab. 5.

Os sistemas que proporcionaram maiores valores médios de densidade do solo na camada de 0-0,10m foram os tratamentos T5, T4, T7 e T1, que envolvem o cultivo de arroz e em rotação com culturas de sequeiro (soja e milho) com preparo convencional do solo. Esse resultado pode estar associado à destruição e menor estabilidade de agregados desses tratamentos em relação aos demais (PALMEIRA, et al. 1999). A destruição dos agregados de maior tamanho pode ser em decorrência do molhamento rápido e desigual dos agregados no início do alagamento, que são fracionados em agregados menores pela explosão causada pela expulsão do ar preso nos espaços interagregados (BHAGAT, 2003). Já a menor estabilidade pode

estar relacionada a menor adição de matéria orgânica das culturas da soja e do milho em relação a cultura do arroz.

Tabela 5 – Comparações de médias de valores de densidade do solo (Mg.m^{-3}), obtidas pelo Método do Anel Volumétrico, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20m, dos diferentes tratamentos após 19 anos de condução do experimento. Média de 12 repetições.

| Tratamento | Densidade | |
|------------|-----------|--------------|
| | 0 – 0,10m | 0,10 – 0,20m |
| T1 | 1,63 ab | 1,74 ab |
| T2 | 1,54 c | 1,68 bc |
| T4 | 1,64 ab | 1,73 ab |
| T5 | 1,67 a | 1,74 a |
| T6 | 1,61 b | 1,72 ab |
| T7 | 1,65 ab | 1,70 abc |
| T8 | 1,60 b | 1,66 c |

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan a 5%.

T1 - Um ano com preparo convencional do solo seguido de dois anos de pousio; **T2** - Sistema de cultivo contínuo de arroz com preparo convencional do solo; **T4** - Rotação de arroz x soja com preparo convencional do solo; **T5** - Rotação de arroz x soja x milho com preparo convencional do solo; **T6** - Sucessão de azevém no inverno x arroz no verão sob plantio direto; **T7** - Rotação de arroz sob plantio direto x soja sob preparo convencional do solo; **T8** - Testemunha: Solo mantido sem cultivo.

Por outro lado, o sistema que apresentou a menor densidade (T2) também foi executado com preparo convencional do solo. Apesar de Rosa (2006) não ter encontrado valores médios de conteúdo de carbono orgânico significativamente superiores neste tratamento, o fato desse envolver cultivo contínuo de arroz, com sua resteva sendo incorporada anualmente com grade aradora, pode ter levado a uma maior concentração de material orgânico pouco decomposto e a desacomodação das partículas nessa camada, contribuindo para uma menor densidade, sendo que este efeito se sobressai em relação aos efeitos negativos do revolvimento e do molhamento - secamento. A baixa decomposição deste resíduo, por sua vez, se deve provavelmente aos maiores períodos de alagamento executados nesse sistema de cultivo.

Resultados semelhantes foram obtidos por Tormena et al. (2004) em Latossolo, num experimento com mandioca e aveia preta. Os autores atribuíram os menores valores de densidade do solo, que foi cultivado sob preparo convencional,

ao efeito de alto revolvimento ocorrido de forma relativamente recente e à alta incorporação de resíduos vegetais pouco decompostos.

Por outro lado, Pedrotti (1996) encontrou que, para as duas camadas analisadas (0-0,10 e 0,10-0,20m) os maiores valores de densidade média foram obtidos no tratamento T2, o que se contrapõe aos resultados obtidos no presente trabalho.

Na camada de 0,10-0,20m, observa-se maior proximidade entre as médias de densidade, devido provavelmente, a menor influência dos sistemas de cultivo sobre a densidade do solo nesta camada (PEDROTTI, 1996). Pode-se observar que, nesta camada, todos os tratamentos, exceto o T2 e o T7, apresentam densidades médias significativamente maiores do que a testemunha, evidenciando a ocorrência de compactação subsuperficial em decorrência destes sistemas de cultivo.

Evidências de compactação na camada subsuperficial foram também observadas por Anders et al. (2005), em planossolos cultivados com arroz irrigado no estado de Arkansas dos Estados Unidos.

De modo geral, os valores de densidade do solo obtidos, em ambas as camadas, são elevados se comparados com valores de densidade de solos observados em terras altas, sendo valores dessa magnitude ($1,5-1,7\text{Mg.m}^{-3}$), correspondentes aos de camadas compactadas de solos de terras altas e considerados como restritivos ao desenvolvimento da maioria das culturas (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Nos solos de várzea, no entanto, esses valores são normais (BORGES et al., 2003; HARTWIG, 2004; LIMA et al., 2006), como pode ser observado no tratamento T8 (solo mantido sem cultivo (tab. 5)).

O fato do tratamento T5 ter apresentado altos valores de densidade nas duas camadas, pode estar relacionado à maior concentração de agregados em classes de menor tamanho ($<1\text{mm}$), conforme verificado por Borges et al. (2003) em experimento próximo ao avaliado pelo presente trabalho. Além disso, o constante revolvimento, como o que ocorre no tratamento T5 ocasiona grandes perdas de carbono do solo ao longo do tempo, as quais aumentam na medida que a frequência do revolvimento dos cultivos for maior. Segundo Tripathi et al. (2007), a diminuição do conteúdo de carbono do solo, verificado por Rosa (2006) neste mesmo tratamento, aumenta a densidade do solo e a dispersão das partículas de fração argila em água. Condições impróprias de conteúdo de água do solo por ocasião do preparo, associadas à grande intensidade do tráfego de máquinas agrícolas, podem

também ter contribuído para o aumento da densidade. Outro fator que favorece este aumento é a drenagem do solo e o seu completo secamento (BHAGAT, 2003) após a colheita do arroz, pois isto acomoda as partículas finas nos espaços porosos e precipita os óxidos de Ferro e Manganês que, por ocasião do alagamento encontravam-se na solução do solo pelo processo de redução decorrente do alagamento.

4.1.2 Método da Tomografia Computadorizada

Na fig. 16 é possível analisar o comportamento dos valores de densidade do solo para cada tratamento em função da profundidade, obtidos aos 19 anos de condução do experimento, através do Método da Tomografia Computadorizada (Apêndice D a J).

Este método permitiu detectar a existência de camadas compactadas com alto grau de detalhamento. A primeira, na superfície do solo (0,005 a 0,02m), mostra que todos os tratamentos apresentaram maiores densidades em relação à testemunha, podendo este fato ser atribuído ao encrostamento superficial que varia em intensidade, conforme o sistema de cultivo adotado. Pode ser observado ainda que, ao serem comparados todos os tratamentos com a testemunha, o T6 comportou-se praticamente igual a esta. Por outro lado, o T5 apresentou os maiores valores de densidade, tornando-se prejudicial ao desenvolvimento das culturas (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Outra evidência de compactação ocorre na camada de 0,08m a 0,14m. Esta compactação pode estar associada à formação de pé-de-grade, ocasionada na interface do solo com a grade de discos utilizada nas operações de preparo do solo, conforme já havia sido identificado por Pedrotti (1996) em alguns tratamentos.

A compactação, ao reduzir os macroporos, afeta negativamente a concentração e difusão de oxigênio e o fluxo de nutrientes às raízes, diminuindo a disponibilidade e absorção de nutrientes. Medeiros et al. (2005) avaliaram o efeito da compactação sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz de sequeiro e concluíram que, independentemente do manejo da água, a compactação do solo diminuiu os valores médios de todas as características avaliadas.

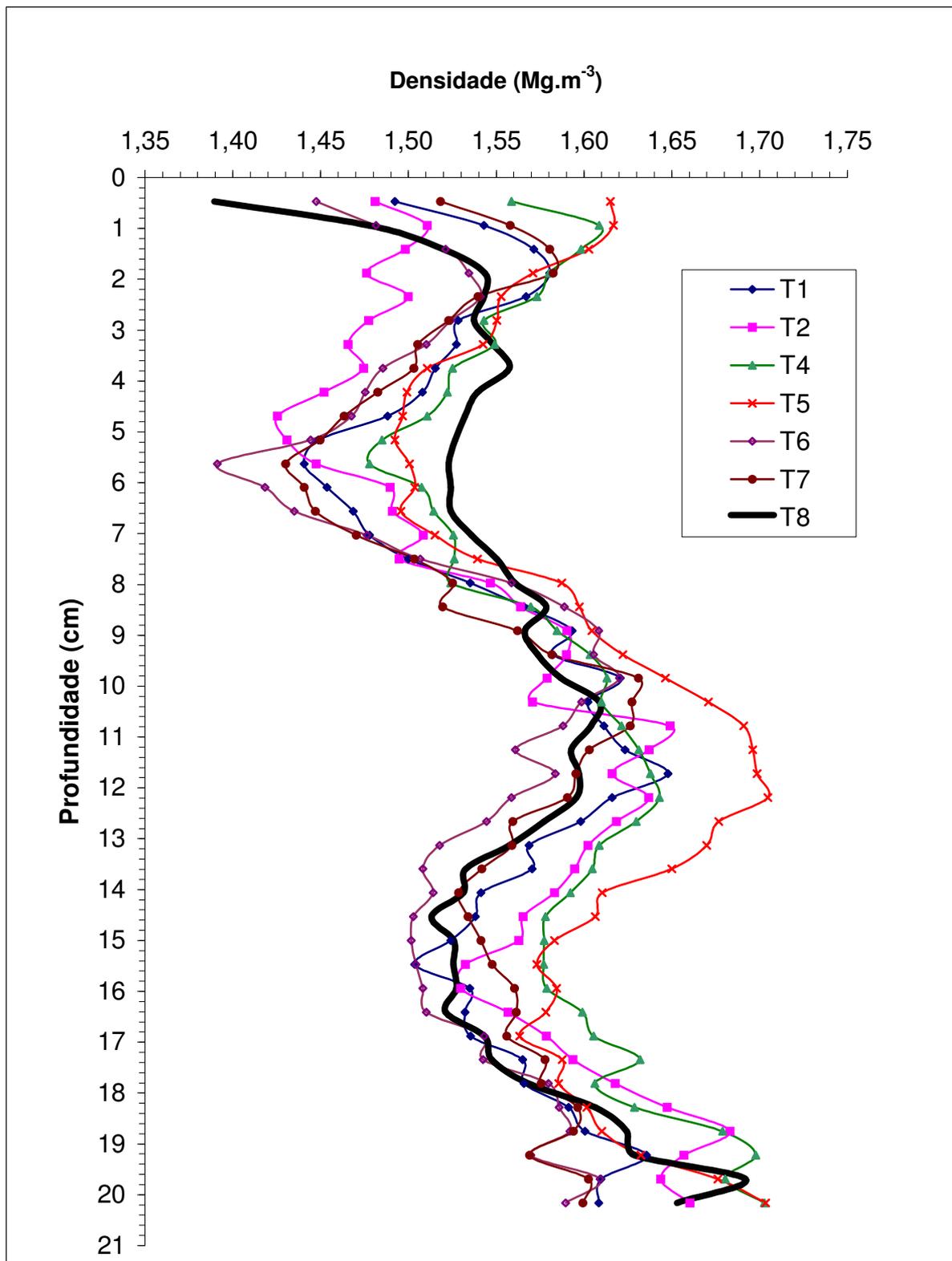


Figura 16 – Variação dos valores de densidade obtidos pela Tomografia Computadorizada, dos diferentes tratamentos ao longo do perfil do solo, aos 19 anos de condução do experimento.

Guimarães e Moreira (2001), na avaliação do efeito de níveis crescentes de compactação sobre a cultura do arroz de sequeiro, mostraram que o crescimento da parte aérea do arroz diminuiu com o aumento da densidade do solo a partir de $1,2\text{Mg.m}^{-3}$. Além disso, na camada compactada, as raízes apresentaram engrossamento, em razão do aumento da densidade do solo, com diminuição da do comprimento e da quantidade de raízes presentes.

Machado et al. (1996), estudando o efeito da escarificação sobre os parâmetros físicos de um planossolo, verificaram que houve uma imediata redução da densidade, da microporosidade e da relação micro/macroporos, o que favoreceria a utilização de culturas de sequeiro em solos de várzea. Esse efeito, no entanto, de acordo com esses autores, tenderia a diminuir ao longo do tempo.

Além disso, na camada de 0,035 a 0,075m, em comparação com T8, todos os tratamentos apresentaram menores valores de densidade. Este efeito pode estar associado com a maior concentração do sistema radicular das plantas nesta camada, juntamente com efeitos positivos do revolvimento e com a incorporação de resíduos de plantas.

Para analisar a influência de cada tratamento na densidade ao longo do perfil do ponto de vista estatístico, realizaram-se comparações de médias de densidade dos tratamentos em camadas de 0,02m (tab. 6), excluindo as camadas de 0-0,02, 0,08-0,12 e 0,18-0,20m, de forma a coincidir com as camadas estudadas por Pedrotti (1996).

De forma geral, à exceção das camadas de 0,02-0,04m, observou-se que o T6 sempre manteve menores valores médios de densidade nas seis camadas analisadas, em contraposição ao T4 e T5. Essa diferença evidencia o efeito positivo do sistema plantio direto (T6) em relação à rotação de culturas com sistema convencional de preparo do solo (T4 e T5), onde ocorre a maior mobilização do solo (ação antrópica pela intensa ação mecânica de máquinas agrícolas) causando, portanto, uma maior oxidação da matéria orgânica (CENTURION; DEMATTÊ, 1992). Já no T6, há a presença de um denso sistema radicular proporcionado pelo arroz e o azevém e melhor cobertura do solo durante todo o ano (ALBUQUERQUE et al., 1995), além do grande aporte de restos vegetais. Isso acontece porque o T6 é o único tratamento que recebe duas culturas não espontâneas anualmente, possuindo revolvimento mínimo (apenas na superfície), baixo tráfego e baixa ação mecânica de máquinas agrícolas sobre o solo. Esse dado está de acordo com o observado por

Anders et al. (2005), onde a resistência mecânica à penetração em um Planossolo diminuiu significativamente com o sistema plantio direto após 41 anos de cultivo.

Tabela 6 – Comparações de médias de valores de densidade do solo (Mg.m^{-3}) obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada em cada tratamento, em seis diferentes profundidades, após 19 anos de condução do experimento (média de 600 repetições).

| Prof. (m) | Tratamento | Densidade | Prof. (m) | Tratamento | Densidade |
|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,02 a 0,04 | T1 | 1,54 a | 0,12 a 0,14 | T1 | 1,60 bc |
| | T2 | 1,48 b | | T2 | 1,61 b |
| | T4 | 1,55 a | | T4 | 1,62 b |
| | T5 | 1,54 a | | T5 | 1,68 a |
| | T6 | 1,52 a | | T6 | 1,54 d |
| | T7 | 1,53 a | | T7 | 1,57 cd |
| | T8 | 1,55 a | | T8 | 1,57 cd |
| | 0,04 a 0,06 | T1 | | 1,47 bc | 0,14 a 0,16 |
| T2 | | 1,45 c | T2 | 1,55 bc | |
| T4 | | 1,50 ab | T4 | 1,58 ab | |
| T5 | | 1,50 ab | T5 | 1,59 a | |
| T6 | | 1,44 c | T6 | 1,51 d | |
| T7 | | 1,45 c | T7 | 1,54 c | |
| T8 | | 1,53 a | T8 | 1,52 cd | |
| 0,06 a 0,08 | | T1 | 1,51 bc | 0,16 a 0,18 | |
| | T2 | 1,52 abc | T2 | | 1,60 ab |
| | T4 | 1,53 ab | T4 | | 1,61 a |
| | T5 | 1,55 a | T5 | | 1,58 abc |
| | T6 | 1,51 bc | T6 | | 1,55 c |
| | T7 | 1,49 c | T7 | | 1,57 bc |
| | T8 | 1,55 a | T8 | | 1,56 c |

Médias seguidas de mesma letra na coluna e em cada camada, não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade de erro.

T1 - Um ano com preparo convencional do solo seguido de dois anos de pousio; **T2** - Sistema de cultivo contínuo de arroz com preparo convencional do solo; **T4** - Rotação de arroz x soja com preparo convencional do solo; **T5** - Rotação de arroz x soja x milho com preparo convencional do solo; **T6** - Sucessão de azevém no inverno x arroz no verão sob plantio direto; **T7** - Rotação de arroz sob plantio direto x soja sob preparo convencional do solo; **T8** - Testemunha: Solo mantido sem cultivo.

Na camada de 0,02 a 0,04m, observa-se que todos os tratamentos não diferiram significativamente entre si, exceto o T2 que apresentou o menor valor de densidade média, mostrando que, de forma geral, há pouca influência dos sistemas de manejo sobre a densidade nesta camada. Uma alta contribuição de matéria seca proporcionada pela resteva da cultura de arroz associada à lenta decomposição,

facilitada pelo longos períodos de alagamentos, pode justificar tal comportamento deste tratamento.

Avaliando as camadas de 0,04 a 0,06m e de 0,06 a 0,08m, todos os tratamentos apresentaram valores médios de densidade iguais ou inferiores em relação à testemunha. Essa constatação demonstra uma diferença fundamental da ação dos sistemas de cultivo na camada mais superficial do solo em relação às camadas mais inferiores, no ambiente de solos de várzea. Os sistemas radiculares das plantas que são cultivadas anualmente, especialmente nos tratamentos com sua camada superficial constantemente arada, tendem a se concentrarem na superfície, alongando-se pouco em profundidade, ao contrário das plantas que habitam o solo mantido sem cultivo (testemunha).

Já nas camadas de 0,12 a 0,14m, 0,14 a 0,16m e 0,16 a 0,18m, a tendência da maioria dos tratamentos, à exceção do T6, de mostrar maior densidade em relação à testemunha, torna evidente o efeito da compactação nos sistemas que empregam o alto revolvimento do solo (T5, T4 e T2). Um dos efeitos críticos desses sistemas, a formação de pé-de-grade, pode explicar o pico de densidade observado na camada de 0,10 a 0,14m (Fig. 16) no T5, também constatada estatisticamente nesse sistema, na camada de 0,12 a 0,14m (tab. 5). Resultados semelhantes foram encontrados por Kukal e Aggarwal (2003) avaliando o efeito do tráfego de máquinas em solos indianos cultivados com arroz e trigo. Estes autores observaram aumento na densidade do solo de $1,63$ a $1,67 \text{Mg.m}^{-3}$ na camada de 0,16-0,18m e de $1,61$ a $1,66 \text{Mg m}^{-3}$ na camada de 0,18-0,20m. Segundo Kirchhof e So (1996), altos valores de densidade em camadas mais profundas dos solos de várzea, sobretudo abaixo de 0,30m, formam camadas de impedimento às perdas de água e nutrientes por percolação, favorecendo o cultivo de arroz irrigado por inundação. Porém, camadas compactadas entre 0-0,30m, aumentam a resistência à penetração das raízes, diminuindo o volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, diminuindo a quantidade de nutrientes absorvidos pelas plantas.

A fig. 17 apresenta a comparação entre a densidade do solo obtida pelo Método do Anel Volumétrico e da Tomografia Computadorizada. Analisando-a, é possível verificar que os dados médios de densidade obtidos pela Tomografia Computadorizada são menores do que os obtidos pelo Método do Anel Volumétrico, com coeficientes de determinação e de correlação médios ($R^2 = 0,63$ e $R = 0,79$).

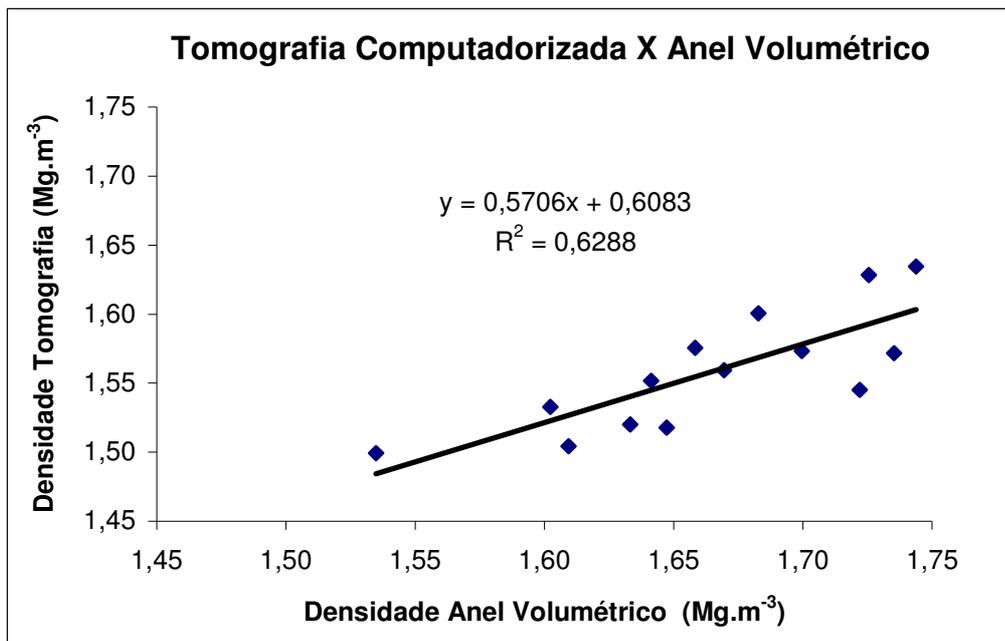


Figura 17 – Correlação dos dados de densidade obtidos com Método do Anel Volumétrico e da Tomografia Computadorizada.

Essa diferença pode ser explicada em função da forma como os dados por Tomografia Computadorizada foram obtidos, uma vez que os valores de densidade foram oriundos da média de valores centrais da amostra, excluindo as bordas próximas à parede do cilindro (tab. 2), ao passo que os valores obtidos pelo Método do Anel Volumétrico representam toda a amostra, não havendo exclusão das bordas das amostras.

Pires et al. (2004) em estudo que buscou identificar e quantificar, através da Tomografia Computadorizada, as regiões internas de amostras coletadas com anéis, observaram que as amostras apresentaram considerável aumento de valores de densidade junto as bordas do cilindro. Dessa forma, a densidade pelo Método do Anel Volumétrico pode resultar em valores maiores porque nos valores médios gerados pela tomografia são descontados os valores das bordas laterais da amostra. Os mesmos autores observam que as regiões compactadas durante o processo de amostragem afetam o resultado de determinações como a densidade do solo, a curva de retenção de água no solo, a porosidade e outras.

4.1.3 Comparação dos valores de densidade do solo obtidos aos 10 e 19 anos de condução do experimento

Para uma avaliação mais criteriosa das alterações provocadas pelos sistemas de cultivo sobre os valores de densidade ao longo do tempo, efetuou-se a comparação de médias para cada tratamento, obtidas aos 10 e 19 anos de condução do experimento (tab. 7 e fig. 18).

Conforme tab 7, é possível perceber que, na maioria das comparações de cada tratamento ao longo do tempo (10 e 19 anos) ocorreram reduções significativas nos valores médios de densidade, à exceção dos tratamentos T1, T5 e T7 na camada de 0,02 a 0,04m; do T6 na camada de 0,06 a 0,08m e do T1 e T5 na camada de 0,12 a 0,14m.

Comparando as distribuições dos valores de densidade obtidos aos 10 e 19 anos de cultivo por tratamento (fig. 18) observa-se que, de forma geral, para a maioria dos tratamentos, houve diminuição da densidade do solo com o passar do tempo. As exceções são o T1 nas camadas de 0,025 a 0,04m e de 0,12 a 0,13m e o T6 na camada de 0,02 a 0,045m. O fato do T6 apresentar aumento de densidade ao longo do tempo na camada logo abaixo da superfície, pode estar relacionado à pressão exercida sobre o solo pelas máquinas e implementos agrícolas utilizados nesse sistema.

A diferença mais acentuada de densidade pode ser verificada no T2 (fig. 18), possivelmente provocada pelo revolvimento anual do solo causando a incorporação dos resíduos da cultura do arroz produzidos em grandes quantidades, podendo aumentar, ao longo do tempo, o espaço poroso.

O fato dos tratamentos T1, T5 e T7 apresentarem valores de densidade mais próximos entre si, na comparação das duas épocas de avaliação (10 e 19 anos), pode estar relacionado ao efeito da incorporação dos resíduos das culturas que nesses tratamentos ocorrem em menor quantidade, em face da utilização de culturas de sequeiro (soja e milho) nos tratamentos T5 e T7. Já no T1 a baixa incorporação de resíduos se dá pelo emprego de pousio durante dois anos consecutivos, ocorrendo a incorporação de resíduos apenas uma vez a cada três anos.

Com relação ao T8, observa-se uma redução constante dos valores de densidade ao longo do perfil dos 10 anos aos 19 anos de condução do experimento.

Tabela 7 – Comparações de médias de valores de densidade (Mg. m^{-3}) obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada, de cada tratamento, em seis diferentes profundidades, aos 10 e 19 anos de condução do experimento.

| Prof. (m) | Tratamento | Densidade | | Diferença | DMS | Sig. |
|-------------|------------|-----------|---------|-----------|---------|------|
| | | 10 anos | 19 anos | | | |
| 0,02 a 0,04 | T1 | 1,534 | 1,546 | 0,012 | 0,04213 | NS |
| | T2 | 1,596 | 1,48 | 0,116 | 0,04506 | Sig |
| | T5 | 1,584 | 1,544 | 0,04 | 0,04213 | NS |
| | T6 | 1,432 | 1,518 | 0,086 | 0,03993 | Sig |
| | T7 | 1,528 | 1,568 | 0,04 | 0,04296 | NS |
| | T8 | 1,686 | 1,546 | 0,14 | 0,04296 | Sig |
| 0,04 a 0,06 | T1 | 1,56 | 1,468 | 0,092 | 0,04296 | Sig |
| | T2 | 1,63 | 1,45 | 0,18 | 0,04467 | Sig |
| | T5 | 1,562 | 1,498 | 0,064 | 0,04296 | Sig |
| | T6 | 1,51 | 1,44 | 0,07 | 0,04213 | Sig |
| | T7 | 1,526 | 1,428 | 0,098 | 0,04364 | Sig |
| | T8 | 1,646 | 1,528 | 0,118 | 0,04213 | Sig |
| 0,06 a 0,08 | T1 | 1,598 | 1,512 | 0,086 | 0,04364 | Sig |
| | T2 | 1,696 | 1,52 | 0,176 | 0,04467 | Sig |
| | T5 | 1,678 | 1,55 | 0,128 | 0,04213 | Sig |
| | T6 | 1,536 | 1,516 | 0,02 | 0,04506 | NS |
| | T7 | 1,634 | 1,466 | 0,168 | 0,04467 | Sig |
| | T8 | 1,67 | 1,55 | 0,12 | 0,04213 | Sig |
| 0,12 a 0,14 | T1 | 1,614 | 1,602 | 0,012 | 0,04296 | NS |
| | T2 | 1,786 | 1,614 | 0,172 | 0,0442 | Sig |
| | T5 | 1,718 | 1,68 | 0,038 | 0,03993 | NS |
| | T6 | 1,598 | 1,542 | 0,056 | 0,03993 | Sig |
| | T7 | 1,698 | 1,616 | 0,082 | 0,04116 | Sig |
| | T8 | 1,638 | 1,574 | 0,064 | 0,04364 | Sig |
| 0,14 a 0,16 | T1 | 1,616 | 1,528 | 0,088 | 0,04296 | Sig |
| | T2 | 1,746 | 1,554 | 0,192 | 0,04467 | Sig |
| | T5 | 1,652 | 1,59 | 0,062 | 0,04296 | Sig |
| | T6 | 1,64 | 1,504 | 0,136 | 0,04467 | Sig |
| | T7 | 1,684 | 1,596 | 0,088 | 0,04296 | Sig |
| | T8 | 1,616 | 1,526 | 0,09 | 0,04296 | Sig |
| 0,16 a 0,18 | T1 | 1,694 | 1,558 | 0,136 | 0,04296 | Sig |
| | T2 | 1,744 | 1,6 | 0,144 | 0,04296 | Sig |
| | T5 | 1,708 | 1,584 | 0,124 | 0,04213 | Sig |
| | T6 | 1,792 | 1,552 | 0,24 | 0,04539 | Sig |
| | T7 | 1,718 | 1,488 | 0,23 | 0,04506 | Sig |
| | T8 | 1,66 | 1,558 | 0,102 | 0,04116 | Sig |

T1 - Um ano com preparo convencional do solo seguido de dois anos de pousio; **T2** - Sistema de cultivo contínuo de arroz com preparo convencional do solo; **T4** - Rotação de arroz x soja com preparo convencional do solo; **T5** - Rotação de arroz x soja x milho com preparo convencional do solo; **T6** - Sucessão de azevém no inverno x arroz no verão sob plantio direto; **T7** - Rotação de arroz sob plantio direto x soja sob preparo convencional do solo; **T8** - Testemunha: Solo mantido sem cultivo.

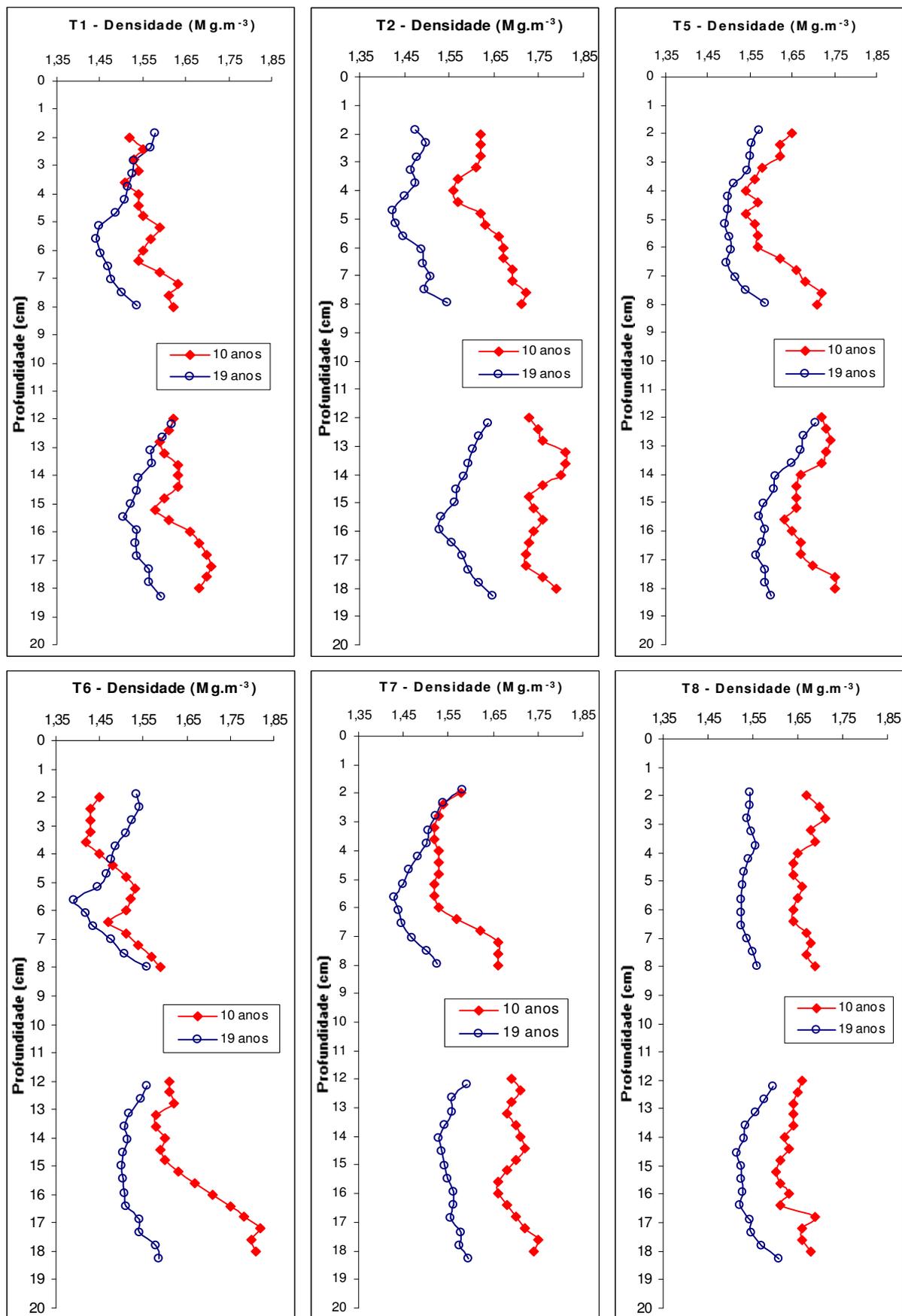


Figura 18 – Variação de densidade ao longo do perfil aos 10 e 19 anos de condução do experimento.

Difícilmente esta diferença pode ser atribuída ao pousio, visto que esta área já se encontrava nesta condição por pelo menos 30 anos.

Esta diferença pode ser atribuída a alguns fatores como: a) as análises terem sido realizadas a partir de dois equipamentos diferentes, com arquitetura, software de reconstrução e regulagens de controles diferentes; b) a obtenção dos coeficientes de atenuação linear e da reta de calibração do equipamento, não terem obedecido exatamente os mesmos procedimentos; c) parâmetros como tempo de contagem, espessura de amostra, translação total e, conseqüentemente, tamanho dos pixels utilizados nos dois trabalhos, não terem sido iguais.

Se, por hipótese, considerar-se que não tenham ocorrido diferenças ao longo do tempo na testemunha, pode-se inferir a respeito de algumas diferenças importantes no T1, T6 e T7, pois esses se entrecruzam na camada superficial (Fig. 18). Essa inferência parece plausível, pois esses sistemas estariam mostrando um aumento de densidade na camada superficial com o tempo, principalmente no T6, que está sob plantio direto sem revolvimento por aproximadamente 40 anos, onde esse comportamento seria o esperado.

5 CONCLUSÕES

Em face dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) O método da Tomografia Computadorizada, após 19 anos de condução do experimento, permitiu identificar a presença de uma camada compactada superficial (0,005 a 0,02 m) nos tratamentos T1, T4, T5 e T7 e outra na profundidade de 0,08 a 0,14 m nos tratamentos T1, T2, T4 e T5, em relação à testemunha.
- b) Na camada de 0,04 a 0,08 m, por outro lado, todos os tratamentos apresentaram valores estatisticamente iguais ou menores em relação à testemunha, invertendo-se a situação na camada de 0,12 a 0,18m, com exceção do T6.
- c) O T5 apresentou os maiores valores de densidade ao longo de praticamente todo o perfil estudado, enquanto que o T6 foi o que apresentou os valores mais próximos aos da testemunha.
- d) Os valores de densidade obtidos aos 19 anos de condução do experimento foram sistematicamente inferiores aos obtidos por Pedrotti (1996) aos 10 anos de condução neste mesmo experimento.

6 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 115-119, 1995.

ANDERS, M. M.; SCHMID, B.; OLK, D. C. Short and long term effects of conservation tillage on soil resistance and aggregate stability in rice production systems. **Southern Conservation Tillage System Conference: Clemson University**. Oral Proceedings. p. 102-110. 2005.

AYLMORE, L. A. G. Use of computer-assisted tomography in studying water movement around plant roots. **Advances in Agronomy**. v. 49, p. 1-53, 1993.

BHAGAT, R. M. Rice Lands of South and South East Asia, Some Soil Physical Aspects. **College on Soil Physics**. Trieste, p.48-61, 2003.

BIASSUSI, M. **Estudo da deformação de um vertissolo através da tomografia computadorizada de dupla energia simultânea**. Pelotas, 1996. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL. 1996.

BORCA, E.; DULIU, O. G. **Applications of nuclear radiation: practical examples**. Editura Tehnica, Bucharest, in Romanian. 1997.

BORGES, J. R.; PAULETTO, E. A.; SOUSA, R. O. de; GOMES, A. da S.; SILVA, J. B. da; LEITZKE, V. W. Agregação de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 9, n. 4, p. 389-395, 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do RS**. Recife, 1973. 431p. (Boletim Técnico nº 30).

BROOKS, R. A.; DI CHIRO, G. Principles of computed assisted tomography CAT in radiography and radioisotopic imaging. **Physics in Medicine and Biology**. v. 21, n. 5, p. 689–752. 1976.

CAMARGO, O. A., ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, SP. 132p. 1997.

CANILLAS E. C.; SALOKHE V. M. Regression analysis of some factors influencing soil compaction. **Soil & Tillage Research**. v. 61, p.167–178. 2001.

CASTRO, O. M. **Preparo do solo para a cultura do milho**. Campinas: Fundação Cargill. 41p. 1989.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p. 263-266, 1992.

CONAB. **Avaliação da Safra Agrícola 2004/2005**. Quinto Levantamento, Junho de 2005. 38p. 2005.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI – MUCELLI, R. S. Static and Dynamic Three-dimensional Studies of Water in Soil Using Computed Tomographic Scanning. **Soil Science**. v. 140, n. 5, p. 326-332. 1985.

CRESTANA, S.; PESSOA, J. D. C.; TORRE, A.; VAZ, C. M. P.; CALHEIROS, R. Uso da Tomografia de Dupla Energia para medir Simultaneamente Densidade e Umidade de um meio Poroso Expansivo. **In: XIX Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos**. 15-17 de outubro de 1991. Campinas-SP. **Anais**. Campinas-SP. v.1, 152-162, 1991.

CRESTANA, S., CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S.; REICHARDT, K. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 2, p. 161-167, 1992.

CRESTANA, S., CRUVINEL, P. E.; MASCARENHAS, S.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. de M.; CESAREO, R.; NIELSEN, D. R.; REICHARDT, K. **In: CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C. I.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L. A. (ed.) Tomografia Reconstitutiva. Instrumentação Agropecuária, Contribuições no Limiar do Novo Século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, p. 151-200, 1996.

CRESTANA, S.; NIELSEN, D. R. Investigações não destrutivas de sistemas porosos multifásicos através da microtomografia de raios-X, gama e ressonância magnética nuclear (RMN). **In: Encontro Nacional sobre escoamentos em meios porosos – ENEMP, 18, 1990, Nova Friburgo**. **Anais**. Nova Friburgo: Colégio Anchieta, v.2, p. 699-710, 1990.

CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S.; JORGE, L. A. C. Métodos e aplicações do processamento de imagens digitais. **In: Instrumentação Agropecuária, Contribuições no Limiar do Novo Século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, p. 91-151, 1996.

DULIU, O. G. Computer Axial Tomography in Geosciences: an overview. **Earth-Science Reviews**. v. 48, p. 265–281, 1999.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 80p. 1997.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. (editores técnicos, Humberto Gonçalves dos Santos et al.) 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 306p. 2006.

FERRAZ, E. S. B. **Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am** . Piracicaba, 1974. 91p. Tese (Título de Livre-Docente) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP. 1974.

FERRAZ, E. S. B.; MANSELL, R. S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Gainesville: University of Florida, 1979. 51 p. (Technical Bulletin, 807).

GARDNER, W. H.; CAMPBELL, G. L.; CALISSENDORFF, C. Systematic and Random Errors in Dual Gamma Energy Soil Bulk Density and Water Content Measurements. **Soil Science Society of American Proceedings**, v.36, p. 393-398, 1972.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: Processos Ecológicos em Agricultura Sustentável**. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS, 653p. 2000.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.37, 2002.

GOMES, A. da S.; CUNHA, N. G.; PAULETTO, E. A.; da SILVEIRA, R. J. C.; TURATTI, A. L. Solos de Várzea: Uso e Manejo. In: Marcantonio, G. (Coord.), Solos e Irrigação. Porto Alegre, RS. Editora da Universidade/UFRGS, FEDERACITE, p. 64-79. 1992.

GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A.; VERNETTI JR., F. J.; SOUSA, R. O. Plantio direto e cultivo mínimo em arroz irrigado. In: GOMES, A. S. & MAGALHÃES JR., A. M. Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

GOMES, A. da S.; PAULETTO, E. A.; SOUSA, R. O. Sistemas de Cultivo – Plantio Direto e Cultivo Mínimo em Arroz Irrigado. In: MAGALHÃES JR. A. M; GOMES, A. da S.; SANTOS, A. B. dos. Editores técnicos. **Sistema de Cultivo de Arroz Irrigado no Brasil**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, p. 121-132. 2006.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, 2001.

HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. The use of computer assisted tomography to determine the spatial distribution of soil water contents. **Australian Journal of Soil Research**. v.21, p. 435–443. 1983.

HARTWIG, M. P. **Tomografia computadorizada associada à geoestatística na avaliação da densidade de um solo hidromórfico sob sistemas de cultivo**. Pelotas, 2004. 120p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, UFPel, Pelotas, 2004.

IRGA. **Censo da lavoura de arroz irrigado do Rio Grande do Sul** – safra 2004/5 / Camilo Feliciano de Oliveira (coordenador). Porto Alegre: Política Setorial, 2006.122p.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. The Soil Solid Phase. **In: Soil Physics**, 5 ed. p. 1-33. 1991.

KIRCHHOF, G., SO, H. B. (Eds.) Management of Clay Soils for Rainfed Lowland Rice-based Cropping Systems. **Proceedings of the ACIAR International Workshop**. ACIAR, Canberra, Australia, 259 p., 1996.

KUKAL, S. S.; AGGARWAL, G. C. Puddling depth and intensity effects in rice-wheat system on a sandy loam soil. I: Development of subsurface compaction. **Soil & Tillage Research**. v.72, p.1-8. 2003.

LIMA, A. C. R. **Caracterização Hidráulica de um Planossolo sob diferentes sistemas de Manejo**. Pelotas. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPel, 2001.

LIMA, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; LIBARDI, P. L.; GOMES, A. S.; PINTO, L. F. S. Hydraulic characterization of a lowland soil under long-term management systems. **In: PAGLIAI, M.; JONES, R. (Org.). Advances in Geoecology – Sustainable Land Management Environmental Protection – A soil Physical Approach**. Reiskirchen. v.35, p.247-258. 2002.

LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E.A. GOMES, A. da S.; HARTWIG, M. P.; PASSIANOTO, C. C. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**. v. 12, n. 2, p. 179-182, 2006.

MACEDO, A.; CRESTANA, S. Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia de raios X. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 23, n. 4, p. 1999.

MACEDO, A.; JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S. **Microvis - Programa de Reconstrução e Visualização de Imagens Tomográficas**. São Carlos: EMBRAPA – CNPDIA (Guia do Usuário e Manual de Operação do Minitomógrafo) 18p. 2000.

MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; CRUVINEL, P.; CRESTANA, S. A. Tomografia computadorizada na avaliação da qualidade física do solo. **In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Org.). Qualidade Física do Solo: Métodos de Estudo - Sistemas de Preparo e Manejo do Solo**. Jaboticabal: FUNEP, cap. 3, p. 47-73, 2002.

MACHADO, A. A. **Sistema de Análise estatística para Windows (WINSTAT)** Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2001.

MACHADO, R. L. T.; TURATTI, A. L.; MACHADO, A. L. T.; ALONÇO, A. S.; REIS, Â. V. Estudo de parâmetros físicos em solo de várzea, antes e após a escarificação. **Revista Brasileira de Agrociência**. v.2, n. 3, p.175-178, 1996.

MANTOVANI, E. C. Compactação do Solo. **Informe Agropecuário**. v. 13, n. 17, p.52-55, 1987.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do Solo e Manejo da Água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P e K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciências Agrotécnicas**. Lavras, v. 29, n. 5, p. 940-947, 2005.

OLIVEIRA, J. C. M. de; REICHARDT, K.; VAZ, C. M. P. Gamma radiation attenuation to study soil particle distribution for forest and sugar cane soils. **Scientia Agrícola**. Piracicaba, v. 51, n. 3, 1994.

OLIVEIRA, J. C. M.; APPOLONI, C. R.; COIMBRA, M. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; FERRAZ, E.; SILVA, S. C.; GALVAO FILHO, W. Soil Structure evaluated by gamma-ray attenuation. **Soil & Tillage Research**. v. 48, p. 127-133, 1998.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil & Tillage Research**. v. 4, p. 433-444, 2004.

PALMEIRA, P. R. T. **Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo**. 41p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPel, 1999.

PALMEIRA, P. R. T.; PAULETTO, E. A.; TEIXEIRA, C. F. A.; GOMES, A. da S.; da SILVA, J. B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 23, n. 2, 189 -195, 1999.

PARFITT, J. M. B.; SILVA, C. A. S.; PETRINI, J. A. Estruturação e sistematização da lavoura de arroz irrigado. In: GOMES, A. S. & MAGALHÃES JR., A. M. Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

PAULETTO, E.A. **Manual de Laboratório**: Determinação de atributos físicos do solo. Pelotas-RS, 59p. 1997.

PAULETTO, E. A.; SOUSA, R. O.; GOMES, A. da S.; PETRINI, J. A. Manejo de Solos de Várzea. In: GOMES, A. da S., PAULETTO, E. A. (eds.). **Manejo de Solo e da Água em Áreas de Várzea**. Pelotas, EMBRAPA - Clima Temperado, p. 61-87, 1999.

PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; PINTO, L. F. S. Física de solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S. & MAGALHÃES JR., A. M. Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

PEDROTTI, A. **Avaliação da Compactação de um Planossolo Submetido a Diferentes Sistemas de Cultivo**. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1996.

PEDROTTI, A.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo: como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 9, n. 4, p. 50-52, 1996.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L.; CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v.36, p.709-715, 2001.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; da SILVA, A. M. Planosol Soil Sample Size for Computadorized Tomography Measurement of Physical Parameters. **Scientia Agrícola**, v. 60, p. 737-740, 2003.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; HOLANDA, F. S. R.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil & Tillage Research**. v.80, p. 115-123, 2005.

PEÑA, Y. A.; GOMES, A. da S.; SOUSA, R. O. Influência de diferentes sistemas de cultivo nas propriedades físicas de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**. Campinas-SP. v.20, p.517-523, 1996.

PETRINI, J. A.; FRANCO, D. F.; SOUSA, P. R.; BACHA, R. E.; TRONCHONI, J. G. Sistema de cultivo de arroz pré-germinado e transplante de mudas. In: GOMES, A. S. & MAGALHÃES JR., A. M., Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 387-416, 2004.

PETRINI, J. A.; FRANCO, D. F. Sistemas de Cultivo – Pré-Germinado, Transplante de Mudas e Mix em Arroz Irrigado. In: MAGALHÃES JR. A. M; GOMES, A. da S.; SANTOS, A. B. dos. Editores técnicos. **Sistema de Cultivo de Arroz Irrigado no Brasil**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, p. 139-156, 2006.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of América Journal**. v.46, p.445–450, 1982.

PINTO, L. F. S.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; SOUSA, R. O. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A. (Ed.). **Manejo de solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa-CPACT, p. 11-36, 1999.

PINTO, L. F. S.; NETO, L. A. J.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. da S., e MAGALHÃES JR., A. M. Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p.75-95, 2004.

PINTO, L. F. S.; GOMES, A. da S.; NETO, L. A. J.; PAULETTO, E. A. Solos cultivados com Arroz Irrigado na Região Subtropical: RS e SC. In: MAGALHÃES JR., A. M; GOMES, A. da S.; SANTOS, A. B. dos. Editores técnicos. **Sistema de Cultivo de Arroz Irrigado no Brasil**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, p. 59-72, 2006.

PIRES L. F., MACEDO JR., SOUZA, M. D., BACCHI, O. O., REICHARDT, K. Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. **Applied Radiation and isotopes**. v. 57 p. 375-380, 2002.

PIRES, L. F.; ARTHUR, R. C. J.; CORRECHEL, V.; BACHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; CAMPONEZ DO BRASIL, R. P. The Use of Gamma Ray Computed Tomography to Investigate Soil Compaction Due to Core Sampling Devices. **Brazilian Journal of Physics**, v. 34, n. 3, p. 728-731, 2004.

PIRES; L. F.; PILOTTO; J. E.; TIMM, L. C.; BACHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Qualitative and quantitative analysis of soil samples by computerized tomography, **Revista Publicatio**, Ponta Grossa, v.11, n. 2, p. 7-15, 2005.

PHOGAT, V. K., AYLMOORE, L. A. G., SCHULLER, R. D. Simultaneous measurement of the spatial distribution of soil water content and bulk density. **Soil Science Society of América Journal**. v.55, p. 908-915, 1991.

RICE-WHEAT CONSORTIUM. Production Technology for Direct Seeded Rice. 18p. 2006. (Rice-Wheat Consortiun, **Technical Bulletin n. 8/2006**).

ROSA, C. M. Teor e qualidade da matéria orgânica de um Planossolo **Hidromórfico sob diferentes sistemas de cultivo**. Pelotas, 2006. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel", UFPel, Pelotas, 2006.

SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da Compactação nas Propriedades Físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 10, p. 91-95. 1986.

SILVA, A. P. da; KAY B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil & Tillage Research**, v.44, p. 81-93, 1997.

SOSBAI-Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. IV Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, Santa Maria. 159p. 2005.

TRIPATHI, R. P.; SHARMA, P.; SINGH, S. Influence of tillage and crop residue on soil physical properties and yields of rice and wheat under shallow water table conditions. **Soil & Tillage Research**, v.92, p. 221–226, 2007.

TORMENA, C. A; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; ARAÚJO, M. A.; PINTRO, J. C. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v.8, n.1, p. 65-71. 2004.

VASCONCELOS, E. B. de. **Levantamento dos atributos físicos e hídricos de três solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 79p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1993.

VAHL, L. C.; SOUSA, R. O. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: GOMES, A. S. e MAGALHÃES JR., A. M. Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

VAZ, C. M. P. **Tomografia computadorizada aplicada a estudos de compactação de solos**. 110p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1989.

VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P. E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. Using a computed tomography miniscaner for studying tillage induced soil compaction. **Soil Technology**. (Cremlingen) v.2, n.3, p. 313–321, 1989.

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

VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; SILVA, A. M. da; MELLO, S. Análise Granulométrica por Raios Gama. EMBRAPA – CNPDIA. (EMBRAPA – CNPDIA, **Boletim de Pesquisa n. 5/1997**). 13p. 1997.

VERNETTI JR., F. J.; GOMES, A. S. Sistema Convencional de Arroz Irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JR., A. M. Editores técnicos. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. p. 339-348, 2004.

WEBER, L.; MARCHESAN, E; CARLESSO, R.; MARZARI, V. Cultivares de arroz irrigado e nutrientes na água de drenagem em diferentes sistemas de cultivos. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.33, n.1, p.27-33, 2003.

ANEXOS

ANEXO A - Descrição geral do perfil.

Perfil: Planossolo descrito no município de Capão do Leão – RS;

Data: 28 de março de 1989;

Classificação original: Planossolo textura argilosa, relevo plano, substrato de sedimentos de granito;

Classificação atual: Planossolo Háplico Eutrófico solódico, com argila de atividade alta, textura média/argilosa e relevo plano (Embrapa, 2006);

Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil: trincheira situada em área plana com solo descoberto;

Altitude: 13m acima do nível do mar;

Material originário: sedimentos originados de rochas graníticas;

Pedregosidade: não pedregosa;

Rochosidade: não rochosa;

Relevo local: plano;

Relevo regional: plano suave a ondulado;

Erosão: não aparente;

Drenagem: imperfeitamente drenado;

Vegetação local: solo descoberto;

Vegetação regional: gramíneas e mata nativa em capões;

Uso atual: talhões em culturas anuais;

Descrito por: Vasconcelos, E. B.; Silveira, R. J. C. da, Pauletto, E. A.; Gomes, A. da S.

ANEXO B - Descrição morfológica do perfil.

Ap 0-0,20m: Bruno-Escuro (10YR 3/3, úmido); cinzento (10YR 5,5/1, seco); franco-argilo-arenoso; fraca média grande, blocos subangulares; duro, friável, ligeiramente pegajoso; transição clara e plana.

E 0,20-0,29m: Bruno acinzentado escuro (10YR 5,5/2, úmido) cinzento (10YR 6/1 seco); franco arenoso; maciça que se desfaz em moderados, médios e grandes, blocos subangulares; ligeiramente duro, firme, ligeiramente pegajoso; transição abrupta e plana.

B₂ 0,29-0,65m: Bruno muito escuro (10 YR 2/2, úmido), bruno acinzentado, muito escuro (10 YR 3/2, seco); mosqueados, comum, pequenos, e grandes, distinto, amarelo brunado (10YR 5/8); argilo-arenoso; forte grande e muito grande, prismática; cerosidade pouca e fraca; muito duro a extremamente duro; muito firme a extremamente firme, plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana.

B₃ 0,65-1,05m: Cinzento claro (2,5 Y 6,5/2, úmido); branco (10YR 5/1, seco); franco argiloso; maciça que se desfaz em fraca, média e grande, blocos subangulares, duro a muito duro; firme; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana.

C 1,05-1,50m+: Cinzento brunado claro(10 YR 6/2, úmido); cinzento claro (10 YR 7/1, seco); mosqueados abundantes; pequenos e médios, distinto, bruno forte (7,5 YR 5/8); franco argiloso; moderada, média e grande, blocos angulares e subangulares; duro; firme; plástico e ligeiramente pegajoso.

Raízes: muitas no A_p, poucas no E, e B₂ e raras no B₃ e C.

Observações: Presença no B₃ de concreções de manganês, pouco, grande, macio, irregular e preto. No momento da descrição, ocorria no local uma prolongada estiagem.

ANEXO C - Características físicas do solo da área experimental.

Tabela 1 - Composição granulométrica e classe textural nos diferentes horizontes do perfil característico do Planossolo.

| Horizonte | Prof. (m) | Granulometria (m) | | | Classe textural |
|----------------------|-----------|-------------------|-------|--------|-------------------|
| | | Areia | Silte | Argila | |
| A_p | 0-0,20 | 42,3 | 47,8 | 9,8 | Franco |
| E | 0,20-0,29 | 51,3 | 36,7 | 12,0 | Franco |
| B₂ | 0,29-0,65 | 39,1 | 29,3 | 31,6 | Franco - argiloso |

Tabela 2 – Densidade do solo (D_s), Densidade de partículas (D_p), microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a), porosidade total determinada (P_{td}), porosidade total calculada (P_{tc}) e relação micro/macroporosidade (M_i/M_a), nos diferentes horizontes do perfil característico do Planossolo.

| Horizonte | D_s (Mg. m ⁻³) | D_p (Mg. m ⁻³) | Porosidade (%) | | | | |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|-------|----------|----------|-----------|
| | | | M_a | M_i | P_{td} | P_{tc} | M_i/M_a |
| A_p | 1,45 | 2,50 | 3,20 | 46,60 | 49,80 | 42,00 | 14,60 |
| E | 1,65 | 2,57 | 4,90 | 30,50 | 35,40 | 35,80 | 6,20 |
| B₂ | 1,66 | 2,64 | 4,50 | 39,00 | 43,50 | 37,12 | 8,70 |

APÊNDICES

APÊNDICE A – Distribuição normal de freqüência, assimetria e análise da variação dos valores de densidade do solo obtidos pelo Método do Anel Volumétrico.

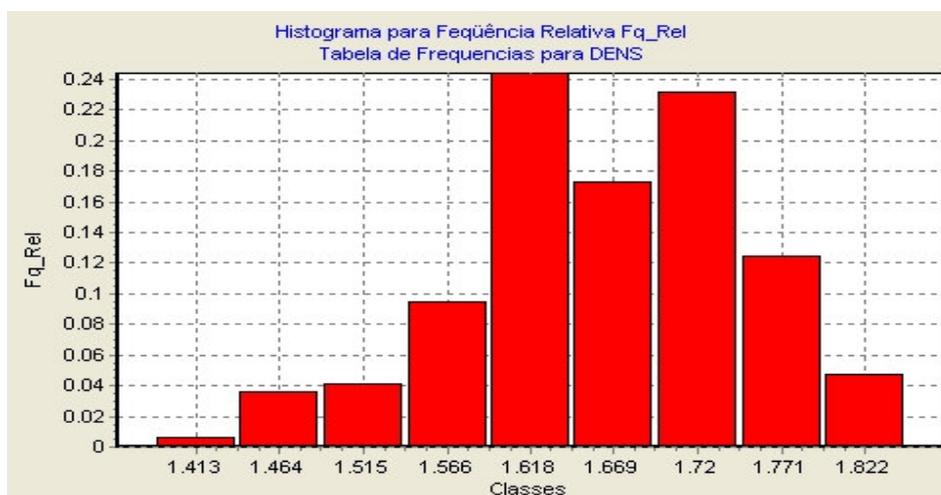


Figura 1 - Ajuste dos dados de densidade obtidos pelo Método do Anel Volumétrico à distribuição normal da freqüência.

Tabela 1 – Análise da variação dos dados de densidade dos tratamentos, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20m, obtidos pelo Método do Anel Volumétrico aos 19 anos de condução do experimento.

| Fontes | GL | SQ | QM | F | P |
|-------------|-----|----------|----------|---------|----------|
| TRATAM | 6 | 0,164986 | 0,027498 | 6,307 | 6,14E-06 |
| PROF | 1 | 0,33975 | 0,33975 | 77,927 | 0 |
| BLOCO | 3 | 0,012933 | 0,004311 | 0,98882 | 0,3998 |
| TRATAM.PROF | 6 | 0,041251 | 0,006875 | 1,5769 | 0,1575 |
| RESIDUO | 151 | 0,658336 | 0,00436 | - | - |
| TOTAL | 167 | 1,217257 | | | |

Média geral = 1,664637 Mg. m⁻³;
 CV = 3,9666%;
 Desvio Padrão = 0,066029

APÊNDICE B – Dados de densidade obtidos pelo Método do Anel Volumétrico.

| 0 – 0,10m | | | 0,10 – 0,20m | | |
|-------------------|--------------|------------------|---------------------|--------------|------------------|
| Tratamento | BLOCO | Densidade | Tratamento | BLOCO | Densidade |
| T1 | BLOCO_1 | 1,642 | T1 | BLOCO_1 | 1,800 |
| T1 | BLOCO_1 | 1,675 | T1 | BLOCO_1 | 1,777 |
| T1 | BLOCO_1 | 1,584 | T1 | BLOCO_1 | 1,767 |
| T1 | BLOCO_2 | 1,724 | T1 | BLOCO_2 | 1,749 |
| T1 | BLOCO_2 | 1,750 | T1 | BLOCO_2 | 1,754 |
| T1 | BLOCO_2 | 1,711 | T1 | BLOCO_2 | 1,733 |
| T1 | BLOCO_3 | 1,665 | T1 | BLOCO_3 | 1,722 |
| T1 | BLOCO_3 | 1,611 | T1 | BLOCO_3 | 1,738 |
| T1 | BLOCO_3 | 1,568 | T1 | BLOCO_3 | 1,614 |
| T1 | BLOCO_4 | 1,451 | T1 | BLOCO_4 | 1,717 |
| T1 | BLOCO_4 | 1,630 | T1 | BLOCO_4 | 1,741 |
| T1 | BLOCO_4 | 1,586 | T1 | BLOCO_4 | 1,710 |
| T2 | BLOCO_1 | 1,575 | T2 | BLOCO_1 | 1,779 |
| T2 | BLOCO_1 | 1,552 | T2 | BLOCO_1 | 1,771 |
| T2 | BLOCO_1 | 1,447 | T2 | BLOCO_1 | 1,799 |
| T2 | BLOCO_2 | 1,554 | T2 | BLOCO_2 | 1,637 |
| T2 | BLOCO_2 | 1,532 | T2 | BLOCO_2 | 1,701 |
| T2 | BLOCO_2 | 1,663 | T2 | BLOCO_2 | 1,778 |
| T2 | BLOCO_3 | 1,508 | T2 | BLOCO_3 | 1,529 |
| T2 | BLOCO_3 | 1,563 | T2 | BLOCO_3 | 1,492 |
| T2 | BLOCO_3 | 1,462 | T2 | BLOCO_3 | 1,690 |
| T2 | BLOCO_4 | 1,483 | T2 | BLOCO_4 | 1,571 |
| T2 | BLOCO_4 | 1,509 | T2 | BLOCO_4 | 1,691 |
| T2 | BLOCO_4 | 1,571 | T2 | BLOCO_4 | 1,755 |
| T4 | BLOCO_1 | 1,597 | T4 | BLOCO_1 | 1,720 |
| T4 | BLOCO_1 | 1,633 | T4 | BLOCO_1 | 1,629 |
| T4 | BLOCO_1 | 1,498 | T4 | BLOCO_1 | 1,679 |
| T4 | BLOCO_2 | 1,634 | T4 | BLOCO_2 | 1,738 |
| T4 | BLOCO_2 | 1,679 | T4 | BLOCO_2 | 1,746 |
| T4 | BLOCO_2 | 1,629 | T4 | BLOCO_2 | 1,728 |
| T4 | BLOCO_3 | 1,702 | T4 | BLOCO_3 | 1,772 |
| T4 | BLOCO_3 | 1,659 | T4 | BLOCO_3 | 1,693 |
| T4 | BLOCO_3 | 1,685 | T4 | BLOCO_3 | 1,803 |
| T4 | BLOCO_4 | 1,676 | T4 | BLOCO_4 | 1,730 |
| T4 | BLOCO_4 | 1,656 | T4 | BLOCO_4 | 1,773 |
| T4 | BLOCO_4 | 1,648 | T4 | BLOCO_4 | 1,695 |
| T5 | BLOCO_1 | 1,635 | T5 | BLOCO_1 | 1,720 |
| T5 | BLOCO_1 | 1,729 | T5 | BLOCO_1 | 1,848 |
| T5 | BLOCO_1 | 1,706 | T5 | BLOCO_1 | 1,737 |

APÊNDICE B – continuação:

| 0 – 0,10m | | | 0,10 – 0,20m | | |
|-------------------|--------------|------------------|---------------------|--------------|------------------|
| Tratamento | BLOCO | Densidade | Tratamento | BLOCO | Densidade |
| T5 | BLOCO_2 | 1,640 | T5 | BLOCO_2 | 1,666 |
| T5 | BLOCO_2 | 1,660 | T5 | BLOCO_2 | 1,621 |
| T5 | BLOCO_2 | 1,633 | T5 | BLOCO_2 | 1,741 |
| T5 | BLOCO_3 | 1,715 | T5 | BLOCO_3 | 1,752 |
| T5 | BLOCO_3 | 1,634 | T5 | BLOCO_3 | 1,764 |
| T5 | BLOCO_3 | 1,641 | T5 | BLOCO_3 | 1,763 |
| T5 | BLOCO_4 | 1,680 | T5 | BLOCO_4 | 1,780 |
| T5 | BLOCO_4 | 1,719 | T5 | BLOCO_4 | 1,801 |
| T5 | BLOCO_4 | 1,642 | T5 | BLOCO_4 | 1,733 |
| T6 | BLOCO_1 | 1,629 | T6 | BLOCO_1 | 1,722 |
| T6 | BLOCO_1 | 1,585 | T6 | BLOCO_1 | 1,613 |
| T6 | BLOCO_1 | 1,673 | T6 | BLOCO_1 | 1,755 |
| T6 | BLOCO_2 | 1,605 | T6 | BLOCO_2 | 1,742 |
| T6 | BLOCO_2 | 1,642 | T6 | BLOCO_2 | 1,778 |
| T6 | BLOCO_2 | 1,706 | T6 | BLOCO_2 | 1,715 |
| T6 | BLOCO_3 | 1,651 | T6 | BLOCO_3 | 1,696 |
| T6 | BLOCO_3 | 1,466 | T6 | BLOCO_3 | 1,736 |
| T6 | BLOCO_3 | 1,387 | T6 | BLOCO_3 | 1,633 |
| T6 | BLOCO_4 | 1,708 | T6 | BLOCO_4 | 1,779 |
| T6 | BLOCO_4 | 1,553 | T6 | BLOCO_4 | 1,743 |
| T6 | BLOCO_4 | 1,706 | T6 | BLOCO_4 | 1,754 |
| T7 | BLOCO_1 | 1,620 | T7 | BLOCO_1 | 1,602 |
| T7 | BLOCO_1 | 1,578 | T7 | BLOCO_1 | 1,577 |
| T7 | BLOCO_1 | 1,575 | T7 | BLOCO_1 | 1,643 |
| T7 | BLOCO_2 | 1,642 | T7 | BLOCO_2 | 1,627 |
| T7 | BLOCO_2 | 1,686 | T7 | BLOCO_2 | 1,773 |
| T7 | BLOCO_2 | 1,628 | T7 | BLOCO_2 | 1,694 |
| T7 | BLOCO_3 | 1,734 | T7 | BLOCO_3 | 1,837 |
| T7 | BLOCO_3 | 1,693 | T7 | BLOCO_3 | 1,804 |
| T7 | BLOCO_3 | 1,696 | T7 | BLOCO_3 | 1,800 |
| T7 | BLOCO_4 | 1,600 | T7 | BLOCO_4 | 1,677 |
| T7 | BLOCO_4 | 1,696 | T7 | BLOCO_4 | 1,700 |
| T7 | BLOCO_4 | 1,619 | T7 | BLOCO_4 | 1,662 |
| T8 | BLOCO_1 | 1,628 | T8 | BLOCO_1 | 1,634 |
| T8 | BLOCO_1 | 1,538 | T8 | BLOCO_1 | 1,595 |
| T8 | BLOCO_1 | 1,474 | T8 | BLOCO_1 | 1,660 |
| T8 | BLOCO_2 | 1,551 | T8 | BLOCO_2 | 1,631 |
| T8 | BLOCO_2 | 1,627 | T8 | BLOCO_2 | 1,715 |
| T8 | BLOCO_2 | 1,624 | T8 | BLOCO_2 | 1,642 |
| T8 | BLOCO_3 | 1,676 | T8 | BLOCO_3 | 1,685 |
| T8 | BLOCO_3 | 1,689 | T8 | BLOCO_3 | 1,695 |
| T8 | BLOCO_3 | 1,615 | T8 | BLOCO_3 | 1,594 |
| T8 | BLOCO_4 | 1,625 | T8 | BLOCO_4 | 1,709 |
| T8 | BLOCO_4 | 1,589 | T8 | BLOCO_4 | 1,660 |
| T8 | BLOCO_4 | 1,592 | T8 | BLOCO_4 | 1,678 |

APÊNDICE C – Análise da variação da densidade do solo obtida pelo Método da Tomografia Computadorizada.

Tabela 3 - Análise da variação dos valores médios de densidade dos diferentes tratamentos, nas profundidades de 0,02-0,04, 0,04-0,06, 0,06-0,08, 0,12-0,14 0,14-0,16 e 0,16-0,18m, obtidos a partir do Método da Tomografia Computadorizada.

| Fontes | GL | SQ | QM | F | P |
|-------------|-----|-----------|----------|--------|-----------|
| TRATAM | 6 | 0,0880616 | 0,014677 | 22,202 | 0 |
| PROF | 5 | 0,3272156 | 0,065443 | 98,996 | 0 |
| TRATAM.PROF | 30 | 0,0834727 | 0,002782 | 4,209 | 1,061E-09 |
| RESIDUO | 168 | 0,1110599 | 0,000661 | - | - |
| TOTAL | 209 | 0,6098098 | - | - | - |

Média geral = 1,542611 Mg.m⁻³;

CV = 1,666739%;

Desvio Padrão = 0,0257113

APÊNDICE D - Dados de densidade do solo do tratamento T1, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada (Média de 10 valores).

| Prof. (m) | Amostra | | | | | | | | | | | | média | Desvio Padrão |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------------------|
| | 407/R1 | 407/R2 | 407/R3 | 416/R1 | 416/R2 | 416/R3 | 419/R1 | 419/R2 | 419/R3 | 426/R1 | 426/R2 | 426/R3 | | |
| 0,0047 | 1,52 | 1,53 | 1,25 | 1,65 | 1,70 | 1,60 | 1,42 | 1,47 | 1,62 | 1,34 | 1,39 | 1,41 | 1,49 | 0,136 |
| 0,0094 | 1,66 | 1,56 | 1,35 | 1,67 | 1,68 | 1,65 | 1,54 | 1,55 | 1,51 | 1,36 | 1,46 | 1,51 | 1,54 | 0,111 |
| 0,0141 | 1,62 | 1,49 | 1,34 | 1,69 | 1,68 | 1,67 | 1,60 | 1,62 | 1,68 | 1,41 | 1,52 | 1,54 | 1,57 | 0,116 |
| 0,0188 | 1,67 | 1,58 | 1,53 | 1,63 | 1,66 | 1,63 | 1,61 | 1,55 | 1,60 | 1,38 | 1,59 | 1,53 | 1,58 | 0,078 |
| 0,0234 | 1,52 | 1,58 | 1,54 | 1,58 | 1,63 | 1,64 | 1,60 | 1,56 | 1,60 | 1,39 | 1,61 | 1,55 | 1,57 | 0,066 |
| 0,0281 | 1,46 | 1,63 | 1,47 | 1,53 | 1,57 | 1,59 | 1,57 | 1,57 | 1,54 | 1,42 | 1,51 | 1,47 | 1,53 | 0,063 |
| 0,0328 | 1,45 | 1,63 | 1,47 | 1,55 | 1,62 | 1,55 | 1,57 | 1,55 | 1,47 | 1,49 | 1,46 | 1,52 | 1,53 | 0,063 |
| 0,0375 | 1,48 | 1,57 | 1,51 | 1,51 | 1,58 | 1,56 | 1,56 | 1,55 | 1,47 | 1,45 | 1,47 | 1,47 | 1,52 | 0,047 |
| 0,0422 | 1,51 | 1,53 | 1,51 | 1,51 | 1,58 | 1,58 | 1,52 | 1,57 | 1,44 | 1,45 | 1,44 | 1,45 | 1,51 | 0,054 |
| 0,0469 | 1,49 | 1,55 | 1,48 | 1,53 | 1,62 | 1,60 | 1,51 | 1,49 | 1,27 | 1,45 | 1,46 | 1,40 | 1,49 | 0,092 |
| 0,0516 | 1,52 | 1,58 | 1,41 | 1,50 | 1,53 | 1,54 | 1,51 | 1,57 | 1,32 | 1,22 | 1,43 | 1,26 | 1,45 | 0,122 |
| 0,0563 | 1,49 | 1,51 | 1,53 | 1,54 | 1,63 | 1,58 | 1,44 | 1,47 | 1,42 | 0,90 | 1,46 | 1,32 | 1,44 | 0,187 |
| 0,0609 | 1,51 | 1,55 | 1,48 | 1,53 | 1,52 | 1,53 | 1,45 | 1,52 | 1,44 | 1,13 | 1,44 | 1,36 | 1,45 | 0,116 |
| 0,0656 | 1,59 | 1,51 | 1,39 | 1,53 | 1,55 | 1,54 | 1,49 | 1,49 | 1,44 | 1,25 | 1,47 | 1,37 | 1,47 | 0,093 |
| 0,0703 | 1,65 | 1,50 | 1,41 | 1,50 | 1,59 | 1,58 | 1,49 | 1,55 | 1,47 | 1,26 | 1,42 | 1,31 | 1,48 | 0,114 |
| 0,0750 | 1,68 | 1,52 | 1,44 | 1,50 | 1,58 | 1,56 | 1,53 | 1,58 | 1,48 | 1,30 | 1,45 | 1,38 | 1,50 | 0,101 |
| 0,0797 | 1,63 | 1,60 | 1,52 | 1,54 | 1,60 | 1,61 | 1,50 | 1,56 | 1,52 | 1,36 | 1,48 | 1,51 | 1,54 | 0,074 |
| 0,0844 | 1,64 | 1,65 | 1,63 | 1,56 | 1,62 | 1,61 | 1,53 | 1,55 | 1,46 | 1,55 | 1,48 | 1,52 | 1,57 | 0,063 |
| 0,0891 | 1,60 | 1,67 | 1,60 | 1,58 | 1,61 | 1,67 | 1,58 | 1,64 | 1,48 | 1,67 | 1,51 | 1,52 | 1,59 | 0,065 |
| 0,0938 | 1,58 | 1,73 | 1,48 | 1,56 | 1,65 | 1,65 | 1,59 | 1,53 | 1,46 | 1,63 | 1,54 | 1,59 | 1,58 | 0,076 |
| 0,0984 | 1,68 | 1,69 | 1,62 | 1,60 | 1,66 | 1,68 | 1,63 | 1,62 | 1,49 | 1,67 | 1,53 | 1,57 | 1,62 | 0,063 |
| 0,1031 | 1,70 | 1,58 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,66 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,54 | 1,56 | 1,60 | 0,041 |
| 0,1078 | 1,65 | 1,71 | 1,61 | 1,62 | 1,70 | 1,61 | 1,54 | 1,55 | 1,51 | 1,64 | 1,64 | 1,30 | 1,61 | 0,109 |
| 0,1125 | 1,66 | 1,73 | 1,63 | 1,64 | 1,67 | 1,65 | 1,59 | 1,61 | 1,43 | 1,61 | 1,62 | 1,41 | 1,62 | 0,093 |
| 0,1172 | 1,66 | 1,69 | 1,60 | 1,67 | 1,68 | 1,67 | 1,60 | 1,67 | 1,60 | 1,59 | 1,64 | 1,46 | 1,65 | 0,064 |
| 0,1219 | 1,62 | 1,70 | 1,62 | 1,61 | 1,65 | 1,63 | 1,59 | 1,58 | 1,55 | 1,58 | 1,60 | 1,46 | 1,62 | 0,058 |
| 0,1266 | 1,58 | 1,66 | 1,61 | 1,56 | 1,63 | 1,64 | 1,56 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,50 | 1,60 | 0,043 |
| 0,1313 | 1,57 | 1,65 | 1,57 | 1,51 | 1,57 | 1,59 | 1,57 | 1,57 | 1,52 | 1,49 | 1,56 | 1,44 | 1,57 | 0,055 |
| 0,1360 | 1,58 | 1,70 | 1,59 | 1,54 | 1,62 | 1,55 | 1,56 | 1,54 | 1,46 | 1,55 | 1,59 | 1,50 | 1,57 | 0,060 |
| 0,1406 | 1,56 | 1,66 | 1,52 | 1,50 | 1,57 | 1,56 | 1,51 | 1,52 | 1,48 | 1,49 | 1,55 | 1,47 | 1,54 | 0,052 |
| 0,1453 | 1,53 | 1,62 | 1,54 | 1,51 | 1,58 | 1,58 | 1,51 | 1,53 | 1,45 | 1,52 | 1,52 | 1,45 | 1,54 | 0,049 |
| 0,1500 | 1,57 | 1,62 | 1,55 | 1,53 | 1,61 | 1,60 | 1,51 | 1,45 | 1,29 | 1,50 | 1,54 | 1,42 | 1,52 | 0,093 |
| 0,1547 | 1,55 | 1,59 | 1,54 | 1,49 | 1,53 | 1,53 | 1,43 | 1,52 | 1,34 | 1,55 | 1,53 | 1,28 | 1,50 | 0,092 |
| 0,1594 | 1,58 | 1,63 | 1,55 | 1,54 | 1,62 | 1,58 | 1,44 | 1,43 | 1,45 | 1,59 | 1,49 | 1,35 | 1,54 | 0,086 |
| 0,1641 | 1,58 | 1,60 | 1,61 | 1,53 | 1,52 | 1,52 | 1,48 | 1,47 | 1,48 | 1,58 | 1,55 | 1,39 | 1,53 | 0,064 |
| 0,1688 | 1,64 | 1,61 | 1,55 | 1,54 | 1,54 | 1,54 | 1,48 | 1,44 | 1,48 | 1,61 | 1,54 | 1,41 | 1,54 | 0,070 |
| 0,1735 | 1,64 | 1,63 | 1,62 | 1,51 | 1,58 | 1,57 | 1,52 | 1,50 | 1,51 | 1,66 | 1,57 | 1,35 | 1,56 | 0,086 |
| 0,1781 | 1,65 | 1,64 | 1,62 | 1,51 | 1,58 | 1,55 | 1,49 | 1,53 | 1,52 | 1,65 | 1,61 | 1,42 | 1,57 | 0,073 |
| 0,1828 | 1,69 | 1,64 | 1,64 | 1,55 | 1,60 | 1,61 | 1,52 | 1,52 | 1,56 | 1,66 | 1,59 | 1,55 | 1,59 | 0,057 |
| 0,1875 | 1,67 | 1,70 | 1,67 | 1,57 | 1,62 | 1,60 | 1,57 | 1,51 | 1,49 | 1,63 | 1,66 | 1,56 | 1,60 | 0,065 |
| 0,1922 | 1,76 | 1,71 | 1,69 | 1,59 | 1,60 | 1,66 | 1,59 | 1,60 | 1,51 | 1,48 | 1,66 | 1,56 | 1,64 | 0,084 |
| 0,1969 | 1,61 | 1,67 | 1,72 | 1,58 | 1,64 | 1,65 | 1,62 | 1,51 | 1,48 | 1,61 | 1,71 | 1,62 | 1,61 | 0,072 |
| 0,2016 | 1,61 | 1,59 | 1,61 | 1,62 | 1,65 | 1,67 | 1,61 | 1,61 | 1,50 | 1,61 | 1,54 | 1,59 | 1,61 | 0,045 |

APÊNDICE E - Dados de densidade do solo do tratamento T2, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada (Média de 10 valores).

| Prof. (m) | Amostra | | | | | | | | | | | | média | Desvio Padrão |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------------------|
| | 402/R1 | 402/R2 | 402/R3 | 414/R1 | 414/R2 | 414/R3 | 420/R1 | 420/R2 | 420/R3 | 430/R1 | 430/R2 | 430/R3 | | |
| 0,0047 | 1,59 | 1,58 | 1,44 | 1,40 | 1,48 | 1,55 | 1,54 | 1,40 | 1,59 | 1,28 | 1,49 | 1,43 | 1,48 | 0,096 |
| 0,0094 | 1,50 | 1,57 | 1,48 | 1,50 | 1,54 | 1,62 | 1,52 | 1,50 | 1,59 | 1,36 | 1,56 | 1,38 | 1,51 | 0,078 |
| 0,0141 | 1,53 | 1,41 | 1,41 | 1,49 | 1,56 | 1,68 | 1,51 | 1,48 | 1,62 | 1,37 | 1,51 | 1,41 | 1,50 | 0,092 |
| 0,0188 | 1,50 | 1,44 | 1,38 | 1,52 | 1,57 | 1,53 | 1,45 | 1,49 | 1,55 | 1,34 | 1,53 | 1,43 | 1,48 | 0,070 |
| 0,0234 | 1,51 | 1,38 | 1,47 | 1,55 | 1,61 | 1,59 | 1,44 | 1,57 | 1,49 | 1,42 | 1,49 | 1,48 | 1,50 | 0,070 |
| 0,0281 | 1,53 | 1,47 | 1,39 | 1,53 | 1,62 | 1,57 | 1,48 | 1,59 | 1,19 | 1,46 | 1,42 | 1,48 | 1,48 | 0,114 |
| 0,0328 | 1,53 | 1,40 | 1,42 | 1,52 | 1,57 | 1,63 | 1,44 | 1,53 | 1,17 | 1,44 | 1,47 | 1,46 | 1,47 | 0,115 |
| 0,0375 | 1,49 | 1,47 | 1,39 | 1,54 | 1,57 | 1,57 | 1,41 | 1,57 | 1,29 | 1,50 | 1,44 | 1,44 | 1,47 | 0,085 |
| 0,0422 | 1,55 | 1,39 | 1,44 | 1,55 | 1,52 | 1,54 | 1,44 | 1,52 | 1,12 | 1,47 | 1,41 | 1,48 | 1,45 | 0,119 |
| 0,0469 | 1,50 | 1,47 | 1,45 | 1,54 | 1,45 | 1,42 | 1,39 | 1,50 | 1,04 | 1,47 | 1,42 | 1,45 | 1,43 | 0,128 |
| 0,0516 | 1,54 | 1,37 | 1,49 | 1,54 | 1,47 | 1,51 | 1,40 | 1,44 | 1,13 | 1,39 | 1,42 | 1,47 | 1,43 | 0,110 |
| 0,0563 | 1,48 | 1,49 | 1,54 | 1,46 | 1,51 | 1,51 | 1,27 | 1,48 | 1,33 | 1,45 | 1,40 | 1,44 | 1,45 | 0,079 |
| 0,0609 | 1,46 | 1,55 | 1,55 | 1,52 | 1,51 | 1,52 | 1,43 | 1,50 | 1,47 | 1,46 | 1,41 | 1,49 | 1,49 | 0,045 |
| 0,0656 | 1,46 | 1,39 | 1,57 | 1,50 | 1,51 | 1,52 | 1,31 | 1,52 | 1,53 | 1,52 | 1,49 | 1,57 | 1,49 | 0,074 |
| 0,0703 | 1,47 | 1,44 | 1,58 | 1,50 | 1,55 | 1,57 | 1,44 | 1,51 | 1,58 | 1,47 | 1,46 | 1,53 | 1,51 | 0,052 |
| 0,0750 | 1,34 | 1,51 | 1,53 | 1,53 | 1,54 | 1,56 | 1,41 | 1,54 | 1,53 | 1,53 | 1,46 | 1,46 | 1,49 | 0,065 |
| 0,0797 | 1,49 | 1,58 | 1,57 | 1,55 | 1,50 | 1,55 | 1,59 | 1,55 | 1,60 | 1,55 | 1,49 | 1,54 | 1,55 | 0,037 |
| 0,0844 | 1,55 | 1,46 | 1,56 | 1,55 | 1,59 | 1,56 | 1,56 | 1,57 | 1,65 | 1,58 | 1,59 | 1,55 | 1,56 | 0,045 |
| 0,0891 | 1,61 | 1,54 | 1,59 | 1,54 | 1,61 | 1,56 | 1,50 | 1,62 | 1,66 | 1,60 | 1,65 | 1,61 | 1,59 | 0,047 |
| 0,0938 | 1,62 | 1,63 | 1,55 | 1,41 | 1,59 | 1,57 | 1,60 | 1,61 | 1,68 | 1,59 | 1,68 | 1,56 | 1,59 | 0,070 |
| 0,0984 | 1,56 | 1,58 | 1,48 | 1,58 | 1,64 | 1,59 | 1,62 | 1,56 | 1,64 | 1,46 | 1,70 | 1,54 | 1,58 | 0,069 |
| 0,1031 | 1,57 | 1,63 | 1,50 | 1,53 | 1,63 | 1,60 | 1,65 | 1,57 | 1,58 | 1,47 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 0,054 |
| 0,1078 | 1,74 | 1,69 | 1,65 | 1,67 | 1,60 | 1,65 | 1,65 | 1,69 | 1,65 | 1,47 | 1,65 | 1,67 | 1,65 | 0,065 |
| 0,1125 | 1,74 | 1,73 | 1,68 | 1,64 | 1,58 | 1,50 | 1,68 | 1,68 | 1,71 | 1,40 | 1,72 | 1,61 | 1,64 | 0,103 |
| 0,1172 | 1,72 | 1,61 | 1,64 | 1,60 | 1,63 | 1,50 | 1,69 | 1,65 | 1,62 | 1,39 | 1,73 | 1,62 | 1,62 | 0,093 |
| 0,1219 | 1,69 | 1,61 | 1,66 | 1,56 | 1,62 | 1,51 | 1,68 | 1,68 | 1,70 | 1,59 | 1,69 | 1,64 | 1,64 | 0,061 |
| 0,1266 | 1,65 | 1,62 | 1,67 | 1,57 | 1,59 | 1,51 | 1,66 | 1,71 | 1,62 | 1,60 | 1,64 | 1,58 | 1,62 | 0,053 |
| 0,1313 | 1,64 | 1,62 | 1,66 | 1,59 | 1,60 | 1,51 | 1,61 | 1,55 | 1,66 | 1,60 | 1,64 | 1,56 | 1,60 | 0,044 |
| 0,1360 | 1,62 | 1,54 | 1,66 | 1,58 | 1,55 | 1,56 | 1,67 | 1,51 | 1,63 | 1,61 | 1,63 | 1,57 | 1,59 | 0,048 |
| 0,1406 | 1,60 | 1,51 | 1,65 | 1,57 | 1,59 | 1,55 | 1,62 | 1,56 | 1,61 | 1,61 | 1,62 | 1,50 | 1,58 | 0,046 |
| 0,1453 | 1,58 | 1,45 | 1,58 | 1,55 | 1,55 | 1,62 | 1,60 | 1,54 | 1,58 | 1,64 | 1,59 | 1,49 | 1,57 | 0,055 |
| 0,1500 | 1,57 | 1,49 | 1,61 | 1,58 | 1,60 | 1,53 | 1,59 | 1,46 | 1,61 | 1,65 | 1,59 | 1,45 | 1,56 | 0,064 |
| 0,1547 | 1,53 | 1,56 | 1,62 | 1,58 | 1,59 | 1,57 | 1,36 | 1,36 | 1,55 | 1,58 | 1,62 | 1,46 | 1,53 | 0,090 |
| 0,1594 | 1,60 | 1,55 | 1,55 | 1,58 | 1,61 | 1,56 | 1,45 | 1,20 | 1,52 | 1,66 | 1,59 | 1,48 | 1,53 | 0,119 |
| 0,1641 | 1,57 | 1,52 | 1,57 | 1,50 | 1,54 | 1,57 | 1,57 | 1,44 | 1,58 | 1,65 | 1,62 | 1,54 | 1,56 | 0,055 |
| 0,1688 | 1,56 | 1,53 | 1,57 | 1,54 | 1,58 | 1,60 | 1,69 | 1,54 | 1,55 | 1,70 | 1,58 | 1,51 | 1,58 | 0,060 |
| 0,1735 | 1,59 | 1,55 | 1,62 | 1,54 | 1,63 | 1,62 | 1,60 | 1,64 | 1,61 | 1,59 | 1,63 | 1,50 | 1,59 | 0,041 |
| 0,1781 | 1,62 | 1,54 | 1,64 | 1,62 | 1,65 | 1,67 | 1,58 | 1,64 | 1,67 | 1,01 | 1,62 | 1,54 | 1,62 | 0,046 |
| 0,1828 | 1,66 | 1,62 | 1,60 | 1,65 | 1,64 | 1,69 | 1,71 | 1,67 | 1,67 | 1,02 | 1,66 | 1,56 | 1,65 | 0,043 |
| 0,1875 | 1,67 | 1,63 | 1,66 | 1,70 | 1,66 | 1,75 | 1,74 | 1,77 | 1,69 | 1,80 | 1,51 | 1,61 | 1,68 | 0,079 |
| 0,1922 | 1,68 | 1,68 | 1,68 | 1,64 | 1,63 | 1,73 | 1,56 | 1,47 | 1,70 | 1,85 | 1,01 | 1,60 | 1,66 | 0,099 |
| 0,1969 | 1,72 | 1,70 | 1,72 | 1,41 | 1,64 | 1,74 | 1,65 | 1,57 | 1,67 | 1,64 | 1,02 | 1,62 | 1,64 | 0,091 |
| 0,2016 | 1,67 | 1,70 | 1,72 | 1,66 | 1,66 | 1,73 | 1,65 | 1,31 | 1,69 | 1,66 | 1,80 | 1,67 | 1,66 | 0,119 |

APÊNDICE F - Dados de densidade do solo do tratamento T4, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada (Média de 10 valores).

| Prof. (m) | Amostra | | | | | | | | | | | | Média | Desvio Padrão |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------------------|
| | 406/R1 | 406/R2 | 406/R3 | 413/R1 | 413/R2 | 413/R3 | 422/R1 | 422/R2 | 422/R3 | 427/R1 | 427/R2 | 427/R3 | | |
| 0,0047 | 1,62 | 1,52 | 1,13 | 1,46 | 1,65 | 1,68 | 1,69 | 1,44 | 1,60 | 1,65 | 1,56 | 1,68 | 1,56 | 0,158 |
| 0,0094 | 1,64 | 1,65 | 1,19 | 1,60 | 1,68 | 1,68 | 1,72 | 1,66 | 1,61 | 1,67 | 1,59 | 1,61 | 1,61 | 0,136 |
| 0,0141 | 1,68 | 1,65 | 1,04 | 1,64 | 1,66 | 1,70 | 1,65 | 1,68 | 1,61 | 1,67 | 1,62 | 1,58 | 1,60 | 0,178 |
| 0,0188 | 1,68 | 1,64 | 1,10 | 1,66 | 1,63 | 1,61 | 1,56 | 1,67 | 1,61 | 1,64 | 1,62 | 1,55 | 1,58 | 0,155 |
| 0,0234 | 1,44 | 1,61 | 1,42 | 1,61 | 1,62 | 1,63 | 1,61 | 1,63 | 1,58 | 1,59 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 0,071 |
| 0,0281 | 1,32 | 1,56 | 1,60 | 1,49 | 1,54 | 1,54 | 1,57 | 1,61 | 1,54 | 1,56 | 1,61 | 1,60 | 1,54 | 0,080 |
| 0,0328 | 1,48 | 1,64 | 1,64 | 1,39 | 1,60 | 1,54 | 1,58 | 1,54 | 1,55 | 1,52 | 1,55 | 1,56 | 1,55 | 0,069 |
| 0,0375 | 1,51 | 1,55 | 1,62 | 1,48 | 1,55 | 1,49 | 1,50 | 1,48 | 1,51 | 1,53 | 1,55 | 1,53 | 1,53 | 0,040 |
| 0,0422 | 1,48 | 1,52 | 1,59 | 1,52 | 1,53 | 1,52 | 1,52 | 1,54 | 1,51 | 1,47 | 1,53 | 1,53 | 1,52 | 0,029 |
| 0,0469 | 1,51 | 1,43 | 1,60 | 1,55 | 1,55 | 1,51 | 1,52 | 1,49 | 1,49 | 1,48 | 1,50 | 1,51 | 1,51 | 0,042 |
| 0,0516 | 1,47 | 1,44 | 1,59 | 1,51 | 1,55 | 1,48 | 1,48 | 1,40 | 1,43 | 1,51 | 1,45 | 1,51 | 1,48 | 0,052 |
| 0,0563 | 1,46 | 1,38 | 1,59 | 1,46 | 1,57 | 1,56 | 1,49 | 1,37 | 1,45 | 1,43 | 1,45 | 1,52 | 1,48 | 0,070 |
| 0,0609 | 1,49 | 1,48 | 1,59 | 1,51 | 1,54 | 1,52 | 1,46 | 1,52 | 1,46 | 1,50 | 1,48 | 1,54 | 1,51 | 0,037 |
| 0,0656 | 1,49 | 1,53 | 1,57 | 1,55 | 1,53 | 1,49 | 1,50 | 1,51 | 1,50 | 1,50 | 1,51 | 1,50 | 1,51 | 0,025 |
| 0,0703 | 1,55 | 1,55 | 1,63 | 1,56 | 1,54 | 1,51 | 1,51 | 1,46 | 1,51 | 1,49 | 1,50 | 1,48 | 1,53 | 0,046 |
| 0,0750 | 1,53 | 1,58 | 1,66 | 1,55 | 1,48 | 1,54 | 1,55 | 1,44 | 1,53 | 1,51 | 1,53 | 1,42 | 1,53 | 0,063 |
| 0,0797 | 1,44 | 1,60 | 1,63 | 1,51 | 1,51 | 1,60 | 1,56 | 1,49 | 1,53 | 1,47 | 1,49 | 1,46 | 1,52 | 0,061 |
| 0,0844 | 1,57 | 1,58 | 1,64 | 1,54 | 1,61 | 1,63 | 1,61 | 1,51 | 1,57 | 1,50 | 1,56 | 1,51 | 1,57 | 0,047 |
| 0,0891 | 1,61 | 1,57 | 1,63 | 1,55 | 1,63 | 1,65 | 1,55 | 1,58 | 1,57 | 1,57 | 1,55 | 1,55 | 1,58 | 0,037 |
| 0,0938 | 1,63 | 1,61 | 1,65 | 1,56 | 1,64 | 1,67 | 1,61 | 1,60 | 1,57 | 1,59 | 1,56 | 1,55 | 1,60 | 0,040 |
| 0,0984 | 1,65 | 1,62 | 1,67 | 1,49 | 1,61 | 1,61 | 1,70 | 1,64 | 1,54 | 1,63 | 1,63 | 1,57 | 1,61 | 0,057 |
| 0,1031 | 1,65 | 1,59 | 1,61 | 1,54 | 1,61 | 1,71 | 1,74 | 1,63 | 1,50 | 1,60 | 1,59 | 1,54 | 1,61 | 0,069 |
| 0,1078 | 1,62 | 1,57 | 1,56 | 1,62 | 1,59 | 1,73 | 1,62 | 1,67 | 1,62 | 1,62 | 1,62 | 1,62 | 1,62 | 0,045 |
| 0,1125 | 1,67 | 1,63 | 1,60 | 1,71 | 1,48 | 1,71 | 1,69 | 1,63 | 1,65 | 1,56 | 1,73 | 1,51 | 1,63 | 0,081 |
| 0,1172 | 1,68 | 1,65 | 1,59 | 1,73 | 1,56 | 1,68 | 1,69 | 1,55 | 1,69 | 1,57 | 1,74 | 1,54 | 1,64 | 0,073 |
| 0,1219 | 1,70 | 1,66 | 1,64 | 1,69 | 1,62 | 1,59 | 1,70 | 1,56 | 1,66 | 1,60 | 1,72 | 1,57 | 1,64 | 0,054 |
| 0,1266 | 1,65 | 1,64 | 1,63 | 1,57 | 1,75 | 1,63 | 1,66 | 1,43 | 1,62 | 1,64 | 1,70 | 1,63 | 1,63 | 0,075 |
| 0,1313 | 1,67 | 1,63 | 1,58 | 1,64 | 1,74 | 1,62 | 1,56 | 1,36 | 1,59 | 1,58 | 1,71 | 1,62 | 1,61 | 0,095 |
| 0,1360 | 1,65 | 1,61 | 1,59 | 1,61 | 1,72 | 1,57 | 1,68 | 1,38 | 1,64 | 1,59 | 1,64 | 1,59 | 1,60 | 0,083 |
| 0,1406 | 1,63 | 1,58 | 1,60 | 1,61 | 1,62 | 1,60 | 1,59 | 1,53 | 1,54 | 1,56 | 1,67 | 1,59 | 1,59 | 0,040 |
| 0,1453 | 1,59 | 1,56 | 1,56 | 1,47 | 1,63 | 1,65 | 1,55 | 1,60 | 1,59 | 1,56 | 1,62 | 1,57 | 1,58 | 0,047 |
| 0,1500 | 1,57 | 1,55 | 1,54 | 1,57 | 1,69 | 1,68 | 1,53 | 1,61 | 1,56 | 1,49 | 1,66 | 1,47 | 1,58 | 0,070 |
| 0,1547 | 1,56 | 1,51 | 1,56 | 1,50 | 1,70 | 1,67 | 1,54 | 1,63 | 1,55 | 1,47 | 1,70 | 1,54 | 1,58 | 0,079 |
| 0,1594 | 1,53 | 1,40 | 1,61 | 1,58 | 1,69 | 1,64 | 1,54 | 1,69 | 1,51 | 1,52 | 1,67 | 1,56 | 1,58 | 0,087 |
| 0,1641 | 1,53 | 1,51 | 1,56 | 1,62 | 1,69 | 1,70 | 1,54 | 1,68 | 1,53 | 1,46 | 1,74 | 1,63 | 1,60 | 0,088 |
| 0,1688 | 1,55 | 1,57 | 1,62 | 1,62 | 1,76 | 1,68 | 1,55 | 1,61 | 1,55 | 1,47 | 1,71 | 1,59 | 1,61 | 0,078 |
| 0,1735 | 1,61 | 1,58 | 1,60 | 1,66 | 1,74 | 1,71 | 1,53 | 1,62 | 1,52 | 1,58 | 1,77 | 1,66 | 1,63 | 0,078 |
| 0,1781 | 1,63 | 1,65 | 1,55 | 1,67 | 1,78 | 1,72 | 1,57 | 1,60 | 1,58 | 1,54 | 1,77 | 1,22 | 1,61 | 0,151 |
| 0,1828 | 1,65 | 1,61 | 1,62 | 1,69 | 1,85 | 1,73 | 1,54 | 1,55 | 1,51 | 1,54 | 1,79 | 1,47 | 1,63 | 0,120 |
| 0,1875 | 1,60 | 1,68 | 1,64 | 1,72 | 1,88 | 1,70 | 1,58 | 1,55 | 1,62 | 1,66 | 1,80 | 1,71 | 1,68 | 0,093 |
| 0,1922 | 1,58 | 1,67 | 1,65 | 1,74 | 1,91 | 1,76 | 1,61 | 1,59 | 1,63 | 1,69 | 1,78 | 1,77 | 1,70 | 0,099 |
| 0,1969 | 1,55 | 1,67 | 1,70 | 1,76 | 1,68 | 1,68 | 1,62 | 1,62 | 1,61 | 1,77 | 1,68 | 1,83 | 1,68 | 0,081 |
| 0,2016 | 1,55 | 1,66 | 1,68 | 1,78 | 1,70 | 1,70 | 1,64 | 1,65 | 1,74 | 1,80 | 1,70 | 1,84 | 1,70 | 0,080 |

APÊNDICE G - Dados de densidade do solo do tratamento T5, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada (Média de 10 valores).

| Prof. (m) | Amostra | | | | | | | | | | | | Média | Desvio Padrão |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|------------------|
| | 404/R1 | 404/R2 | 404/R3 | 410/R1 | 410/R2 | 410/R3 | 423/R1 | 423/R2 | 423/R3 | 429/R1 | 429/R2 | 429/R3 | | |
| 0,0047 | 1,59 | 1,69 | 1,60 | 1,50 | 1,65 | 1,60 | 1,79 | 1,58 | 1,63 | 1,59 | 1,66 | 1,48 | 1,62 | 0,082 |
| 0,0094 | 1,61 | 1,61 | 1,64 | 1,51 | 1,65 | 1,62 | 1,74 | 1,55 | 1,65 | 1,56 | 1,68 | 1,58 | 1,62 | 0,063 |
| 0,0141 | 1,61 | 1,61 | 1,61 | 1,54 | 1,57 | 1,62 | 1,69 | 1,51 | 1,65 | 1,54 | 1,65 | 1,62 | 1,60 | 0,052 |
| 0,0188 | 1,58 | 1,61 | 1,57 | 1,55 | 1,58 | 1,38 | 1,63 | 1,52 | 1,58 | 1,59 | 1,65 | 1,60 | 1,57 | 0,068 |
| 0,0234 | 1,56 | 1,69 | 1,52 | 1,58 | 1,55 | 1,39 | 1,61 | 1,45 | 1,57 | 1,57 | 1,63 | 1,52 | 1,55 | 0,080 |
| 0,0281 | 1,58 | 1,66 | 1,48 | 1,51 | 1,58 | 1,42 | 1,64 | 1,59 | 1,56 | 1,53 | 1,56 | 1,49 | 1,55 | 0,067 |
| 0,0328 | 1,52 | 1,59 | 1,52 | 1,50 | 1,54 | 1,59 | 1,58 | 1,59 | 1,51 | 1,53 | 1,51 | 1,53 | 1,54 | 0,035 |
| 0,0375 | 1,54 | 1,58 | 1,50 | 1,48 | 1,53 | 1,50 | 1,43 | 1,55 | 1,48 | 1,44 | 1,54 | 1,57 | 1,51 | 0,048 |
| 0,0422 | 1,57 | 1,54 | 1,49 | 1,40 | 1,43 | 1,46 | 1,49 | 1,49 | 1,48 | 1,48 | 1,56 | 1,60 | 1,50 | 0,058 |
| 0,0469 | 1,59 | 1,55 | 1,45 | 1,48 | 1,43 | 1,44 | 1,49 | 1,46 | 1,47 | 1,46 | 1,55 | 1,59 | 1,50 | 0,057 |
| 0,0516 | 1,57 | 1,52 | 1,46 | 1,45 | 1,43 | 1,39 | 1,53 | 1,41 | 1,50 | 1,54 | 1,58 | 1,51 | 1,49 | 0,062 |
| 0,0563 | 1,57 | 1,51 | 1,51 | 1,44 | 1,43 | 1,50 | 1,54 | 1,46 | 1,46 | 1,51 | 1,54 | 1,55 | 1,50 | 0,045 |
| 0,0609 | 1,51 | 1,48 | 1,49 | 1,38 | 1,45 | 1,52 | 1,52 | 1,53 | 1,54 | 1,54 | 1,57 | 1,53 | 1,50 | 0,051 |
| 0,0656 | 1,45 | 1,50 | 1,46 | 1,49 | 1,49 | 1,52 | 1,60 | 1,51 | 1,52 | 1,50 | 1,49 | 1,42 | 1,50 | 0,045 |
| 0,0703 | 1,52 | 1,53 | 1,57 | 1,48 | 1,51 | 1,50 | 1,55 | 1,49 | 1,52 | 1,57 | 1,51 | 1,43 | 1,52 | 0,038 |
| 0,0750 | 1,51 | 1,56 | 1,59 | 1,65 | 1,57 | 1,48 | 1,59 | 1,43 | 1,53 | 1,58 | 1,51 | 1,49 | 1,54 | 0,061 |
| 0,0797 | 1,56 | 1,60 | 1,61 | 1,67 | 1,58 | 1,55 | 1,64 | 1,58 | 1,56 | 1,58 | 1,58 | 1,55 | 1,59 | 0,037 |
| 0,0844 | 1,54 | 1,66 | 1,60 | 1,76 | 1,59 | 1,52 | 1,62 | 1,55 | 1,56 | 1,60 | 1,62 | 1,54 | 1,60 | 0,065 |
| 0,0891 | 1,55 | 1,71 | 1,59 | 1,63 | 1,59 | 1,63 | 1,67 | 1,53 | 1,52 | 1,61 | 1,59 | 1,63 | 1,60 | 0,055 |
| 0,0938 | 1,57 | 1,74 | 1,60 | 1,57 | 1,60 | 1,65 | 1,66 | 1,66 | 1,56 | 1,60 | 1,63 | 1,65 | 1,62 | 0,053 |
| 0,0984 | 1,62 | 1,70 | 1,64 | 1,65 | 1,61 | 1,68 | 1,67 | 1,69 | 1,59 | 1,65 | 1,58 | 1,69 | 1,65 | 0,042 |
| 0,1031 | 1,61 | 1,77 | 1,73 | 1,66 | 1,67 | 1,67 | 1,74 | 1,64 | 1,59 | 1,69 | 1,59 | 1,67 | 1,67 | 0,057 |
| 0,1078 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,61 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,69 | 1,78 | 1,69 | 0,036 |
| 0,1125 | 1,65 | 1,74 | 1,75 | 1,68 | 1,65 | 1,66 | 1,72 | 1,61 | 1,67 | 1,77 | 1,70 | 1,73 | 1,70 | 0,048 |
| 0,1172 | 1,64 | 1,72 | 1,76 | 1,71 | 1,59 | 1,68 | 1,69 | 1,70 | 1,75 | 1,78 | 1,63 | 1,73 | 1,70 | 0,057 |
| 0,1219 | 1,76 | 1,70 | 1,72 | 1,72 | 1,66 | 1,69 | 1,70 | 1,68 | 1,68 | 1,75 | 1,68 | 1,71 | 1,70 | 0,030 |
| 0,1266 | 1,74 | 1,67 | 1,70 | 1,69 | 1,63 | 1,66 | 1,66 | 1,67 | 1,68 | 1,68 | 1,70 | 1,65 | 1,68 | 0,029 |
| 0,1313 | 1,73 | 1,65 | 1,67 | 1,68 | 1,63 | 1,66 | 1,65 | 1,66 | 1,65 | 1,70 | 1,70 | 1,66 | 1,67 | 0,028 |
| 0,1360 | 1,69 | 1,68 | 1,63 | 1,67 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,63 | 1,62 | 1,66 | 1,68 | 1,64 | 1,65 | 0,026 |
| 0,1406 | 1,66 | 1,62 | 1,60 | 1,64 | 1,57 | 1,65 | 1,58 | 1,56 | 1,55 | 1,65 | 1,64 | 1,60 | 1,61 | 0,038 |
| 0,1453 | 1,65 | 1,63 | 1,63 | 1,62 | 1,55 | 1,60 | 1,56 | 1,60 | 1,52 | 1,66 | 1,65 | 1,61 | 1,61 | 0,044 |
| 0,1500 | 1,60 | 1,56 | 1,59 | 1,59 | 1,61 | 1,59 | 1,55 | 1,53 | 1,54 | 1,60 | 1,64 | 1,59 | 1,58 | 0,031 |
| 0,1547 | 1,61 | 1,51 | 1,59 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,56 | 1,52 | 1,54 | 1,63 | 1,62 | 1,60 | 1,57 | 0,037 |
| 0,1594 | 1,60 | 1,60 | 1,55 | 1,61 | 1,56 | 1,58 | 1,53 | 1,56 | 1,58 | 1,60 | 1,65 | 1,60 | 1,58 | 0,032 |
| 0,1641 | 1,54 | 1,60 | 1,59 | 1,58 | 1,57 | 1,51 | 1,56 | 1,53 | 1,56 | 1,63 | 1,66 | 1,59 | 1,58 | 0,041 |
| 0,1688 | 1,56 | 1,61 | 1,54 | 1,59 | 1,58 | 1,46 | 1,53 | 1,54 | 1,57 | 1,63 | 1,64 | 1,51 | 1,56 | 0,051 |
| 0,1735 | 1,59 | 1,65 | 1,58 | 1,56 | 1,59 | 1,51 | 1,57 | 1,57 | 1,60 | 1,64 | 1,66 | 1,55 | 1,59 | 0,042 |
| 0,1781 | 1,57 | 1,67 | 1,57 | 1,54 | 1,57 | 1,41 | 1,56 | 1,60 | 1,61 | 1,64 | 1,69 | 1,60 | 1,59 | 0,072 |
| 0,1828 | 1,57 | 1,67 | 1,57 | 1,43 | 1,59 | 1,61 | 1,57 | 1,60 | 1,64 | 1,66 | 1,67 | 1,63 | 1,60 | 0,065 |
| 0,1875 | 1,63 | 1,69 | 1,59 | 1,18 | 1,65 | 1,61 | 1,60 | 1,60 | 1,67 | 1,69 | 1,72 | 1,69 | 1,61 | 0,047 |
| 0,1922 | 1,66 | 1,69 | 1,66 | 1,11 | 1,60 | 1,65 | 1,64 | 1,65 | 1,69 | 1,70 | 1,76 | 1,78 | 1,63 | 0,053 |
| 0,1969 | 1,64 | 1,68 | 1,66 | 1,50 | 1,62 | 1,70 | 1,69 | 1,71 | 1,68 | 1,73 | 1,74 | 1,76 | 1,68 | 0,069 |
| 0,2016 | 1,67 | 1,72 | 1,72 | 1,58 | 1,59 | 1,73 | 1,73 | 1,72 | 1,75 | 1,76 | 1,76 | 1,70 | 1,70 | 0,059 |

APÊNDICE H - Dados de densidade do tratamento T6, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada (Média de 10 valores).

| Prof. (m) | Amostra | | | | | | | | | | | | Média | Desvio Padrão |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------------------|
| | 408/R1 | 408/R2 | 408/R3 | 409/R1 | 409/R2 | 409/R3 | 424/R1 | 424/R2 | 424/R3 | 431/R1 | 431/R2 | 431/R3 | | |
| 0,0047 | 1,40 | 1,15 | 1,39 | 1,23 | 1,36 | 1,50 | 1,55 | 1,64 | 1,55 | 1,36 | 1,61 | 1,64 | 1,45 | 0,161 |
| 0,0094 | 1,49 | 1,42 | 1,56 | 1,40 | 1,20 | 1,53 | 1,45 | 1,66 | 1,48 | 1,36 | 1,58 | 1,65 | 1,48 | 0,129 |
| 0,0141 | 1,52 | 1,53 | 1,60 | 1,56 | 1,20 | 1,63 | 1,48 | 1,61 | 1,52 | 1,39 | 1,57 | 1,65 | 1,52 | 0,123 |
| 0,0188 | 1,47 | 1,52 | 1,63 | 1,62 | 1,30 | 1,61 | 1,51 | 1,58 | 1,51 | 1,47 | 1,61 | 1,59 | 1,53 | 0,094 |
| 0,0234 | 1,47 | 1,52 | 1,61 | 1,63 | 1,40 | 1,65 | 1,59 | 1,57 | 1,45 | 1,49 | 1,50 | 1,61 | 1,54 | 0,079 |
| 0,0281 | 1,50 | 1,48 | 1,61 | 1,59 | 1,56 | 1,61 | 1,47 | 1,49 | 1,38 | 1,50 | 1,49 | 1,61 | 1,52 | 0,070 |
| 0,0328 | 1,45 | 1,45 | 1,60 | 1,58 | 1,55 | 1,61 | 1,41 | 1,40 | 1,45 | 1,51 | 1,52 | 1,59 | 1,51 | 0,076 |
| 0,0375 | 1,44 | 1,45 | 1,59 | 1,55 | 1,58 | 1,57 | 1,42 | 1,32 | 1,37 | 1,51 | 1,46 | 1,57 | 1,49 | 0,089 |
| 0,0422 | 1,44 | 1,44 | 1,59 | 1,54 | 1,55 | 1,58 | 1,55 | 1,43 | 1,23 | 1,46 | 1,35 | 1,55 | 1,48 | 0,108 |
| 0,0469 | 1,40 | 1,42 | 1,59 | 1,52 | 1,57 | 1,52 | 1,52 | 1,49 | 1,18 | 1,49 | 1,39 | 1,52 | 1,47 | 0,108 |
| 0,0516 | 1,40 | 1,44 | 1,58 | 1,50 | 1,50 | 1,58 | 1,49 | 1,40 | 1,17 | 1,48 | 1,31 | 1,48 | 1,44 | 0,115 |
| 0,0563 | 1,44 | 1,43 | 1,56 | 1,53 | 1,54 | 1,55 | 1,52 | 1,33 | 0,67 | 1,40 | 1,26 | 1,47 | 1,39 | 0,246 |
| 0,0609 | 1,40 | 1,36 | 1,52 | 1,50 | 1,53 | 1,58 | 1,52 | 1,48 | 0,83 | 1,47 | 1,32 | 1,52 | 1,42 | 0,200 |
| 0,0656 | 1,43 | 1,33 | 1,54 | 1,48 | 1,55 | 1,56 | 1,51 | 1,36 | 1,22 | 1,44 | 1,26 | 1,55 | 1,44 | 0,118 |
| 0,0703 | 1,42 | 1,43 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,60 | 1,52 | 1,14 | 1,49 | 1,46 | 1,39 | 1,58 | 1,48 | 0,126 |
| 0,0750 | 1,46 | 1,50 | 1,55 | 1,60 | 1,59 | 1,61 | 1,50 | 1,14 | 1,60 | 1,44 | 1,51 | 1,56 | 1,51 | 0,129 |
| 0,0797 | 1,53 | 1,52 | 1,61 | 1,61 | 1,58 | 1,67 | 1,57 | 1,43 | 1,59 | 1,51 | 1,48 | 1,62 | 1,56 | 0,067 |
| 0,0844 | 1,54 | 1,56 | 1,64 | 1,61 | 1,63 | 1,66 | 1,56 | 1,46 | 1,64 | 1,58 | 1,57 | 1,60 | 1,59 | 0,055 |
| 0,0891 | 1,59 | 1,59 | 1,67 | 1,59 | 1,64 | 1,62 | 1,55 | 1,57 | 1,64 | 1,60 | 1,60 | 1,64 | 1,61 | 0,035 |
| 0,0938 | 1,65 | 1,38 | 1,66 | 1,58 | 1,67 | 1,66 | 1,55 | 1,61 | 1,65 | 1,61 | 1,58 | 1,69 | 1,61 | 0,085 |
| 0,0984 | 1,62 | 1,70 | 1,59 | 1,65 | 1,67 | 1,62 | 1,54 | 1,62 | 1,66 | 1,61 | 1,55 | 1,62 | 1,62 | 0,047 |
| 0,1031 | 1,50 | 1,54 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,63 | 1,62 | 1,61 | 1,59 | 1,60 | 1,60 | 1,70 | 1,60 | 0,048 |
| 0,1078 | 1,59 | 1,55 | 1,70 | 1,65 | 1,61 | 1,59 | 1,59 | 1,63 | 1,25 | 1,59 | 1,70 | 1,60 | 1,59 | 0,115 |
| 0,1125 | 1,59 | 1,50 | 1,58 | 1,60 | 1,66 | 1,60 | 1,58 | 1,59 | 1,09 | 1,65 | 1,69 | 1,59 | 1,56 | 0,155 |
| 0,1172 | 1,51 | 1,50 | 1,66 | 1,60 | 1,64 | 1,56 | 1,58 | 1,58 | 0,83 | 1,60 | 1,67 | 1,53 | 1,58 | 0,058 |
| 0,1219 | 1,51 | 1,48 | 1,63 | 1,59 | 1,62 | 1,52 | 1,52 | 1,57 | 0,70 | 1,59 | 1,65 | 1,48 | 1,56 | 0,062 |
| 0,1266 | 1,43 | 1,42 | 1,63 | 1,53 | 1,59 | 1,56 | 1,50 | 1,58 | 1,63 | 1,53 | 1,62 | 1,51 | 1,54 | 0,072 |
| 0,1313 | 1,39 | 1,39 | 1,64 | 1,52 | 1,54 | 1,51 | 1,48 | 1,59 | 1,59 | 1,51 | 1,60 | 1,46 | 1,52 | 0,080 |
| 0,1360 | 1,38 | 1,41 | 1,61 | 1,54 | 1,47 | 1,49 | 1,46 | 1,53 | 1,60 | 1,50 | 1,60 | 1,51 | 1,51 | 0,073 |
| 0,1406 | 1,40 | 1,38 | 1,60 | 1,53 | 1,48 | 1,58 | 1,46 | 1,58 | 1,56 | 1,51 | 1,57 | 1,51 | 1,51 | 0,071 |
| 0,1453 | 1,37 | 1,37 | 1,57 | 1,50 | 1,55 | 1,57 | 1,47 | 1,56 | 1,58 | 1,50 | 1,54 | 1,48 | 1,50 | 0,071 |
| 0,1500 | 1,37 | 1,41 | 1,60 | 1,48 | 1,53 | 1,56 | 1,49 | 1,55 | 1,55 | 1,48 | 1,53 | 1,47 | 1,50 | 0,067 |
| 0,1547 | 1,39 | 1,42 | 1,58 | 1,53 | 1,46 | 1,59 | 1,47 | 1,50 | 1,54 | 1,51 | 1,57 | 1,50 | 1,50 | 0,063 |
| 0,1594 | 1,41 | 1,42 | 1,65 | 1,48 | 1,50 | 1,61 | 1,42 | 1,56 | 1,52 | 1,53 | 1,55 | 1,45 | 1,51 | 0,077 |
| 0,1641 | 1,40 | 1,39 | 1,60 | 1,48 | 1,54 | 1,62 | 1,40 | 1,57 | 1,53 | 1,54 | 1,53 | 1,52 | 1,51 | 0,077 |
| 0,1688 | 1,47 | 1,45 | 1,62 | 1,51 | 1,54 | 1,67 | 1,42 | 1,62 | 1,57 | 1,54 | 1,58 | 1,53 | 1,54 | 0,076 |
| 0,1735 | 1,43 | 1,51 | 1,65 | 1,51 | 1,54 | 1,68 | 1,37 | 1,66 | 1,57 | 1,58 | 1,53 | 1,49 | 1,54 | 0,091 |
| 0,1781 | 1,47 | 1,54 | 1,70 | 1,52 | 1,55 | 1,74 | 1,37 | 1,67 | 1,57 | 1,59 | 1,64 | 1,58 | 1,58 | 0,106 |
| 0,1828 | 1,50 | 1,54 | 1,69 | 1,57 | 1,54 | 1,69 | 1,32 | 1,67 | 1,59 | 1,61 | 1,70 | 1,61 | 1,59 | 0,112 |
| 0,1875 | 1,59 | 1,55 | 1,74 | 1,57 | 1,58 | 1,42 | 1,36 | 1,71 | 1,63 | 1,57 | 1,75 | 1,64 | 1,59 | 0,118 |
| 0,1922 | 1,43 | 1,34 | 1,62 | 1,63 | 1,60 | 1,57 | 1,36 | 1,68 | 1,67 | 1,60 | 1,67 | 1,65 | 1,57 | 0,123 |
| 0,1969 | 1,61 | 1,61 | 1,62 | 1,63 | 1,61 | 1,60 | 1,39 | 1,62 | 1,68 | 1,67 | 1,60 | 1,67 | 1,61 | 0,078 |
| 0,2016 | 1,59 | 1,58 | 1,60 | 1,67 | 1,66 | 1,58 | 1,28 | 1,58 | 1,63 | 1,69 | 1,60 | 1,61 | 1,59 | 0,103 |

APÊNDICE I - Dados de densidade do tratamento T7, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada (Média de 10 valores),

| Prof. (m) | Amostra | | | | | | | | | | | | Média | Desvio Padrão |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------------------|
| | 401/R1 | 401/R2 | 401/R3 | 411/R1 | 411/R2 | 411/R3 | 421/R1 | 421/R2 | 421/R3 | 425/R1 | 425/R2 | 425/R3 | | |
| 0,0047 | 1,31 | 1,4 | 1,54 | 1,49 | 1,51 | 1,5 | 1,49 | 1,57 | 1,58 | 1,54 | 1,67 | 1,63 | 1,52 | 0,097 |
| 0,0094 | 1,39 | 1,47 | 1,53 | 1,56 | 1,62 | 1,4 | 1,72 | 1,51 | 1,63 | 1,6 | 1,69 | 1,57 | 1,56 | 0,103 |
| 0,0141 | 1,4 | 1,56 | 1,56 | 1,65 | 1,62 | 1,55 | 1,58 | 1,56 | 1,6 | 1,59 | 1,65 | 1,65 | 1,58 | 0,069 |
| 0,0188 | 1,56 | 1,52 | 1,5 | 1,55 | 1,66 | 1,67 | 1,59 | 1,55 | 1,56 | 1,5 | 1,67 | 1,67 | 1,58 | 0,067 |
| 0,0234 | 1,48 | 1,45 | 1,49 | 1,54 | 1,51 | 1,62 | 1,63 | 1,54 | 1,52 | 1,47 | 1,61 | 1,6 | 1,54 | 0,063 |
| 0,0281 | 1,57 | 1,51 | 1,46 | 1,52 | 1,5 | 1,49 | 1,55 | 1,45 | 1,54 | 1,48 | 1,6 | 1,6 | 1,52 | 0,05 |
| 0,0328 | 1,54 | 1,52 | 1,43 | 1,55 | 1,5 | 1,52 | 1,59 | 1,49 | 1,49 | 1,4 | 1,5 | 1,53 | 1,51 | 0,051 |
| 0,0375 | 1,5 | 1,56 | 1,42 | 1,54 | 1,57 | 1,57 | 1,49 | 1,45 | 1,56 | 1,46 | 1,49 | 1,44 | 1,5 | 0,054 |
| 0,0422 | 1,54 | 1,51 | 1,37 | 1,48 | 1,59 | 1,61 | 1,43 | 1,44 | 1,47 | 1,48 | 1,43 | 1,45 | 1,48 | 0,07 |
| 0,0469 | 1,5 | 1,51 | 1,28 | 1,5 | 1,57 | 1,53 | 1,38 | 1,42 | 1,5 | 1,5 | 1,47 | 1,4 | 1,46 | 0,079 |
| 0,0516 | 1,58 | 1,44 | 1,26 | 1,41 | 1,41 | 1,54 | 1,46 | 1,43 | 1,48 | 1,41 | 1,52 | 1,46 | 1,45 | 0,083 |
| 0,0563 | 1,58 | 1,44 | 1,36 | 1,34 | 1,44 | 1,51 | 1,38 | 1,39 | 1,45 | 1,44 | 1,41 | 1,42 | 1,43 | 0,064 |
| 0,0609 | 1,62 | 1,34 | 1,35 | 1,47 | 1,52 | 1,54 | 1,37 | 1,41 | 1,41 | 1,39 | 1,45 | 1,41 | 1,44 | 0,084 |
| 0,0656 | 1,61 | 1,45 | 1,23 | 1,5 | 1,56 | 1,5 | 1,32 | 1,42 | 1,45 | 1,41 | 1,48 | 1,45 | 1,45 | 0,1 |
| 0,0703 | 1,55 | 1,56 | 1,36 | 1,42 | 1,55 | 1,52 | 1,37 | 1,47 | 1,49 | 1,42 | 1,5 | 1,43 | 1,47 | 0,069 |
| 0,0750 | 1,59 | 1,54 | 1,38 | 1,43 | 1,63 | 1,57 | 1,4 | 1,57 | 1,53 | 1,45 | 1,5 | 1,46 | 1,5 | 0,079 |
| 0,0797 | 1,63 | 1,56 | 1,4 | 1,55 | 1,53 | 1,5 | 1,45 | 1,61 | 1,6 | 1,47 | 1,51 | 1,49 | 1,53 | 0,068 |
| 0,0844 | 1,57 | 1,57 | 1,43 | 1,49 | 1,52 | 1,54 | 1,54 | 1,59 | 1,59 | 1,46 | 1,44 | 1,5 | 1,52 | 0,057 |
| 0,0891 | 1,61 | 1,55 | 1,5 | 1,54 | 1,54 | 1,56 | 1,58 | 1,64 | 1,67 | 1,48 | 1,53 | 1,53 | 1,56 | 0,057 |
| 0,0938 | 1,63 | 1,53 | 1,55 | 1,58 | 1,56 | 1,51 | 1,66 | 1,68 | 1,67 | 1,52 | 1,47 | 1,64 | 1,58 | 0,071 |
| 0,0984 | 1,59 | 1,57 | 1,6 | 1,67 | 1,56 | 1,57 | 1,75 | 1,71 | 1,71 | 1,55 | 1,63 | 1,66 | 1,63 | 0,068 |
| 0,1031 | 1,69 | 1,61 | 1,63 | 1,59 | 1,53 | 1,52 | 1,75 | 1,73 | 1,65 | 1,61 | 1,56 | 1,68 | 1,63 | 0,074 |
| 0,1078 | 1,55 | 1,64 | 1,56 | 1,59 | 1,58 | 1,55 | 1,77 | 1,7 | 1,72 | 1,58 | 1,65 | 1,62 | 1,63 | 0,07 |
| 0,1125 | 1,54 | 1,68 | 1,51 | 1,68 | 1,58 | 1,55 | 1,6 | 1,6 | 1,64 | 1,56 | 1,64 | 1,67 | 1,6 | 0,057 |
| 0,1172 | 1,5 | 1,58 | 1,49 | 1,65 | 1,53 | 1,58 | 1,69 | 1,66 | 1,64 | 1,61 | 1,57 | 1,64 | 1,6 | 0,064 |
| 0,1219 | 1,55 | 1,6 | 1,43 | 1,6 | 1,54 | 1,57 | 1,73 | 1,7 | 1,6 | 1,56 | 1,58 | 1,63 | 1,59 | 0,076 |
| 0,1266 | 1,57 | 1,55 | 1,42 | 1,6 | 1,43 | 1,55 | 1,68 | 1,71 | 1,56 | 1,49 | 1,53 | 1,63 | 1,56 | 0,089 |
| 0,1313 | 1,56 | 1,59 | 1,41 | 1,62 | 1,5 | 1,49 | 1,69 | 1,71 | 1,56 | 1,45 | 1,56 | 1,58 | 1,56 | 0,09 |
| 0,1360 | 1,59 | 1,58 | 1,42 | 1,55 | 1,49 | 1,37 | 1,66 | 1,66 | 1,56 | 1,45 | 1,57 | 1,6 | 1,54 | 0,091 |
| 0,1406 | 1,56 | 1,57 | 1,34 | 1,5 | 1,58 | 1,45 | 1,6 | 1,66 | 1,53 | 1,57 | 1,49 | 1,5 | 1,53 | 0,082 |
| 0,1453 | 1,51 | 1,56 | 1,34 | 1,44 | 1,53 | 1,53 | 1,62 | 1,62 | 1,52 | 1,55 | 1,55 | 1,63 | 1,53 | 0,081 |
| 0,1500 | 1,56 | 1,55 | 1,35 | 1,51 | 1,57 | 1,6 | 1,6 | 1,58 | 1,41 | 1,62 | 1,52 | 1,62 | 1,54 | 0,085 |
| 0,1547 | 1,53 | 1,58 | 1,36 | 1,59 | 1,59 | 1,57 | 1,56 | 1,64 | 1,44 | 1,6 | 1,46 | 1,66 | 1,55 | 0,088 |
| 0,1594 | 1,57 | 1,55 | 1,4 | 1,59 | 1,64 | 1,63 | 1,54 | 1,58 | 1,46 | 1,62 | 1,59 | 1,57 | 1,56 | 0,071 |
| 0,1641 | 1,56 | 1,53 | 1,4 | 1,6 | 1,59 | 1,61 | 1,54 | 1,61 | 1,52 | 1,63 | 1,6 | 1,54 | 1,56 | 0,063 |
| 0,1688 | 1,58 | 1,46 | 1,41 | 1,57 | 1,6 | 1,64 | 1,49 | 1,58 | 1,5 | 1,64 | 1,64 | 1,56 | 1,56 | 0,076 |
| 0,1735 | 1,56 | 1,48 | 1,41 | 1,68 | 1,58 | 1,71 | 1,54 | 1,64 | 1,53 | 1,57 | 1,74 | 1,49 | 1,58 | 0,099 |
| 0,1781 | 1,57 | 1,47 | 1,43 | 1,71 | 1,66 | 1,67 | 1,56 | 1,59 | 1,53 | 1,62 | 1,72 | 1,39 | 1,58 | 0,107 |
| 0,1828 | 1,6 | 1,48 | 1,46 | 1,76 | 1,63 | 1,71 | 1,54 | 1,61 | 1,53 | 1,67 | 1,7 | 1,46 | 1,6 | 0,105 |
| 0,1875 | 1,56 | 1,52 | 1,45 | 1,67 | 1,6 | 1,67 | 1,55 | 1,59 | 1,53 | 1,7 | 1,59 | 1,7 | 1,59 | 0,079 |
| 0,1922 | 1,56 | 1,52 | 1,42 | 1,58 | 1,56 | 1,57 | 1,55 | 1,61 | 1,56 | 1,61 | 1,57 | 1,72 | 1,57 | 0,069 |
| 0,1969 | 1,59 | 1,57 | 1,49 | 1,61 | 1,59 | 1,6 | 1,57 | 1,61 | 1,6 | 1,65 | 1,6 | 1,76 | 1,6 | 0,062 |
| 0,2016 | 1,6 | 1,61 | 1,52 | 1,6 | 1,6 | 1,58 | 1,56 | 1,68 | 1,61 | 1,62 | 1,58 | 1,62 | 1,6 | 0,038 |

APÊNDICE J - Dados de densidade do tratamento T8, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada (Média de 10 valores),

| Prof. (m) | Amostra | | | | | | | | | | | | Média | Desvio Padrão |
|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|------------------|
| | 405/R1 | 405/R2 | 405/R3 | 412/R1 | 412/R2 | 412/R3 | 418/R1 | 418/R2 | 418/R3 | 432/R1 | 432/R2 | 432/R3 | | |
| 0,0047 | 1,53 | 1,39 | 1,23 | 1,27 | 1,46 | 1,38 | 1,46 | 1,58 | 1,48 | 1,23 | 1,42 | 1,23 | 1,39 | 0,123 |
| 0,0094 | 1,61 | 1,5 | 1,28 | 1,34 | 1,45 | 1,5 | 1,61 | 1,62 | 1,49 | 1,43 | 1,58 | 1,33 | 1,48 | 0,116 |
| 0,0141 | 1,58 | 1,54 | 1,34 | 1,4 | 1,49 | 1,48 | 1,63 | 1,57 | 1,52 | 1,63 | 1,62 | 1,45 | 1,52 | 0,094 |
| 0,0188 | 1,57 | 1,48 | 1,36 | 1,41 | 1,5 | 1,62 | 1,61 | 1,61 | 1,52 | 1,69 | 1,62 | 1,54 | 1,54 | 0,096 |
| 0,0234 | 1,57 | 1,43 | 1,47 | 1,54 | 1,48 | 1,62 | 1,55 | 1,53 | 1,52 | 1,66 | 1,59 | 1,56 | 1,54 | 0,064 |
| 0,0281 | 1,55 | 1,46 | 1,53 | 1,48 | 1,5 | 1,59 | 1,57 | 1,52 | 1,49 | 1,62 | 1,56 | 1,57 | 1,54 | 0,048 |
| 0,0328 | 1,56 | 1,48 | 1,59 | 1,57 | 1,5 | 1,55 | 1,56 | 1,52 | 1,51 | 1,62 | 1,55 | 1,59 | 1,55 | 0,042 |
| 0,0375 | 1,57 | 1,5 | 1,62 | 1,61 | 1,56 | 1,56 | 1,53 | 1,5 | 1,53 | 1,58 | 1,57 | 1,57 | 1,56 | 0,039 |
| 0,0422 | 1,57 | 1,52 | 1,49 | 1,55 | 1,57 | 1,52 | 1,54 | 1,51 | 1,53 | 1,57 | 1,56 | 1,53 | 1,54 | 0,026 |
| 0,0469 | 1,51 | 1,53 | 1,52 | 1,57 | 1,55 | 1,56 | 1,53 | 1,49 | 1,53 | 1,55 | 1,53 | 1,53 | 1,53 | 0,022 |
| 0,0516 | 1,56 | 1,5 | 1,37 | 1,58 | 1,53 | 1,56 | 1,53 | 1,53 | 1,51 | 1,59 | 1,55 | 1,51 | 1,53 | 0,057 |
| 0,0563 | 1,49 | 1,52 | 1,53 | 1,55 | 1,6 | 1,56 | 1,46 | 1,49 | 1,47 | 1,55 | 1,53 | 1,5 | 1,52 | 0,04 |
| 0,0609 | 1,54 | 1,56 | 1,49 | 1,54 | 1,56 | 1,52 | 1,48 | 1,56 | 1,46 | 1,55 | 1,54 | 1,5 | 1,52 | 0,034 |
| 0,0656 | 1,5 | 1,49 | 1,49 | 1,52 | 1,6 | 1,58 | 1,51 | 1,52 | 1,4 | 1,55 | 1,6 | 1,53 | 1,52 | 0,055 |
| 0,0703 | 1,53 | 1,51 | 1,55 | 1,57 | 1,58 | 1,53 | 1,55 | 1,55 | 1,38 | 1,54 | 1,57 | 1,57 | 1,54 | 0,052 |
| 0,0750 | 1,49 | 1,52 | 1,55 | 1,58 | 1,64 | 1,51 | 1,55 | 1,57 | 1,5 | 1,54 | 1,57 | 1,61 | 1,55 | 0,044 |
| 0,0797 | 1,52 | 1,52 | 1,56 | 1,58 | 1,61 | 1,59 | 1,54 | 1,6 | 1,47 | 1,55 | 1,6 | 1,58 | 1,56 | 0,043 |
| 0,0844 | 1,46 | 1,51 | 1,56 | 1,61 | 1,64 | 1,63 | 1,55 | 1,59 | 1,52 | 1,6 | 1,64 | 1,64 | 1,58 | 0,059 |
| 0,0891 | 1,51 | 1,54 | 1,56 | 1,6 | 1,65 | 1,63 | 1,53 | 1,58 | 1,45 | 1,6 | 1,59 | 1,54 | 1,57 | 0,055 |
| 0,0938 | 1,5 | 1,56 | 1,59 | 1,63 | 1,65 | 1,66 | 1,58 | 1,55 | 1,43 | 1,63 | 1,54 | 1,57 | 1,57 | 0,066 |
| 0,0984 | 1,57 | 1,61 | 1,62 | 1,64 | 1,65 | 1,63 | 1,59 | 1,51 | 1,52 | 1,59 | 1,59 | 1,52 | 1,59 | 0,048 |
| 0,1031 | 1,58 | 1,67 | 1,62 | 1,61 | 1,6 | 1,62 | 1,68 | 1,6 | 1,61 | 1,56 | 1,61 | 1,56 | 1,61 | 0,036 |
| 0,1078 | 1,53 | 1,62 | 1,65 | 1,68 | 1,5 | 1,71 | 1,6 | 1,59 | 1,52 | 1,64 | 1,64 | 1,57 | 1,6 | 0,064 |
| 0,1125 | 1,62 | 1,59 | 1,59 | 1,66 | 1,5 | 1,66 | 1,58 | 1,6 | 1,56 | 1,6 | 1,66 | 1,51 | 1,59 | 0,053 |
| 0,1172 | 1,6 | 1,61 | 1,63 | 1,63 | 1,6 | 1,63 | 1,62 | 1,6 | 1,51 | 1,6 | 1,61 | 1,52 | 1,6 | 0,039 |
| 0,1219 | 1,59 | 1,57 | 1,57 | 1,63 | 1,62 | 1,63 | 1,62 | 1,56 | 1,58 | 1,63 | 1,61 | 1,55 | 1,6 | 0,029 |
| 0,1266 | 1,6 | 1,57 | 1,51 | 1,63 | 1,62 | 1,62 | 1,6 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,55 | 1,53 | 1,58 | 0,036 |
| 0,1313 | 1,58 | 1,56 | 1,5 | 1,61 | 1,57 | 1,62 | 1,55 | 1,54 | 1,52 | 1,55 | 1,57 | 1,52 | 1,56 | 0,036 |
| 0,1360 | 1,51 | 1,44 | 1,51 | 1,56 | 1,57 | 1,6 | 1,58 | 1,52 | 1,51 | 1,55 | 1,52 | 1,51 | 1,53 | 0,042 |
| 0,1406 | 1,5 | 1,48 | 1,52 | 1,58 | 1,53 | 1,66 | 1,55 | 1,47 | 1,47 | 1,56 | 1,53 | 1,52 | 1,53 | 0,054 |
| 0,1453 | 1,48 | 1,52 | 1,52 | 1,54 | 1,55 | 1,73 | 1,54 | 1,5 | 1,21 | 1,53 | 1,52 | 1,53 | 1,51 | 0,116 |
| 0,1500 | 1,47 | 1,52 | 1,54 | 1,56 | 1,54 | 1,61 | 1,51 | 1,5 | 1,46 | 1,55 | 1,51 | 1,54 | 1,53 | 0,041 |
| 0,1547 | 1,49 | 1,52 | 1,48 | 1,55 | 1,6 | 1,62 | 1,5 | 1,48 | 1,45 | 1,54 | 1,54 | 1,56 | 1,53 | 0,05 |
| 0,1594 | 1,56 | 1,56 | 1,45 | 1,56 | 1,61 | 1,57 | 1,45 | 1,49 | 1,55 | 1,52 | 1,53 | 1,49 | 1,53 | 0,049 |
| 0,1641 | 1,51 | 1,52 | 1,48 | 1,51 | 1,61 | 1,48 | 1,53 | 1,48 | 1,56 | 1,54 | 1,52 | 1,52 | 1,52 | 0,036 |
| 0,1688 | 1,56 | 1,47 | 1,47 | 1,5 | 1,62 | 1,65 | 1,53 | 1,54 | 1,56 | 1,57 | 1,56 | 1,5 | 1,54 | 0,056 |
| 0,1735 | 1,49 | 1,51 | 1,48 | 1,59 | 1,6 | 1,65 | 1,53 | 1,52 | 1,51 | 1,58 | 1,52 | 1,58 | 1,55 | 0,053 |
| 0,1781 | 1,46 | 1,42 | 1,6 | 1,55 | 1,65 | 1,72 | 1,57 | 1,57 | 1,53 | 1,58 | 1,56 | 1,59 | 1,57 | 0,078 |
| 0,1828 | 1,44 | 1,49 | 1,69 | 1,7 | 1,68 | 1,79 | 1,63 | 1,6 | 1,43 | 1,63 | 1,59 | 1,62 | 1,61 | 0,107 |
| 0,1875 | 1,48 | 1,55 | 1,72 | 1,71 | 1,7 | 1,75 | 1,67 | 1,62 | 1,39 | 1,58 | 1,64 | 1,68 | 1,62 | 0,106 |
| 0,1922 | 1,49 | 1,5 | 1,71 | 1,74 | 1,7 | 1,78 | 1,65 | 1,6 | 1,41 | 1,66 | 1,64 | 1,65 | 1,63 | 0,116 |
| 0,1969 | 1,55 | 1,69 | 1,77 | 1,77 | 1,73 | 1,76 | 1,68 | 1,66 | 1,57 | 1,7 | 1,73 | 1,69 | 1,69 | 0,075 |
| 0,2016 | 1,53 | 1,65 | 1,7 | 1,79 | 1,77 | 1,62 | 1,72 | 1,67 | 1,42 | 1,68 | 1,66 | 1,64 | 1,65 | 0,1 |

APÊNDICE K - Dados médios de densidade de todos os tratamentos, obtidos pelo Método da Tomografia Computadorizada. (Média de 120 valores)

| Profundidade | Tratamento | | | | | | |
|--------------|------------|------|------|------|------|------|------|
| | T1 | T2 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 |
| 0,0047 | 1,49 | 1,48 | 1,56 | 1,62 | 1,45 | 1,52 | 1,39 |
| 0,0094 | 1,54 | 1,51 | 1,61 | 1,62 | 1,48 | 1,56 | 1,48 |
| 0,0141 | 1,57 | 1,50 | 1,60 | 1,60 | 1,52 | 1,58 | 1,52 |
| 0,0188 | 1,58 | 1,48 | 1,58 | 1,57 | 1,53 | 1,58 | 1,54 |
| 0,0234 | 1,57 | 1,50 | 1,57 | 1,55 | 1,54 | 1,54 | 1,54 |
| 0,0281 | 1,53 | 1,48 | 1,54 | 1,55 | 1,52 | 1,52 | 1,54 |
| 0,0328 | 1,53 | 1,47 | 1,55 | 1,54 | 1,51 | 1,51 | 1,55 |
| 0,0375 | 1,52 | 1,47 | 1,53 | 1,51 | 1,49 | 1,50 | 1,56 |
| 0,0422 | 1,51 | 1,45 | 1,52 | 1,50 | 1,48 | 1,48 | 1,54 |
| 0,0469 | 1,49 | 1,43 | 1,51 | 1,50 | 1,47 | 1,46 | 1,53 |
| 0,0516 | 1,45 | 1,43 | 1,48 | 1,49 | 1,44 | 1,45 | 1,53 |
| 0,0563 | 1,44 | 1,45 | 1,48 | 1,50 | 1,39 | 1,43 | 1,52 |
| 0,0609 | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,50 | 1,42 | 1,44 | 1,52 |
| 0,0656 | 1,47 | 1,49 | 1,51 | 1,50 | 1,44 | 1,45 | 1,52 |
| 0,0703 | 1,48 | 1,51 | 1,53 | 1,52 | 1,48 | 1,47 | 1,54 |
| 0,0750 | 1,50 | 1,49 | 1,53 | 1,54 | 1,51 | 1,50 | 1,55 |
| 0,0797 | 1,54 | 1,55 | 1,52 | 1,59 | 1,56 | 1,53 | 1,56 |
| 0,0844 | 1,57 | 1,56 | 1,57 | 1,60 | 1,59 | 1,52 | 1,58 |
| 0,0891 | 1,59 | 1,59 | 1,58 | 1,60 | 1,61 | 1,56 | 1,57 |
| 0,0938 | 1,58 | 1,59 | 1,60 | 1,62 | 1,61 | 1,58 | 1,57 |
| 0,0984 | 1,62 | 1,58 | 1,61 | 1,65 | 1,62 | 1,63 | 1,59 |
| 0,1031 | 1,60 | 1,57 | 1,61 | 1,67 | 1,60 | 1,63 | 1,61 |
| 0,1078 | 1,61 | 1,65 | 1,62 | 1,69 | 1,59 | 1,63 | 1,60 |
| 0,1125 | 1,62 | 1,64 | 1,63 | 1,70 | 1,56 | 1,60 | 1,59 |
| 0,1172 | 1,65 | 1,62 | 1,64 | 1,70 | 1,58 | 1,60 | 1,60 |
| 0,1219 | 1,62 | 1,64 | 1,64 | 1,70 | 1,56 | 1,59 | 1,60 |
| 0,1266 | 1,60 | 1,62 | 1,63 | 1,68 | 1,54 | 1,56 | 1,58 |
| 0,1313 | 1,57 | 1,60 | 1,61 | 1,67 | 1,52 | 1,56 | 1,56 |
| 0,1360 | 1,57 | 1,59 | 1,60 | 1,65 | 1,51 | 1,54 | 1,53 |
| 0,1406 | 1,54 | 1,58 | 1,59 | 1,61 | 1,51 | 1,53 | 1,53 |
| 0,1453 | 1,54 | 1,57 | 1,58 | 1,61 | 1,50 | 1,53 | 1,51 |
| 0,1500 | 1,52 | 1,56 | 1,58 | 1,58 | 1,50 | 1,54 | 1,53 |
| 0,1547 | 1,50 | 1,53 | 1,58 | 1,57 | 1,50 | 1,55 | 1,53 |
| 0,1594 | 1,54 | 1,53 | 1,58 | 1,58 | 1,51 | 1,56 | 1,53 |
| 0,1641 | 1,53 | 1,56 | 1,60 | 1,58 | 1,51 | 1,56 | 1,52 |
| 0,1688 | 1,54 | 1,58 | 1,61 | 1,56 | 1,54 | 1,56 | 1,54 |
| 0,1735 | 1,56 | 1,59 | 1,63 | 1,59 | 1,54 | 1,58 | 1,55 |
| 0,1781 | 1,57 | 1,62 | 1,61 | 1,59 | 1,58 | 1,58 | 1,57 |
| 0,1828 | 1,59 | 1,65 | 1,63 | 1,60 | 1,59 | 1,60 | 1,61 |
| 0,1875 | 1,60 | 1,68 | 1,68 | 1,61 | 1,59 | 1,59 | 1,62 |
| 0,1922 | 1,64 | 1,66 | 1,70 | 1,63 | 1,57 | 1,57 | 1,63 |
| 0,1969 | 1,61 | 1,64 | 1,68 | 1,68 | 1,61 | 1,60 | 1,69 |
| 0,2016 | 1,61 | 1,66 | 1,70 | 1,70 | 1,59 | 1,60 | 1,65 |

APÊNDICE L – Fatores de correção aplicados aos dados de Tomografia Computadorizada.

| Distância (m) | Fator de Correção | Distância (m) | Fator de Correção. |
|----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| 0,0047 | 0,964 | 0,1078 | 0,964 |
| 0,0094 | 0,979 | 0,1125 | 0,979 |
| 0,0141 | 0,992 | 0,1172 | 0,992 |
| 0,0188 | 1,004 | 0,1219 | 1,004 |
| 0,0234 | 1,015 | 0,1266 | 1,015 |
| 0,0281 | 1,024 | 0,1313 | 1,024 |
| 0,0328 | 1,032 | 0,1360 | 1,032 |
| 0,0375 | 1,039 | 0,1406 | 1,039 |
| 0,0422 | 1,043 | 0,1453 | 1,043 |
| 0,0469 | 1,046 | 0,1500 | 1,046 |
| 0,0516 | 1,048 | 0,1547 | 1,048 |
| 0,0563 | 1,047 | 0,1594 | 1,047 |
| 0,0609 | 1,045 | 0,1641 | 1,045 |
| 0,0656 | 1,041 | 0,1688 | 1,041 |
| 0,0703 | 1,036 | 0,1735 | 1,036 |
| 0,0750 | 1,028 | 0,1781 | 1,028 |
| 0,0797 | 1,020 | 0,1828 | 1,020 |
| 0,0844 | 1,010 | 0,1875 | 1,010 |
| 0,0891 | 0,998 | 0,1922 | 0,998 |
| 0,0938 | 0,986 | 0,1969 | 0,986 |
| 0,0984 | 0,972 | 0,2016 | 0,972 |
| 0,1031 | 0,957 | 0,2063 | 0,957 |