

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**PREPAROS E PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM
SOLO ARENOSO PARA CANA-DE-AÇÚCAR E
MANDIOCA NO RIO GRANDE DO SUL**

TESE DE DOUTORADO

Eracilda Fontanela

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**PREPAROS E PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM SOLO
ARENOSO PARA CANA-DE-AÇÚCAR E MANDIOCA NO RIO
GRANDE DO SUL**

Eracilda Fontanela

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogenéticos do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**PREPAROS E PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM SOLO
ARENOSO PARA CANA-DE-AÇÚCAR E MANDIOCA NO RIO
GRANDE DO SUL**

elaborada por
Eracilda Fontanela

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert, PhD.
(Presidente/Orientador)

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki, Dr. (UFPEL)

Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)

Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)

Adriano Dicesar Martins de Araujo Gonçalves, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 29 de fevereiro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, meu agradecimento é a Deus por ter me iluminado e pelas bênçãos no decorrer de meu caminho, para que eu não esmorecesse e tivesse força em cada obstáculo enfrentado.

Agradeço também à Capes por ter me concedido bolsa de estudos durante todo o período do trabalho.

À UFSM por ter oportunizado estudar em uma instituição de qualidade e com profissionais tão qualificados, em especial aos professores do PPGCS, os quais tive o privilégio de tê-los como meus verdadeiros mestres. Obrigada pelos ensinamentos e por terem partilhado seus conhecimentos.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas, de forma muito especial aos meus verdadeiros amigos, que contribuíram para a realização desse trabalho, quer seja nas atividades intensas de campo, de laboratório e da vida, contribuindo para o meu crescimento, aprendizado e desenvolvimento deste trabalho. Além disso, sou muito grata aos meus amigos que conquistei durante a realização deste trabalho e período que estive na UFSM: o apoio, o incentivo e a companhia foram essenciais para a minha persistência nos objetivos de vida.

Além disso, agradeço o carinho e apoio dos meus amigos que conquistei nesse ano no IFRS – Câmpus Ibirubá. Independente dos nossos destinos, sempre guardarei as melhores lembranças com muito carinho e saudades de vocês.

E, por fim, agradeço toda a minha família, pela educação e os princípios de vida que sempre foram muito importantes para o equilíbrio em meus atos em toda a minha trajetória.

Ao meu amor, pelo carinho e incentivo.

Muito obrigada por tudo! Jamais esquecerei cada um de vocês.

“As pessoas esquecerão certos problemas

Perdoarão certas falhas

Mas jamais perdoarão como você as tratou (Cesar Souza)”

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

PREPAROS E PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM SOLO ARENOSO PARA CANA-DE-AÇÚCAR E MANDIOCA NO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: ERACILDA FONTANELA

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Local e data de defesa: Santa Maria, 29 de fevereiro de 2012.

A crescente demanda de biocombustíveis como alternativa em substituição aos combustíveis derivados de petróleo tem instigado aumento da produção das culturas bioenergéticas. A metade sul do estado do Rio Grande do Sul, por apresentar limitações hídricas para a produção da soja, tem recebido incentivos governamentais para a produção dessas culturas, em especial às culturas da cana-de-açúcar e da mandioca. No entanto, há necessidade de informações mais precisas quanto ao manejo adequado a essas culturas, e as influências das propriedades físico-hídricas e mecânicas do solo sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas. Nesse sentido, o presente estudo objetivou determinar o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo nos seus atributos físicos, hídricos e mecânicos e na produtividade da cana-de-açúcar e da mandioca. O estudo foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Em dois experimentos foram plantadas as culturas da cana-de-açúcar e da mandioca, em delineamento de blocos ao acaso com três repetições, sob diferentes sistemas de manejo e níveis de compactação: plantio convencional (PC), escarificado (ESC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC). Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas para determinação dos parâmetros físico-hídricos do solo: densidade, distribuição do tamanho de poros, curva de retenção de água, fluxos de ar e água, intervalo hídrico ótimo e os parâmetros compressivos: pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (IC) e elasticidade do solo. Além disso, foram calculados os indicadores de qualidade do solo: índice S e densidade relativa (DR) ou grau de compactação (GC). O preparo do solo com mobilização (PC e ESC) altera a camada compactada do solo, pela diminuição da sua densidade e aumentando a macroporosidade e a porosidade total, mas esses efeitos são temporários e o solo volta a se tornar adensado comprometendo a funcionalidade da estrutura do solo e o desenvolvimento das plantas. A compactação adicional pelo tráfego da carregadora modifica a estrutura do Argissolo Vermelho-Amarelo, em função do aumento da densidade e alterações na distribuição dos poros do solo, com redução da macroporosidade e porosidade total, comprometendo a condutividade à água e ao ar no solo. As camadas mais profundas foram responsáveis pelo maior armazenamento de água no solo. Na cultura da cana-de-açúcar, o PDC e o ESC retêm maior conteúdo de água, enquanto na cultura da mandioca, é o PD e o ESC. Pelo rendimento de ambas as culturas em associação com os parâmetros estudados, o plantio direto é o manejo do solo que oferece as melhores condições físicas, sendo indicado para produção de cana-de-açúcar e mandioca.

Palavras-chave: culturas bioenergéticas, níveis de compactação, disponibilidade de água.

ABSTRACT

Doctorate Thesis
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

PREPARATION AND PHYSICAL PROPERTIES OF A SANDY SOIL I SUGAR CANE AND CASSAVA IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: ERACILDA FONTANELA
ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Date and Place of the Defense: Santa Maria, February 29, 2012.

The growing demand for biofuels as alternative to petroleum-based fuels has instigated increased production of bioenergy crops. The southern half of Rio Grande do Sul, by having limited water resources for the production of soy, has received government incentives for the production of these crops, especially crops of sugar cane and cassava. However, there is need for more precise information regarding the proper management of these crops, and the influences of physical and hydraulic properties and mechanical soil on the growth and development of plants. Accordingly, this study aimed to determine the effect of different tillage systems on soil physical attributes, water and soil mechanics and its effects on the productivity of sugar cane and cassava. The study was conducted in the experimental area of the Soils Department, Federal University of Santa Maria in a Hapludalf. In two experiments were planted crops of sugar cane and cassava, in randomized blocks with three replications under different management systems and levels of compression: conventional tillage (CT) no tillage chiseled (NTC) no tillage (NT) and no tillage compacted (NTC_{omp}). Soil samples with preserved structure were collected for determination of physico-hydric soil density, pore size distribution curve of water retention, air and water flows, optimal water and compressive parameters: preconsolidation pressure (PP), compression index (CI) and elasticity of the soil. In addition, we calculated the indicators of soil quality: S ratio and relative density (RD) or degree of compression (GC). Soil preparation with mobilization (CT and NTC) alters the compacted soil, reducing soil bulk density and increased macroporosity and total porosity, but these effects are temporary and soil back to become thickened compromising the functionality of soil structure and plant development. A further compaction by traffic loader modifies the structure of Hapludalf, due to the increase in density and changes in distribution of soil pores, reducing macroporosity and total porosity, affecting the conductivity to water and air in the soil. The deeper layers were responsible for increased water storage in the soil. In the culture of cane sugar, NTC and NTC_{omp} retains higher water content, while the cassava crop, is the NT and NTC. Yield of both crops in association with the studied parameters, no-till soil management is offering the best physical condition and is indicated for production of sugar cane and cassava.

Keys words: bioenergy crops, soil compaction levels, water availability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios de areia, silte e argila (g kg ⁻¹) nas cinco camadas de solo amostradas.	52
Tabela 2 – Caracterização química do solo da área em estudo para produção de cana-de-açúcar e mandioca. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.....	52
Tabela 3 - Densidade do solo (Mg m ⁻³), macroporosidade, microporosidade e porosidade total (m ³ m ⁻³) da primeira época, nos quatro tratamentos e nas quatro camadas para a cultura da cana-de-açúcar.	71
Tabela 4 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa) e de índice de compressão (IC) para os preparos e manejos do solo, nas três camadas em estudo da época 1 para a cultura da cana-de-açúcar.	74
Tabela 5 - Densidade do solo (Mg m ⁻³), macro e microporosidade e porosidade total (m ³ m ⁻³) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da cana-de-açúcar na época 2.	76
Tabela 6 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h ⁻¹) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da cana-de-açúcar, na época 2.....	77
Tabela 7 – Correlação de Pearson entre os parâmetros físicos do solo: densidade do solo, macro e microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica do solo saturado.	79
Tabela 8 – Índice S para o Argissolo Vermelho Amarelo nos tratamentos e camadas em estudo para a cultura da cana-de-açúcar na época 2, calculado a partir das curvas de retenção de água.....	103
Tabela 9 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (σ_c), índice de recuperação (Ir) e coeficiente de descompressão (Cd) para os preparos e manejos do solo em estudo para a cana-de-açúcar na época 2.	105
Tabela 10 – Densidade máxima obtida na carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial e grau de compactação (GC) para os preparos e manejos nas camadas do solo em estudo para a cultura da cana-de-açúcar na época 2.	107

Tabela 11 – Densidade do solo (kg m^{-3}), macroporosidade, microporosidade e porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), em quatro profundidades e nos diferentes tratamentos para a cultura da mandioca na época 1.....	111
Tabela 12 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa) e de índice de compressão (IC) para os preparos e manejos do solo, nas três camadas em estudo da época 1 para a cultura da mandioca.	114
Tabela 13 - Densidade do solo (Mg m^{-3}), macro e microporosidade e porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da mandioca na época 2..	115
Tabela 14 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da mandioca, na época 2.....	116
Tabela 15 – Correlação de Pearson entre os parâmetros físicos do solo: densidade do solo, macro e microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica do solo saturado.	117
Tabela 16 – Índice S para o Argissolo Vermelho Amarelo nos tratamentos e camadas em estudo para a cultura da mandioca na época 2, calculado a partir das curvas de retenção de água.....	135
Tabela 17 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (IC), índice de recuperação (Ir) e coeficiente de descompressão (Cd) para os preparos e manejos do solo em estudo para a cultura da mandioca na época 2.	136
Tabela 18 – Densidade máxima obtida na carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial e grau de compactação (GC) para os preparos e manejos nas camadas do solo em estudo para a cultura da mandioca na época 2.....	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhamento dos manejos e preparos do solo para implantação das culturas da cana-de-açúcar e da mandioca. A) plantio convencional (aração e gradagem); B) plantio escarificado; C) plantio direto compactado.	53
Figura 2 – Esquema da área experimental destinada à produção de cana-de-açúcar. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.	54
Figura 3 – Detalhamento da abertura dos sulcos nos tratamentos para a produção de cana-de-açúcar. Departamento de Solos. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.	55
Figura 4 – Esquema do posicionamento do experimento no campo para produção de mandioca. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.	56
Figura 5 – Detalhamento da abertura dos sulcos nos tratamentos para a produção da mandioca. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria– RS.	56
Figura 6 – Resistência do solo à penetração e conteúdo volumétrico de água na entrelinha (A) e na linha (B) do escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) nas camadas em estudo da primeira época. * significativo a 5% de probabilidade de erro; ns = não significativo pelo teste DMS.	73
Figura 7 – Distribuição do tamanho de poros para os diferentes tratamentos: escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) e camadas: 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40 a 0,60 m.	81
Figura 8 - Permeabilidade do solo ao ar (μm^2), nos potenciais de água (-6, -10, -33 kPa), nas camadas e tratamentos para a cultura da cana-de-açúcar. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	83
Figura 9 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,00 a 0,05 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	85
Figura 10 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,05 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	86

Figura 11 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	87
Figura 12 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	88
Figura 13 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,40 a 0,60 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	89
Figura 14 – Precipitação diária ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar medidos na estação automática de Santa Maria/RS.....	90
Figura 15 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,00 a 0,05 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	92
Figura 16 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,05 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	93
Figura 17 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	94
Figura 18 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	95
Figura 19 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,40 a 0,60 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, plantio direto compactado.	96
Figura 20 – Água disponível no solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar para os quatro tratamentos em estudo. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	98

Figura 21 – Curva de retenção de água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten dos preparos e manejo do solo na época 2.	99
Figura 22 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC $\psi = -10$ kPa), ponto de murcha permanente (PMP $\psi = -1500$ kPa), porosidade de aeração (PA) de 10%, e resistência à penetração (RP) de 2,0 MPa, para os quatro tratamentos e em todas as camadas estudadas. A área hachurada corresponde ao IHO.	100
Figura 23 – Produtividade da cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos estudados.....	108
Figura 24 – Resistência do solo à penetração e conteúdo volumétrico de água na entrelinha (A) e na linha (B) do plantio para o escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) nas camadas de solo em estudo sob plantio de mandioca na época 1. * significativo a 5% de probabilidade de erro; ns = não significativo pelo teste DMS.	112
Figura 25 – Distribuição do tamanho de poros para os diferentes tratamentos: escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) e camadas: 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40 a 0,60 m na cultura da mandioca.	119
Figura 26 - Permeabilidade do solo ao ar (μm^2), nos potenciais de água (-6, -10, -33 e -100 kPa), nas camadas e tratamentos para a cultura da mandioca. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	120
Figura 27 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,00 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.....	122
Figura 28 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.....	123
Figura 29 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.....	124

Figura 30 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,00 a 0,05 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	126
Figura 31 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,05 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	127
Figura 32 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	128
Figura 33 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.	129
Figura 34 – Água disponível no solo ao longo do ciclo da mandioca para os tratamentos: escarificado, plantio convencional, plantio direto e plantio direto compactado.	130
Figura 35 – Curva de Retenção de Água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten dos preparos e manejo do solo sob mandioca na época 2.	132
Figura 36 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo ($CC \psi = -10$ kPa), ponto de murcha permanente (PMP $\psi = -1500$ kPa), porosidade de aeração (PA) de 10%, e resistência à penetração (RP) de 2,0 MPa para o plantio direto (C) e plantio direto compactado (D) cultivado com mandioca. A área hachurada corresponde ao IHO.	134
Figura 37 – Produtividade da mandioca para os preparos e manejos do solo em estudo.	140

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 HIPÓTESE.....	29
3 OBJETIVOS	31
3.1 Geral	31
3.2 Específicos	31
4 REVISÃO	33
4.1 Biocombustível.....	33
4.2 Cana de açúcar	34
4.3 Mandioca	36
4.4 Manejo e preparo do solo.....	38
4.5 Parâmetros mecânicos do solo.....	42
4.6 Qualidade do solo	47
5 MATERIAL E MÉTODOS	51
5.1 Local e clima	51
5.2 Solo e tratamentos	51
5.3 Experimento com cana-de-açúcar.....	54
5.4 Experimento com mandioca	55
5.5 Amostragens.....	57
5.6 Determinações e avaliações.....	58
5.6.1 Textura do solo, carbono orgânico e densidade de partículas	58
5.6.2 Densidade do solo, porosidade e curva de retenção de água.....	58
5.6.3 Capacidade de suporte de carga e resistência do solo à compactação	59
5.6.4 Elasticidade do solo	60
5.6.5 Permeabilidade do solo ao ar.....	60
5.6.6 Condutividade hidráulica solo saturado	61
5.6.7 Curva de retenção de água no solo	62
5.6.8 Índice S	63
5.6.9 Intervalo hídrico ótimo do solo como indicador de qualidade do solo	63
5.6.10 Determinação da densidade relativa do solo	65
5.6.11 Disponibilidade hídrica às plantas.....	65

5.6.12 Produtividade.....	66
5.7 Análise dos dados.....	66
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.1 Cana-de-açúcar	69
6.1.1 Propriedades físicas do solo (época 1)	69
6.1.2 Parâmetros físico-hídricos (época 2)	75
6.1.2.1 Intervalo hídrico ótimo (IHO)	100
6.1.2.2 Índice S	101
6.1.3 Parâmetros mecânicos	103
6.1.4 Produtividade.....	107
6.2 Mandioca	109
6.2.1 Propriedades físicas do solo (época 1)	109
6.2.2 Parâmetros físico-hídricos (época 2)	114
6.2.2.1 Intervalo hídrico ótimo (IHO)	132
6.2.2.2 Índice S	134
6.2.4 Parâmetros mecânicos	135
6.2.4 Produtividade.....	139
7 CONCLUSÕES.....	141
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	143
REFERÊNCIAS	145
APÊNDICES	157

1 INTRODUÇÃO

O etanol é um combustível promissor por ser considerado, por alguns especialistas, limpo e renovável. O Brasil é um dos principais produtores de etanol do mundo, sendo de açúcar a principal matéria prima. No entanto, outras culturas também têm sido utilizadas para a sua fabricação como é o caso da beterraba, do milho, da mandioca, entre outros. A região central do Brasil é a principal responsável pela produção de cana-de-açúcar destinada à fabricação do biocombustível.

A cana-de-açúcar é uma cultura que está em grande expansão, principalmente em regiões não tradicionais em função das condições de clima e solo. O Rio Grande do Sul não é autossuficiente em etanol, sendo sua demanda toda dependente de importação do produto de outros estados. No estado, a maior produção de cana-de-açúcar ocorre no noroeste do estado. Produzida em pequenas propriedades com mão de obra familiar, a cana-de-açúcar é destinada à produção artesanal de açúcar, o melado, a cachaça em agroindústrias.

O Rio Grande do Sul apresenta, em sua Metade Sul, carência de alternativas à pecuária extensiva que sejam rentáveis. Isso ocorre em parte devido às condições de solo e clima nessa região, que limitam a agricultura pelo elevado risco de perdas por razões climáticas, principalmente por deficiência hídrica. De acordo com o zoneamento agrícola do MAPA, a cana-de-açúcar tem potencial de crescimento e desenvolvimento na Metade Sul do Rio Grande do Sul. Desse modo, necessita-se de dados de pesquisa sobre os patamares de produtividade da cultura nessas condições de clima, pois a cultura plantada em um mesmo tipo de solo atinge produtividade distinta, por causa do clima diferente de cada região. Nesse sentido, a publicação do zoneamento agrícola para a cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul (BRASIL, 2009), evidencia a possibilidade de expandir a produção sucroalcooleira no estado.

A lavoura canavieira caracteriza-se pelo preparo de solo intensivo para o plantio, causando degradação das propriedades físicas e mecânicas do solo. Essa situação é ainda mais agravada com uma alta compactação dos solos em áreas mecanizadas, que requerem uso de máquinas pesadas ao longo do ciclo (SILVA, 2003). Apesar disso, a cana pode ser considerada uma excelente alternativa para adição de resíduos culturais em sistemas de produção agrícola, pois pode produzir de 10 a 30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de palha nos canaviais colhidos sem queima (TRIVELIN et al., 1996), a qual pode reduzir os efeitos do tráfego de máquinas e implementos sobre as propriedades físicas e mecânicas do solo.

Por outro lado, em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, sabe-se que a trafegabilidade é intensa durante todo o ciclo da cultura e, em virtude da modernização do sistema e o consequente surgimento de maquinários maiores e mais sofisticados, proporcionou o aumento do peso do maquinário e dos implementos agrícolas. Com isso, a intensidade de uso do solo em condições de umidade inadequada e solo “nu”, dentre outros, causa compactação do solo, trazendo prejuízos para a produtividade das culturas e contribuindo com os processos erosivos (ROQUE et al., 2011).

Similarmente, a cultura da mandioca vem crescendo sua produção voltada à fabricação do etanol. A mandioca é uma planta rústica, com ampla adaptação às condições mais variadas de clima e solo. Solos arenosos ou de textura média são ideais para cultivar mandioca, pois possibilitam fácil crescimento das raízes, têm boa drenagem e apresentam facilidade de colheita. No entanto, é preciso adequar sistemas de preparo e manejo do solo que evitem aumento da densidade do solo, pois as suas raízes tuberosas apresentam elevada sensibilidade à compactação e podem comprometer a produtividade da mandioca (HOWELER et al., 1993). A adoção de sistemas de preparo com mínimo revolvimento do solo, que mantêm em superfície os resíduos de culturas de cobertura, tem sido preconizada por constituírem uma alternativa tecnicamente viável para a cultura (OLIVEIRA et al., 2001).

O preparo do solo para produção da mandioca é tradicionalmente realizado com uma aração e duas gradagens, o que pode causar compactação nas camadas inferiores à mobilização pela ação do pé de arado e erosão do solo e a diminuição da produtividade. O uso de plantas de cobertura do solo como adubação verde e o preparo do solo através do método de cultivo mínimo podem contribuir na diminuição do processo erosivo do solo e facilitar a colheita manual. A grande maioria dos estudos sobre condições físicas do solo foi feita no Paraná no norte do Brasil. Portanto, há grande lacuna no conhecimento para a região do extremo sul do país.

Apesar de estudos para o zoneamento agrícola dessas culturas na região, faltam pesquisas com relação ao manejo do solo, às propriedades físico-hídricas e mecânicas do solo para essas culturas nas regiões do estado que são aptas ao cultivo. A disponibilidade hídrica, a porosidade e a estrutura dos solos e a interação destas características com a produção vegetal não estão suficientemente descritas para as culturas da cana-de-açúcar e mandioca.

2 HIPÓTESE

A cana-de-açúcar e a mandioca tem grande potencial produtivo para desenvolver-se em solos de textura arenosa (solos tipo 1) podendo, portanto, serem usadas como culturas alternativas à soja na metade sul do Rio Grande do Sul.

A ação mecânica do preparo e manejo do solo provocam mudanças na estrutura e no conteúdo de água armazenada, conseqüentemente, ocasionam ação negativa no crescimento e desenvolvimento das culturas.

Os sistemas de manejo plantio direto e escarificado, por não apresentarem mobilização intensiva e manterem os resíduos culturais na superfície do solo, dispõem de maior conteúdo de água disponível às plantas, menor densidade do solo, maior porosidade de aeração e conteúdo de carbono orgânico, e essa melhoria na qualidade estrutural e reduz a compactação do solo, proporcionando maior produtividade das culturas.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Determinar o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo nos atributos físicos, hídricos e mecânicos, e a produtividade da cana-de-açúcar e da mandioca em um Argissolo na Metade Sul do RS.

3.2 Específicos

- a) Avaliar a disponibilidade temporal de água no solo nos cultivos nos sistemas de manejo do solo.
- b) Quantificar a qualidade do espaço poroso do solo com base na distribuição de tamanho de poros, o índice S, a densidade relativa e os fluxos de água e de ar nos sistemas de manejo do solo.
- c) Determinar o efeito do tráfego sobre a estrutura do solo com base em parâmetros compressivos como pressão de pré-consolidação, susceptibilidade à compactação (coeficiente de compressibilidade) e elasticidade.
- d) Determinar o efeito da deformação do solo sobre o espaço poroso.
- e) Quantificar o efeito da matéria orgânica do solo na elasticidade.
- f) Relacionar a qualidade física do solo e da disponibilidade hídrica com a produtividade das plantas nos distintos sistemas de manejo do solo.

4 REVISÃO

4.1 Biocombustível

A segurança energética é um dos principais desafios deste século. O aumento da população mundial e do consumo per capita, associados aos problemas da mudança do clima, ensejam a necessidade de ações mais coordenadas e sustentáveis, em seus aspectos ambientais, sociais e econômicos.

Os biocombustíveis são uma das alternativas para o setor de transportes. Além da expectativa de diminuição das reservas de petróleo e com a possibilidade da escassez do mesmo, há a grande e crescente preocupação com a preservação e proteção do meio ambiente, pois os combustíveis fósseis são grandes poluidores, seja pela emissão de gases do efeito estufa durante a combustão, seja pelo descarte de resíduos ou pelos derramamentos que eventualmente ocorrem no mar e no solo (NGUYEN et al., 2007).

A lógica na evolução da matriz energética mundial é a da substituição das fontes de energia fósseis por outras práticas mais sustentáveis, isto é, a substituição da energia produzida pela lenha, carvão, petróleo e outros, pela energia limpa e renovável. O etanol é um importante combustível líquido derivado da biomassa de culturas agrícolas (NGUYEN et al., 2007). É considerado como uma fonte de energia renovável e, por isso, eficaz na economia de energias fósseis e na redução dos gases de efeito estufa (GEE) utilizado como combustível alternativo no setor de transportes, em todo o mundo (KOHLHEPP, 2010).

Uma gama de culturas tem sido utilizada com o intuito de ampliar as possibilidades de produção sustentável de energia a partir da biomassa, sendo que as espécies variam de acordo com a região, pelas condições de clima e tempo. O etanol pode ser gerado a partir de uma série de matérias-primas, que são geralmente classificados em amido, melação, dentre outras. Estudos têm sido desenvolvidos, em diversos países, com o intuito de ampliar as possibilidades para produção sustentável de energia a partir da biomassa. No Brasil, por exemplo, a matéria-prima dominante é a cana-de-açúcar, embora a mandioca seja uma cultura promissora para a produção de etanol, pois o etanol pode ser gerado a partir do amido (KOSUGI et al., 2009; YU; TAO, 2009).

O Brasil é o líder na produção de etanol extraído da cana-de-açúcar (KOHLHEPP, 2010). A vasta utilização do etanol misturado com a gasolina ou usado puramente como

combustível dos veículos equipados com motores a álcool ou utilizado em veículos flex, coloca o Brasil como um líder de redução na emissão de dióxido de carbono (MACEDO et al., 2004).

4.2 Cana de açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) é uma gramínea, citada como provável cultura originária da Ásia (FIGUEIREDO, 2008; CARDOSO, 2012), pertencente à família Poaceae. A cultura tem grande importância para produção nutricional (humana e animal) e industrial (álcool combustível). Hoje, os maiores produtores mundiais são Brasil, Índia, China, Tailândia e México (BRASIL, 2009).

O agronegócio da cana-de-açúcar brasileira é uma atividade responsável por promover o desenvolvimento econômico de um grande número de municípios, por contribuir para o emprego de trabalhadores nas áreas rurais e por apresentar enorme capacidade de agregação de valor à produção. Além disso, é considerada a matéria-prima mais favorável para a produção do biocombustível, pois tem potencial para redução de 70 a 90 % ou mais dos gases de efeito estufa (NGUYEN et al., 2007).

Atualmente, a cana-de-açúcar e seus derivados são a segunda principal fonte de energia primária da matriz energética nacional e o consumo de etanol já é superior ao da gasolina. A produção brasileira de cana-de-açúcar, na safra 2008/2009, chegou a cerca de 600 milhões de toneladas, com rendimento ao redor de 80 toneladas por hectare (BRASIL, 2009). É cultivada em todos os estados brasileiros, mas é no Estado de São Paulo em que se concentra a maioria das lavouras. Segundo a CONAB (2010) a safra 2009/2010 de cana-de-açúcar foi de aproximadamente 612 milhões de toneladas, com produtividade média estimada em 81,2 toneladas por hectare, sendo o Estado de São Paulo o principal produtor com 54% da produção.

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil sofreu rápido processo de modernização, onde são adotadas técnicas de cultivo e colheita intensamente mecanizadas que promovem alterações no comportamento das propriedades físicas e hídricas do solo e na produtividade dos canaviais. Nesse sentido, o uso intensivo dos Latossolos Vermelhos eutróféricos no nordeste do Estado de São Paulo com a cana-de-açúcar, com preparo superficial excessivo e

queima dos resíduos, modificou significativamente as propriedades físicas do solo (SOUZA, 2004). As principais alterações são evidenciadas pela diminuição do volume de macroporos, do tamanho de agregados e da taxa de infiltração de água no solo e do aumento da resistência à penetração de raízes e da densidade do solo.

A produção de cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul, apesar de ser pouco significativa em nível nacional, tem importância por estar, tradicionalmente, associada às atividades desenvolvidas em áreas de pequena propriedade, relacionadas à criação de gado e ao processamento artesanal de subprodutos. Estudos indicam que a cana-de-açúcar apresenta potencial para atingir números muito mais expressivos em termos de área plantada e produtividade no Rio Grande do Sul, tanto para álcool quanto para açúcar. O Estado possui várias regiões aptas para o cultivo, tanto para a obtenção de açúcar como para álcool, sendo que a tolerância ao frio é um aspecto importante na escolha do genótipo para algumas áreas (MALUF et al., 2007).

O tráfego de máquinas pesadas na área cultivada, principalmente por ocasião da colheita, quando caminhões carregados com cana-de-açúcar atingem uma massa de 26 Mg, contribui para a compactação em subsuperfície (SILVA, 2003). Estudos sobre os efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo para cana-de-açúcar em um Latossolo Roxo (BARBIERI et al., 1997), indicaram que a compactação do solo atingiu a profundidade de 0,6 m, principalmente no preparo com grades pesadas. Cerri et al. (1991) também verificaram aumentos de densidade de Latossolos de Piracicaba cultivados com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa, associando a compactação do solo ao tráfego de máquinas nas atividades agrícolas. Esses mesmos autores verificaram que os parâmetros de compressibilidade foram influenciados pelo conteúdo de água do solo, verificando que, à medida que aumentava a umidade do solo, diminuía os valores da pressão de preconsolidação e aumentava o índice de compressão do solo, indicando menor capacidade de suporte de carga e maior compressibilidade do solo, respectivamente.

A resistência do solo à penetração, apontada como um dos fatores limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento das culturas, varia com o tipo de solo e com a espécie cultivada, sendo que as causas para o seu aumento nas lavouras têm sido atribuídas a compactação pelo tráfego de máquinas agrícolas. Segundo Souza et al. (2006), com teores de água no solo em torno da capacidade de campo, os valores de resistência à penetração encontrados, superiores a 1,99 MPa, são considerados impeditivos ao desenvolvimento radicular da cana de açúcar, pois nessas condições, os valores de densidade do solo

caracterizam região compactada e, com isso, as raízes encontram dificuldade para crescer e se desenvolver.

A presença de uma estrutura maciça e adensada, nas camadas superficial e subsuperficial, é comum na maioria dos solos cultivados intensivamente, com valores de densidade do solo mais elevados. Com isso, a aeração e a penetração e proliferação de raízes também são prejudicadas. Assim, a densidade pode variar consideravelmente, dependendo da textura, dos teores de matéria orgânica do solo e da frequência de cultivo.

Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar influenciam os parâmetros de compressibilidade do solo (SILVA; CABEDA, 2006), ou seja, nos sistemas sequeiro e irrigado, a pressão de preconsolidação aumentou e diminuiu o índice de compressão em relação ao solo de mata nativa, refletindo o maior grau de compactação do solo e a maior resistência dos agregados à ruptura nesses sistemas de manejo.

4.3 Mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma planta arbustiva tropical, amplamente cultivada por ter raízes tuberosas, que contêm, entre as culturas alimentares, alta concentração de amido na base seca (HU et al., 2004; YU; TAO, 2009). É originária do continente americano, provavelmente do Brasil Central. Essa cultura, já era amplamente cultivada pelos povos indígenas aborígenes, por ocasião da descoberta do Brasil.

A cultura é amplamente cultivada devido à sua importância nutricional e industrial. Como matéria-prima para a produção de etanol, a mandioca encontra-se entre os cultivos amiláceos de grande potencial e competitividade na produção de biocombustíveis renováveis (SALLA et al., 2010) e tem vantagem sobre outras matérias-primas, pois pode ser cultivada em terras onde outras culturas não têm bom desenvolvimento e produtividade.

A mandioca é uma planta bastante rústica, com ampla adaptação às condições mais variadas de clima e solo. Sua melhor condição de desenvolvimento é em clima quente e úmido, não suportando baixas temperaturas. A faixa ideal de temperatura situa-se entre 20 a 27°C (média anual). As temperaturas baixas, em torno de 15°C, retardam a brotação e emergência e diminuem ou mesmo paralisam sua atividade vegetativa, entrando em fase de repouso. É importante adequar à época de plantio para que não ocorra deficiência de água nos

primeiros cinco meses de cultivo, o que prejudica a produção; a deficiência de água após os primeiros cinco meses de cultivo, quando as plantas já formaram suas raízes de reserva, não causa maiores reduções na produção. Os solos arenosos ou de textura média são ideais para cultivar mandioca, pois possibilitam fácil crescimento das raízes, boa drenagem e facilidade de colheita (FUKUDA; OTSUBO, 2012).

De fácil adaptação e conhecida como uma das culturas resistentes às condições mais variadas de clima e solo, a mandioca é capaz de crescer em solos pobres em terras marginais com quantidades mínimas de fertilizantes, pesticidas e água (YU; TAO, 2009), onde outras culturas agrícolas teriam dificuldades para crescerem e desenvolverem-se adequadamente (HU et al., 2004). É frequentemente cultivada em solos de textura superficial média a arenosa, com baixos teores de nutrientes e de matéria orgânica (SILVA et al., 2008). Os excessos hídricos podem causar o desenvolvimento de fungos nas raízes, principalmente da "podridão das raízes".

A cultura da mandioca embora exija grande quantidade de nutrientes, a mesma não responde à adubação. Isso tem sido relacionado com a associação de micorrizas arbusculares (BALOTA et al., 1999). A micorriza é uma associação simbiótica natural entre fungos micorrízicos do solo e as raízes das plantas. A mandioca é altamente dependente da micorriza arbuscular e apresenta alta colonização radicular por fungos micorrízicos. As hifas dos fungos presentes no solo auxiliam na absorção dos nutrientes do solo e dispõem às plantas. Na mandioca, o efeito benéfico da micorriza arbuscular ocorre particularmente, pois apresentam um sistema radicular reduzido e pouco ramificado (SOUZA; FIALHO, 2003).

Na cultura da mandioca, o cultivo em solo arenoso, com baixos teores de nutrientes e de matéria orgânica, é realizado com alta mobilização do solo (FASINMIRIN; REICHERT, 2011). Tal processo podem representar efeitos negativos ainda mais evidentes devido às características inerentes ao seu cultivo, que não proporcionam boa proteção ao solo em seu estágio inicial de crescimento, deixando-o descoberto por longo período e assim, susceptível a grande perda de solo e nutrientes ocasionados pela erosão das partículas soltas e perda da capacidade produtiva da cultura (SILVA et al., 2008). Nesse estudo, em que se buscou avaliar os efeitos nos parâmetros físicos e matéria orgânica, na fase inicial, do sistema convencional de preparo do solo e do sistema plantio direto, associado ao uso de diferentes plantas de cobertura, os autores verificaram que o sistema convencional apresentou menor densidade e maior porosidade total do solo, especialmente na macroporosidade, quando comparado aos

valores verificado nos sistemas plantio direto com uso de plantas de cobertura e semelhança nos teores de matéria orgânica entre os dois sistemas de manejo.

O uso de resíduos agrícolas como fonte de produção do etanol é uma alternativa eficaz. A polpa de mandioca, por exemplo, tem um grande potencial como matéria-prima para produção de etanol, pois contém grande quantidade de amido e substâncias celulósicas que pode ser hidrolisada e fermentada para produzir etanol (KOSUGI et al., 2009). Para Hu et al. (2006), a melhor escolha de etanol de mandioca se dá pelo resultado do equilíbrio da energia total (maior eficiência), do ambiente (baixa custos externos das emissões de poluentes) e da economia (baixo custo).

A operação da indústria de etanol a partir da mandioca é continuada, já que a cultura não dispõe da janela de tempo para cultivo e colheita. Além disso, pode ser armazenada como matéria seca. A tecnologia para conversão de amido como matéria-prima para o etanol é baseada na hidrólise do amido e da fermentação do açúcar (YU; TAO, 2009).

Pelo exposto acima, percebe-se que a maioria dos estudos relacionando aspectos físicos do solo com essas culturas foram realizados em estados com maior tradição na produção de culturas para bioenergia. Em termos de zoneamento para o Estado do Rio Grande do Sul, alguns exemplos são os trabalhos de Silveira et al. (1990) e Barni et al. (1995, 1996) que relacionaram o rendimento de girassol com dados agroclimatológicos.

4.4 Manejo e preparo do solo

Com a crescente evolução tecnológica, estamos nos deparando com maquinários cada vez mais sofisticados e de grande porte para as operações de preparo e cultivos agrícolas. Se por um lado, facilita o trabalho no campo, por outro esse aumento no peso das máquinas, aliada a uma inadequada umidade do solo durante as operações, reflete na compactação do solo. Cada vez mais pesquisas são realizadas com parâmetros que demonstrem os efeitos causados com o tráfego de máquinas sobre as áreas de cultivo (KAISER, 2010; ROSA et al., 2011; VOGELMANN et al., 2012).

Os sistemas de manejo do solo nas atividades agrícolas, com a finalidade de proporcionar condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas, tem sido o grande responsável pelas grandes alterações na estrutura do solo, com redução do espaço

poroso (REICHERT et al., 2007), afetando o movimento da água no interior do solo e suas propriedades físico-hídricas (KLEIN; CAMARA, 2007), com redução do crescimento radicular das plantas.

O peso das máquinas e equipamentos aliado à intensidade do tráfego, tanto na colheita como nos tratos culturais em plantações de cana-de-açúcar, causa compactação do solo e, com isso, compromete a produtividade da cultura (PACHECO; CANTALICE, 2011). A adoção de sistemas de preparo ou manejo do solo com o mínimo de revolvimento e/ou operações mecanizadas com eficácia e na umidade adequada podem evitar ou diminuir a degradação física do solo, pela erosão e compactação, além de aumentar a produtividade e reduzir custos de produção pela diminuição da intensidade de operações no preparo e manejo do solo.

O preparo convencional do solo consiste no revolvimento mecânico das camadas superficiais, geralmente se utiliza uma aração e duas gradagens (FASINMIRIN; REICHERT, 2011), para reduzir a compactação, aumentar os espaços porosos e, com isso, elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água, além de facilitar o crescimento das raízes das plantas. No entanto, o revolvimento excessivo pode proporcionar efeitos indesejáveis como a desagregação da estrutura do solo que, aliada à ausência de resíduos na superfície do solo aumenta ainda mais a susceptibilidade do solo à erosão pelo impacto da gota de chuva. É o caso dos solos arenosos, que apresentam elevada suscetibilidade a erosão, onde tem sido estimulada a adoção de preparo conservacionista para manter a cobertura e reduzir a erosão (TORMENA et al., 2002).

O sistema de plantio direto (PD) caracteriza-se pelo revolvimento do solo apenas no sulco da semeadura, com rotação de culturas e manutenção da palhada na superfície do solo (BEUTLER et al., 2007). Surgiu com o propósito de reduzir os processos erosivos do solo, pela ausência de mobilização e presença da cobertura vegetal do solo (palhada) e reduzindo o assoreamento e a eutrofização de represas e cursos d'água. Além disso, atua na melhoria das condições estruturais e biológicas do solo, eleva sua capacidade de infiltração e retenção de água e seu teor de matéria orgânica, diminui as variações de temperatura do solo, apresenta menor perda de água por evaporação promovendo, portanto, a preservação do meio ambiente e no aumento da produtividade agrícola (FASINMIRIN; REICHERT, 2011). No entanto esse sistema tende a proporcionar formação de camadas compactadas no solo ocasionado pelo tráfego de máquinas, provocando alterações na estrutura do solo (CAMARA; KLEIN, 2005; ROSA et al., 2011).

Há inúmeros estudos voltados a diferentes níveis de compactação do solo em plantio direto. Contudo, ainda existem dúvidas sobre qual o estado de compactação do solo, sob PD, que influi negativamente na produção das culturas e quais os limites críticos das propriedades físico-mecânicas que limitam o pleno desenvolvimento das plantas (SECCO et al., 2004). Em virtude das práticas utilizadas e do tempo de adesão, pode resultar em aumento da densidade do solo e, conseqüentemente, a compactação do mesmo, um dos principais problemas físicos que afeta a dinâmica da água (infiltração e movimentação) e limita a produtividade das culturas (CAMARA; KLEIN, 2005; BEUTLER et al., 2007). No entanto, a manutenção da palha na superfície do solo ao longo do ano e a alternância de espécies vegetais e sua manutenção na superfície do solo na área (rotação de culturas) reduz a degradação do solo (MENTGES et al., 2010).

A partir da avaliação dos diferentes sistemas de preparo do solo: sistema plantio direto, cultivo mínimo em relação ao plantio convencional, Fasinmirin & Reichert (2011) investigaram a influência nas propriedades físicas do solo e verificaram que o plantio direto resultou em menor densidade do solo na camada superficial (0 a 0,05 m) e, por vezes até a camada de 0 a 0,10 m em virtude do acúmulo do material orgânico depositado, das culturas anteriores, na superfície do solo. Quanto ao parâmetro resistência à penetração das raízes, os autores verificaram que embora o plantio direto tenha apresentado maior valor, em relação aos demais sistemas de preparo, é o sistema com maior aporte de nutrientes e contribuição positiva no rendimento da cultura da mandioca.

Mentges et al. (2010) avaliaram o efeito de diferentes situações de preparo nos atributos físico-hídricos de um solo de textura arenosa e verificaram que a compactação elevou a densidade e a resistência mecânica à penetração do solo, reduziu a porosidade total e a macroporosidade, sem causar efeitos significativos na microporosidade. Lima et al. (2010) avaliaram a relação entre alguns parâmetros de plantas de soja e de feijão e a resistência do solo à penetração em solo arenoso sob semeadura direta e convencional e verificaram que o índice de velocidade de emergência das culturas em estudo foi menor no sistema convencional de preparo do solo do que no sistema de semeadura direta. No entanto, o sistema convencional de preparo do solo possibilitou maiores valores de índice de área foliar e de altura do feijão em relação ao sistema de semeadura direta.

A escarificação é uma técnica de preparo do solo que propõem mínima mobilização do solo mantendo, sobretudo, os restos culturais na superfície do solo (FASINMIRIN; REICHERT, 2011) e atuando com uma das alternativas recomendadas, frequentemente, para

reduzir os efeitos da compactação dos solos e, conseqüentemente, reduzir a densidade e aumentar a porosidade do solo. Além disso, são observadas melhorias na estrutura do solo em relação às propriedades físico-hídricas e mecânicas do solo (CAMARA; KLEIN, 2005). Para Cavalieri et al. (2006) a adoção de sistemas de preparo com mínimo revolvimento do solo e uso de plantas de cobertura, além de oferecer as condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da cultura, proporciona manutenção ou melhoria dos sistemas de produção.

Os implementos escarificadores contêm hastes que são utilizados no manejo primário do solo, e que apresentam vantagens sobre os implementos de discos por não promoverem uma inversão de camadas, obtendo-se com isto, maior capacidade operacional e, principalmente, menor alteração da estrutura do solo. São utilizados no preparo do solo e rompimento de camadas compactadas superficial, facilitando, assim, a penetração das raízes e a infiltração da água no solo.

Ao avaliar os efeitos de sulcadores de semeadoras-adubadoras em Latossolo de textura argilosa em plantio direto e plantio direto escarificado, Camara & Klein (2005) verificaram que a escarificação diminuiu a densidade do solo, apresentou uma maior infiltração de água, condutividade hidráulica do solo saturado e rugosidade superficial em relação ao PD. Não verificaram diferença significativa entre os manejos para os parâmetros porosidade total e a macroporosidade do solo. Por fim, destacam que a escarificação é uma técnica eficaz para melhorar a conservação do solo e da água, apresentando efeito residual da escarificação transcorrido um ano após a operação.

Com o intuito de avaliar a influência do tráfego de máquinas na compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, de textura franco arenosa, Vogelmann et al. (2011) verificaram que uma única escarificação aumenta a suscetibilidade à compactação do solo abaixo da linha de atuação da haste escarificadora em solo de textura franco arenosa sob semeadura direta. Fasinmirin & Reichert (2011) estudaram técnicas de conservação do solo em função dos sistemas de preparo do solo; sistema plantio direto e cultivo mínimo em relação ao plantio convencional, verificando que o aporte de matéria orgânica é maior na camada superficial em PD, refletindo em menor densidade do solo e resistência do solo à penetração das raízes, combinado com o efeito na conservação do solo e da água e redução da temperatura pela cobertura do solo. No entanto, a camada subsuperficial do solo sob plantio direto apresenta uma camada compactada, comprovada pela maior resistência à penetração das raízes da cultura da mandioca.

4.5 Parâmetros mecânicos do solo

A compactação do solo causada pela aplicação de cargas ao solo resulta em modificações na estrutura do solo, afetando, principalmente, os poros localizados entre os agregados (KLEIN, 2012), com aumento da densidade e da resistência do solo (HORN; LEBERT, 1994; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; PACHECO; CANTALICE, 2011). A compactação é caracterizada pela diminuição do volume de vazios ocupados pela água ou pelo ar (porosidade, principalmente, macroporosidade ou porosidade de aeração que são os poros maiores que 50 μ m), limitando a infiltração de água, a retenção, a água disponível às plantas (REICHERT et al., 2011; KLEIN, 2012), a temperatura, a permeabilidade do solo ao ar e a redistribuição de água no solo (condutividade hidráulica), reduzindo as trocas gasosas e a disponibilidade de oxigênio, que afeta o crescimento das raízes em busca de água e nutrientes e limita o crescimento radicular por impedimento mecânico. Isso culmina com a redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas (VIEIRA, 2006).

A compactação excessiva do solo provoca deficiência em termos de desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Quando associada ao elevado conteúdo de água no solo pode provocar redução da aeração do solo. Por outro lado, em baixo conteúdo de água no solo provoca aumento da resistência do solo à penetração das raízes (LAPEN et al., 2004).

Em função disso, a compactação do solo tem provocado perda da capacidade produtiva do solo, levando-o à degradação. No entanto Klein (2012) afirma que certo nível de compactação, onde o IHO é máximo, é benéfico para a produção das culturas e justifica que o aumento da compactação caracterizado pelo aumento da densidade faz com que aumente a retenção e a disponibilidade de água às plantas.

A relação entre a susceptibilidade à compactação e o suporte de carga com as propriedades físicas de solos foram avaliadas por Suzuki et al. (2008), onde verificaram que há uma relação significativa entre os valores de capacidade de suporte de carga obtidos no campo e o modelo ajustado pelos valores de resistência à penetração que considera a densidade e a umidade do solo. Verificaram ainda que quanto maior a resistência do solo à penetração, menor a deformação e maior a capacidade de suporte de carga, podendo assim, estimar o comportamento mecânico pela densidade inicial e a resistência do solo à penetração. Streck et al. (2004) verificaram que com o aumento da compactação do solo reduziu a macroporosidade e a porosidade total de um Argissolo de textura arenosa.

Valores críticos ou limitantes de parâmetros físicos do solo foram propostos por Reichert et al. (2007) para avaliar a compactação de solos de diferentes texturas. Para densidade do solo crítica, obtida quando o intervalo hídrico ótimo é zero, os autores propõem valores entre 1,7 a 1,8 Mg m⁻³, para solo de textura franco arenosa. A partir desses dados, foram verificados a redução no crescimento radicular e na produtividade da cultura da soja e do feijão (REINERT et al., 2006). Outra proposta dos autores foi relacionar a densidade do solo com a macroporosidade de 0,10 m³ m⁻³, considerada como ideal para o pleno crescimento e desenvolvimento das raízes, para obtenção da densidade do solo crítica. A estimativa da condutividade hidráulica crítica a partir deste volume de macroporos também foi proposta pelos autores, que sugeriram um valor crítico de 13,8 mm h⁻¹ para o Argissolo.

Os sistemas de manejo do solo devem envolver sistemas de cultivo e práticas de preparo do solo que mantenham a estrutura do solo favorável ao crescimento das plantas. Håkansson & Voorhees (1997) consideram a intensidade do tráfego e as características da máquina (massa, carga por eixo, tipo de pneus e pressão de inflação) como as principais causas da compactação dos solos agrícolas. O processo de compactação é influenciado, ainda, pela matéria orgânica (STONE; EKWUE, 1995), pela estrutura (HORN et al., 1988), pelo teor de água (DIAS JUNIOR, 1994; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999) e pela densidade do solo (CARPENEDO, 1994). Considerando que nos últimos anos houve um aumento da intensidade de uso do solo e da mecanização, é de se esperar que esses problemas possam ser encontrados nas lavouras em todo o mundo (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994). Há ainda outro fator que interfere no aumento da probabilidade de compactação do solo. Trata-se do Programa Mais Alimento, incentivado pelo Governo Federal, que visa facilitar a aquisição de maquinários agrícolas. No entanto, o que se verifica é que os produtores rurais estão adquirindo maquinários cada vez maiores, uma vez que não há critérios técnicos que definem tamanho de máquina ideal para cada propriedade ou atividade agrícola.

A compactação do solo é resultante do somatório do tempo de permanência e peso da carga e do número de vezes que o solo é submetido a uma nova carga (HÅKANSSON et al., 1988; HÅKANSSON; MEDVEDEV, 1995). Alguns componentes associados às máquinas podem ser adaptados, se entendidas as suas interações com o solo, tais como: tipo e pressão de inflação dos pneus, carga por eixo e intensidade de tráfego (HÅKANSSON; VOORHEES, 1997). Alguns solos têm maior capacidade de suporte de cargas, são mais facilmente manejados após períodos de chuva e não têm limitações ao crescimento vegetal. A diferenciação entre tipos de solos ocorre devido aos diferentes estados de agregação, ou seja,

resistência interagregados e intra-agregados, à textura, ao teor de água, à matéria orgânica e às cargas que o solo já recebeu no passado (CULLEY; LARSON, 1980; HORN; LEBERT, 1994).

Nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, as pressões excessivas provocadas pela grande quantidade de operações motomecanizadas em curto espaço de tempo, resulta em compactação adicional, favorecendo a degradação física do solo (PACHECO; CANTALICE, 2011).

Embora o crescimento das raízes no solo não ocorra em uma única direção, existe relação entre densidade radicular e a resistência à penetração medida pelo penetrômetro. Segundo Taylor & Brar (1991), os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Nesmith (1987) adotou o valor de 2,0 MPa como limite crítico de resistência para a penetração de raízes. Cintra & Mielniczuk (1983) encontraram uma redução de 50% no comprimento radicular de várias culturas quando a resistência à penetração foi de 1,1 MPa, em um Latossolo Roxo muito argiloso. Os valores críticos citados por Camargo & Aleoni (1997) são variáveis devidos, principalmente, ao tipo de equipamento usado, tipo de solo, entre outros. Contudo, esses valores situam-se na faixa de 2 a 5 MPa. De maneira geral, considera-se que 2,0 MPa seja o valor crítico de resistência do solo ao crescimento radicular (TAYLOR et al., 1966). No entanto, esses valores podem ainda variar dentro do ciclo da cultura, pois as raízes em estágio inicial têm exigências físicas bastante diferentes das raízes desenvolvidas e adultas. Com valores de RP críticos, as raízes das plantas apresentam dificuldade para atravessar a camada impeditiva e se desenvolvem mais superficialmente, restringindo assim o acesso aos nutrientes e ao conteúdo volumétrico do perfil do solo.

Parâmetros que auxiliam a análise do processo de compactação dos solos agrícolas são obtidos da curva de compressão do solo. Essa curva relaciona o índice de vazios (ou densidade do solo) com o logaritmo da pressão aplicada no solo e, a partir dela, obtém-se a pressão de preconsolidação (σ_p), que é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR; PEIRCE, 1996) e o índice de compressão (C_c), que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação. A aplicação no solo de pressões menores do que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis), enquanto a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas, não recuperáveis (HOLTZ; KOVACS, 1981).

A pressão exercida pelos pneus das máquinas agrícolas é inferior à exercida pelas patas dos animais, pois a pressão desse último é aplicada em uma área menor comparada à área dos pneus das máquinas agrícolas (FLORES et al., 2007). No laboratório, é possível simular pressões exercidas por maquinários agrícolas, pisoteio animal e, ainda, simular situações extremas de cargas aplicadas ao solo.

A determinação da σ_p e do C_c têm grande importância na adequação de máquinas que exerçam menores pressões sobre o solo e, se o valor da σ_p for superado, podemos estimar o quanto de compactação adicional ocorrerá. Por outro lado, para o sistema radicular das plantas desenvolverem-se, é necessário que as raízes vençam a RP do solo (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999).

O conhecimento do estado de compactação, pela pressão de preconsolidação (σ_p) e pelo índice de compressão (IC), nas práticas de uso do solo foi avaliada por Silva et al. (2002a,b) em duas profundidades em solos sob sistemas de plantio direto e convencional. Para a camada superficial (0 a 0,02 m) de um Argissolo, verificaram que a pressão de preconsolidação para o manejo convencional foram quatro vezes menores que os determinados para o sistema plantio direto até à densidade do solo de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ e, cerca de duas vezes quando essa densidade do solo foi maior que $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$. Não verificaram influência do manejo do solo em Latossolos para a pressão de preconsolidação. Para o índice de compressão, tanto no Latossolo como no Argissolo, verificaram correlação significativa com a densidade do solo, sendo que a maior suscetibilidade à compactação foi encontrada nos Latossolos.

A condição de umidade do solo é o fator determinante da capacidade de suporte de carga do solo. Quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compactação. Mas, à medida que o mesmo vai umedecendo, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre os agregados do solo, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas sólidas da matriz do solo, diminuindo a resistência do solo à compactação (HILLEL, 1980).

A deformação do solo e a suscetibilidade do solo à compactação estão relacionadas com o estado inicial de compactação e com a quantidade de água no solo. Resultados apresentados por diversos autores indicam que existe um conteúdo de água no solo ótimo para ocorrer a compactação (SALIRE et al., 1994; DIAS JUNIOR, 1994; KONDO; DIAS JUNIOR, 1999). Segundo Carpenedo (1994), as pressões médias normalmente aplicadas sobre a superfície do solo pelos pneus de tratores e colheitadeiras estão entre 100 e 200 kPa,

enquanto as carretas agrícolas exercem pressões, que dependendo da carga, podem chegar a valores próximos de 600 kPa. Valores críticos de pressão de preconsolidação para o estado inicial de compactação foram propostos por Reichert et al. (2007). Para Argissolos de textura arenosa com densidades entre 1,6 e 1,8 Mg m⁻³, valores de 115 a 133 kPa para a camada superficial (0 a 0,02 m) e de 98 a 105 kPa para camada subsuperficial (0,10 a 0,12 m).

O estudo da compactação dos solos pode ser realizado pelo conhecimento da densidade relativa ou conhecido ainda como grau de compactação ou compactação relativa. Esse parâmetro, capaz de determinar a qualidade física do solo, foi apresentado por Klein (2006) e consiste da relação entre a densidade inicial do solo, naquela condição de manejo, e alguma densidade de referência ou densidade máxima do solo. Grau de compactação elevado pode reduzir a porosidade do solo, diminuindo a aeração do solo, e aumentando a densidade e resistência do solo à penetração, dificultando o desenvolvimento radicular; e grau de compactação muito baixo pode indicar solo muito solto, comprometendo a retenção de água e o contato solo semente na semeadura (também favorecendo a ocorrência do processo erosivo).

No entanto, a compactação do solo, principalmente pelo sistema de semeadura direta, pode ser evitada ou reduzida por meio do incremento e manutenção de resíduos orgânicos na superfície do solo, a fim de aumentar seu conteúdo de matéria orgânica. Nesse sentido, os materiais orgânicos atuam na dissipação da energia exercida pelo tráfego de máquinas e ou animais e, quando a matéria orgânica (MOS) é incorporada a matriz do solo pela atividade biológica, aumenta a elasticidade e a resistência do solo à compactação. A elasticidade é um parâmetro usado nos estudos de compactação do solo. É expressa pelo coeficiente de descarregamento (Cd), que corresponde à declividade da reta de descarregamento/recarregamento e pelo índice de recuperação (Ir) obtido pela relação da variação do índice de vazios durante o descarregamento e do carregamento. A elasticidade é sensivelmente afetada pelo conteúdo de água no solo e pelo conteúdo de MOS. Desse modo, um incremento no conteúdo de água faz com que ocorra um aprisionamento das bolhas de ar existente no solo não saturado. Já a MO, além de aumentar a retenção de água, possui característica elástica que tem o poder de recuperar o estado inicial do solo após aplicação da carga, diminuindo a compressão do solo. Além disso, a elasticidade é função do tempo da aplicação das cargas e da elasticidade do solo, ou seja, dos parâmetros intrínsecos do solo (BRAIDA et al., 2008).

4.6 Qualidade do solo

Qualidade do solo, definido por Karlen (2004), é considerada como o indicador de práticas agrícolas sustentáveis. Um solo ideal para a agricultura é aquele que proporciona o melhor desenvolvimento e maior produtividade de uma determinada espécie. O crescimento e desenvolvimento das plantas são influenciados pela temperatura, aeração, umidade e resistência do solo à penetração (FORSYTE, 1965, LETEY, 1985).

O conceito de faixa de umidade não limitante-NLWR (*non limiting water range*) foi apresentado por Letey (1985). Sendo definido como a faixa de conteúdo de água no solo em que não há restrições ao crescimento das plantas pela deficiência de oxigênio (limite inferior) e pela diminuição do conteúdo de água no solo a valores próximos ao ponto de murcha permanente, ou quando a resistência do solo ao crescimento radicular atinge 2,0 MPa (limite superior). Silva et al. (1994) aprimoraram o conceito de NLWR, baseado que o crescimento do sistema radicular varia de uma forma contínua com o potencial hídrico, denominaram então, de “least limiting water range (LLWR)”. Posteriormente, Orellana et al. (1997) utilizaram o conceito introduzido por Letey (1985) em avaliações da qualidade física do solo, denominando-o intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo. Esse é definido pela umidade ótima do solo a disponibilidade de água às plantas, integrado a três fatores: efeito do potencial matricial ou energia de retenção, aeração e resistência do solo à penetração das raízes. A amplitude do IHO indica o quão expostas estão às culturas ao estresse estrutural do solo que afeta diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 1994; SILVA; KAY, 1997; TORMENA et al., 2007; PEREIRA et al., 2010).

Avaliando o intervalo hídrico ótimo em Argissolo sob diferentes níveis de compactação, Collares et al. (2006) verificaram que em todos os tratamentos o conteúdo volumétrico de água permaneceu dentro dos limites do IHO, isto é, entre os limites do conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo e do conteúdo volumétrico de água no ponto de murcha permanente. O rendimento da cultura do feijão foi influenciado negativamente quando o conteúdo de água para resistência à penetração de 2 MPa passou a definir o limite inferior do IHO.

O IHO fica mais estreito à medida que o estado de compactação aumenta (aumento da densidade do solo) e ocorre degradação da estrutura (SILVA, 2003). A aeração do solo pode restringir a difusão de oxigênio e, por consequência, o crescimento radicular em condições de

umidade mais baixa que a capacidade de campo, assim como a resistência do solo à penetração pode restringir crescimento em condições de umidade maior que a correspondente ao ponto de murcha permanente. Culturas produzidas em solos com pequeno IHO são mais vulneráveis à queda de produtividade por falta ou excesso de água do que solo com grande valor de IHO. O rendimento da cultura do feijoeiro reduziu quando o tempo para a resistência do solo à penetração foi diminuída até atingir o valor de 2 MPa, avaliado a partir da umidade do solo na capacidade de campo (GUBIANI, 2008).

Na densidade do solo quando o IHO é zero ($ds_{IHO=0}$), a probabilidade da umidade do solo estar fora do ótimo é 100% e, portanto, o risco às culturas é alto. No entanto, é possível que esse valor ainda não seja o crítico, pois valores maiores podem ser os críticos e impeditivos. Uma dificuldade inerente à definição de valor crítico é estabelecer se um dado processo (ex.: crescimento de raízes) ou resultado (ex.: produção de grãos) é afetado em determinado grau estabelecido (restritivo) ou totalmente paralisado (impeditivo). Tormena et al. (1998) encontraram que o IHO foi influenciado positivamente até a densidade de 1,1 Mg ha⁻¹ e negativamente para densidades superiores. Silva & Kay (1997) encontraram uma redução do IHO com o aumento da densidade do solo. Kaiser et al. (2009) avaliaram o intervalo hídrico ótimo em Latossolo sob plantio direto e plantio direto compactado (PDC) e verificaram que o crescimento radicular do feijão foi restritivo no PDC, apresentando crescimento superficial e, com isso, ficou limitado o acesso de água e nutrientes às plantas. O PD reduziu o IHO na camada subsuperficial, porém sem restringir a qualidade física estrutural.

Outra forma de expressar a densidade crítica é usando a compactação relativa ou também conhecido como grau de compactação, sendo a razão entre a densidade real do solo e a densidade a uma compactação máxima, podendo essa ser a densidade máxima do teste Proctor (CARTER, 1990), densidade com compressão uniaxial a 1600 kPa (HÅKANSSON, 1990) ou célula de consolidação a 200 kPa (SILVA et al., 1997). A densidade relativa deve ser associada a propriedades do solo (SILVA et al., 1997) e ao rendimentos de culturas (KLEIN; LIBARDI, 2002). Suzuki et al. (2007) avaliaram os parâmetros físicos do solo e o rendimento das culturas da soja e do feijoeiro em resposta ao grau de compactação de um Latossolo e um Argissolo. O resultado desse estudo mostrou que o aumento do grau de compactação provocou redução linear da macroporosidade e da condutividade hidráulica do solo saturado e aumento da resistência do solo à penetração. Os autores destacam que os valores de grau de compactação correspondentes aos valores críticos de macroporosidade e

RP dependem do tipo de solo. No Latossolo os limites críticos de aeração e de resistência à penetração foram alcançados com menor grau de compactação do que no Argissolo. O grau de compactação ótimo para a cultura da soja em Latossolo foi de 86%. Enquanto no Argissolo, em virtude da elevada compactação, não foi possível determinar um grau de compactação ótimo para as culturas da soja e do feijoeiro.

O índice *S* é um indicador, proposto por Dexter (2004), da qualidade física do solo ao longo do tempo e nas diversas condições de preparo e manejo do solo. É definido como a inclinação da curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão, como indicador da qualidade física do solo. Para o autor, valores elevados de *S* indicam que o solo apresenta boa condição estrutural com favorável distribuição no tamanho dos poros do solo. Assim o índice *S* apresenta sensibilidade para identificar a degradação da qualidade física do solo em diferentes sistemas de uso do solo (MAIA, 2011). Dexter (2004) classifica os solos com boa qualidade estrutural aqueles com $S > 0,035$, solos que apresentam algum tipo de restrição física aqueles com $0,020 < S < 0,035$ e, solos muito pobres fisicamente, aqueles com valor de $S < 0,020$.

Um aumento nos valores de *S* indica uma ampla distribuição de tamanho de poros, condizente com condições estruturais que estabelecem um adequado funcionamento físico do solo (STRECK et al., 2008). Esses autores verificaram que em solos de textura argilosa e muito argilosa, o parâmetro *S* apresentou decréscimo exponencial com o aumento da densidade do solo e um crescimento exponencial com o aumento da matéria orgânica do solo, mostrando que o parâmetro *S* foi sensível na determinação da qualidade física dos solos de textura argilosa e muito argilosa. É um parâmetro que não pode ser considerado separadamente e, por isso, nesse estudo será utilizado como comparativo aos demais indicadores da qualidade física do solo.

A manutenção e a melhoria da qualidade do solo são determinantes para a estabilidade, para a sustentabilidade e para a produtividade de ecossistemas naturais e de agroecossistemas. A compreensão e a quantificação do impacto dos sistemas de preparo do solo na sua qualidade física, além dos parâmetros hídricos e mecânicos, são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (SILVA et al., 2008).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Local e clima

Para atender os objetivos propostos nesse estudo e testar as hipóteses estabelecidas, implantou-se um experimento na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, no município de Santa Maria, região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul. O local situa-se entre as coordenadas geográficas 29° 42' de latitude sul e 53°48' de longitude oeste de Greenwich e altitude de 90 metros.

O clima da região é classificado como “Cfa” de Köppen, ou seja, clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a temperatura do mês mais frio varia entre -3°C e 18°C (MORENO, 1961). A precipitação é, normalmente, bem distribuída, com precipitação anual que varia entre 1300 a 1800 mm. Os maiores valores são registrados nos meses de maio e junho e as chuvas são mais intensas nos meses da primavera.

5.2 Solo e tratamentos

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (Santos et al., 2006), relevo suave ondulado, de textura franco-arenosa (101 g kg⁻¹ de argila, 251 g kg⁻¹ de silte e 648 g kg⁻¹ de areia), conforme tabela 1. Segundo descrição de perfil de solo realizado por Kaiser (2010), esse solo possui horizonte E iniciado na camada 0,50 m e o horizonte Bt iniciado em 0,90 m.

Foram realizados dois experimentos, um com a cultura da cana-de-açúcar e outro com a cultura da mandioca, em sistemas de manejo diferenciados.

Tabela 1 - Valores médios de areia, silte e argila (g kg^{-1}) nas cinco camadas de solo amostradas.

Camada m	Areia		Silte	Argila
	Grossa	Fina		
	-----g kg ⁻¹ -----			
0,00 – 0,05	233	436	233	98
0,05 – 0,10	218	446	237	99
0,10 – 0,20	212	442	244	102
0,20 – 0,40	186	439	271	104
0,40 – 0,60	168	453	273	106

O delineamento experimental utilizado, nos dois experimentos, foi o de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos consistiram de sistemas de manejo e preparo do solo: plantio direto (PD); preparo convencional (PC); plantio direto compactado (PDC) e escarificado (ESC), conforme ilustrado na figura 1.

Ambas as áreas experimentais encontravam-se em pousio com cobertura de gramíneas (azevém) e não apresentavam características visíveis de degradação. Inicialmente, foi realizada uma amostragem de solo em quatro pontos da área, na camada 0 a 0,20 m para análise das características químicas do solo (Tabela 2).

Tabela 2 – Caracterização química do solo da área em estudo para produção de cana-de-açúcar e mandioca. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria–RS.

pH água 1:1	P	K	MO	Ca	Mg	Al	H+Al	K	CTC _{efetiva}	CTC pH _{7,0}	Soma de Bases	Saturação (%)	
	mg dm ³	mg dm ³	%	cmol _c dm ³						Bases	Al	Bases	
5,10	19,9	52,0	1,3	1,8	0,5	0,4	3,5	0,14	2,84	5,94	2,44	14,1	41,0
5,00	22,8	68,0	1,3	1,3	0,4	0,6	3,5	0,18	2,48	5,38	1,88	24,2	34,9
4,90	20,8	68,0	1,4	1,1	0,3	0,8	3,9	0,18	2,38	5,48	1,58	33,7	28,8
4,80	23,8	68,0	1,3	1,0	0,3	0,8	3,9	0,18	2,28	5,38	1,48	35,1	27,47

As áreas e seus entornos foram dessecadas com a aplicação de herbicida sistêmico não seletivo – glifosato. Na sequência foram distribuídos, aleatoriamente, os tratamentos. O estabelecimento dos tratamentos se deu pela proposição de diferentes condições às culturas e por representar as principais condições estruturais dos solos na região.



Figura 1 - Detalhamento dos manejos e preparos do solo para implantação das culturas da cana-de-açúcar e da mandioca. A) plantio convencional (aração e gradagem); B) plantio escarificado; C) plantio direto compactado.

Para a aplicação dos tratamentos foi utilizado um trator modelo MF275 (Figura 1). O PC foi preparado com uma operação de arado de discos e duas gradagens (grade de discos). O ESC foi realizado com o auxílio de um escarificador de três hastes, distanciadas a 0,80 m, até uma profundidade média de 0,30 m. O PDC foi condicionado por duas passadas sobrepostas e paralelas de uma máquina pá carregadora com massa total de 8 Mg, quando o solo estava com conteúdo de água no solo de $0,16 \text{ kg kg}^{-1}$.

Nos dois experimentos, foi realizada a adubação de acordo com o manual de recomendação do CQFS-RS/SC (2004). Também, quando necessário, foram realizadas capinas e pulverizações manuais para controle das plantas daninhas, pragas e doenças durante todo o ciclo das culturas.

5.3 Experimento com cana-de-açúcar

O estudo foi conduzido em uma área experimental com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), variedade SP-81-3250 implantada em 1º de outubro de 2010. A área foi dividida em 12 parcelas (4 tratamentos e 3 blocos) e deixou-se um espaçamento entre as parcelas de 7 m para realização das manobras dos implementos agrícolas. Cada parcela foi constituída de quatro linhas, tendo estas um comprimento de 10 m e um espaçamento entre linhas de 1,40 m, totalizando uma área de 672 m^2 cada parcela (Figura 2).

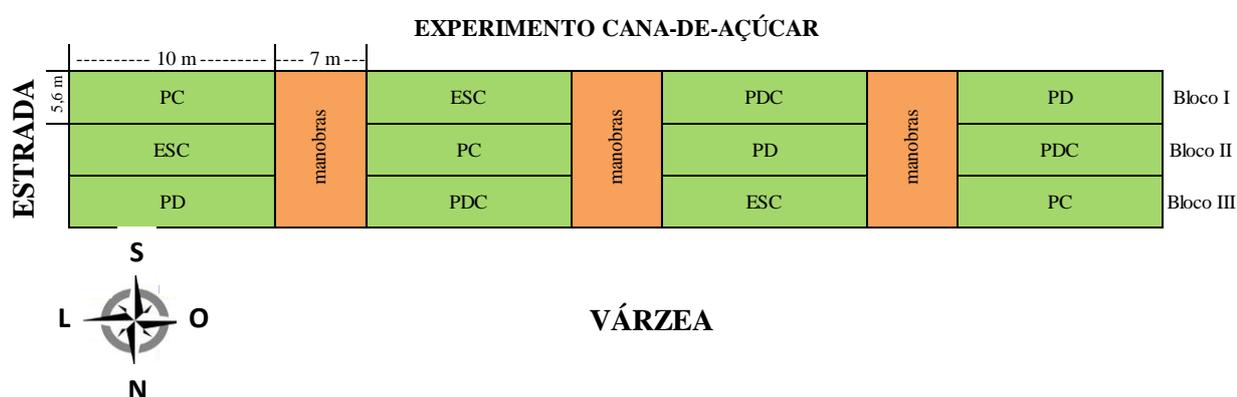


Figura 2 – Esquema da área experimental destinada à produção de cana-de-açúcar. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

A cana-de-açúcar foi plantada em sulcos abertos com, aproximadamente, 0,30 m de profundidade (Figura 3) para aplicação da adubação NPK (44 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 100 kg ha⁻¹ de fósforo – superfosfato triplo – P₂O₅ todo na base e 80 kg ha⁻¹ de potássio –K₂O), a qual foi baseada na recomendação do CQFS-RS/SC (2004). Após a adubação, colocou-se uma fina camada de solo em cima do adubo para que fosse então implantada a cultura.



Figura 3 – Detalhamento da abertura dos sulcos nos tratamentos para a produção de cana-de-açúcar. Departamento de Solos. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado na profundidade de, aproximadamente, 0,25 m onde foram deitados os colmos da cana. Utilizou-se a densidade média de 18 gemas por metro de sulco, mediante a distribuição de colmos "pé com ponta". Em seguida efetuou-se o corte manual dos colmos em toletes de três a quatro gemas e, posteriormente, foram cobertos com uma camada de solo.

5.4 Experimento com mandioca

O experimento foi implantação em 5 de outubro de 2010 numa área dividida em 12 parcelas e espaçamento entre parcelas de 5 m para realização das manobras dos implementos agrícolas. Cada parcela foi constituída de cinco linhas, tendo estas um comprimento de 10 m e um espaçamento entre linhas de 0,80 m, totalizando uma área de 480 m² (Figura 4).

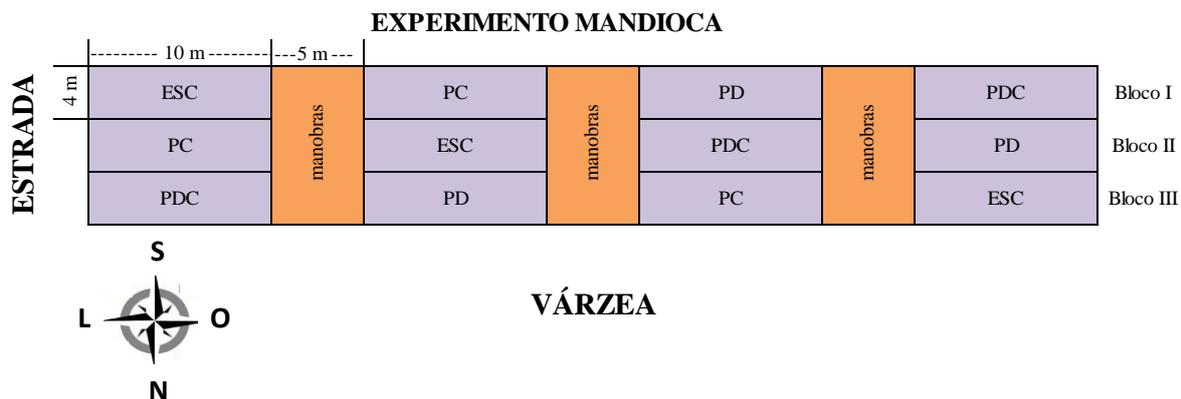


Figura 4 – Esquema do posicionamento do experimento no campo para produção de mandioca. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

Os sulcos, nos tratamentos, foram abertos ate a profundidade de 0,25 m, aproximadamente (Figura 5), para aplicação da adubação NPK (44 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 100 kg ha⁻¹ de fósforo – superfosfato triplo – P₂O₅ todo na base e 80 kg ha⁻¹ de potássio –K₂O), a qual foi baseada na recomendação do CQFS-RS/SC (2004). Após a adubação, colocou-se uma fina camada de solo por cima do adubo para que fosse então plantada a cultura.



Figura 5 – Detalhamento da abertura dos sulcos nos tratamentos para a produção da mandioca. Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria– RS.

A mandioca foi plantada na profundidade de, aproximadamente, 0,20 m. As ramas foram depositadas nos sulcos distanciadas entre si a 0,80 m e, posteriormente, foram cobertos com uma camada de solo.

5.5 Amostragens

Foram realizadas duas coletas de solo. A primeira realizada um mês após a implantação das culturas, na linha e entrelinha, a fim de caracterizar a área e obter alguns parâmetros iniciais da condição do solo às plantas. Nesta amostragem, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, com anéis de 0,05 m de diâmetro e 0,04 m de altura, no centro das camadas de 0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,40 e 0,40 a 0,60 m para determinação da densidade do solo, porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total), resistência mecânica do solo à penetração. Para a obtenção dos parâmetros compressivos (pressão de preconsolidação σ_p , e índice de compressão IC) foram coletadas amostras com estrutura preservada 0,057 m de diâmetro e 0,03 m de altura, nas camadas de 0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m.

A segunda amostragem foi realizada próxima à linha de plantio da cultura quando as plantas já estavam na fase de maturação, para avaliar as condições de solo em função do manejo e preparo nas camadas. As coletas e avaliações foram realizadas nas linhas centrais de cada parcela para a cana-de-açúcar e três linhas centrais de cada parcela para a mandioca, as demais foram consideradas como bordadura. Nesta amostragem, coletaram-se amostras de solo com estrutura preservada, no centro das camadas de 0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,40 m para determinação da compressibilidade e elasticidade do solo, intervalo hídrico ótimo e incluindo a camada de 0,40 a 0,60 m para determinação da densidade do solo, porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total), condutividade hidráulica, curva de retenção de água e permeabilidade do solo ao ar.

5.6 Determinações e avaliações

5.6.1 Textura do solo, carbono orgânico e densidade de partículas

Amostras de solo com estrutura alterada foram coletadas para determinação da textura, do carbono orgânico e da densidade de partículas do solo.

A textura do solo foi determinada pelo método da pipeta que utiliza 20g de terra fina seca ao ar (TFSA) e o dispersante NaOH (EMBRAPA, 1997). Foi realizada a quantificação do teor de argila (< 0,002 mm), silte (0,002 a 0,05 mm), areia fina (0,05 a 0,2 mm) e areia grossa (0,20 a 2 mm).

Para a determinação do teor de carbono orgânico foi utilizado o método de combustão úmida, descrito por Tedesco et al. (1995) modificado e descrito por Rheinheimer et al. (2008).

A densidade de partícula foi determinada pelo método do balão volumétrico modificado, descrito em Gubiani et al. (2006).

5.6.2 Densidade do solo, porosidade e curva de retenção de água

Amostras de solo com estrutura preservada, coletadas em anéis volumétricos, foram utilizadas para determinação da curva de retenção de água (CRA). As determinações de densidade, porosidade e distribuição de tamanho de poros foram obtidas com os dados da curva de retenção de água (CRA) no solo, obtida com a mesa de tensão e membrana de Richards, conforme metodologia descrita em Embrapa (1979).

A determinação da curva de retenção de água no solo de todos os tratamentos envolveu inicialmente a saturação das amostras de solo por capilaridade por 2 dias. Após, essas amostras de solo foram transferidas para uma coluna de areia para a aplicação das tensões de 1, 6 e 10 kPa. Em cada uma dessas tensões, as amostras permaneceram em média num período mínimo de dois dias. A aplicação das tensões de 33 e 100 kPa foram realizadas utilizando câmaras de pressão. Nessas tensões, as amostras de solo foram deixadas por um período mínimo de quatro dias, garantindo a drenagem completa da água. A retenção de água

no solo nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa foram realizadas através de um psicrômetro, utilizando o aparelho WP4 - potenciômetro do ponto de orvalho – (DECAGON, 2000).

5.6.3 Capacidade de suporte de carga e resistência do solo à compactação

Para determinação da capacidade de suporte de carga do solo, em cada condição de manejo e preparo, foram coletadas três amostras de solo com estrutura preservada (anéis de 0,057 m de diâmetro e 0,03 m de altura) em cada camada e parcela, no centro das camadas 0,00 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, totalizando 108 amostras. A análise foi realizada por meio do ensaio de compressão uniaxial em um consolidômetro modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises) seguindo a NBR-12007/90, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1990).

As amostras foram saturadas por capilaridade e equilibradas à tensão de 33kPa, para posterior aplicação sucessiva de cargas estáticas (12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa), por um tempo de aplicação de carga de cinco minutos, tempo necessário para que mais de 90% da compactação fosse alcançada (SILVA et al., 2000). Após o ensaio, as amostras foram colocadas em estufa para a secagem a 105 °C, por 24 horas.

A relação entre índice de vazios ($\varepsilon = dp/ds - 1$) e cargas aplicadas (σ) foi descrita pelo modelo hidráulico de van Genuchten (1980), adaptado para as variáveis do processo de deformação do solo, $\varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_f) / (1 + (\alpha\sigma)^n) (1 - 1/n)$ (REINERT et al., 2003), em que ε_i e ε_f são o índice de vazios inicial e final respectivamente, α , n e m , são coeficientes de ajuste do modelo. Os coeficientes α , n , m e ε_f foram estimados pelo método de Marquardt, com auxílio do software SAS (SAS INSTITUTE, 1999). A reta virgem foi definida pelo segmento de reta tangente ao ponto de inflexão da curva de compressão ajustada e o I_c foi definido pela inclinação da reta virgem. A σ_p foi estimada pelo valor de σ na intersecção da reta virgem com a reta bissetriz, de acordo com o método de Casagrande descrito em Holtz & Kovacs (1981). O ponto de máxima curvatura foi calculado numericamente por meio de um algoritmo desenvolvido em Visual Basic for Applications (informações não publicadas), que calcula a curvatura (C) para todos os valores de σ , usando a equação $C = \left| \frac{d^2\varepsilon/d^2\sigma}{\left[1 + (d\varepsilon/d\sigma)^2\right]^{3/2}} \right|$ (Gregory et al., 2006), em que $d\varepsilon/d\sigma$ e $d^2\varepsilon/d^2\sigma$ são, respectivamente, a primeira e segunda derivadas do modelo ajustado.

5.6.4 Elasticidade do solo

Para avaliar a elasticidade do solo, o carregamento, na prensa de compressão uniaxial, foi realizado em duas etapas. Primeiramente, fez-se o carregamento até a carga de 400 kPa, admitindo-se que esta carga é maior que a pressão de pré-consolidação das amostras. Posteriormente, fez-se o descarregamento sequencial das cargas aplicadas. Após o descarregamento, realizou-se o carregamentos de todas as cargas até a carga máxima de 1600 kPa. Tanto nos carregamentos como nos descarregamentos, as leituras no extensômetro foram realizadas após 5 minutos de aplicação da carga. A elasticidade é expressa pelo coeficiente de descompressão (C_d), que corresponde à declividade da reta de descarregamento/re-carregamento e pelo índice de relaxação (I_r), calculado com a seguinte equação:

$$I_r (\%) = (\Delta e_d / \Delta e_c) 100$$

onde I_r = índice de relaxação (%); Δe_d = variação no índice de vazios da amostra durante o descarregamento; Δe_c = variação do índice de vazios da amostra durante o carregamento.

5.6.5 Permeabilidade do solo ao ar

Amostras de solos com estrutura preservada foram coletadas para a verificação da permeabilidade do solo ao ar nos diferentes manejos e preparos e camadas do solo em estudo. A permeabilidade ao ar do solo (K_a) foi obtida pela determinação da condutividade ao ar (K_l), medida com um permeâmetro de carga constante.

Para o cálculo da condutividade ao ar (K_l , $m s^{-1}$) foi utilizada a equação abaixo:

$$K_l = \rho_l g \frac{0,001 \Delta V l}{60 \Delta t 100 \Delta p A}$$

onde, ρ_l = densidade do ar ($kg m^{-3}$); g = gravidade = $9,81 (m s^{-2})$; ΔV = volume de ar (m^3) que passa pela amostra durante Δt = em determinado intervalo de tempo (s); l =

comprimento da amostra de solo (m); Δp = pressão do ar aplicada (Kg ms^{-2}); A = área da amostra (m^2). A permeabilidade ao ar K_a (μm^2) foi calculada pela condutividade ao ar (K_l), como segue:

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g}$$

onde:

K_a = permeabilidade ao ar (μm^2); K_l = condutividade ao ar (cm s^{-1}); η = viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$); ρ_l = densidade do ar na hora da medição (kg m^{-3}) e g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$).

O espaço aéreo ou porosidade de aeração (ε_a) foi calculado como a diferença entre a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água medido em cada camada de todos os tratamentos.

5.6.6 Condutividade hidráulica solo saturado

Após determinação da umidade volumétrica e da permeabilidade ao ar, as amostras foram novamente saturadas por capilaridade durante 48 horas e, posteriormente, submetidas ao teste de condutividade hidráulica constante. O fluxo de água foi medido em permeômetro de carga constante até que se atingisse a condição de equilíbrio dinâmico, mediante a aplicação de uma carga hidráulica constante de 2 cm de coluna d'água, conforme descrito por Libardi (2005). Acoplado ao anel da amostra de solo foi colocado um anel adicional na parte superior, preso com uma fita adesiva, a fim de ser suprida com uma carga hidráulica constante. Sob cada amostra, havia um recipiente para coleta da água percolada na amostra. Foram realizadas medições da vazão em intervalos de cinco minutos até que se atingisse duas a três leituras semelhantes. A condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}) foi calculada de acordo com a equação:

$$K_{sat} = \frac{q.l}{A.h.t}$$

onde, q = volume de água percolado pela amostra (cm^3); l = altura da amostra (cm); A = área da amostra de solo (cm^2); h = lâmina de água aplicada (cm); t = tempo de mediação (horas).

5.6.7 Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo foi ajustada utilizando a metodologia descrita por Silva et al. (1994). Amostras com estrutura preservada foram equilibradas em diferentes e sequenciais potenciais envolvendo funis de Haines, mesa de tensão e placas porosas, conforme Klute (1986). Após aplicar cada potencial as amostras foram pesadas e os dados de conteúdo volumétrico do solo foram obtidos em função da tensão aplicada ao solo.

Com os valores da umidade volumétrica do solo e do potencial matricial, ajustou-se a equação de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980) utilizando-se o software SWRC (*Soil Water Retention Curve*) desenvolvido por Dourado Neto *et al.* (2000), para a obtenção dos parâmetros empíricos de ajuste α , m , n , e fixando a θ_s no valor correspondente à porosidade total e θ_r como valor da umidade volumétrica à tensão de 1500 kPa.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + (\alpha \Psi_m)^n\right)^m}$$

onde, θ = umidade volumétrica; θ_r = umidade volumétrica residual; θ_s = umidade volumétrica do solo saturado; Ψ_m = potencial matricial da água no solo; α , m , n = parâmetros empíricos de ajuste da equação.

5.6.8 Índice S

Com o auxílio do programa Soil Water Retention Curve - SWRC (Dourado Neto et al., 2001), os dados de retenção da água do solo nos diferentes tratamentos e camadas foram ajustados às curvas, pelo modelo de Genuchten (1980). No cálculo do índice S, os pares de pontos experimentais (θ, Ψ) foram ajustados com as equações de van Genuchten (1980), descrita anteriormente. Dexter e Bird (2001) demonstraram o módulo do potencial da água no ponto de inflexão, quando é plotado como $\ln(\Psi)$ versus θ :

$$\Psi_i = [(1/\alpha) (1/m)^{1/n}]$$

Substituindo a equação anterior na de van Genuchten encontra-se a umidade do solo no ponto de inflexão:

$$\theta_i = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) [1 + (1/m)]^{-m} + \theta_{\text{res}}$$

Como demonstrado por Dexter (2004) isso dá a inclinação (*slope*) da curva de retenção de água no ponto de inflexão.

$$S = -n (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) [1 + (1/m)]^{-m},$$

onde Ψ está em hPa e θ está em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

5.6.9 Intervalo hídrico ótimo do solo como indicador de qualidade do solo

Para determinação do IHO, é necessário o conhecimento das curvas de retenção de água e de resistência mecânica do solo a penetração. A relação funcional entre potencial matricial (ψ_m) e conteúdo de água no solo (θ) foi ajustada pelo procedimento descrito por Silva et al. (1994).

Para tanto, foram coletadas amostras com estrutura preservada (0,05m de altura por 0,057 m de diâmetro) sendo aplicados os seguintes potenciais: -6 e -10 kPa numa mesa de tensão e a -33, -50, -70, -100, -500 e -1500 kPa, mediante pressões aplicadas em placas porosas. Após atingir o equilíbrio, as amostras foram pesadas e, posteriormente utilizadas para determinação da resistência à penetração.

A resistência do solo à penetração foi determinada em cada amostra após a aplicação dos potenciais já especificados, com o que se estabeleceu um gradiente de umidade entre as amostras. Utilizou-se um penetrômetro eletrônico de bancada da marca Marconi para determinação da resistência do solo à penetração com uma medida feita no centro geométrico de cada amostra. Utilizou-se uma velocidade constante de penetração de 60 mm min⁻¹, e cone com diâmetro de base de 4 mm e ângulo de 30°. O aparelho é equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados (Tormena et al., 1998). Na sequência, as amostras foram secadas em estufa a 105°C para a determinação do conteúdo de água e da densidade do solo.

A curva de resistência do solo foi ajustada por meio de um modelo não linear proposto por Busscher (1990):

$$RP = a \times \theta^b \times Ds^c$$

onde, os coeficientes a, b e c são parâmetros do ajuste.

O IHO foi determinado, conforme descrito em Silva et al. (1994), para cada amostra, e o valor da densidade do solo conhecido. Os valores críticos para o crescimento das culturas associados com o potencial mátrico, resistência do solo e porosidade de aeração foram respectivamente: a capacidade de campo (θ_{CC}) ou conteúdo de água no potencial de -10 kPa, o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou o conteúdo de água no potencial de -1500 kPa, o conteúdo de água no solo em que a resistência (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa, e o conteúdo de água no solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 0,10 m³ m⁻³.

O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água em que ocorrem as restrições dos parâmetros físicos considerados. O limite superior é o menor valor de θ considerado na capacidade de campo ou na porosidade com ar de 10%, e o limite inferior é o maior valor de θ na resistência à penetração de 2,0 MPa ou no ponto de murcha permanente.

A água disponível (AD) no solo foi estimada pela diferença entre a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).

Para a obtenção dos parâmetros de estimação do IHO, utilizou-se um algoritmo por meio do programa estatístico desenvolvido por Leão et al. (2005).

5.6.10 Determinação da densidade relativa do solo

A normalização da densidade do solo denota o grau de compactação ou compactação relativa do solo, GC, que é definida como:

$$GC = 100 D_s / D_{ref}$$

onde, D_s é a densidade atual do solo e D_{ref} é a densidade do mesmo solo em um estado de referência obtido em laboratório. A referência foi obtida pela D_s atingida quando o solo é submetido a uma carga axial de 1600 kPa no ensaio de compressibilidade (já descrito anteriormente). O grau de compactação ou compactação relativa é expresso em porcentagem.

5.6.11 Disponibilidade hídrica às plantas

O conteúdo de água foi monitorado com a utilização de um sistema automatizado de determinação, coleta e armazenamento de dados, usando-se o equipamento TDR – *Time Domain Reflectometry* – (WANG et al., 1998).

A umidade do solo foi monitorada continuamente durante o ciclo da cana-de-açúcar e da mandioca, desde a data de plantio até o ponto de maturação. Para isso, instalou-se sondas com duas hastes conectadas por cabo coaxiais a um TDR 100 e armazenadores de dados (*datalogger*) para fazer as leituras e o armazenamento dos dados.

As sondas foram instaladas nas camadas de 0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,40 e 0,40 a 0,60 m para a cultura da cana-de-açúcar, sendo que para a cultura da mandioca, a umidade volumétrica foi medida até a camada de 0,20 a 0,40 m. Nas duas camadas superficiais, as sondas foram instaladas na horizontal à superfície do solo, ou seja, de forma que as duas hastes ficassem paralelas à superfície do solo. Nas demais camadas, as sondas foram instaladas a 45° da camada equivalente, abrangendo os 20 cm da camada que coincide com o comprimento da sonda. Para aferição dos dados, utilizou-se no sistema uma equação de calibração específica para o solo em estudo, conforme descrito em Kaiser et al. (2010).

A água disponível às plantas (mm) foi calculada por meio da diferença do conteúdo de água volumétrica medida no campo e do conteúdo volumétrico de água no ponto de murcha permanente obtido no potencial de -1500 kPa, multiplicado pela espessura da camada (em mm) equivalente.

5.6.12 Produtividade

A produtividade da cana-de-açúcar foi determinada pela colheita manual de quatro metros lineares da cultura na linha central de cada parcela. Na sequência fez-se a separação de ponteira e colmo através da diferença de pigmentação e desprendimento da bainha. A partir disso, realizou-se a pesagem dos colmos e obteve-se a produção de cada parcela, bem como dos tratamentos caracterizados pelos diferentes níveis de compactação do solo.

Para avaliação da produtividade da mandioca, foram coletadas aleatoriamente três plantas médias por parcela experimental, totalizando nove repetições por tratamento. Das plantas colhidas, tomaram-se a massa das raízes tuberosas das três plantas e, obteve-se então a produção média de cada parcela e, por conseguinte, de cada manejo e preparo do solo por área ($t\ ha^{-1}$) plantada.

5.7 Análise dos dados

Os dados obtidos nas avaliações foram inicialmente submetidos à análise de distribuição normal, com o uso do teste de Shapiro-Wilk. Para as variáveis condutividade hidráulica saturada e permeabilidade do solo a ar, o teste de normalidade seguiu distribuição não normal. Assim, foram transformadas para posterior teste estatístico.

Os resultados obtidos na primeira coleta para densidade do solo, macro e microporosidade, porosidade total e resistência do solo à penetração, foram submetidos à análise de variância e, quando o teste f foi significativo, fez-se a comparação de médias pelo teste da diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade de erro. Para tal, considerou-se o sistema de preparo ou manejo como fator principal e a posição de coleta como fator secundário, constituindo-se um modelo de análise com parcela subdividida.

Para a análise estatística da pressão de preconsolidação e índice de compressão da primeira coleta, bem como de todos os parâmetros avaliados na segunda coleta, os dados foram submetidos à análise de variância e, quando o teste f foi significativo, fez-se a comparação de médias pelo teste da diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade de erro, tendo como fator principal o tratamento e o fator secundário a camada.

Também foi realizada a análise de correlação de Pearson entre as propriedades físicas avaliadas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Cana-de-açúcar

6.1.1 Propriedades físicas do solo (época 1)

A densidade do solo (Tabela 3) não apresentou diferença significativa na camada superficial entre os tratamentos e nas posições de coleta de solo. Nessa camada, foram observados os menores valores de densidade do solo, comparado às demais camadas. Em todas as camadas, os resultados observados indicam que os maiores valores foram verificados na entrelinha da cultura, onde não houve revolvimento e alteração provocados pela abertura do sulco para o plantio, não apresentando impedimento no desenvolvimento radicular das culturas. Tais resultados são concordantes com os obtidos por Roque et al. (2011), quando avaliaram o efeito do tráfego em relação à linha de cultivo sobre a densidade do solo em um Latossolo Vermelho Distrófico sob cana-de-açúcar.

Na camada de 0,05 a 0,10 m, houve diferença significativa para os diferentes níveis de compactação e posição, sendo o maior valor de densidade ($1,73 \text{ Mg m}^{-3}$) verificado no PDC, devido ao maior acúmulo das tensões exercidas pelo tráfego das máquinas, seguido do PD ($1,71 \text{ Mg m}^{-3}$), do ESC ($1,60 \text{ Mg m}^{-3}$) e do PC ($1,58 \text{ Mg m}^{-3}$). Diferenças entre tratamentos também foram observadas na camada de 0,20 a 0,40 m. Nessa camada, o maior valor médio de densidade do solo foi verificado para o PC, sendo essa camada localizada abaixo da camada onde há ocorrência de “pé-de-arado”, característico desse sistema de preparo do solo.

A macroporosidade (Tabela 3) apresentou diferença significativa para o fator tratamento e para posição, nas duas camadas mais superficiais e na camada de 0,20 a 0,40 m. Por ser uma variável que apresenta alta relação com a densidade do solo, observou-se que, nos diferentes níveis de compactação e nas diferentes camadas, a macroporosidade reduziu com o aumento do estado de compactação medido pela densidade do solo. De modo geral, os valores de macroporosidade são superiores a 10%, considerado mínimo para o pleno desenvolvimento das plantas (VOMOCIL; FLOCKER, 1966), com exceção do PDC e do PC nas camadas de 0,10 a 0,20 e de 0,20 a 0,40 m.

A microporosidade (Tabela 3) apresentou diferença significativa na camada superficial do solo. De maneira geral, os resultados observados foram sensivelmente superiores na

camada mais superficial (0,05 a 0,10 m), opondo-se ao encontrado na camada mais profunda (0,40 a 0,60 m). O menor valor da microporosidade foi encontrado nos tratamentos em que houve revolvimento do solo (ESC e PC), nas camadas de 0,00 a 0,05, 0,05 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, sendo que, a partir dessa última camada, o PD e o PDC também apresentaram baixos valores de microporosidade. Esse resultado indica que a microporosidade teve comportamento inverso à macroporosidade, com menores valores de microporosidade na linha da cultura, corroborando com os resultados obtidos por Roque et al., (2011). Os microporos do solo são responsáveis pela retenção de água, a qual será utilizada pelas plantas em diferentes condições de disposição de água no solo, inclusive em épocas de estiagem. Os macroporos, assim que ocorre a rápida drenagem da água no solo, são responsáveis pela aeração do solo (HILLEL, 1998).

A porosidade total (Tabela 3) não apresentou diferença significativa nas camadas em estudo, o que pode ser explicado pelo acúmulo de matéria orgânica na superfície do solo em todos os manejos e preparos do solo. Nas camadas de 0,05 a 0,10 e 0,20-0,40 m verificou-se maior porosidade na linha da cultura e nos tratamentos onde ocorreu algum tipo de mobilização.

Tabela 3 - Densidade do solo (Mg m^{-3}), macroporosidade, microporosidade e porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) da primeira época, nos quatro tratamentos e nas quatro camadas para a cultura da cana-de-açúcar.

Posição	Densidade do solo					Macroporosidade					Microporosidade					Porosidade total				
	----- Mg m^{-3} -----					----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----														
	ESC	PC	PD	PDC	Média	ESC	PC	PD	PDC	Média	ESC	PC	PD	PDC	Média	ESC	PC	PD	PDC	Média
Camada 0,00-0,05 m																				
Entrelinha	1,50	1,45	1,58	1,71	1,56A	0,14	0,21	0,16	0,10	0,15A	0,29	0,24	0,25	0,26	0,26A	0,43	0,45	0,40	0,35	0,41A
Linha	1,40	1,51	1,55	1,46	1,48A	0,23	0,19	0,15	0,19	0,19A	0,25	0,24	0,26	0,26	0,25A	0,47	0,43	0,42	0,45	0,44A
Média	1,45a	1,48a	1,57a	1,59a		0,18a	0,20a	0,16a	0,15a		0,27a	0,24a	0,25a	0,26a		0,45a	0,44a	0,41a	0,40a	
Camada 0,05-0,10 m																				
Entrelinha	1,70	1,63	1,73	1,77	1,71A	0,11	0,14	0,10	0,09	0,11B	0,23	0,26	0,26	0,25	0,25A	0,36	0,39	0,35	0,33	0,36B
Linha	1,50	1,54	1,68	1,69	1,60B	0,20	0,17	0,11	0,11	0,15A	0,25	0,24	0,24	0,24	0,25A	0,44	0,42	0,36	0,36	0,40A
Média	1,60a	1,58a	1,71a	1,73a		0,15a	0,15a	0,11a	0,10a		0,24a	0,25a	0,25a	0,25a		0,40 ^a	0,40a	0,36a	0,35a	
Camada 0,10-0,20 m																				
Entrelinha	1,73	1,79	1,71	1,76	1,75A	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10A	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25A	0,35	0,33	0,35	0,34	0,34A
Linha	1,67	1,71	1,68	1,71	1,69A	0,13	0,09	0,13	0,11	0,11A	0,24	0,27	0,24	0,28	0,25A	0,37	0,35	0,37	0,35	0,36A
Média	1,70a	1,75a	1,70a	1,73a		0,12a	0,09a	0,12a	0,10a		0,24a	0,26a	0,24a	0,26a		0,36a	0,34a	0,36a	0,34a	
Camada 0,20-0,40 m																				
Entrelinha	1,75	1,79	1,74	1,79	1,77A	0,09	0,08	0,11	0,08	0,09B	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25A	0,34	0,33	0,34	0,32	0,33B
Linha	1,73	1,78	1,60	1,71	1,70B	0,11	0,08	0,16	0,12	0,12A	0,24	0,25	0,24	0,24	0,24A	0,35	0,33	0,40	0,36	0,36A
Média	1,74ab	1,78a	1,67b	1,75ab		0,10ab	0,08b	0,13a	0,10ab		0,24a	0,25a	0,24a	0,24a		0,34ab	0,33b	0,37a	0,34ab	
Camada 0,40-0,60 m																				
Entrelinha	1,66	1,67	1,71	1,67	1,68A	0,14	0,14	0,13	0,14	0,13A	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23A	0,37	0,37	0,35	0,37	0,37A
Linha	1,64	1,74	1,67	1,65	1,67A	0,15	0,11	0,14	0,15	0,14A	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23A	0,38	0,34	0,37	0,38	0,37A
Média	1,65a	1,71a	1,69a	1,66a		0,14a	0,12a	0,14a	0,14a		0,24a	0,23a	0,23a	0,23a		0,38a	0,36a	0,36a	0,38a	

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade.

ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

A resistência mecânica que o solo oferece à penetração com o conteúdo volumétrico de água (Figura 6) evidencia a condição inicial do solo com a aplicação dos preparos e manejos do solo após o plantio (época 1). É um parâmetro bastante utilizado na caracterização de atributos físicos e mecânicos relacionados à trafegabilidade, compactação e manejo do solo e afeta diretamente o crescimento radicular e indiretamente a produtividade das culturas.

A diferença significativa entre os tratamentos para o fator resistência do solo à penetração de raízes foi verificada nas camadas até a profundidade de 0,30 m na entrelinha (Figura 6A) do plantio. Da mesma forma, com exceção da camada superficial (0,00 a 0,05 m), onde se observa maior variação no conteúdo volumétrico de água, na linha também foi evidenciada diferença significativa nas camadas até a profundidade de 0,30 m (Figura 6B).

Foi verificado valores de RP maiores que 2 MPa, considerada crítica para o desenvolvimento radicular das culturas (TAYLOR, 1966), na entrelinha da cultura desde a superfície para a maioria dos manejos e preparos do solo. Todavia, os menores valores de RP foram observados na camada superficial, apenas para o PC e para o PD, o que diferenciou significativamente dos preparos escarificado (ESC) e com compactação adicional (PDC). O PC evidenciou bem a camada mais compactada, com maior resistência mecânica à penetração das raízes,

Na linha do plantio, novamente observou-se uma variação nos valores de RP para a camada superficial, onde se verificaram os menores valores, inclusive inferiores a 2 MPa. No entanto, na camada de 0,15 a 0,30 m, ocorreu o mesmo comportamento verificado na entrelinha do plantio, com valores de RP que excederam o limite permitido para o crescimento e desenvolvimento satisfatórios das plantas. A resistência à penetração na camada de 0,40 a 0,60 m não apresentou diferença significativa, tanto na linha como na entrelinha do plantio, evidenciando que não houve ação dos implementos agrícolas na implantação dos tratamentos (preparo e manejo) no solo.

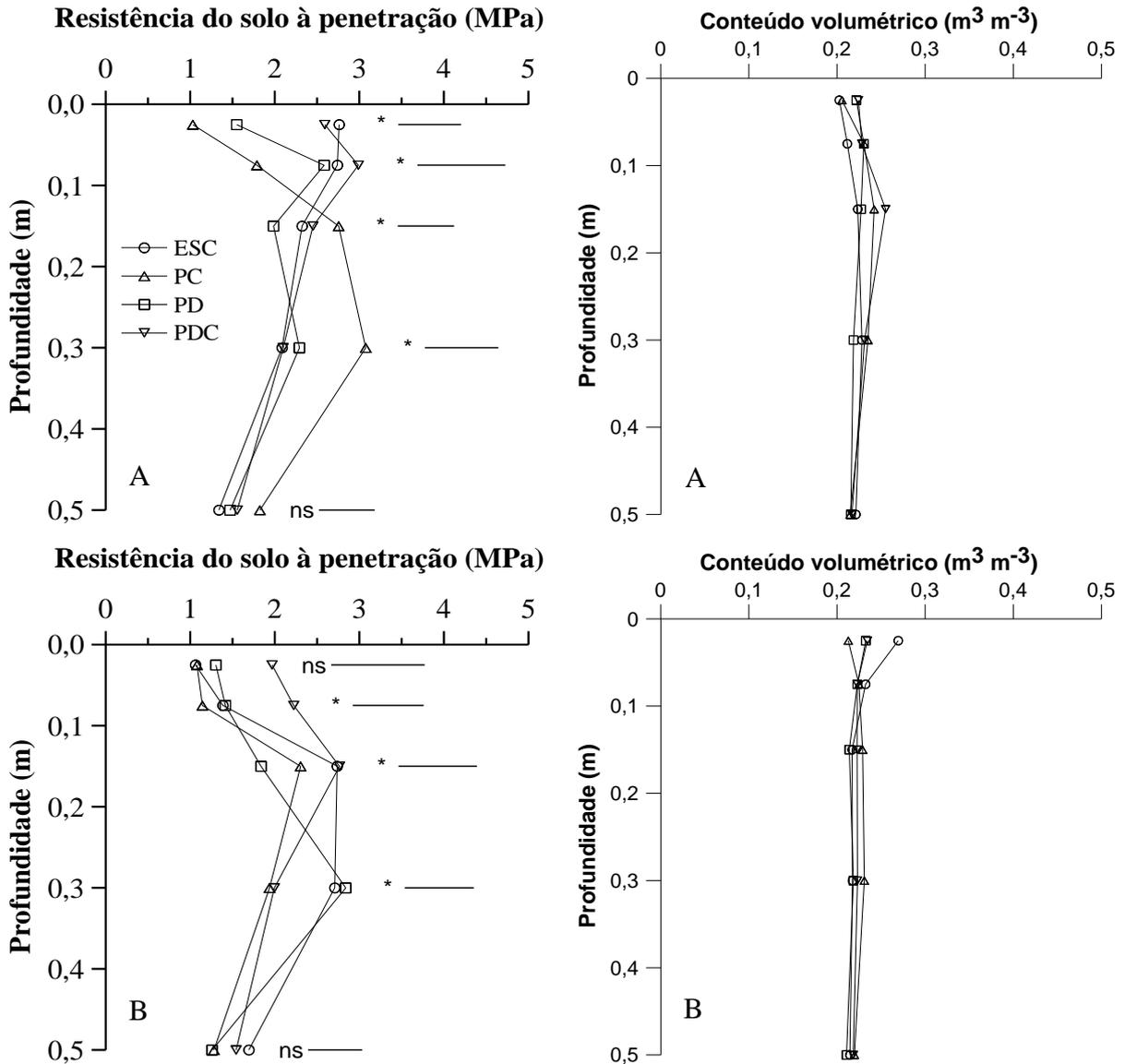


Figura 6 – Resistência do solo à penetração e conteúdo volumétrico de água na entrelinha (A) e na linha (B) do escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) nas camadas em estudo da primeira época. * significativo a 5% de probabilidade de erro; ns = não significativo pelo teste DMS.

A pressão de preconsolidação (Tabela 4) não apresentou diferença significativa para os tratamentos em estudo nas camadas avaliadas, pois houve alto coeficiente de variação (entre 36 e 60%).

A camada superficial (0,00 a 0,05 m) apresentou os maiores valores de σ_p , o que indica maior capacidade de suporte de carga, o que possivelmente esteja associada ao maior conteúdo de matéria orgânica nessa camada. Embora não tenha apresentado diferença

significativa, observa-se que, na camada de 0,10 a 0,20 m, a σ_p foi maior no PDC, seguido do PD comparada aos demais preparos e manejo do solo, o que justifica por ser essa a camada com maior impedimento físico. Esses valores indicam que níveis de pressões aplicadas ao solo maiores que a σ_p para determinada umidade, acarretam compactação adicional do solo.

O índice de compressão (Tabela 4) também não apresentou diferença significativa nas camadas estudadas. Os maiores valores de IC foram encontrados na camada superficial, pois é essa camada que recebe as tensões aplicadas ao solo no momento do preparo e cultivo do solo. Dentre os manejos e preparos do solo, o ESC e o PDC apresentaram valores bem próximos (0,24 e 0,23, respectivamente), enquanto o PD, em todas as camadas, se destacou com maior o índice de compressão, o que demonstra que, para esses tratamentos, há maior susceptibilidade à compactação.

Tabela 4 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p , kPa) e de índice de compressão (IC) para os preparos e manejos do solo, nas três camadas em estudo da época 1 para a cultura da cana-de-açúcar.

Camada m	Tratamentos					CV %
	ESC	PC	PD	PDC	Média	
σ_p (kPa)						
0,00-0,10	108,03a	88,98a	88,22a	100,58a	96,57	50,73
0,10-0,20	83,37a	71,66a	106,07a	118,47a	94,22	60,77
0,20-0,30	80,95a	77,94a	75,68a	106,70a	84,71	36,93
IC						
0,00-0,10	0,24a	0,21a	0,29a	0,23a	0,24	30,28
0,10-0,20	0,11a	0,10a	0,12a	0,10a	0,11	12,95
0,20-0,30	0,10a	0,12a	0,14a	0,12a	0,12	7,00

Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado. σ_p = pressão de preconsolidação; IC = índice de compressão; CV = coeficiente de variação.

6.1.2 Parâmetros físico-hídricos (época 2)

Na cultura da cana-de-açúcar, não houve diferença significativa a 5% de probabilidade de erro para densidade do solo, macroporosidade, porosidade total do solo para os fatores tratamentos (Tabela 5). Dentre os tratamentos, o PC apresentou, na média, menor densidade do solo, correspondendo ao preparo que recebeu revolvimento e o PDC ficou com a maior D_s , justificado pelas tensões que foram aplicadas ao solo nesse tratamento, confirmando estudo realizado por Kaiser (2010) no mesmo tipo de solo com diferentes manejos do solo.

O aumento da densidade do solo pode prejudicar o desenvolvimento do sistema radicular das culturas. Quando analisada entre as camadas, as alterações mais expressivas de densidade do solo foram obtidas na camada de 0,20 a 0,40 m para o PC, PD e PDC (1,66; 1,67 e 1,71 Mg m^{-3} , respectivamente). Isso se deve, possivelmente, ao fato de o solo ter sido revolvido até a profundidade de 0,30 m para o plantio da cana-de-açúcar, deixando o solo solto e suscetível à compactação nas camadas inferiores, comparado a sistemas de plantio direto durante alguns anos, em que o solo está mais estruturado e proporciona maior resistência à compactação, além de não atingir as camadas mais profundas (BEUTLER et al., 2007).

No tratamento ESC, o maior valor de D_s (1,71 Mg m^{-3}) foi observado na camada superficial. As menores densidades foram observadas na camada superficial para o PD possivelmente pela ação da abertura do sulco para o plantio da cana-de-açúcar e ainda pela maior quantidade de material orgânico na superfície do solo, camada de 0,20 a 0,40 m para o ESC e camada de 0,40 a 0,60 m para o PC e PDC. As médias dos valores de densidade do solo encontrados tanto nas camadas quanto nos tratamentos avaliados estão abaixo de 1,75 Mg m^{-3} , considerado por Reichert et al. (2009), como limitante às culturas sob solos de textura arenosa.

A macroporosidade (Tabela 5) não foi afetada pelo manejo e preparo do solo. Os valores encontrados foram inferiores ou próximos a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, considerado como mínimo para um bom desenvolvimento do sistema radicular (CANNEL, 1977). Roque et al. (2011) também encontraram valores de macroporosidade abaixo disso num estudo que avaliou o controle de tráfego em cultivo com cana-de-açúcar. Por haver uma relação direta e altamente significativa com a densidade do solo, a macroporosidade e a porosidade total reduziram nas camadas e tratamentos em que apresentaram valores significativamente elevados de D_s .

Portanto, o tráfego de máquinas provocou aumento da densidade do solo e, por conseguinte, da resistência do solo à penetração das raízes, com redução da macroporosidade, corroborando com Beutler et al. (2009) e Collares et al. (2006).

Tabela 5 - Densidade do solo (Mg m^{-3}), macro e microporosidade e porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da cana-de-açúcar na época 2.

Camada (m)	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
Densidade do solo (Mg m^{-3})						
0,00-0,10	1,71a	1,61a	1,59a	1,64a	1,64	6,67
0,10-0,20	1,62a	1,63a	1,64a	1,65a	1,63	6,79
0,20-0,40	1,59a	1,66a	1,67a	1,71a	1,66	7,92
0,40-0,60	1,65a	1,59a	1,66a	1,61a	1,63	7,24
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,10	0,06a	0,07a	0,09a	0,07a	0,07	43,58
0,10-0,20	0,08a	0,07a	0,07a	0,07a	0,07	47,86
0,20-0,40	0,10a	0,07a	0,07a	0,05a	0,07	55,38
0,40-0,60	0,08a	0,09a	0,07a	0,08a	0,08	53,42
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,10	0,25b	0,27a	0,25b	0,27a	0,26	10,77
0,10-0,20	0,25a	0,26a	0,26a	0,26a	0,26	6,36
0,20-0,40	0,25a	0,25a	0,25a	0,26a	0,25	5,34
0,40-0,60	0,26a	0,27a	0,25a	0,25a	0,26	6,47
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
0,00-0,10	0,31a	0,34a	0,34a	0,34a	0,33	12,47
0,10-0,20	0,33a	0,33a	0,33a	0,33a	0,33	11,16
0,20-0,40	0,34a	0,33a	0,33a	0,31a	0,33	12,12
0,40-0,60	0,33a	0,36a	0,32a	0,34a	0,34	14,71

ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado. Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si pela DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

A microporosidade (Tabela 5), responsável pela retenção e redistribuição da água no solo, apresentou diferença significativa entre os tratamentos apenas na camada superficial. Nessa, os menores valores foram encontrados no tratamento ESC e PD com valores de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, em ambos os tratamentos. Os maiores valores de microporosidade foram verificados no PC e no PDC, ambos com $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, resultado dos elevados valores obtidos, principalmente, na camada de 0,00 a 0,10 m.

Embora não se tenha verificado diferença significativa a 5% de probabilidade de erro para o atributo condutividade hidráulica do solo saturado, K_{sat} , (Tabela 6) os valores mostram que o tratamento ESC com $41,11 \text{ mm h}^{-1}$ foi significativamente maior quando comparado com os tratamentos PD, com $27,51 \text{ mm h}^{-1}$, o PC com $10,55 \text{ mm h}^{-1}$ e o PDC com $7,30 \text{ mm h}^{-1}$. Esse comportamento é atribuído à menor densidade, possivelmente maior continuidade de poros e, conseqüentemente, menor compactação do solo apresentada no tratamento com revolvimento do solo, correspondente ao PC. Para Mesquita & Moraes (2004), a condutividade hidráulica saturada do solo é determinada pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água, tornando-se dependente da forma, distribuição e continuidade dos mesmos.

Mesmo que não tenha apresentado diferença significativa entre as camadas, com coeficiente de variação de 23 a 54 %, verificou-se maior K_{sat} na camada superficial, possivelmente em virtude do efeito do sulco do plantio, o que proporciona melhoria na condução de água no solo em virtude da sua maior porosidade e continuidade de poros (KAISER, 2010).

Tabela 6 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da cana-de-açúcar, na época 2.

Camada M	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
	Condutividade hidráulica (mm h^{-1})					
0,00-0,10	41,11a	10,55a	27,51a	7,30a	22,03	23,03
0,10-0,20	4,25a	6,06a	6,12a	14,23a	7,71	34,74
0,20-0,40	9,17a	2,04a	16,89a	3,15a	7,78	54,06
0,40-0,60	1,64a	17,57a	21,40a	7,09a	11,92	31,25

ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado. Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si pela DMS a 5% de probabilidade de erro.

Constatou-se ainda uma redução da condutividade hidráulica nas camadas intermediárias, principalmente na camada de 0,10 a 0,20 m, com menor K_{sat} nos tratamentos PD e PDC, com 4,25 e 6,06 mm h^{-1} , respectivamente. A mesma tendência também foi observada na camada de 0,20 a 0,40 m, com valores que oscilaram entre 2,04 e 16,89 mm h^{-1} , sendo os tratamentos PC e PD, respectivamente. Costa et al. (2003) verificaram redução dos

valores de K_{sat} com o aumento da profundidade do solo em PD em Latossolo Bruno e atentam para o efeito dos sistemas de preparo sobre a densidade e porosidade do perfil do solo.

A relação da condutividade hidráulica em função da macroporosidade do solo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, proposta Reichert et al. (2007), para estimativa da K_{sat} crítica assume o valor mínimo de $13,8 \text{ mm h}^{-1}$. Com base nisso, este estudo assumiu valores entre $2,33$ e $13,8 \text{ mm h}^{-1}$, em virtude dos baixos valores de macroporosidade. Kaiser (2010) encontrou valor mínimo de K_{sat} de $10,6 \text{ mm h}^{-1}$ num estudo com diferentes níveis de compactação em Argissolo Vermelho-Amarelo. A condutividade hidráulica depende da estrutura do solo e, dessa forma, os sistemas de preparo que modificam a estrutura do solo influenciam diretamente na condutividade hidráulica do solo saturado. Ellies et al. (1997) relatam que a condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades tais como, quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros.

Pelo fato de a condutividade hidráulica na condição saturada depender em grande parte da forma e continuidade do sistema poroso, varia fortemente de um local a outro, apresentando em determinados locais valores extremos, podendo diferir também para as distintas orientações do solo. A condutividade hidráulica na condição saturada é mais dependente, portanto, da estrutura do que da textura do solo. Ao aumentar o grau de agregação de um solo, o valor dessa condutividade hidráulica aumenta. O efeito da estrutura e em especial dos poros grandes, possibilita a um solo argiloso exibir valores de K_{sat} similares aos solos arenosos. Todas estas propriedades do espaço poroso, que influenciam a condutividade, podem ser reunidas no termo único “geometria porosa dos solos” (LIBARDI, 2005).

Estes resultados indicam que a menor condutividade hidráulica do solo implica na menor infiltração e movimentação da água nos diferentes sistemas de preparo e manejo no perfil do solo. A intensidade do tráfego provoca aumento da compactação do solo com efeitos negativos nos atributos físicos do solo, com redução da macroporosidade, da porosidade total, da infiltração de água no perfil e elevação da densidade do solo (MENTGES et al., 2010). Esses mesmos autores verificaram que a redução da macroporosidade provocada pela compactação de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, não provocou diferenças significativas na condutividade hidráulica do solo. Daí a importância do entendimento e

predição do fluxo de água no solo para o manejo agrícola e ambiental (NETO; FERNANDES, 2005).

Quando correlacionada com os parâmetros físicos do solo, verificou-se que o aumento da densidade do solo e consequente redução da macroporosidade e porosidade total influenciaram negativamente na condutividade hidráulica do solo (Tabela 7), corroborando com Klein (2012) de que a compactação e, por conseguinte, a descontinuidade dos poros diminui a condutividade do solo saturado. Portanto, pode-se inferir que esse parâmetro é sensível na diferenciação do efeito dos sistemas de preparo e manejo do solo e informa o movimento da água no solo.

Tabela 7 – Correlação de Pearson entre os parâmetros físicos do solo: densidade do solo, macro e microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica do solo saturado.

	DS	Mac	Mic	PT	Ksat
DS	1	-0,904 ^{**}	-0,240 [*]	-0,900 ^{**}	-0,048 ^{ns}
Mac	-	1	0,037 ^{ns}	0,892 ^{**}	0,043 ^{ns}
Mic	-	-	1	0,485 ^{**}	-0,058 ^{ns}
PT	-	-	-	1	0,008 ^{ns}
Ksat	-	-	-	-	1

** significativo a 0,0001; * significativo a 0,01; ns = não significativo. DS = densidade do solo; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade; PT = porosidade total; Ksat = condutividade hidráulica do solo saturado.

A distribuição do tamanho de poros (Figura 7) não teve diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade de erro nas camadas avaliadas, o que significa que os preparos e manejos do solo não influenciaram nas classes de poros, já que esse parâmetro é influenciado pela diferença de textura e estrutura do solo (KAISER, 2010). Houve uma pequena variação no diâmetro de poros entre os tratamentos em todas as camadas.

Houve um predomínio do volume de poros menores que 50 μm , considerado como a classe dos microporos responsáveis pela retenção e disponibilidade de água às plantas. Para a classe de poros menor que 3 μm para os sistema de manejo ou preparo do solo em todas as camadas avaliadas, pode-se dizer que, em função da força com que a água está retida nesses

poros, não está disponível às plantas. A distribuição do tamanho dos poros é determinada pela estrutura do solo e, aliada ao teor de argila e de matéria orgânica afeta, em muito, a dinâmica da água no solo e, principalmente, a sua disponibilidade às plantas (KLEIN, 2012).

A segunda classe de poros que apresentou maior volume de poros em todos os tratamentos e em todas as camadas foi a classe de 300 a 50 μm , considerada por Klein e Libardi (2002) como a classe dos macroporos e que perdem água nas tensões menores que 6 kPa. Dessa classe, o PD se destacou com maior volume de poros na camada superficial, seguido pelo ESC nas duas camadas seguintes e, na camada mais profunda, o PDC. Possivelmente, o baixo volume dos poros de maior diâmetro deve-se ao aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade indicada pelos valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A distribuição do tamanho de poros no solo condiciona a difusão de oxigênio e a drenagem da água que ocorrem predominantemente nos macroporos, bem como a capacidade do solo de retenção de água disponível, através dos microporos, ao sistema radicular. Nesse sentido, o conhecimento desse parâmetro permite avaliar o comportamento físico-hídrico do solo, influenciando a potencialidade agrícola dos solos (RIBEIRO et al., 2007).

A relação ideal entre microporos e porosidade total do solo, descrita em Reynolds et al. (2002), para um desenvolvimento satisfatório das plantas, é de 0,66. Tal condição facilita a drenagem rápida do excesso de água por meio dos macroporos, promove adequada aeração do solo e, por meio dos microporos, o armazenamento e disponibilidade de água às plantas. No solo em estudo, a relação entre microporos e porosidade total foi superior ao valor de 0,66, com valores entre 0,72 e 0,83. Os maiores valores dessa relação são ocasionados pelo aumento da densidade do solo e, conseqüentemente, da redução da porosidade total do solo.

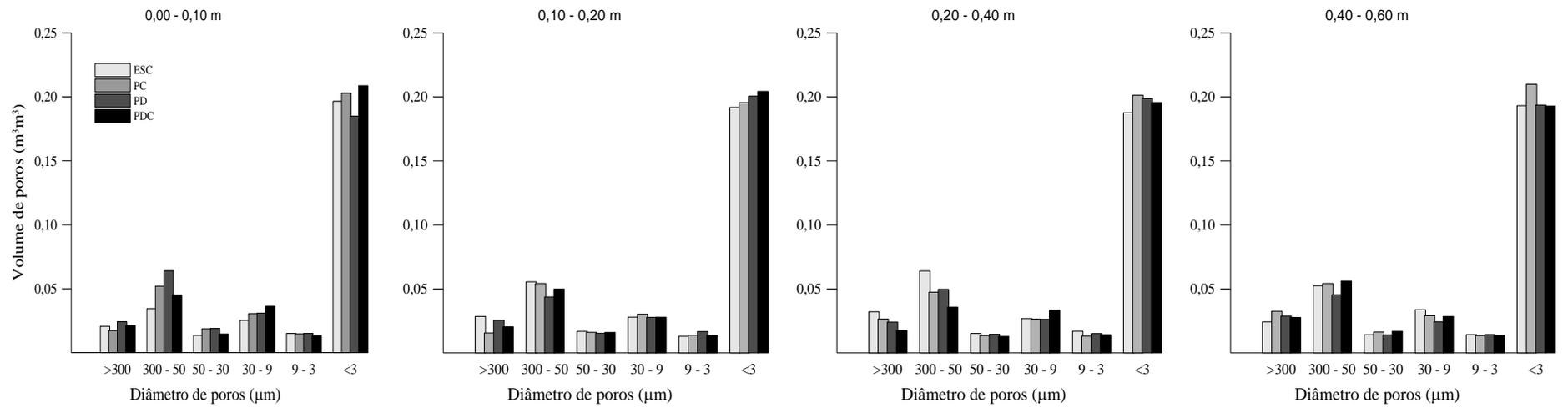


Figura 7 – Distribuição do tamanho de poros para os diferentes tratamentos: escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) e camadas: 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40 a 0,60 m.

Não houve diferença significativa a 5% de probabilidade de erro nos potenciais de -6, -10 e -33 kPa para a permeabilidade do solo ao ar, devido ao alto coeficiente de variação, entre 130 a 141% (Figura 8).

Ao analisar as camadas, verificou-se que, na média, a camada superficial apresentou maior K_{ar} e maior incremento nos menores potenciais, ou seja, nos potenciais mais negativos. Esse fator é explicado pela drenagem dos poros maiores, favorecendo a macroporosidade e, conseqüentemente a passagem de ar nesses poros (FONTANELA, 2008). À medida que a camada estudada é aprofundada, verificou-se que foi diminuindo a declividade da curva e ocorreu, inclusive, uma inversão, onde a K_{ar} diminuiu com a drenagem da água do solo na camada de 0,10 a 0,20 para o PDC, caracterizando o efeito do tráfego provocado nesse tratamento, na camada de 0,20 a 0,40 m para o PD 0,40 a 0,60 m, para os tratamentos em estudo, com exceção do PD que, possivelmente, o resultado do aumento da K_{ar} seja provocado pela atividade biológica, especialmente por bioporos observados nas amostras.

Nos potenciais maiores (-6 e -33 kPa), o PDC apresentou os menores valores de K_{ar} , seguidos do PD, pois esses potenciais têm relação direta com a macroporosidade do solo. O tratamento que recebeu escarificação apresentou maior K_{ar} . Nos potenciais mais negativos (-33 e -100 kPa), os menores valores de K_{ar} foram verificados no tratamento PDC, seguidos do tratamento ESC, onde a microporosidade e a porosidade total são afetadas em virtude da adoção do manejo e preparo do solo, respectivamente. Nesse sentido, a relação da K_{sat} com a K_{ar} é afetada no potencial de -6 kPa e, a medida que ocorre a drenagem, ou seja, diminui os potenciais, aumenta também a K_{sat} .

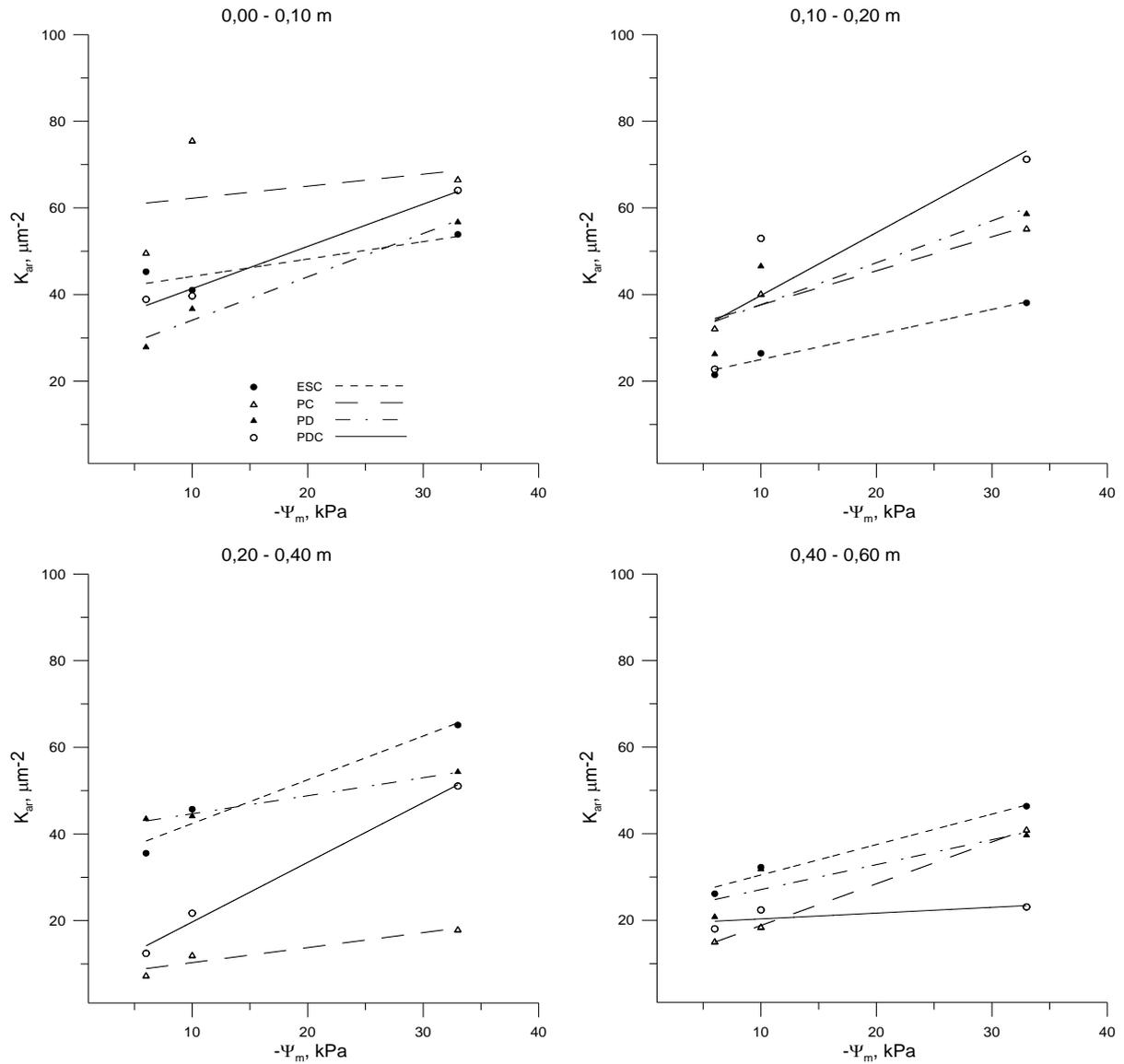


Figura 8 - Permeabilidade do solo ao ar (μm^2), nos potenciais de água (-6, -10, -33 e -100 kPa), nas camadas e tratamentos para a cultura da cana-de-açúcar. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

O espaço aéreo ou porosidade de aeração (ε_a), obtido pela diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar (225 dias, outubro a maio - 2011/2012) nas diferentes camadas são apresentadas nas Figuras 10 a 14.

Todos os poros do solo ocupados por água, à medida que são drenados aumenta o percentual de poros de ar no solo. Desse modo, o espaço aéreo, responsável pelas trocas gasosas e quantidade de água disponível às plantas, pode ser, portanto, fator limitante da produtividade das culturas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; SILVA, 2003).

Verifica-se que, de forma geral, todos os tratamentos em todas as camadas a porosidade de aeração permaneceu acima de $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ considerados como ótimos para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A camada superficial é caracterizada por apresentar maior quantidade de poros, em virtude do efeito da matéria orgânica e do aporte de materiais orgânicos presentes nessa camada, fazendo com que os micro-organismos atuem nessa camada no processo de decomposição e, com isso, no revolvimento natural do solo. Além disso, é a camada em que ocorre maior perda de água após a precipitação, seja pela drenagem e/ou mesmo, nos casos em que há variações de temperatura (amplitude térmica) pela exposição do solo.

Nas demais camadas, o tratamento que recebeu escarificação (ESC) foi quem se destacou com maior índice de ε_a com exceção da camada de 0,20 a 0,40 m que o PC foi, de modo geral, quem apresentou maior porosidade de aeração. Na camada de 0,05 a 0,10 m os tratamentos PC e PD ficaram com menor incidência de espaço aéreo. Para o tratamento que recebeu revolvimento, possivelmente, após a mobilização do solo tenha ocorrido o processo de reconsolidação resultante da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem (HILLEL, 1998), mesmo na ausência de tráfego (SCHÄFER et al. (2001). Assim, no intervalo de tempo entre a mobilização e a amostragem para a realização das determinações físico-hídricas, devem ter ocorrido reconsolidação do solo e rearranjo do espaço aéreo do mesmo, tornando-o menos condutivo.

Nas camadas mais profundas, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m, a menor incidência de poros preenchidos com ar, foi resultado dos tratamentos PD e PDC (sem revolvimento e com adição de carga, respectivamente). As medidas da estrutura do solo requerem um conhecimento da relação entre a permeabilidade ao ar com a porosidade de aeração, embora ambas não sejam bem relacionadas, pois a permeabilidade ao ar é muito sensível aos macroporos e às galerias formadas pela atividade biológica (BALL & SMITH., 1991).

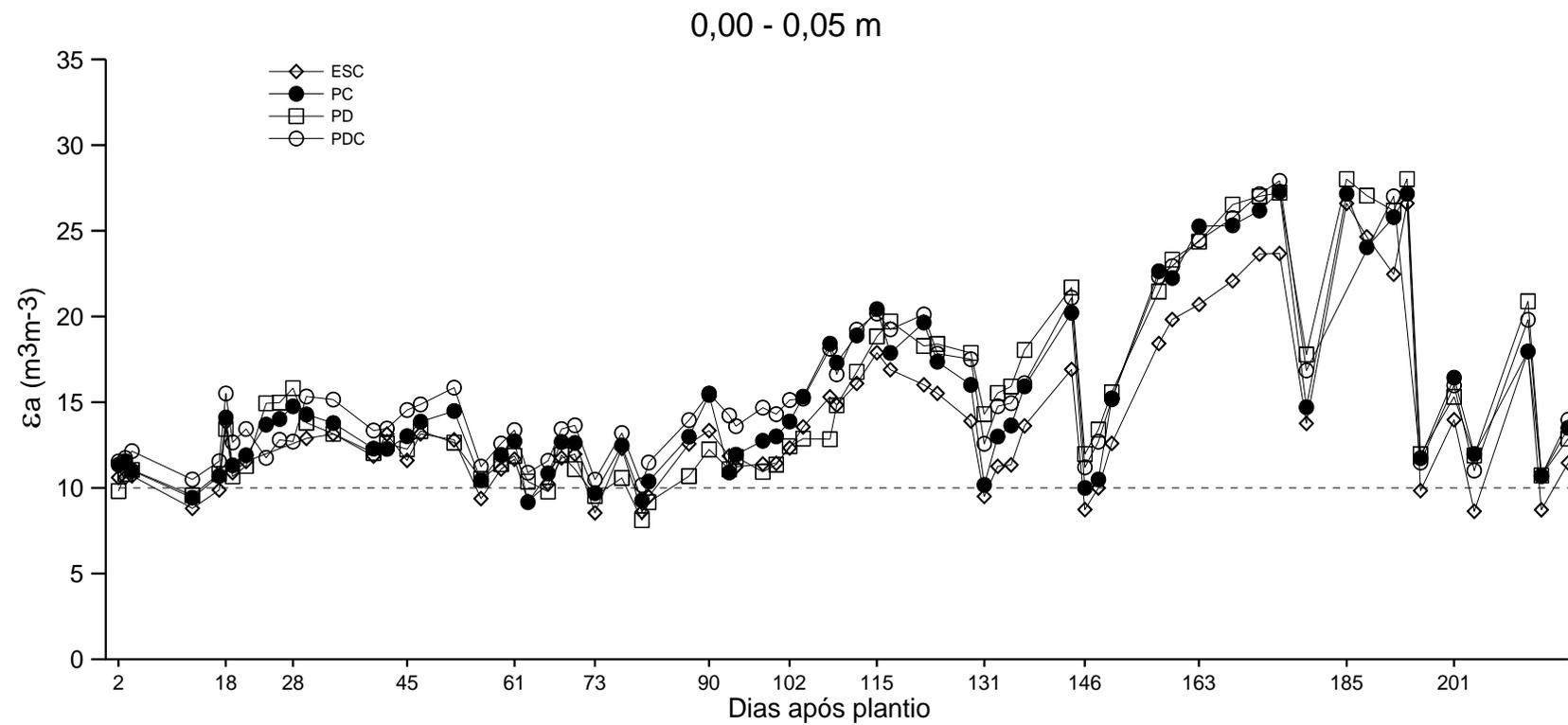


Figura 9 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,00 a 0,05 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

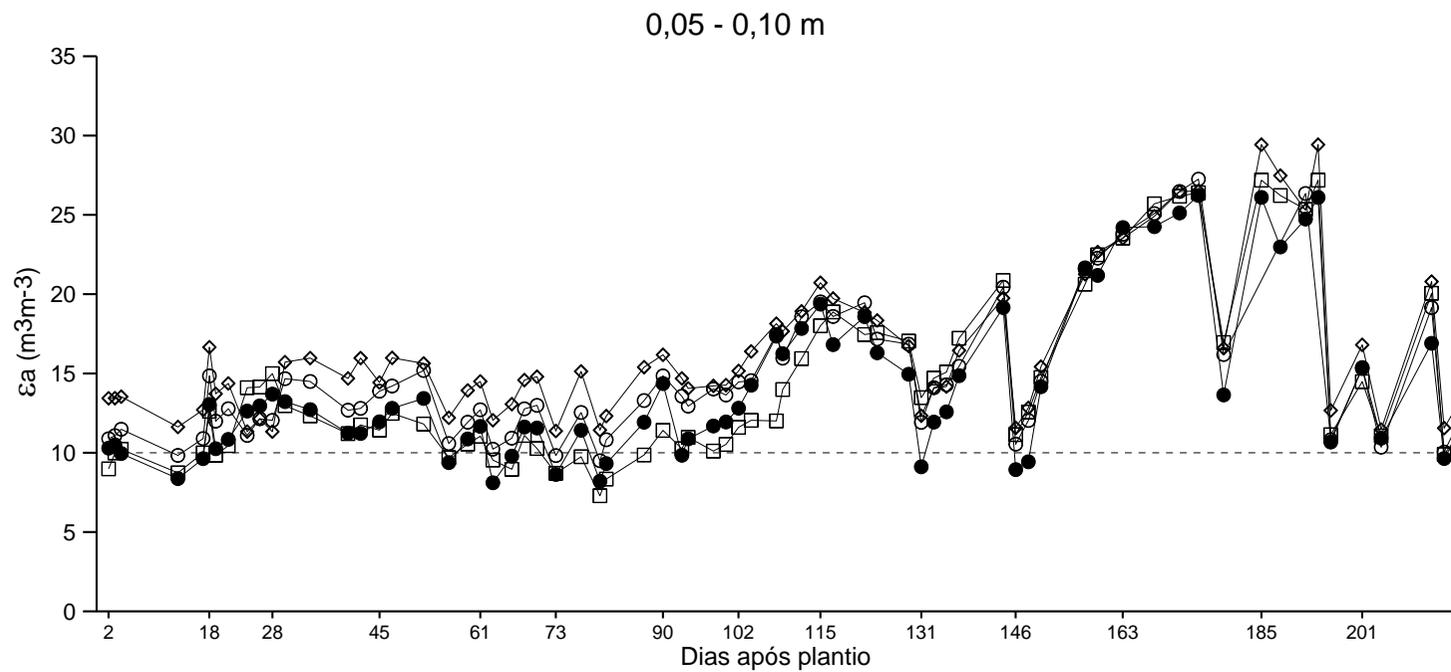


Figura 10 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,05 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

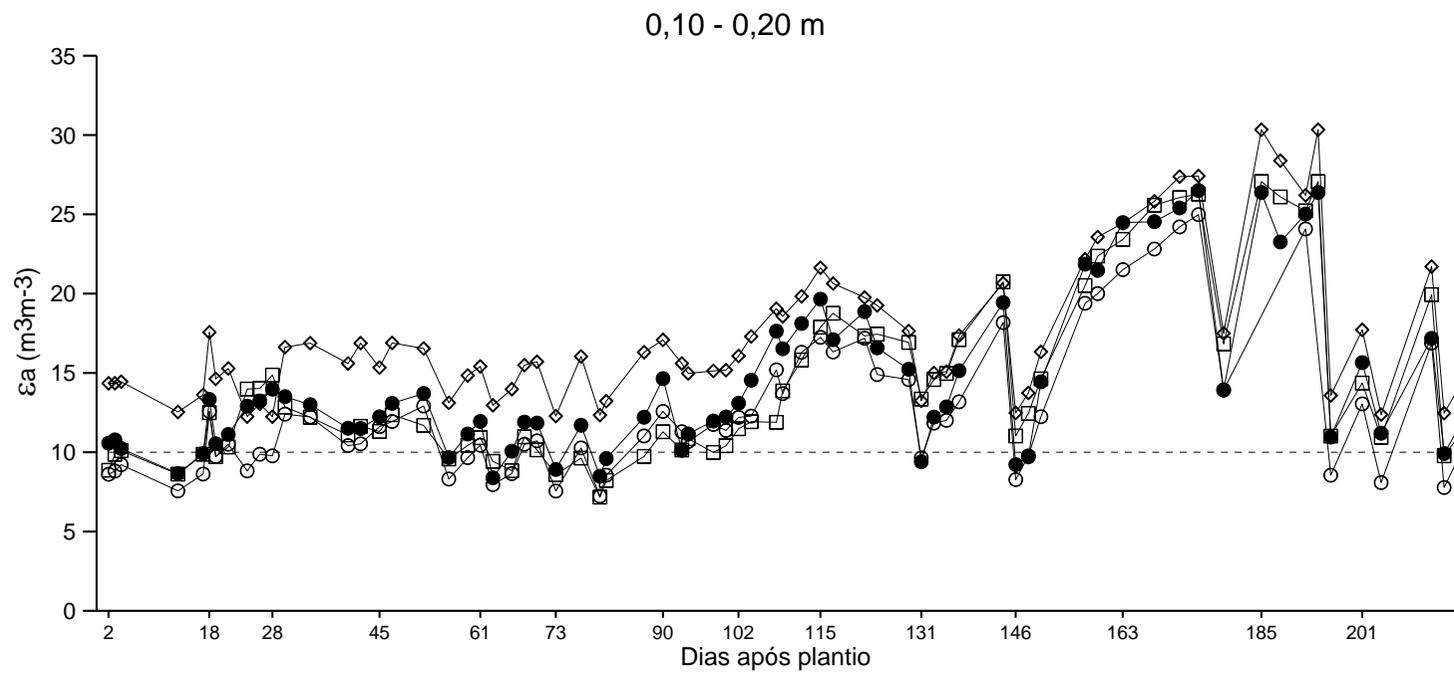


Figura 11 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

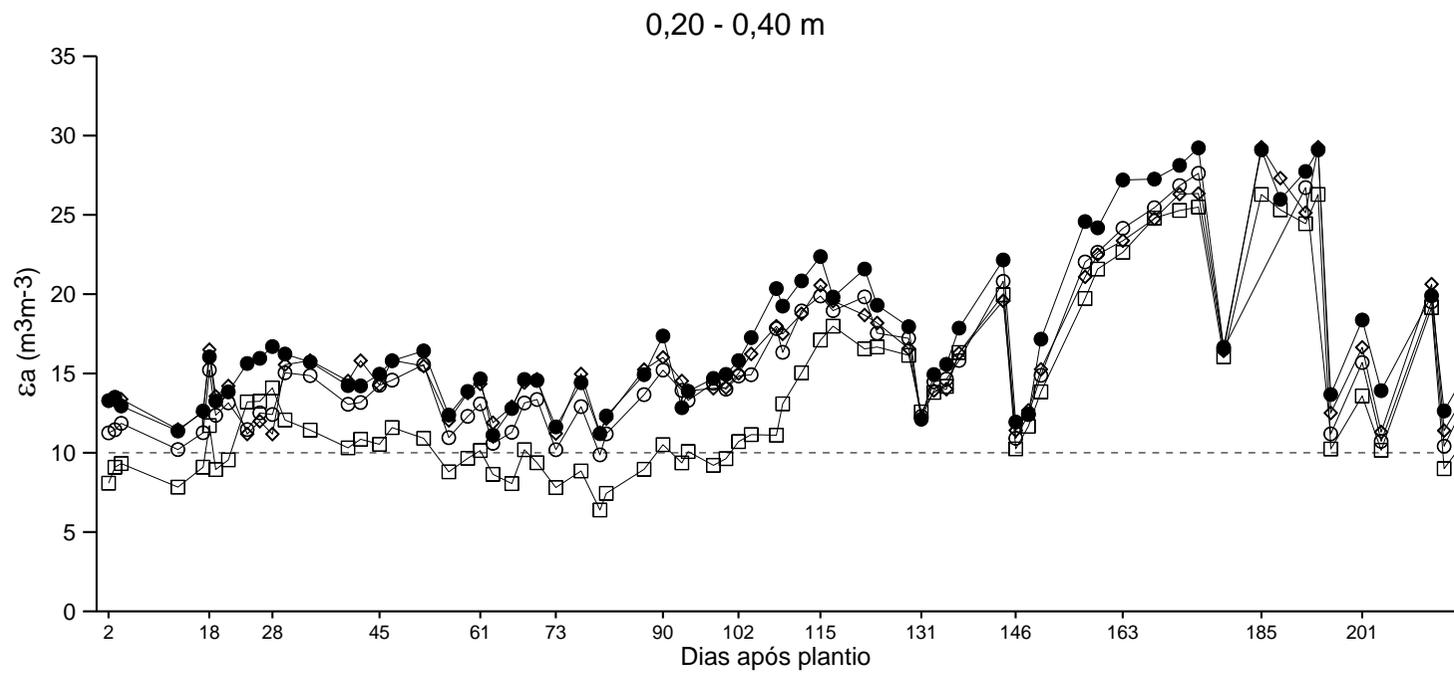


Figura 12 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

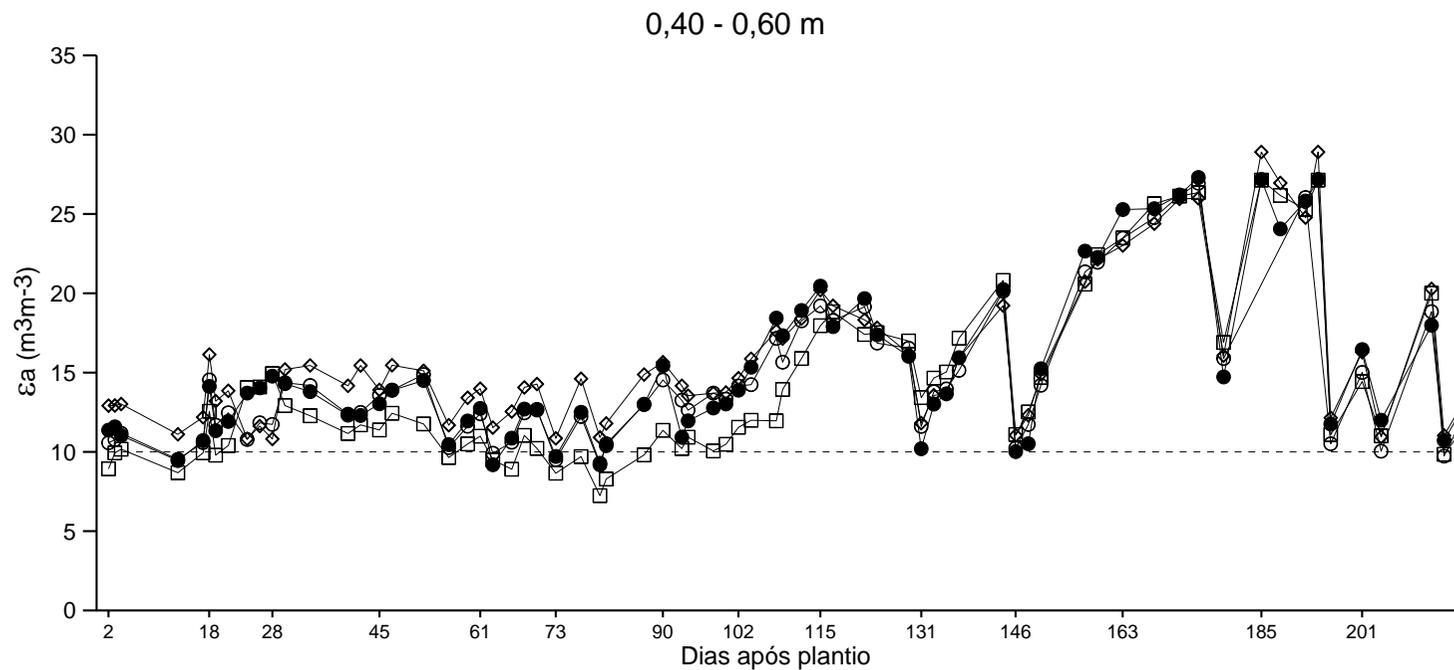


Figura 13 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,40 a 0,60 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Os valores de precipitação diária obtidos da estação experimental de Santa Maria/RS são apresentados na Figura 14. Houve uma distribuição uniforme, com exceção do período de escassez de chuva entre os 58 e 144 dias após o plantio (DAP), o que provocou redução da água armazenada no solo neste período.

A variação da umidade volumétrica do solo para o período estudado (225 dias, outubro a maio - 2011/2012) ao longo do ciclo da cana-de-açúcar nas diferentes camadas é apresentada nas Figuras 15 a 19. Não foi encontrada diferença significativa entre os conteúdos de água do solo nos diferentes tratamentos, ou seja, os diferentes níveis de compactação (ESC, PC PD e PDC) não interferiram no armazenamento de água no solo em todas as camadas (0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,40 e 0,40 a 0,60 m) deste estudo.

A umidade volumétrica do solo oscilou em função da ocorrência das precipitações ao longo do ciclo da cultura. Notou-se que pequenas quantidades de chuva provocaram uma grande variação da umidade do solo na camada superficial (0,00 a 0,05 m) a qual foi reduzindo nas camadas mais profundas do perfil do solo. Nas demais camadas, o conteúdo volumétrico de água oscilou em torno da capacidade de campo, com menor variação nas camadas mais profundas, com destaque apenas para o período de estiagens que manifestou influência em todas as camadas, para todos os tratamentos.

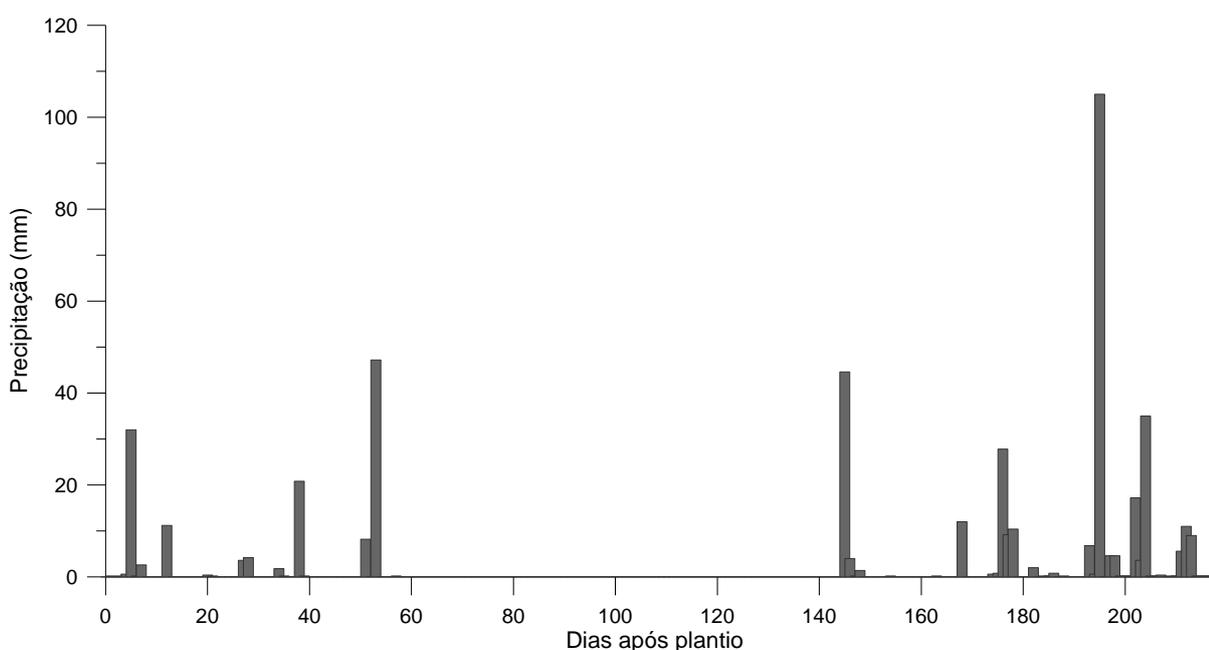


Figura 14 – Precipitação diária ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar medidos na estação automática de Santa Maria/RS.

Embora a umidade volumétrica da camada de 0,00 a 0,05 m, para todos os tratamentos, apresentou valores dentro da faixa de água disponível (limite entre a umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente) ao longo dos dias avaliados, alguns dias do período em que ocorreu a estiagem a umidade atingiu valores bastante baixos, próximo da umidade do ponto de murcha permanente. Da água contida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, apenas uma parte está livremente disponível às plantas (KLEIN, 2012). No entanto, nessa camada (0,00 a 0,05 m), pode-se inferir que não ocorreram problemas e restrições físicas ao crescimento radicular visto que se verificou menor D_s e, conseqüentemente, menor RP e maior aeração do solo nessa camada.

Nas camadas mais próximas à superfície do solo (0,00 a 0,05 e 0,05 e 0,10 m), verificou-se que o tratamento que recebeu mobilização do solo (PC) apresentou menor retenção e armazenamento de água em comparação aos demais tratamentos. Esse fato é mais evidenciado na camada de 0,10 a 0,20, principalmente quando na condição de escassez de chuva, sendo essa informação menos expressiva nas duas camadas mais profundas (0,20 a 0,40 e 0,40 a 0,60 m), onde o PC reteve mais água até o período de 128 DAP, porém sem apresentar diferença significativa dos demais tratamentos. Posteriormente, os conteúdos de água nessas camadas foram bastante semelhantes em todos os níveis de compactação. Resultados semelhantes foram obtidos por Kaiser et al. (2009) em Argissolo submetido aos diferentes níveis de compactação e cultivado com a cultura do girassol.

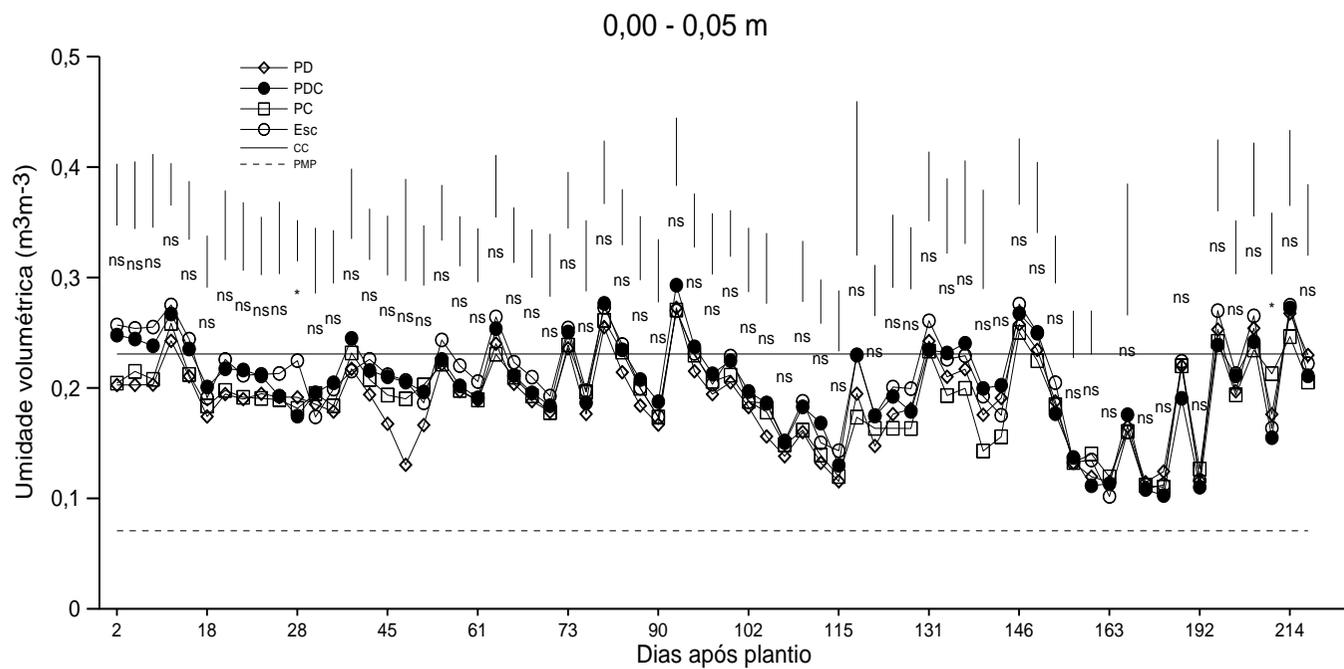


Figura 15 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,00 a 0,05 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

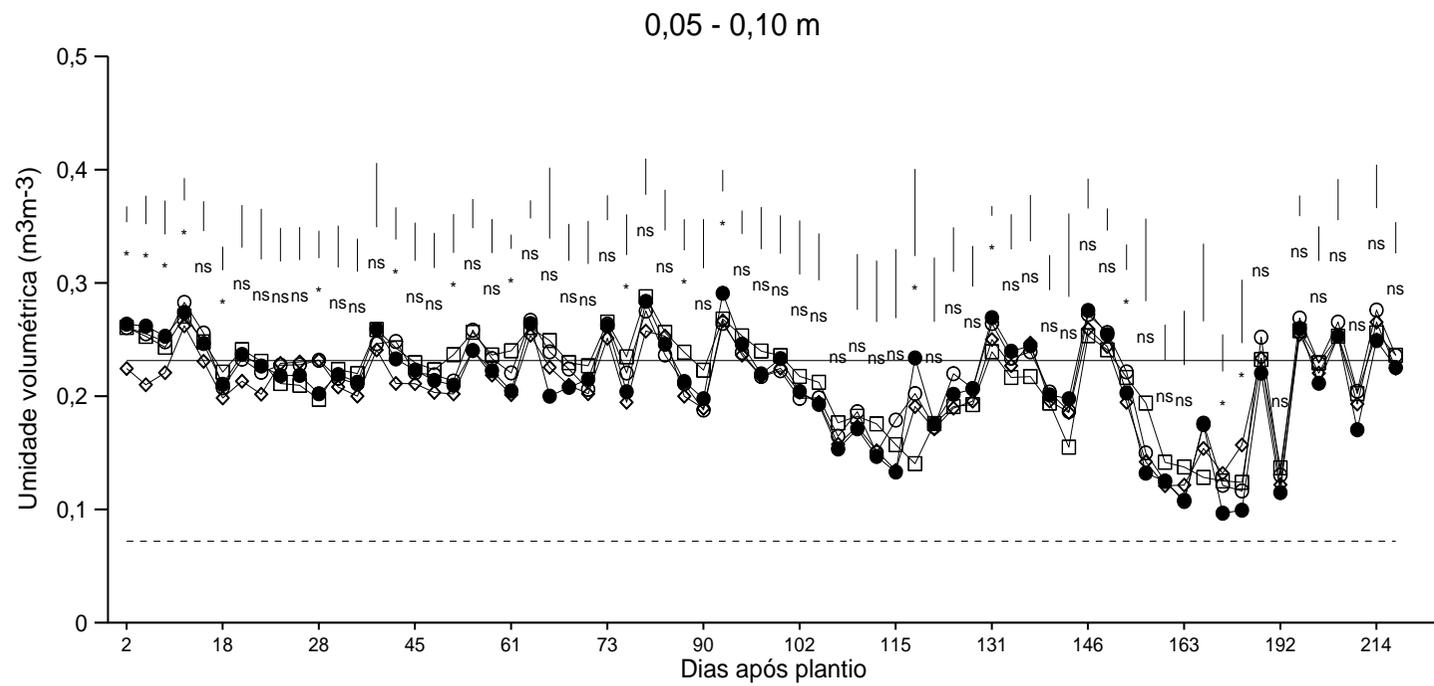


Figura 16 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,05 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plântio convencional, PD = plântio direto, PDC = plântio direto compactado.

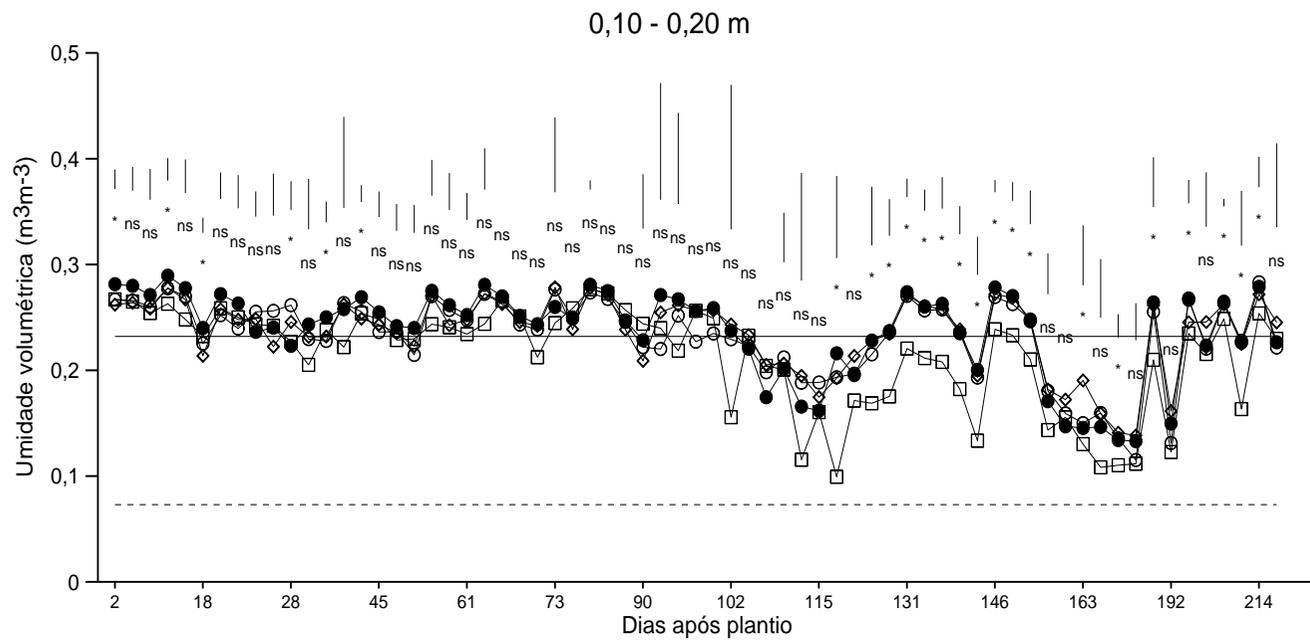


Figura 17 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

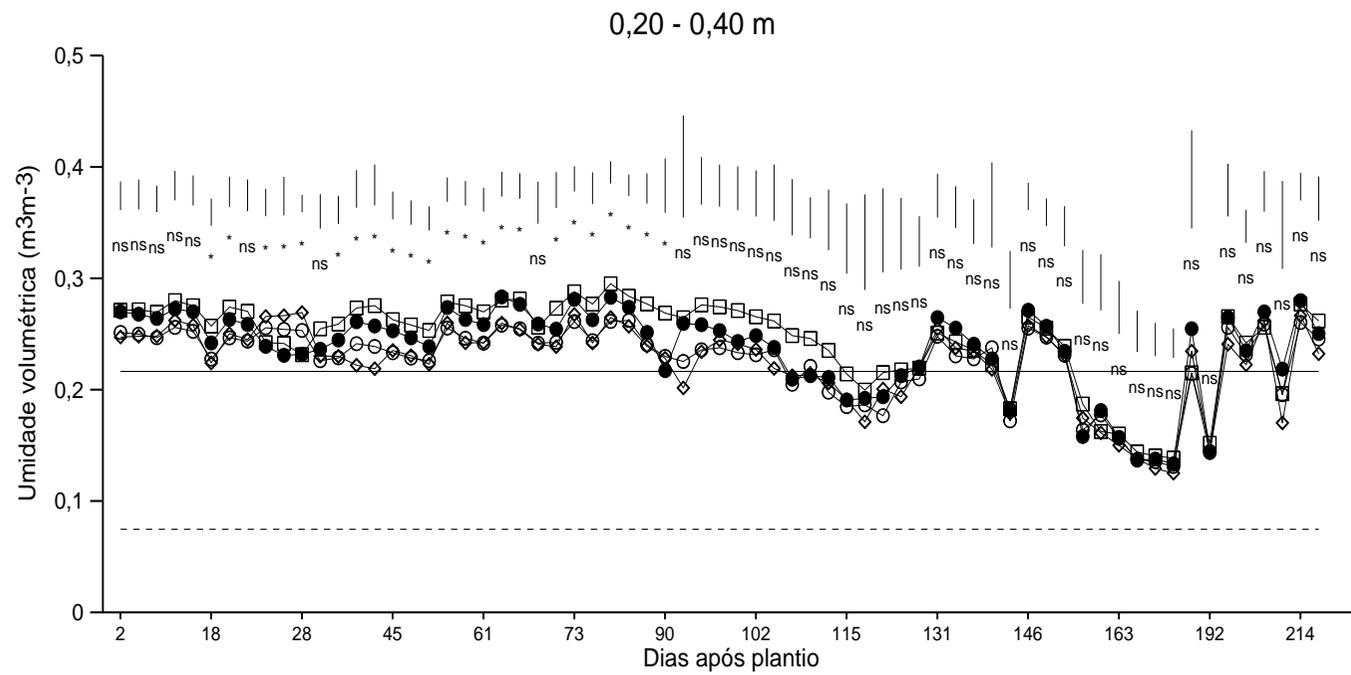


Figura 18 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

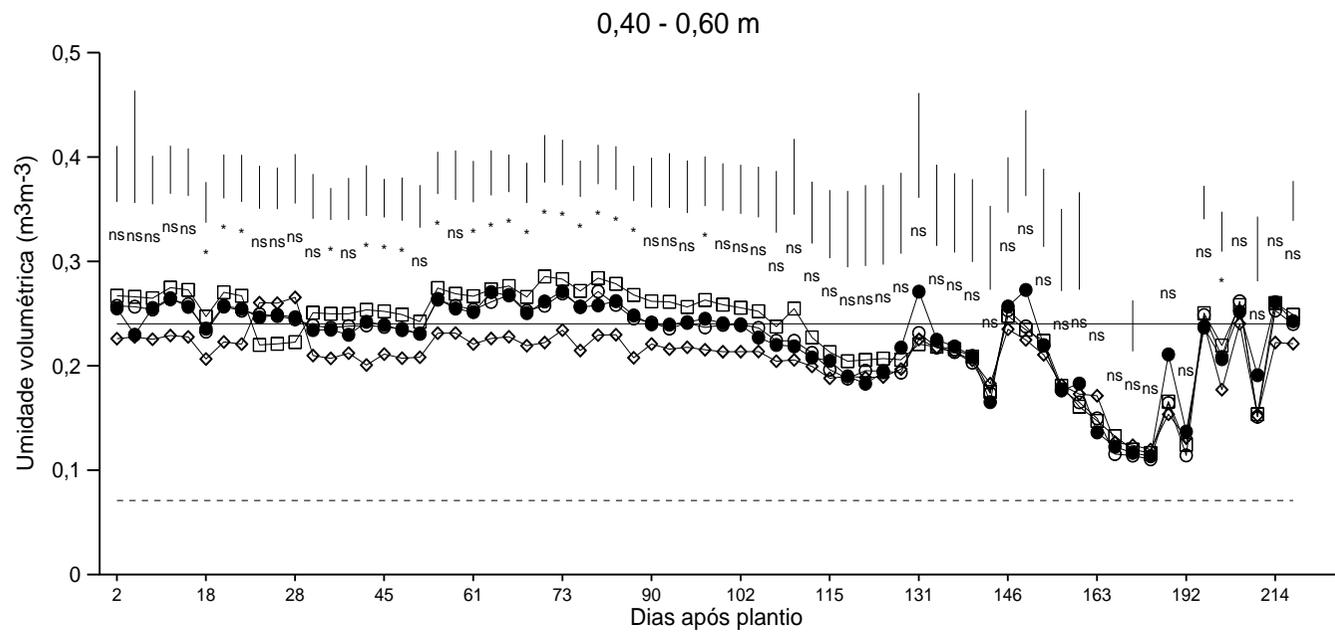


Figura 19 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na camada de 0,40 a 0,60 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

O ESC e o PDC foram, de modo geral, os tratamentos que apresentaram maior conteúdo de água em todas as camadas ao longo dos dias de avaliação. Dessa forma, pode-se inferir que a compactação aplicada não modificou significativamente a retenção de água no solo, podendo estar relacionada à mobilização do solo na linha de plantio da cana-de-açúcar, não interferindo na movimentação e armazenagem da água no perfil do solo.

A umidade do solo está diretamente relacionada e influencia os diversos parâmetros físico-mecânicos do solo e, por isso, é preciso aprimorar esses conhecimentos nos solos arenosos da metade Sul do RS. Para Bernardo et al. (2006) a capacidade do solo em reter e disponibilizar água depende basicamente da textura e estrutura do solo, da quantidade, tamanho e continuidade dos poros e da espessura do horizonte explorado pelo sistema radicular das mesmas.

A disponibilidade de água às plantas (Figura 20) determinada para o período do ciclo da cultura mostrou que a variação da quantidade de água disponível no solo para os diferentes tratamentos esteve diretamente relacionada à quantidade de chuva ocorrida durante o período de observação atingindo, em todos os sistemas de preparo e manejo do solo, picos bastante baixos no período em que ocorreu estiagem (80 a 140 DAP).

Embora não há grande variação de água disponível entre os tratamentos estudados, verificou-se que, nos primeiros dias após o plantio da cana-de-açúcar, o PD apresentou menor quantidade de água disponível comparado com os demais tratamentos. Embora se tenha observado essa semelhança nos diferentes tratamentos, REICHERT et al. (2011) salientam que a água disponível às plantas depende não apenas da capacidade do solo em reter e armazenar a água da chuva e disponibilizar às plantas, mas sim do comportamento do ciclo hidrológico durante todo o ciclo da cultura bem como o manejo do solo adotado.

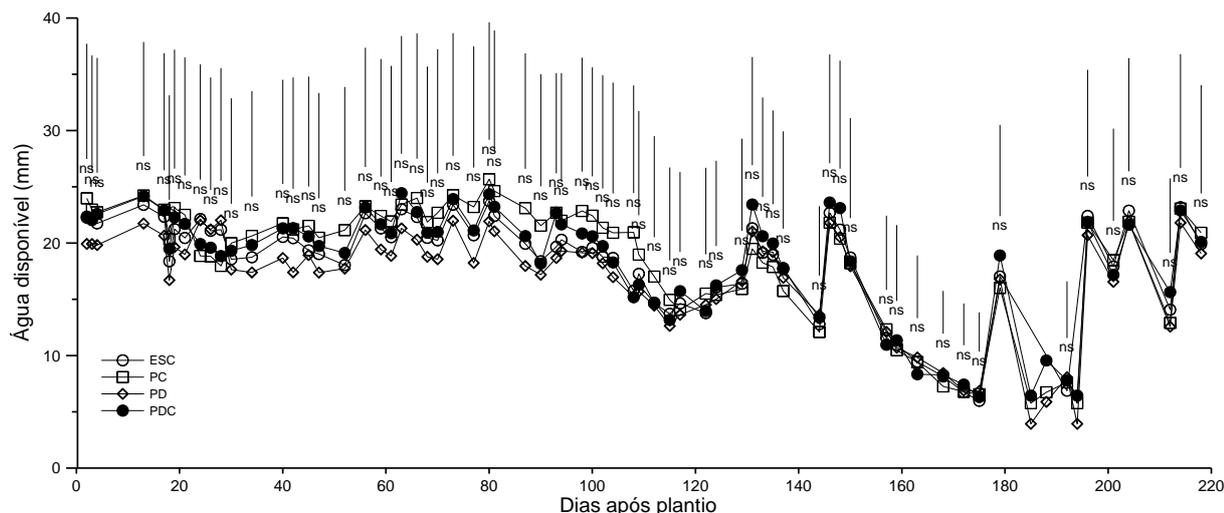


Figura 20 – Água disponível no solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar para os quatro tratamentos em estudo. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

A figura 21 representa as curvas de retenção de água (CRA) dos preparos e manejo do solo. Analisando-se as curvas obtidas para os quatro tratamentos e camadas percebe-se uma tendência de comportamento semelhante entre elas pela umidade de saturação.

A curva de retenção de água no PD mostra que a camada de 0,00 a 0,10 m apresentou menor retenção de água em relação as demais camadas, desde o potencial de -10 kPa até o ponto de murcha permanente (-1500 kPa). Isso pode ser também atribuído ao fato que, nessa camada, o tratamento PD apresentou maior porosidade total. Observou-se também que, para os potenciais inferiores a 10 kPa, a umidade foi menor na camada de 0,40 a 0,60 m. O mesmo ocorreu no PDC, em que essa camada apresenta os valores menores de umidade volumétrica comparados com as demais camadas em estudo. Nos tratamentos em que ocorreu revolvimento do solo, como no PC, a menor umidade foi verificada na camada de 0,20 a 0,40 m, desde a umidade de saturação até o potencial de -10 kPa e, em potenciais menores (mais negativos), a camada de 0,10 a 0,20 m quem apresentou esse comportamento. No ESC verifica-se os menores valores desde a umidade de saturação até 1 kPa para a camada de 0,00 a 0,10 m e nos potenciais acima disso, a camada 0,20 a 0,40 m se destaca. Em suma, pode-se dizer que, nos tratamentos em que não ocorreu revolvimento do solo, houve uma tendência da camada mais profunda (0,40 a 0,60 m) apresentar o menor conteúdo de água, enquanto que nos tratamentos com revolvimento esse comportamento é observado na camada de 0,20 a 0,40 m.

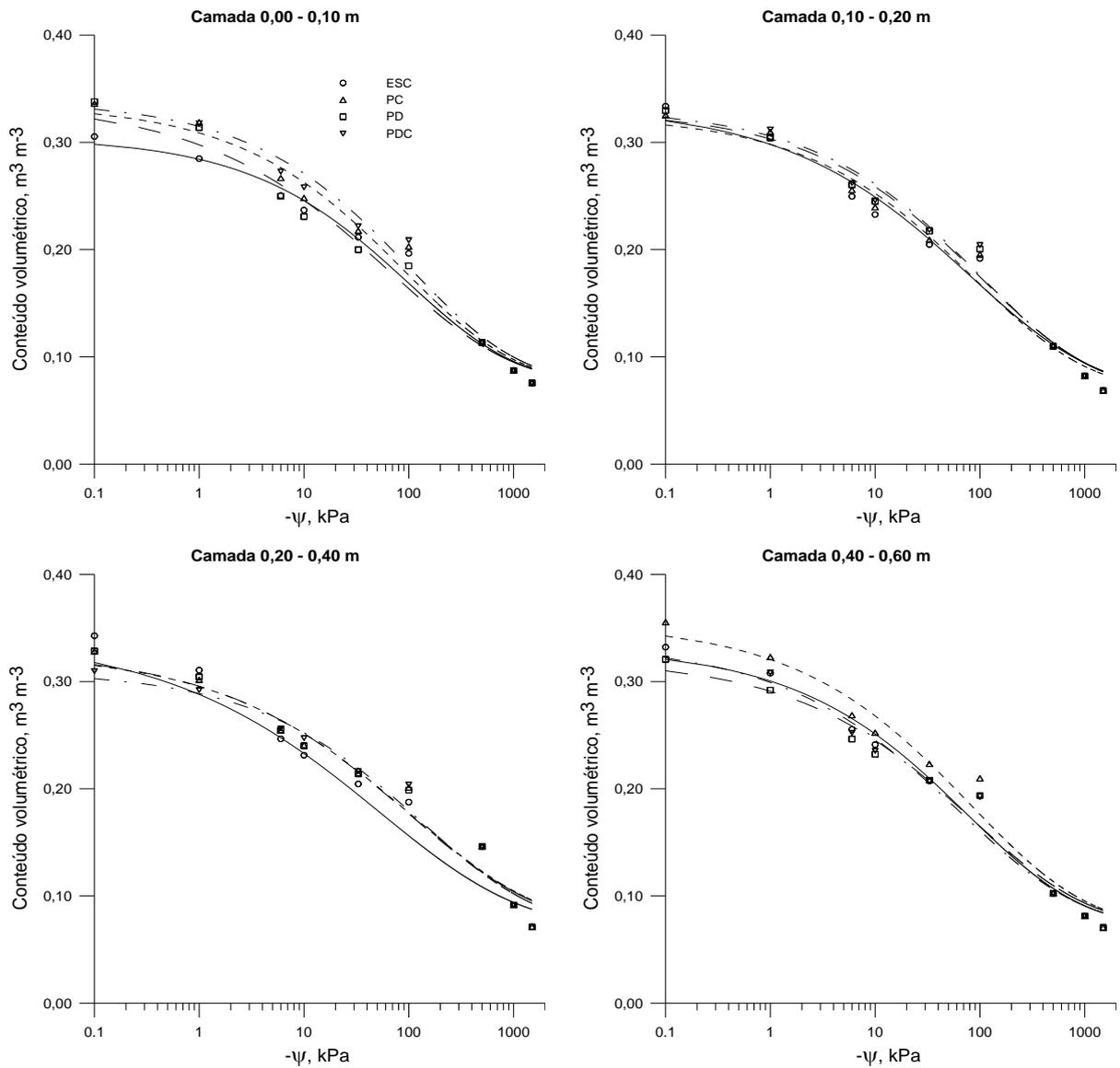


Figura 21 – Curva de retenção de água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten dos preparos e manejo do solo na época 2.

Os maiores conteúdos de água foram verificados na camada de 0,20 a 0,40 m para o PDC, ao longo da curva, e para o PD desde o potencial de -33 kPa até o ponto mais seco da curva. Em potenciais menores, a camada de 0,10 a 0,20 m apresentou os maiores conteúdos. Em contrapartida, nos tratamentos com revolvimento do solo os maiores valores de umidade foram observados na camada de 0,40 a 0,60 m desde a saturação até o potencial de -33 kPa, a

partir desse potencial até -1500 kPa, as camadas de 0,20 a 0,40 e de 0,00 a 0,10 m foram as que apresentaram os maiores valores para o PC e o ESC, respectivamente.

A retenção de água é menor em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica. Além disso, o manejo, a granulometria e a constituição do solo influenciam na retenção de água, pois as forças de adsorção dependem, basicamente, da espessura do filme de água que recobre as partículas, a qual varia de acordo com sua superfície específica (CORCINI, 2008).

6.1.2.1 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

O intervalo hídrico ótimo do solo apresentado na figura 22 considera todas as camadas e tratamentos para o Argissolo em estudo. O IHO é delimitado pela umidade do solo na porosidade de aeração (θ_{PA}) de 10% e umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) no potencial matricial de -10 kPa, como limite superior e umidade do solo equivalente a resistência à penetração (θ_{RP}) de 2 MPa e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) no potencial matricial de -1500 kPa, como limite inferior.

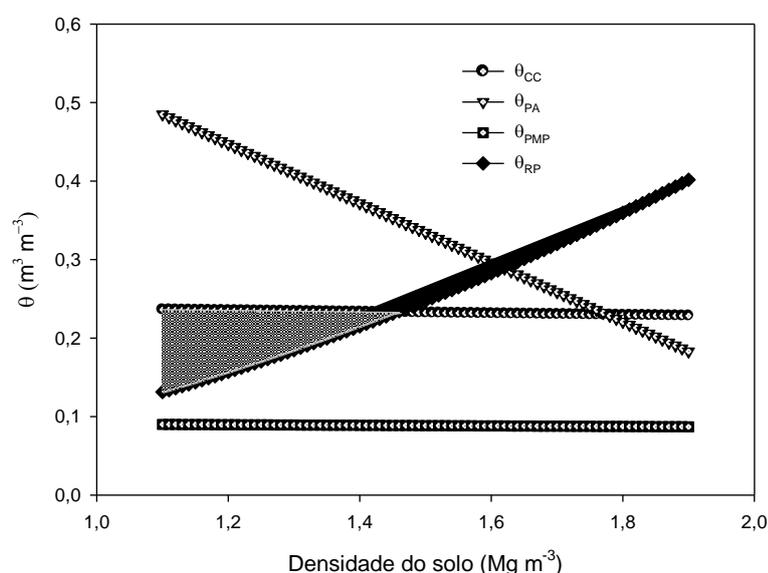


Figura 22 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC $\psi = -10$ kPa), ponto de murcha permanente (PMP $\psi = -1500$ kPa), porosidade de aeração (PA) de 10%, e resistência à penetração (RP) de 2,0 MPa, para os quatro tratamentos e em todas as camadas estudadas. A área hachurada corresponde ao IHO.

A densidade do solo influenciou negativamente no IHO que foi definido pela θ_{CC} no limite superior e θ_{RP} no limite inferior. O IHO foi afetado em toda a sua extensão do limite inferior pela resistência do solo à penetração que foi superior a θ_{PMP} em toda a extensão de densidade do solo, semelhante aos resultados obtidos por Imhoff et al. (2001), Benjamim et al. (2003) e Roque et al. (2011). No limite superior o IHO foi delimitado pela umidade na capacidade de campo no potencial de -10 kPa. O IHO reduziu a zero com o aumento da densidade do solo de 1,10 a 1,48 Mg m⁻³, cuja densidade corresponde à densidade crítica (Dsc) do solo, a qual pode apresentar restrição ao crescimento radicular das plantas. Para Tormena et al. (2008) é necessário aumentar o conteúdo de água no solo para manter a resistência à penetração de 2 MPa e, assim, reduzir a fricção entre as partículas provocadas pelo aumento da densidade.

A θ_{PA} e θ_{PMP} não foram os principais fatores limitantes às condições de umidade para o crescimento e desenvolvimento das plantas. O aumento da densidade coincidiu com a diminuição da θ_{PA} e aumento da θ_{PMP} .

Os limites em que a θ_{CC} e a θ_{RP} convergiram coincide com o ponto em que o IHO é considerado zero. A densidade do solo que coincide com esse ponto é denominada densidade do solo crítica (Dsc) a partir da qual podem ocorrer restrições severas ao crescimento radicular ou o rendimento das plantas, indicando que as condições físicas do solo não são ideais e que pode estar aumentando a degradação do solo. Nesse estudo, o valor de Dsc foi de 1,46 Mg m⁻³, indicando que, provavelmente, os diferentes níveis de compactação implicaram nas condições de densidade do solo restritivas ao desenvolvimento radicular. Reinert et al. (2006) e Reichert et al. (2007) propuseram valores críticos de densidade do solo – quando o intervalo hídrico ótimo é zero – de acordo com as classes texturais. Para o solo com características franco arenosa os autores definiram a Dsc de 1,7 a 1,8 Mg m⁻³.

6.1.2.2 Índice S

O índice S (Tabela 8) representa a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão. Dexter (2004) estabelece limites de $S > 0,035$ e $S < 0,035$ para indicar, respectivamente, boa qualidade estrutural e restritiva para o crescimento radicular das plantas.

Os valores de índice $S < 0,020$ indicam solos muito pobres fisicamente e com alta restrição ao crescimento das raízes das plantas.

Nesse estudo, os valores de S ficaram acima do valor de 0,0035. O índice S para o tratamento PD foi maior na camada de 0,10 a 0,20 m onde apresentou maior teor de água no potencial matricial de -1 kPa a -33 kPa, reduzindo nos demais potenciais. O PDC teve seu maior valor de S na camada de 0 a 10 e 0,40 a 0,60 m em virtude do elevado teor de água ao longo da CRA. O aumento da densidade do solo provoca uma redução do conteúdo de água no solo nos potenciais mais próximos da saturação e aumento no conteúdo de água retido nos potenciais mais negativos (STRECK et al. 2008). Mudanças na estrutura física do solo provoca redução na inclinação da curva de retenção de água no solo e, com isso, reduz o índice S (DEXTER, 2004; DA SILVA, 2004; STRECK et al., 2008).

Tabela 8 – Índice S para o Argissolo Vermelho Amarelo nos tratamentos e camadas em estudo para a cultura da cana-de-açúcar na época 2, calculado a partir das curvas de retenção de água.

Camada (m)	Tratamentos				
	ESC	PC	PD	PDC	Média
0,00-0,10	0,042a	0,040a	0,039a	0,042a	0,041
0,10-0,20	0,041a	0,042a	0,042a	0,040a	0,041
0,20-0,40	0,036a	0,035a	0,037a	0,037a	0,036
0,40-0,60	0,039a	0,044a	0,040a	0,042a	0,041

ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado. Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si pela DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

A camada de solo de 0,20 a 0,40 m apresentou os menores valores de S (0,036, 0,035 e 0,037), respectivamente, para os tratamentos ESC, PC e PD. Para Silva (2004) isso indica que nessa camada, a qualidade estrutural é inferior em relação às demais camadas e tratamentos em virtude da elevada densidade do solo e conseqüente redução do volume de poros (compactação) indicando com isso que a estrutura física apresenta restrições. Nesse sentido, é possível inferir que a água disponível às plantas, o conteúdo de água na capacidade de campo e a retenção de água tenham sido afetadas já que essas são determinadas pela estrutura do solo. A camada de 0,40 a 0,60 m foi responsável pela maior inclinação da CRA apenas para o PC, desde a umidade de saturação até o potencial de -33 kPa. Para Streck et al. (2008) os maiores valores de S indicam que há um rearranjo de poros no solo e, portanto, uma menor restrição física (aeração, restrição mecânica e retenção de água) para o crescimento das raízes das plantas.

6.1.3 Parâmetros mecânicos

A pressão de preconsolidação (σ_p) foi não significativa a 5% de probabilidade de erro nas camadas em estudo, com coeficiente de variação de 28 a 44% (Tabela 9).

Na média das camadas, verifica-se que a camada superficial (0,00 a 0,10 m) apresentou a menor σ_p , sendo o PD e o PC responsáveis pelos menores valores (respectivamente, 92,77 e 98,43 kPa). Com isso, pode-se dizer que essa camada tem um menor suporte de carga em virtude da desestruturação provocada pela aplicação do tratamento e pela abertura do sulco para o plantio da cultura. A pressão de preconsolidação é altamente influenciada pelo teor de água do solo, que por sua vez é retida pela matéria orgânica contida na superfície do solo (REICHERT et al., 2009; BRAIDA et al., 2011).

A camada que apresentou maior capacidade de suporte de carga foi a de 0,20 a 0,40 m, com σ_p média de 134,52 kPa. Isso pode ser atribuído a menor mobilização do solo nessa camada. Conhecendo a capacidade de suporte de carga é possível evitar compactação adicional pelo controle de cargas, igual ou superior à pressão de preconsolidação, aplicadas ao solo (ROSA, 2007).

Na camada de 0,10 a 0,20 m, considerada a de maior impedimento físico em plantio direto, o ESC e o PDC apresentaram os menores valores de σ_p , indicando que cargas aplicadas ao solo maiores que a pressão de preconsolidação, ou seja, que exceda esse nível de pressão causa compactação adicional. Quando se analisa a média dos tratamentos na camada, verificou-se que não houve grande variação entre os sistemas de manejo e preparo do solo, indicando que a σ_p não foi influenciada pelos diferentes níveis de compactação.

Tabela 9 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (IC), índice de recuperação (Ir) e coeficiente de descompressão (Cd) para os preparos e manejos do solo em estudo para a cana-de-açúcar na época 2.

Camada M	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
Pressão de preconsolidação (kPa)						
0,00-0,10	117,26a	98,43a	92,77a	99,69a	102,04	28,10
0,10-0,20	88,30a	124,15a	108,16a	97,72a	104,58	38,55
0,20-0,40	135,25a	137,91a	132,43a	132,33a	134,52	44,58
Índice de Compressão						
0,00-0,10	0,19a	0,13a	0,18a	0,19a	0,17	16,82
0,10-0,20	0,16a	0,10ab	0,13ab	0,09b	0,12	27,09
0,20-0,40	0,11a	0,11a	0,10a	0,12a	0,11	23,41
Índice de recuperação (%)						
0,00-0,10	7,14a	5,79a	5,37a	7,04a	6,38	15,62
0,10-0,20	5,40b	8,90a	7,41ab	8,22a	7,48	18,46
0,20-0,40	7,43a	8,03a	12,34a	7,78a	9,01	36,49
Coeficiente de descompressão						
0,00-0,10	0,05a	0,03a	0,05a	0,05a	0,05	127,43
0,10-0,20	0,04a	0,03a	0,03a	0,02a	0,03	22,41
0,20-0,40	0,03a	0,03a	0,03a	0,03a	0,03	202,50

Médias seguidas de letras iguais, na linha e na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Para o índice de compressão (IC), verificou-se que ocorreu diferença significativa a 5% de probabilidade de erro para os parâmetros preparos e manejo do solo apenas na camada de 0,10 a 0,20 m com coeficiente de variação de 29%. Os maiores valores de IC ocorreram na camada superficial, com menor valor no PC (0,13), onde houve mobilização do solo. Na média dos tratamentos, verificou-se que o IC foi influenciado pelos níveis de compactação, ou seja, pelos preparos e manejo do solo.

Os menores valores de IC, que indica que o solo é menos susceptível à compactação, foram verificados na camada de 0,20 a 0,40 m e, dentre os tratamentos, no PD. Isso ocorre em

função do maior atrito entre as partículas de solos, dificultando a movimentação das partículas para posições mais próximas, configurando deformação (LIMA, 2004). Com os valores de IC obtidos nesse estudo, no período do ciclo da cana-de-açúcar, pode-se inferir que esse solo apresenta baixa susceptibilidade à compactação.

Os parâmetros de elasticidade do solo, medido pelo índice de recuperação (Ir) ou pelo coeficiente de descompressão (Cd) (Tabela 9), não evidenciam diferença significativa entre os tratamentos, somente entre as camadas, com coeficiente de variação de 49%.

O Ir foi menor para a camada de 0,00 a 0,10 m em relação às demais camadas, enquanto o Cd resultou no maior valor nessa camada. O inverso foi verificado na camada de 0,20 a 0,40 m aonde o Ir foi maior em relação às demais enquanto o Cd resultou no menor valor nessa camada, embora esse último não tenha diferido estatisticamente, das demais camadas e tratamentos, a 5% de probabilidade de erro. Esses parâmetros são dependentes da umidade do solo e indica que quanto maior for a umidade, maior é a dificuldade na expulsão do ar dos poros do solo fazendo com que aumente o confinamento das bolhas de ar e, com isso aumenta a elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2008). Esses mesmos autores evidenciaram que a elasticidade tem alta correlação com o grau de saturação.

Para os preparos e manejos do solo, o índice de recuperação foi maior e semelhante nos tratamentos sem revolvimento (PD e PDC) que no PC e ESC, não ocorrendo o mesmo para o Cd. Provavelmente, os altos valores de Ir observados sejam devidos ao maior conteúdo de água nesses tratamentos em virtude de não terem sido mobilizados e, desse modo, mantiveram sua estrutura preservada. Braida et al. (2008) explicam os baixos valores de Cd em solos com alta densidade e que solos com essas características, tem maior poder de recuperação do volume de poros após a aplicação da carga.

O grau de compactação ou também conhecida como densidade relativa do solo (Tabela 10) para as três camadas e todas as condições de preparo e manejo estudadas, não apresentou diferença significativa a 5% de probabilidade de erro para o fator camada e manejo ou preparo do solo, nem mesmo para a interação desses fatores. O que se observa é que o grau de compactação decresceu com a profundidade e que os valores na média oscilaram de 86,87 a 91,05%. Esses valores estão um tanto acima do grau de compactação ótimo para as culturas (77 e 88%), definido por Suzuki et al. (2007). Segundo a classificação feita por Reinert et al. (2008), solos com densidade relativa entre 0,80 a 0,90 são considerados como solos não compactados.

Tabela 10 – Densidade máxima obtida na carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial e grau de compactação (GC) para os preparos e manejos nas camadas do solo em estudo para a cultura da cana-de-açúcar na época 2.

Camada m	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
Densidade máxima (Mg m ⁻³)						
0,00-0,10	1,82	1,90	1,84	1,83	1,85a	2,44
0,10-0,20	1,89	1,90	1,87	1,96	1,90a	2,62
0,20-0,30	1,70	1,94	1,95	1,72	1,83a	1,80
Grau de compactação (%)						
0,00 a 0,10	86,52	89,22	86,30	85,42	86,87a	3,16
0,10 a 0,20	87,59	92,16	89,40	92,34	90,37a	2,50
0,20 a 0,40	90,92	91,75	92,25	91,70	91,68a	1,96

Médias seguidas de letras iguais, na linha e na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Na condição do solo em estudo verificou-se que a densidade relativa foi mais evidente na camada 0,20 a 0,40 m, para todos os tratamentos avaliados, bem como no PDC e no PC, classificado Reinert et al. (2008) como densidade relativa de solo compactado (DR 90%), evidenciando novamente que, possivelmente, no PC tenha ocorrido um empacotamento natural e o rearranjo das partículas tenha provocado o adensamento desse solo.

6.1.4 Produtividade

A produtividade avaliada pela média de massa de colmo de cana-de-açúcar para os diferentes preparos do solo está mostrada na Figura 23. A maior produtividade da cultura foi obtida no plantio direto (112,68 t ha⁻¹) com grau de compactação de 89,32%. Muito semelhante, o tratamento escarificado, que produziu 102,38 t ha⁻¹ e com GC de 88,34%. O PDC e o PC apresentaram rendimento de colmo de 100,18 e 94,43 t ha⁻¹ e GC de 89,82 e

91,05%, respectivamente. Carter (1990), em solo com granulometria semelhante, obteve máximo rendimento quando a densidade relativa variou de 77 a 84%. Resultados obtidos por Rossetto et al. (2004) que avaliaram a produtividade da cana-de-açúcar acima de 115 t ha⁻¹ na testemunha (sem calagem) em diferentes áreas de estudo sob Latossolos e um valor médio de 123 t ha⁻¹ para a cana-planta, sendo esse valor reduzido a partir da brota da planta. Maule et al (2001) encontraram valor de produtividade de 175 t ha⁻¹ em Argissolo e destacam a existência de uma variação no potencial de produtividade de colmos de cana-de-açúcar entre diferentes tipos de solos em consequência das diferentes condições hídricas entre os solos, o que enfatiza o papel do ambiente na produtividade de colmos e maturação de cultivares da cana-de-açúcar.

Estudos realizados por diversos autores (BEUTLER et al., 2005; MARCOLIN, 2006; KLEIN, 2012) mostraram que o grau de compactação varia com o tipo de solo, mais precisamente pela granulometria do solo, sendo menor em solos argilosos devido ao incremento na resistência do solo à penetração das raízes.

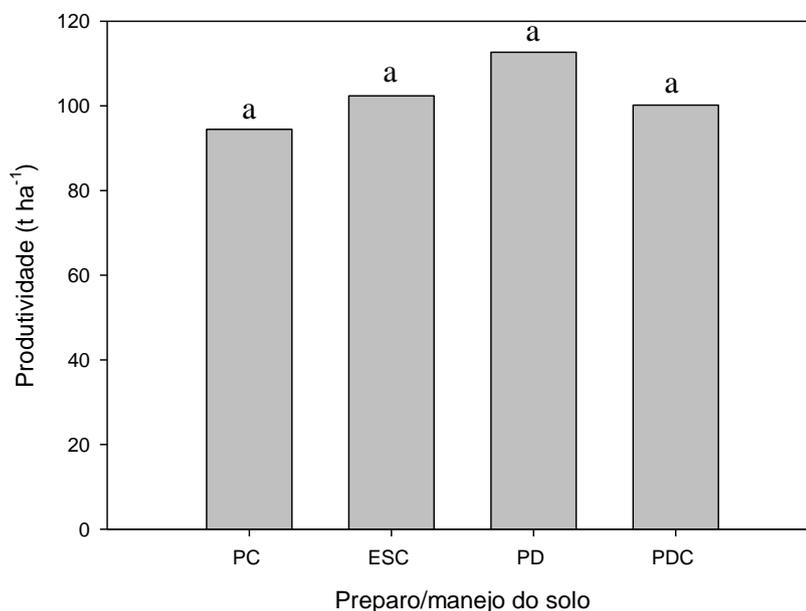


Figura 23 – Produtividade da cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos estudados.

No período crítico de estiagem, foi perceptível, por observação visual, deficiência hídrica apenas no tratamento PC por meio do tamanho das plantas, comparado aos demais tratamentos, e da coloração (amarelada) da cana-de-açúcar. Diversos fatores podem influenciar na produtividade da cultura da cana-de-açúcar e, por isso, nem sempre é possível definir os níveis ótimos de umidade no solo que reduzem os prejuízos ao rendimento das culturas, em razão de outros fatores, tais como variações de solos, condições climáticas (precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa do ar), manejo da cultura entre outros.

6.2 Mandioca

6.2.1 Propriedades físicas do solo (época 1)

A densidade do solo (Tabela 11) não mostrou diferença significativa para interação posição x tratamento nas camadas de solo. Apenas houve diferença estatística para tratamento na camada de 0,05 a 0,10 m. Conforme esperado, a menor densidade foi verificada na camada superficial e na linha de plantio da cultura, em função da mobilização do solo no momento da abertura do sulco para implantação da cultura. Nas primeiras três camadas (até 0,2 m de profundidade), o PDC foi quem se destacou com maior D_s devido ao maior acúmulo das tensões exercidas pelo tráfego das máquinas, seguido do ESC, que pode ser justificado pela ausência do efeito do preparo na posição da coleta do solo. Embora se esperasse que no PC a densidade fosse menor que no PD, observou-se que nas camadas de 0,00 a 0,05 e 0,20 a 0,40 m o PC apresentou D_s superior ao PD. Essa inversão pode ser atribuída à presença de material orgânico do PD na camada superficial e a presença de “pé-de-arado” na camada de 0,20 a 0,40 m do PC, característico desse sistema de preparo do solo.

A macroporosidade do solo (Tabela 11) não apresentou interação significativa entre os preparos e manejos e a posição de coleta do solo. Houve diferença significativa entre posição nas três camadas, até a profundidade de 0,20 m, e diferença entre preparos e manejos, na camada de 0,05 a 0,10 m. Os menores valores de macroporosidade foram observados no PDC, em todas as camadas e nas entrelinhas da cultura, onde se verificaram as maiores densidades do solo. Da mesma forma, na camada mais profunda (0,20 a 0,40 m), onde se observou as

macroporosidades inferiores àquela considerada mínima para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Houve interação entre tratamentos e posição para o parâmetro microporosidade na camada de 0,00 a 0,05 m, onde se observou os maiores valores de microporosidade. Quanto à posição, verificou-se diferença significativa nas camadas de 0,05 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, com os maiores valores na entrelinha da cultura, onde se observou os maiores valores de densidade do solo.

Com o aumento da densidade do solo nas diferentes condições, houve decréscimo da macroporosidade e da porosidade total (Tabela 11). Assim como a macroporosidade, a porosidade total foi maior na camada superficial (0,00 a 0,05 m) do solo. Nessa mesma camada houve diferença significativa para posição, sendo a porosidade total mais expressiva na linha da cultura, onde ocorre a menor densidade do solo.

Tabela 11 – Densidade do solo (kg m^{-3}), macroporosidade, microporosidade e porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), em quatro profundidades e nos diferentes tratamentos para a cultura da mandioca na época 1.

Posição	Densidade do solo					Macroporosidade					Microporosidade					Porosidade total					
	----- Mg m^{-3} -----					----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----					----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----					----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----					
	ESC	PC	PD	PDC	Média	ESC	PC	PD	PDC	Média	ESC	PC	PD	PDC	Média	ESC	PC	PD	PDC	Média	
Camada 0,00-0,05 m																					
Entrelinha	1,45	1,42	1,46	1,55	1,47A	0,20	0,23	0,18	0,12	0,18B	0,27Aa	0,26Aa	0,26Aa	0,30Aa	0,27	0,47	0,49	0,43	0,42	0,45B	
Linha	1,37	1,35	1,26	1,33	1,33B	0,23	0,25	0,26	0,23	0,25A	0,25Aa	0,26Aa	0,23Aa	0,27Aa	0,26	0,48	0,51	0,49	0,51	0,50A	
Média	1,41a	1,39a	1,36a	1,44a		0,22a	0,24a	0,22a	0,18a		0,26	0,26	0,24	0,29		0,47a	0,50a	0,46a	0,46a		
Camada 0,05-0,10 m																					
Entrelinha	1,64	1,50	1,55	1,61	1,58A	0,11	0,17	0,13	0,10	0,13B	0,28	0,27	0,28	0,29	0,28A	0,39	0,44	0,41	0,39	0,41A	
Linha	1,50	1,34	1,46	1,61	1,48A	0,18	0,24	0,20	0,13	0,19A	0,26	0,25	0,24	0,27	0,25B	0,44	0,49	0,44	0,40	0,44A	
Média	1,57a	1,42b	1,51ab	1,61a		0,15ab	0,20a	0,16ab	0,12b		0,27a	0,26 ^a	0,26a	0,28a		0,41ab	0,46a	0,43ab	0,39b		
Camada 0,10-0,20 m																					
Entrelinha	1,78	1,64	1,68	1,72	1,71A	0,09	0,11	0,10	0,08	0,10B	0,27	0,27	0,25	0,28	0,27A	0,36	0,39	0,35	0,36	0,36A	
Linha	1,58	1,47	1,63	1,69	1,59B	0,16	0,19	0,13	0,11	0,14A	0,26	0,26	0,24	0,26	0,25B	0,42	0,45	0,37	0,37	0,40A	
Média	1,68a	1,56a	1,66a	1,70a		0,13a	0,15a	0,12a	0,09a		0,26a	0,27a	0,25a	0,27a		0,39a	0,42a	0,36a	0,36a		
Camada 0,20-0,40 m																					
Entrelinha	1,72	1,77	1,72	1,77	1,74A	0,09	0,09	0,11	0,09	0,10A	0,26	0,27	0,27	0,26	0,27A	0,36	0,36	0,38	0,35	0,36A	
Linha	1,74	1,76	1,66	1,73	1,72A	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10A	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26A	0,37	0,37	0,37	0,36	0,37A	
Média	1,73a	1,76a	1,69a	1,75a		0,10a	0,10a	0,11a	0,10a		0,27a	0,27a	0,27a	0,26a		0,36a	0,37a	0,37a	0,36a		

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Os resultados da resistência do solo à penetração das raízes e de conteúdo volumétrico de água, obtidos com os diferentes tratamentos e camadas do experimento com mandioca da época 1, são apresentados na figura 24.

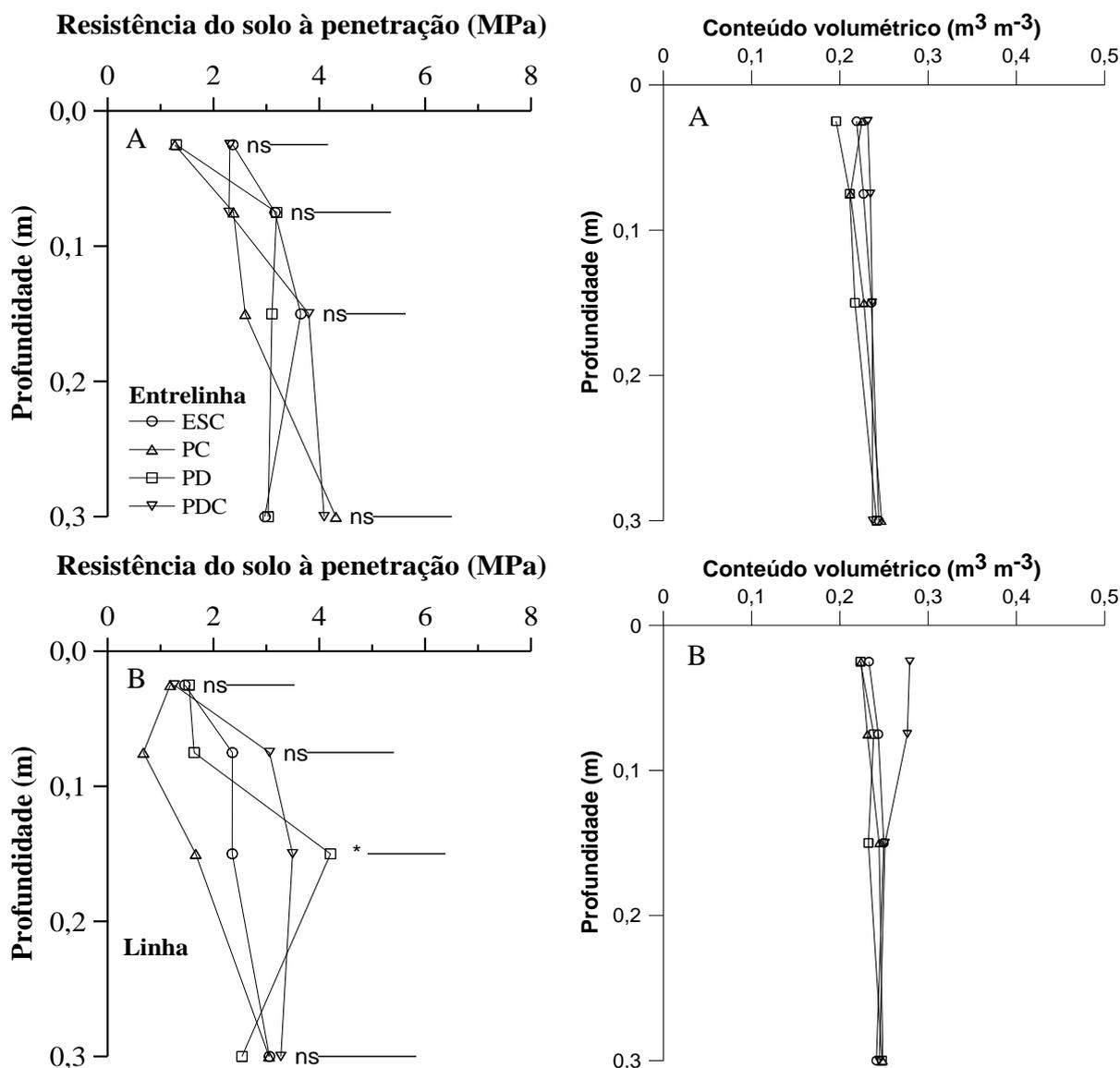


Figura 24 – Resistência do solo à penetração e conteúdo volumétrico de água na entrelinha (A) e na linha (B) do plantio para o escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) nas camadas de solo em estudo sob plantio de mandioca na época 1. * significativo a 5% de probabilidade de erro; ns = não significativo pelo teste DMS.

Pode-se observar que a RP não apresentou diferença significativa a 5% de probabilidade na entrelinha (Figura 19A) da cultura, com valores de RP que ultrapassaram 2 MPa. Na linha do plantio (Figura 19B) da mandioca, somente na profundidade de 0,15 m foi verificada diferença significativa a 5% de probabilidade entre os tratamentos, sendo o PD o tratamento com maior RP (4,21 MPa) nessa camada, corroborando com estudo de Abreu et al., (2004) e Reichert et al., (2009), que também encontraram maior RP em PD em relação ao PC e escarificado em solo de mesma textura. Nas demais profundidades não foi possível verificar diferença significativa a 5% entre os valores encontrados para os sistemas de preparo e manejo do solo, embora os valores médios de resistência para esta profundidade tenham sido maiores no PDC em todas as profundidades.

A pressão de preconsolidação obtida para os tratamentos sob mandioca (Tabela 12) também não apresentou diferença significativa, apresentando coeficiente de variação entre 7 e 48%.

A camada superficial (0,00 a 0,05 m) apresentou os menores valores de σ_p , o que indicou menor capacidade de suporte de carga enquanto a camada mais profunda apresentou os maiores valores de capacidade de suporte da carga. Embora não tenha apresentado diferença significativa, observou-se que na camada de 0,10 a 0,20 m a σ_p foi maior no ESC, seguido do PDC comparada aos demais preparos e manejo do solo, o que justifica por ser essa a camada com maior impedimento físico. Esses valores indicam que níveis de pressões aplicadas ao solo maiores que a σ_p para determinada umidade, acarretam compactação adicional do solo.

Da mesma forma, o índice de compressão (Tabela 12) não apresentou diferença significativa nas camadas estudadas. Dentre os tratamentos, o PC foi responsável pelos maiores índices de compressão nas duas camadas mais superficiais e o PD, na camada mais profunda, o que demonstra que, para esses tratamentos e camadas, há maior susceptibilidade à compactação.

apresentou os valores mais elevados em relação às demais camadas. De acordo com Silva et al. (2008), a persistência dos efeitos da mobilização ocasionado pelo revolvimento do solo em sistema convencional resultam na quebra dos agregados e no desenvolvimento de poros, notadamente maiores (macroporos). Nas demais camadas, embora os diferentes níveis de compactação tenham favorecido o aumento na densidade do solo e redução da macroporosidade e porosidade total, não se verificou efeitos significativos entre os tratamentos para esses parâmetros, nem mesmo para microporosidade do solo.

Tabela 13 - Densidade do solo (Mg m^{-3}), macro e microporosidade e porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da mandioca na época 2.

Camada m	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
	Densidade do solo (Mg m^{-3})					
0,00-0,10	1,56a	1,56a	1,58a	1,59a	1,57	3,17
0,10-0,20	1,63a	1,53a	1,56a	1,58a	1,57	4,14
0,20-0,40	1,59a	1,58a	1,59a	1,62a	1,60	4,90
	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
0,00-0,10	0,17ab	0,20a	0,14b	0,18ab	0,17	13,71
0,10-0,20	0,15a	0,14a	0,13a	0,12a	0,14	21,90
0,20-0,40	0,12a	0,11a	0,12a	0,12a	0,11	25,37
	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
0,00-0,10	0,29ab	0,27b	0,30a	0,28ab	0,28	5,29
0,10-0,20	0,27a	0,28a	0,29a	0,27a	0,28	8,66
0,20-0,40	0,29a	0,29a	0,27a	0,28a	0,28	8,19
	Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
0,00-0,10	0,46a	0,46a	0,44a	0,46a	0,46	3,74
0,10-0,20	0,42a	0,42a	0,42a	0,39a	0,41	9,74
0,20-0,40	0,41a	0,40a	0,39a	0,40a	0,40	7,31

Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

A microporosidade apresentou diferença significativa somente na camada 0 a 0,10 m para os diferentes níveis de compactação. Dos níveis de compactação, o maior valor de microporosidade ($0,30 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) foi observado no PD, sendo superior ao verificado no ESC ($0,29 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$), seguido do PDC ($0,28 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) e, o PC foi o responsável pela menor microporosidade ($0,27 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$), em virtude da mobilização excessiva nesse tratamento, o que

indica menor potencial de armazenamento de água. Silva et al. (2008) verificaram que o sistema convencional, quando comparado com o plantio direto em solo arenoso cultivado com mandioca, apresentou menor densidade e maior porosidade total do solo, especialmente na macroporosidade.

Em relação à porosidade total, não se verificou diferença significativa a 5% de probabilidade de erro para os níveis de compactação nas diferentes camadas em estudo. Os sistemas ESC e PC apresentaram comportamentos semelhantes entre si nas diferentes camadas, com valores superiores aos do sistema PD, exceto na camada de 0,20 a 0,40 m, que demonstrou valores similares aos do PDC. Essa camada por ter apresentado maior densidade do solo, reduziu a porosidade total e, possivelmente alterado a distribuição no tamanho de poros.

Para a Ksat, os diferentes níveis de compactação diferiram estatisticamente entre si apenas na camada superficial (Tabela 14). Verificou-se nessa camada que o tratamento que recebeu compactação adicional não influenciou negativamente na condutividade da água possivelmente em função do aporte de material orgânico presente nessa camada, da mobilização parcial dessa camada no momento do plantio da cultura da mandioca e, o enraizamento das plantas que podem ter favorecido a infiltração e percolação da água. Desse mesmo modo, a camada superficial foi responsável pela maior Ksat em todos os níveis de compactação.

Tabela 14 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) em quatro camadas e nos diferentes tratamentos para a cultura da mandioca, na época 2.

Camada m	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
	Condutividade hidráulica (mm h^{-1})					
0,00-0,10	66,07ab	100,81a	23,33b	103,74ab	73,70	46,84
0,10-0,20	52,00a	117,19a	43,51a	8,75a	55,70	95,77
0,20-0,40	7,01a	10,22a	6,09a	14,21a	9,45	97,43

Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste da DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Foi verificada diferença significativa entre os níveis de compactação apenas na camada superficial. Constatou-se ainda uma redução da condutividade hidráulica na camada

de 0,10 a 0,20 m apenas nos tratamentos que receberam escarificação e compactação adicional, ao contrário do que foi observado para o PC e PD com valores de Ksat bastante expressivos em relação às demais camadas. A camada de 0,20 a 0,40 m apresentou os menores valores de Ksat. Esses resultados indicam que apenas a camada mais profunda e o PDC apresenta valor de condutividade hidráulica crítica para macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, conforme sugerido por Reichert et al. (2007) como sendo de $13,8 \text{ mm h}^{-1}$, por Kaiser (2010) de $10,6 \text{ mm h}^{-1}$ e Prevedello (2012) de $25,6 \text{ mm h}^{-1}$, todos obtidos em Argissolo de textura franco arenosa.

Na correlação da Ksat com os parâmetros físicos do solo (Tabela 15), houve relação significativa entre a densidade do solo, macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica do solo. O aumento da densidade do solo e a consequente redução da macroporosidade e porosidade total influenciou negativamente na condutividade hidráulica do solo, corroborando com resultados obtidos por Prevedello (2012).

Tabela 15 – Correlação de Pearson entre os parâmetros físicos do solo: densidade do solo, macro e microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica do solo saturado.

	DS	Mac	Mic	PT	Ksat
DS	1	-0,82 ^{**}	0,13 ^{ns}	-0,82 ^{**}	-0,75 ^{**}
Mac	-	1	-0,03 ^{ns}	0,83 ^{**}	0,67 ^{**}
Mic	-	-	1	0,54 ^{**}	-0,15 ^{ns}
PT	-	-	-	1	0,65 ^{**}
Ksat	-	-	-	-	1

** significativo a 0,0001; ns = não significativo. DS = densidade do solo; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade; PT = porosidade total; Ksat = condutividade hidráulica do solo saturado.

Para os tratamentos estudados, em cada camada, não foi verificado diferença significativa pelo teste DMS a 5 % de probabilidade de erro para distribuição do tamanho de poros (Figura 25), o que significa que os preparos e manejos do solo não influenciaram significativamente nas classes de poros, com uma pequena variação no diâmetro de poros entre os tratamentos em todas as camadas.

A classe dos poros de tamanho entre 50 e 300 μm , foi evidenciada na camada superficial (0,00 a 0,10 m) para todos os tratamentos, comparado às demais classes. Esse destaque, possivelmente está relacionado à diminuição da densidade do solo, maior macroporosidade e porosidade total verificados nessa camada. Nas demais camadas, mesmo que não tenha sido verificada diferença significativa, notou-se que o PC apresentou maior volume de poros dentro dessa classe e que no PDC e o ESC foram verificados volumes semelhantes de poros e superiores ao PD. Mudanças na estrutura do solo provocadas pelos diferentes preparos e manejo do solo apresentaram variação no volume de poros e alterações na dinâmica da água e do ar do solo.

Em todas as camadas, o destaque no volume de poros na classe de solo menor que 3 μm para os sistema de manejo e preparo do solo tem relação direta com a força com que a água está retida nesses poros e indisponíveis às plantas. Na relação ideal entre microporos e porosidade total do solo, proposta por Reynolds et al. (2002), um desenvolvimento satisfatório das plantas, é de 0,66, em que facilita a drenagem rápida do excesso de água por meio dos macroporos, promove adequada aeração do solo e, por meio dos microporos, a armazenamento e disponibilidade de água às plantas. Neste estudo, a relação entre microporos e porosidade total foi inferior ao valor de 0,66 na camada superficial para o ESC, PC e PDC, destacando ainda a camada de 0,10 a 0,20 m do escarificado que também ficou abaixo. Os demais tratamentos nas camadas, os valores da relação ideal entre microporos e porosidade total oscilou entre 0,67 e 0,72. A camada mais profunda apresentou os maiores valores dessa relação em virtude das maiores densidades do solo verificadas nessa camada.

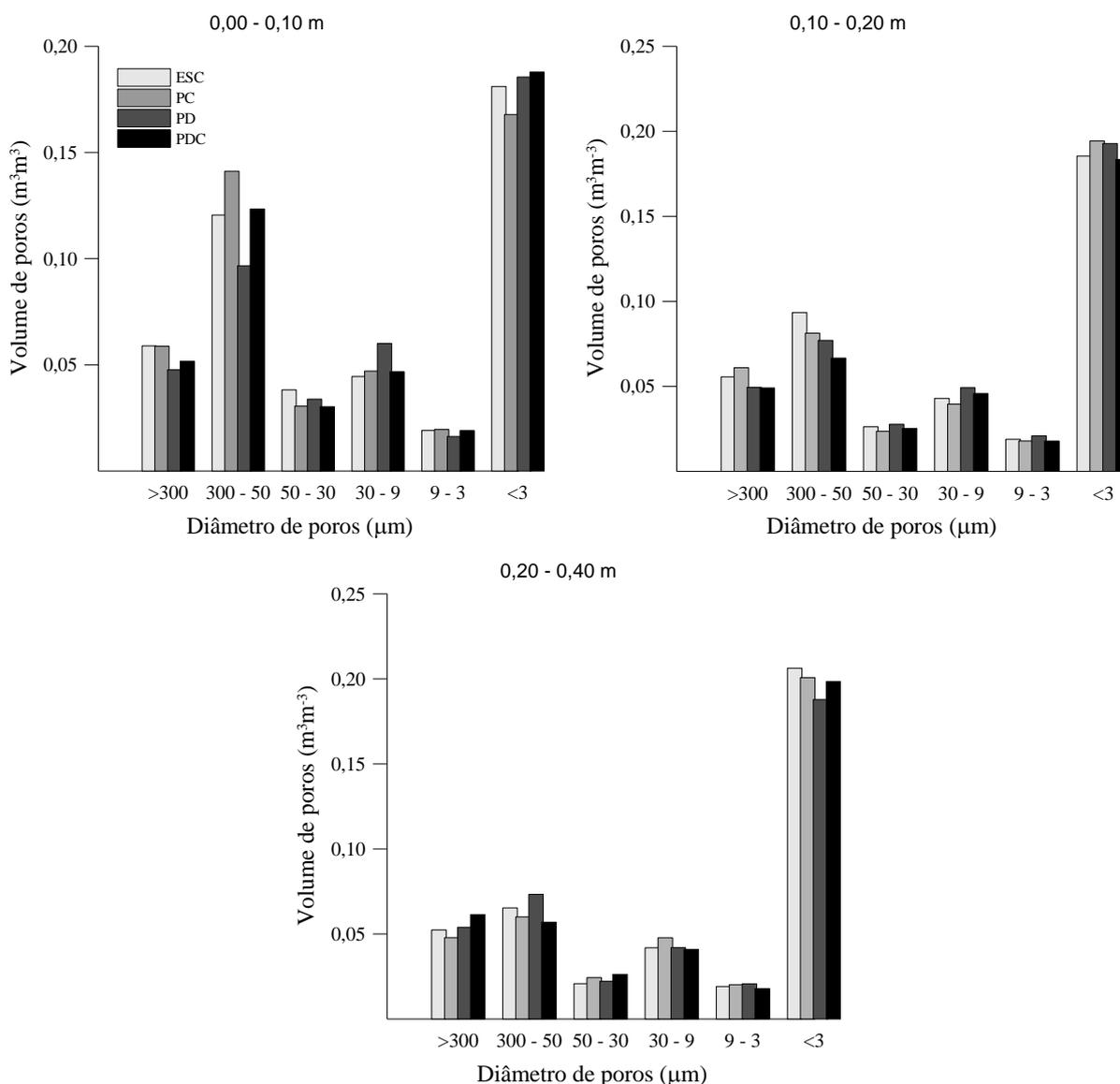


Figura 25 – Distribuição do tamanho de poros para os diferentes tratamentos: escarificado (ESC), plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio direto compactado (PDC) e camadas: 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40 a 0,60 m na cultura da mandioca.

A permeabilidade do solo ao ar nos diferentes potenciais matriciais de água no solo nas camadas e tratamentos estudados está apresentada na Figura 26. Da mesma forma que na cultura da cana-de-açúcar, no experimento com mandioca não foi verificada diferença significativa a 5% de probabilidade de erro nos potenciais de -6, -10 e -33 kPa para a permeabilidade do solo ao ar. Verificou-se que, na média, a camada superficial apresentou maior K_{ar} , maiores que $20 \mu\text{m}^{-2}$ e maior incremento nos menores potenciais (potenciais mais negativos).

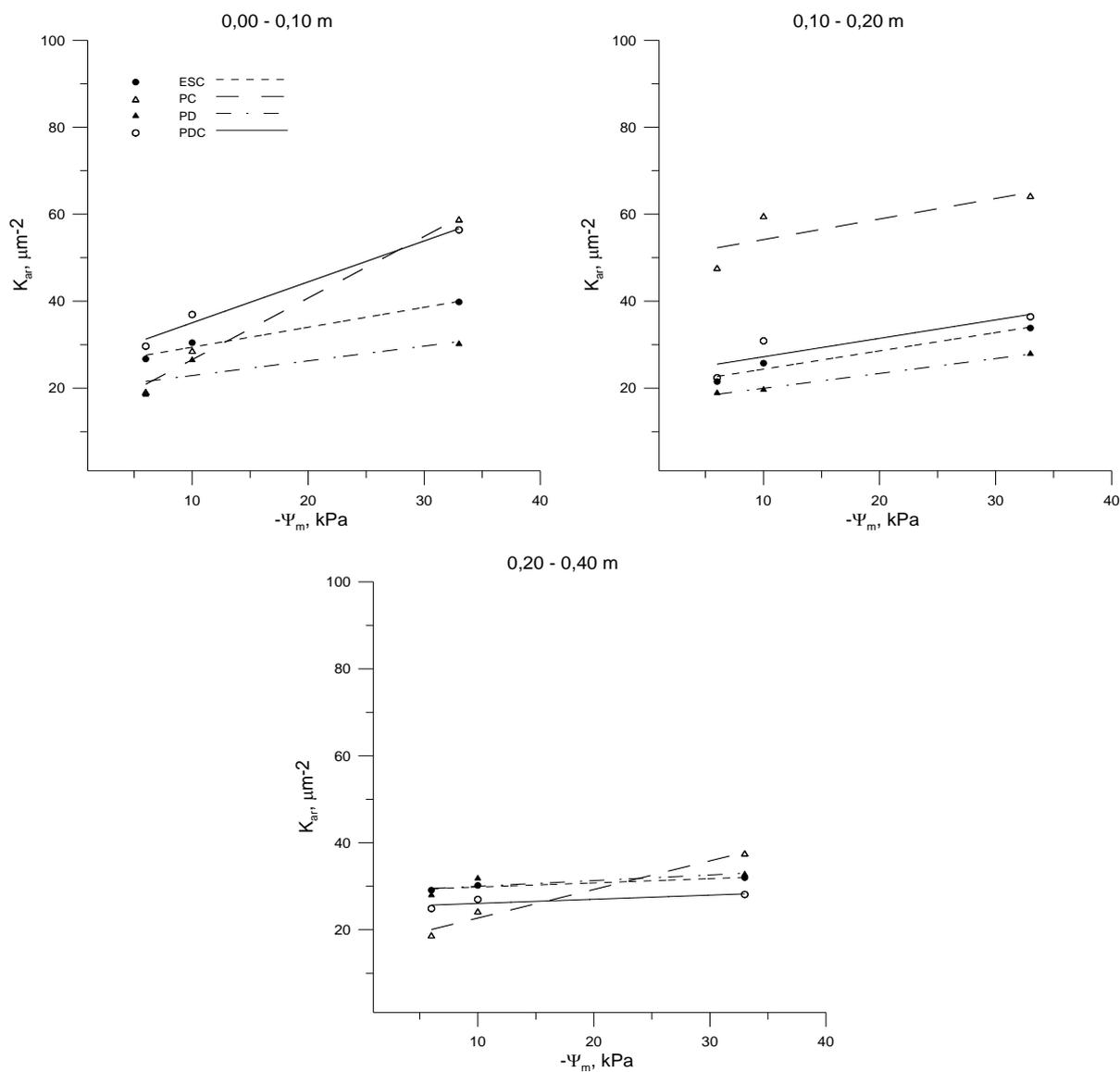


Figura 26 - Permeabilidade do solo ao ar (μm^2), nos potenciais de água (-6, -10, -33 e -100 kPa), nas camadas e tratamentos para a cultura da mandioca. ESC = escarificado, PC = plântio convencional, PD = plântio direto, PDC = plântio direto compactado.

Na camada de 0,10 a 0,20 m, verificou-se que a K_{ar} no ESC foi mais expressiva, seguido do PDC, ESC e, por último, PD. Possivelmente, o resultado expressivo da K_{ar} no escarificado seja explicado pela ação do rompimento da camada no momento do preparo do solo. Nos potenciais maiores (-6 e -33 kPa), todos os tratamentos apresentaram os menores valores de K_{ar} , pois esses potenciais têm relação direta com a macroporosidade do solo. Na camada mais profunda (0,20 a 0,40 m) o escarificado e o plântio direto foram bastante semelhantes e evidenciaram maior K_{ar} nessa camada em relação ao PC e PDC, que

demonstraram alteração na estrutura física do solo, possivelmente pela técnica de preparo, refletindo na aeração do solo.

O espaço aéreo ou porosidade de aeração (ε_a), obtido pela diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica, ao longo do ciclo da mandioca nas diferentes camadas estão apresentadas nas Figuras 27 a 29.

Todos os poros do solo ocupados por água, à medida que são drenados aumenta o percentual de poros de ar no solo. Desse modo, o espaço aéreo, responsável pelas trocas gasosas e quantidade de água disponível às plantas, pode ser, portanto, fator limitante da produtividade das culturas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; SILVA, 2003).

Verifica-se que, de forma geral, todos os tratamentos em todas as camadas a porosidade de aeração permaneceu acima de $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ considerados como ótimos para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A camada superficial é caracterizada por apresentar maior quantidade de poros, em virtude do efeito da matéria orgânica e do aporte de materiais orgânicos presentes nessa camada, fazendo com que os micro-organismos atuem nessa camada no processo de decomposição e, com isso, no revolvimento natural do solo. Além disso, é a camada em que ocorre maior perda de água após a precipitação, seja pela drenagem e/ou mesmo, nos casos em que há variações de temperatura (amplitude térmica) pela exposição do solo.

Em todas as camadas, os tratamentos com revolvimento (ESC e PC) foram os que se destacaram com maior índice de ε_a . O PD e o PDC foram os responsáveis pelas menores incidências de espaço aéreo. Para os tratamentos que receberam revolvimento, possivelmente, após a mobilização do solo tenha ocorrido o processo de reconsolidação resultante da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem (HILLEL, 1998), mesmo na ausência de tráfego (SCHÄFER et al. (2001). Assim, no intervalo de tempo entre a mobilização e a amostragem para a realização das determinações físico-hídricas, devem ter ocorrido reconsolidação do solo e rearranjo do espaço aéreo do mesmo, tornando-o menos condutivo.

As medidas da estrutura do solo requerem um conhecimento da relação entre a permeabilidade ao ar com a porosidade de aeração, embora ambas não sejam bem relacionadas, pois a permeabilidade ao ar é muito sensível aos macroporos e às galerias formadas pela atividade biológica (BALL & SMITH., 1991).

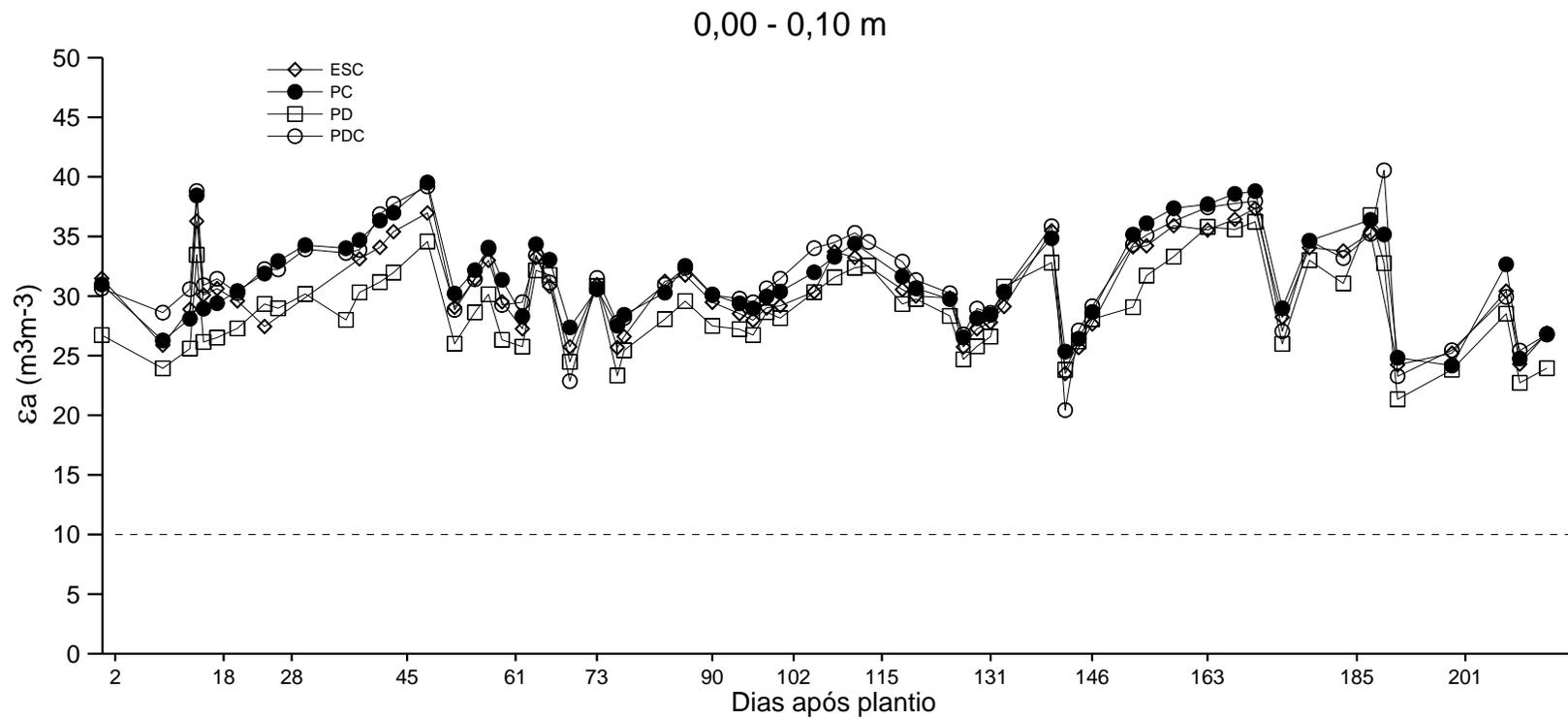


Figura 27 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,00 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

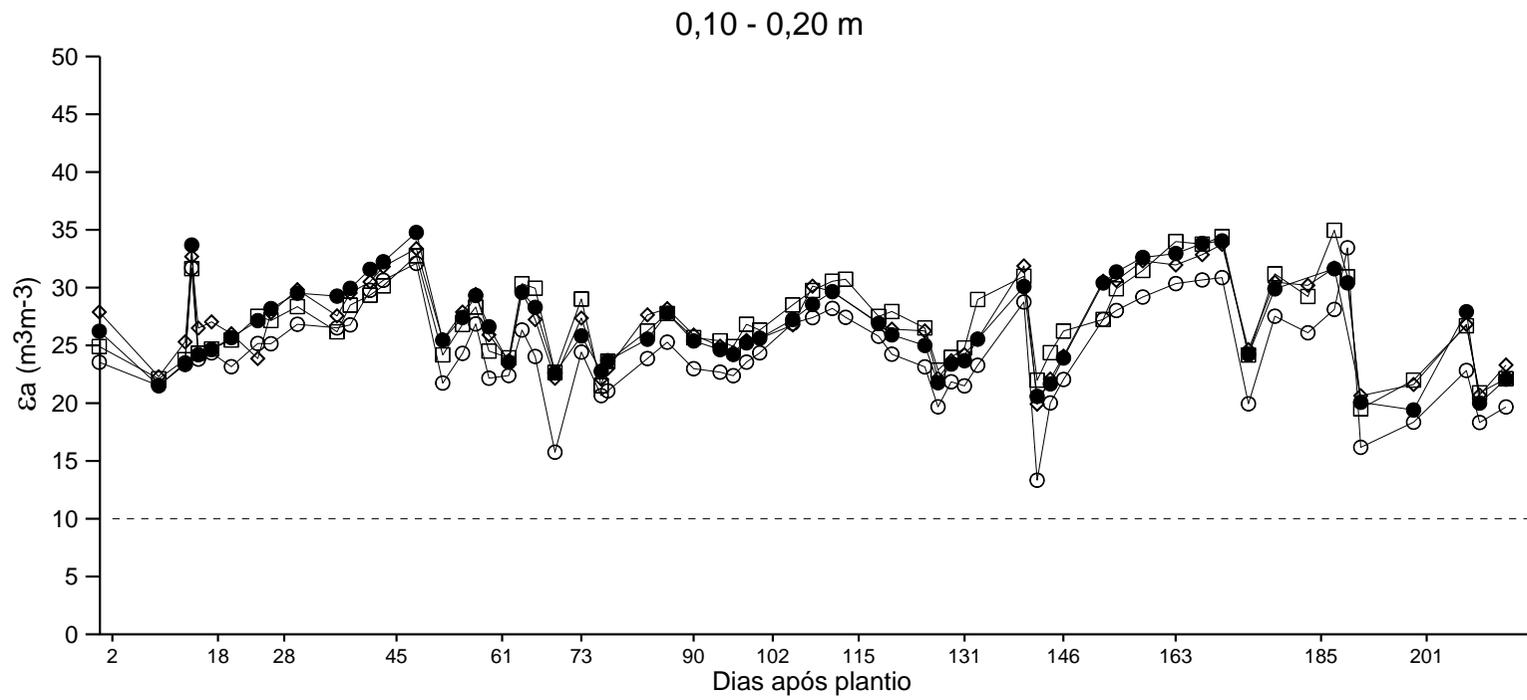


Figura 28 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

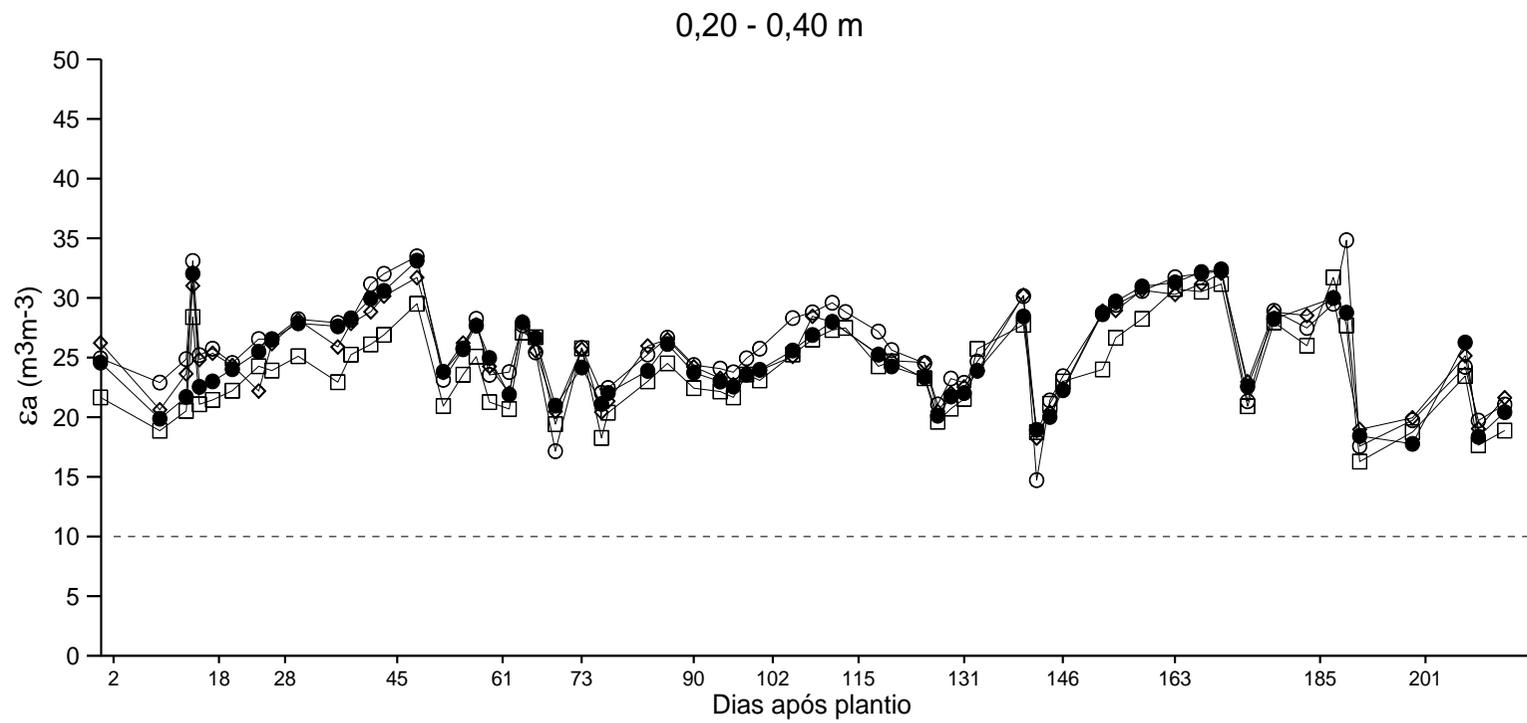


Figura 29 – Espaço aéreo do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Foi verificado também o conteúdo volumétrico de água no solo cultivado com a cultura da mandioca (Figuras 30 a 33) para os tratamentos ESC, PC, PD e PDC nas camadas de 0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Verificou-se que as oscilações no conteúdo e armazenamento de água no solo, nas quatro camadas estudadas, ocorreram em função da precipitação registrada (Figura 14) durante o ciclo da cultura. É possível verificar também que as maiores oscilações ocorreram nas camadas superficiais, indicando que as variações na precipitação ocorrida provocaram grandes alterações no conteúdo de água do solo, que pode ser atribuída às perdas de água por evapotranspiração.

Nas camadas superficiais verificou-se que, estatisticamente, poucos foram os dias em que houve diferença estatística entre os tratamentos. Quando comparado entre as camadas, verificou-se que essas camadas têm menor conteúdo de água no solo, possivelmente isso ocorre devido às perdas por evaporação e suprimento de água para as plantas, uma vez que o secamento da camada superficial do solo era bastante visível, corroborando com Kaiser (2010).

Em todo o ciclo avaliado da cultura da mandioca, notou-se que o conteúdo de água armazenada no solo ficou entre o limite de água disponível, ou seja, entre o conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Os dias em que indicam conteúdo de água acima da capacidade de campo indicam que ocorreu precipitação e que, apenas parte do volume de água estará disponível às plantas; a outra parte será drenada dos poros maiores e, outra ainda, estará retida nos microporos em elevadas tensões, indisponível às plantas.

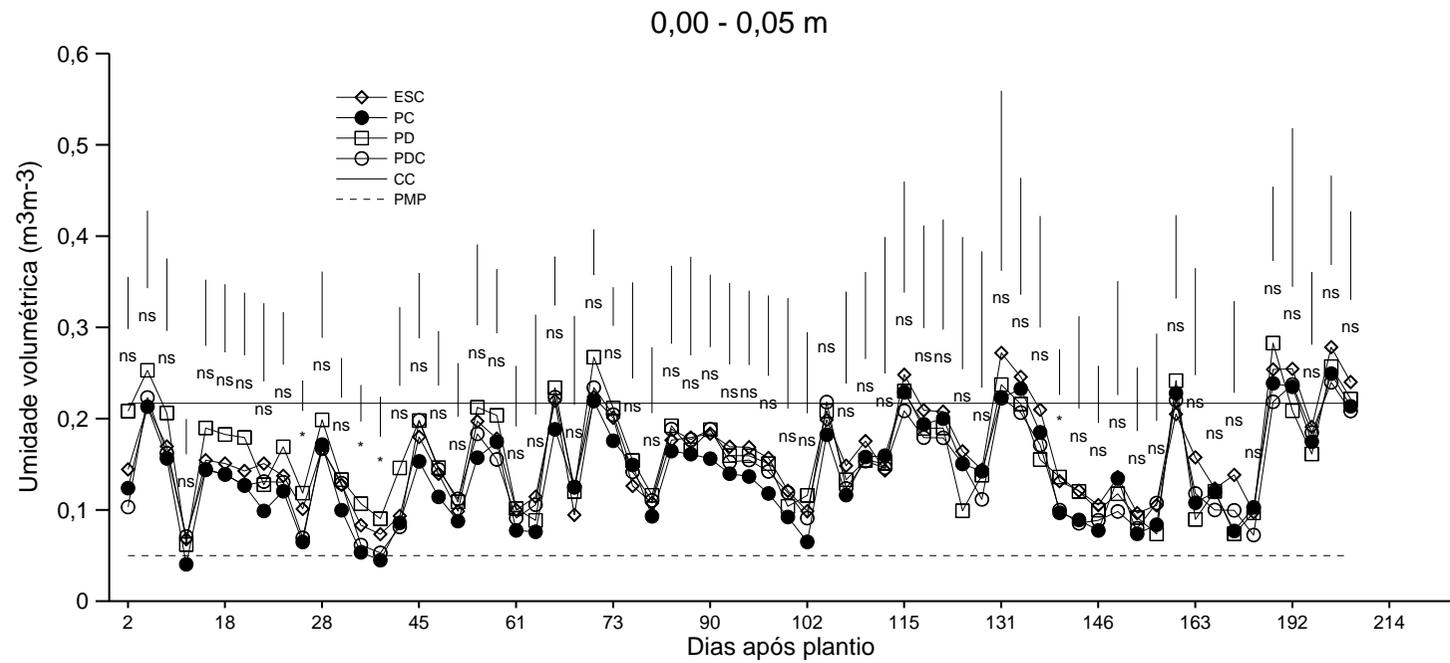


Figura 30 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,00 a 0,05 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

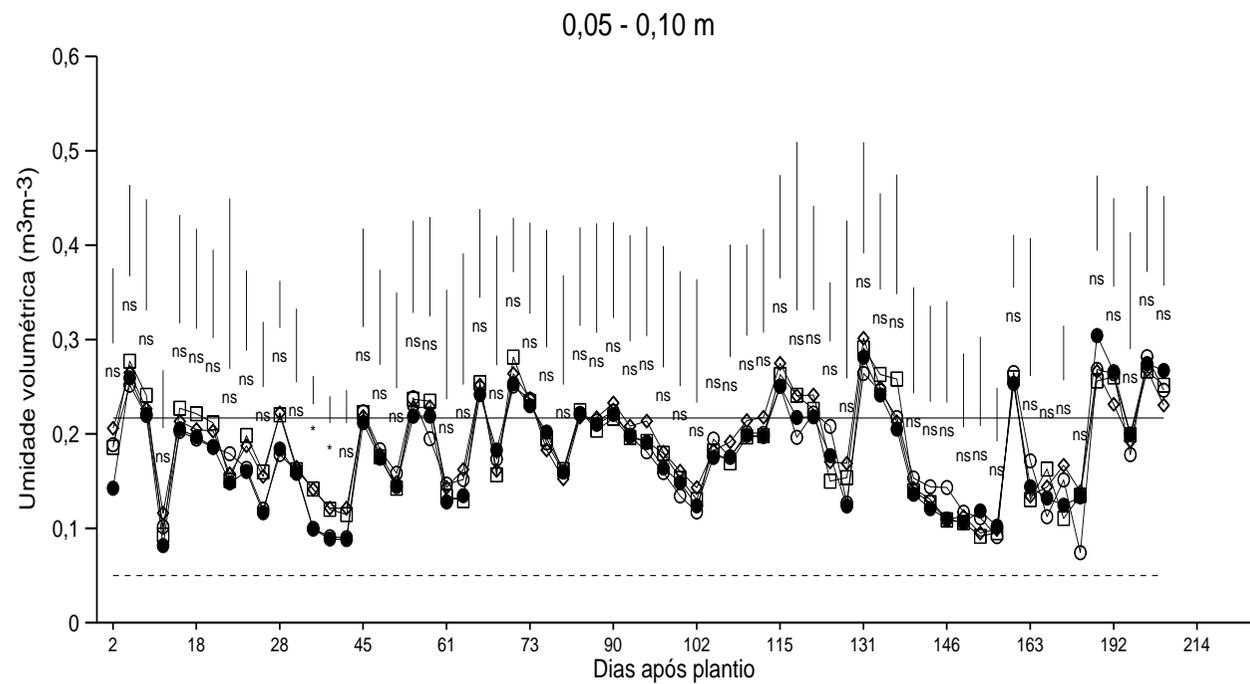


Figura 31 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,05 a 0,10 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

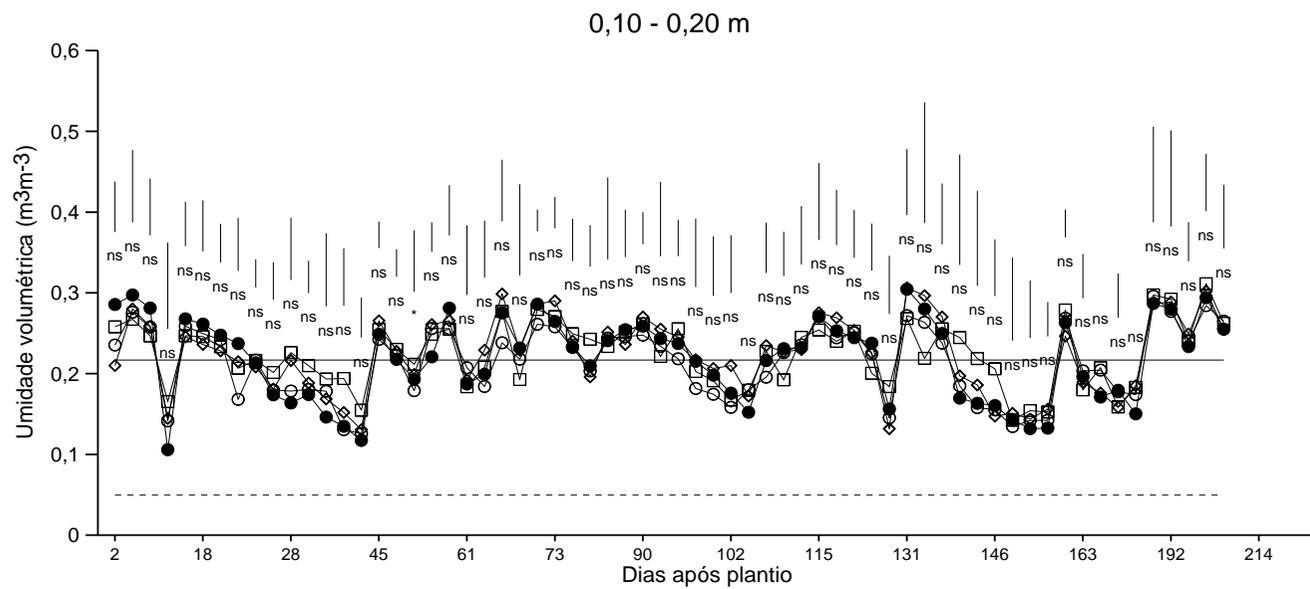


Figura 32 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,10 a 0,20 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

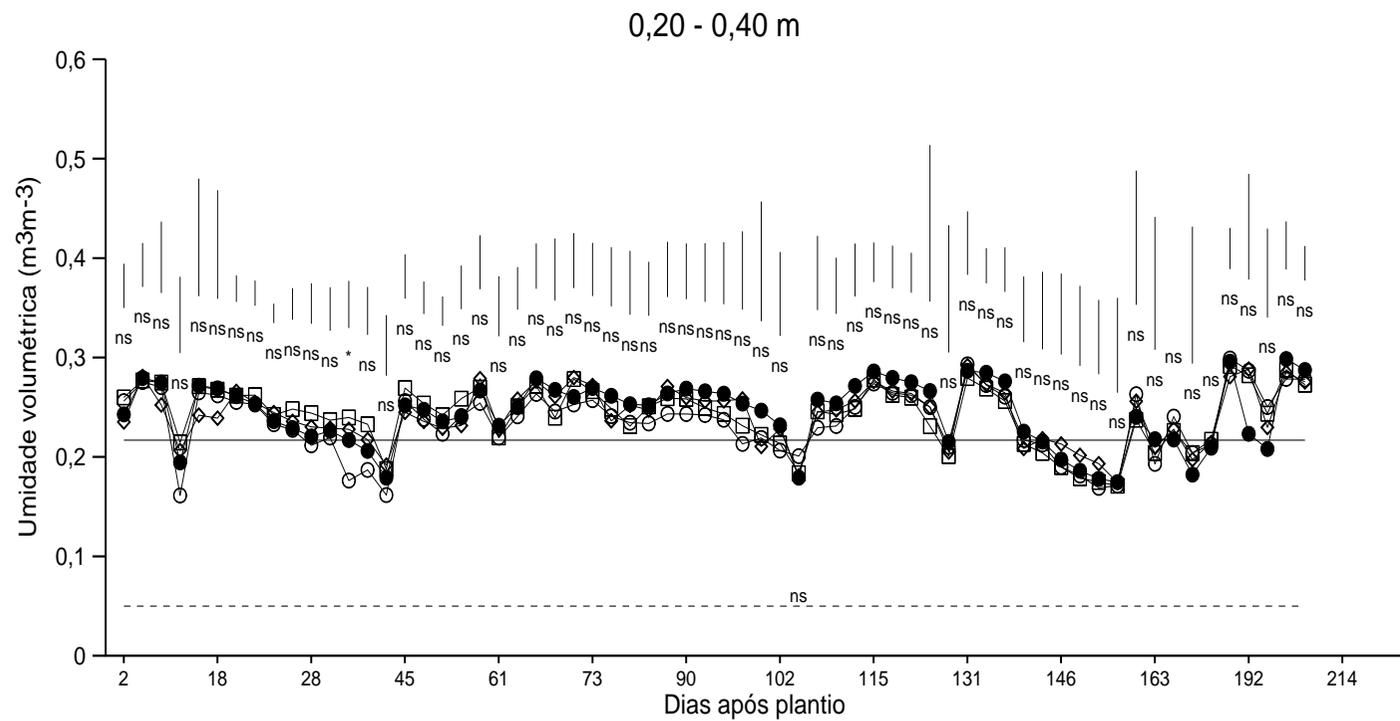


Figura 33 – Umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da mandioca na camada de 0,20 a 0,40 m. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Nas duas camadas mais profundas houve pequenas variações no conteúdo de água no solo em todos os tratamentos, que foram bastante semelhantes ao longo dos dias avaliados. Semelhante do que ocorreu na cultura da cana-de-açúcar, todos os tratamentos armazenaram água e perderam pouco por evaporação nessas camadas, mesmo o tratamento sob plantio convencional, indicando que nessas camadas a estrutura do solo dos tratamentos, em especial do PC, está inalterada e que não há efeito desse sistema de preparo do solo. Verificou-se, especificamente na camada de 0,20 a 0,40 m, o conteúdo volumétrico de água ficou acima do conteúdo da capacidade de campo em grande parte do período estudado, indicando maior umidade nessa camada.

A água disponível no solo, para a cultura da mandioca, até 0,40 m de profundidade para os diferentes preparos e manejo do solo no período de 213 dias de avaliação está apresentada na Figura 34.

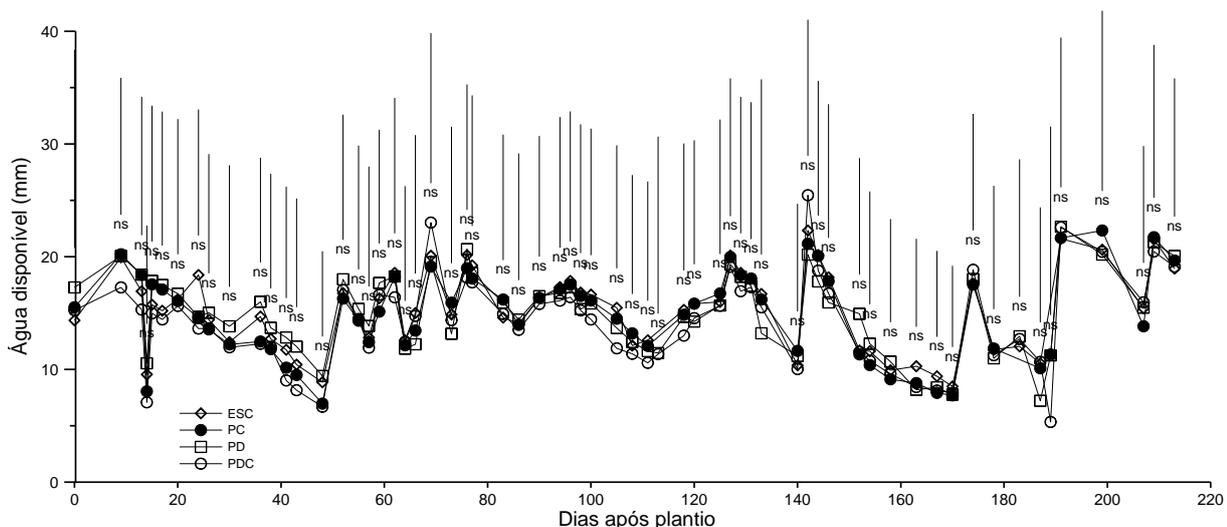


Figura 34 – Água disponível no solo ao longo do ciclo da mandioca para os tratamentos: escarificado, plantio convencional, plantio direto e plantio direto compactado.

Não foi verificada diferença significativa a 5% de probabilidade de erro na água disponível para os diferentes tratamentos ao longo do ciclo da cultura da mandioca (Figura 34). De maneira geral, os diferentes preparos e manejos do solo seguem tendência bastante semelhante de água disponível, ou seja, os tratamentos apresentaram semelhança no conteúdo de água disponível às plantas. Comportamento semelhante foi encontrado por Kaiser (2010) ao comparar a água no solo sob a cultura do milho submetido a diferentes níveis de

compactação. Esse autor justifica que a quantidade de água disponível está associada à quantidade da água da chuva e da sua distribuição no perfil do solo e que, por conseguinte, a baixa quantidade de água disponível está associada à falta de chuva, perdas por evaporação ou drenagem e ainda por absorção da água pelas raízes das plantas, suprimindo suas necessidades. Nota-se que poucos foram os dias em que o conteúdo de água esteve abaixo do ponto de murcha permanente, limitando disponibilidade de água à cultura da mandioca.

O comportamento da curva de retenção de água nos diferentes níveis de compactação e camadas em estudo está apresentado na figura 35. A camada superficial, que constitui de poros de tamanho maior, evidenciou maior grau de saturação. Mudanças provocadas na distribuição do tamanho de poros afetam a curva de retenção de água, pois o tamanho dos poros é quem determina o potencial de água neles retida ou qual a tensão necessária para esvaziar esses poros.

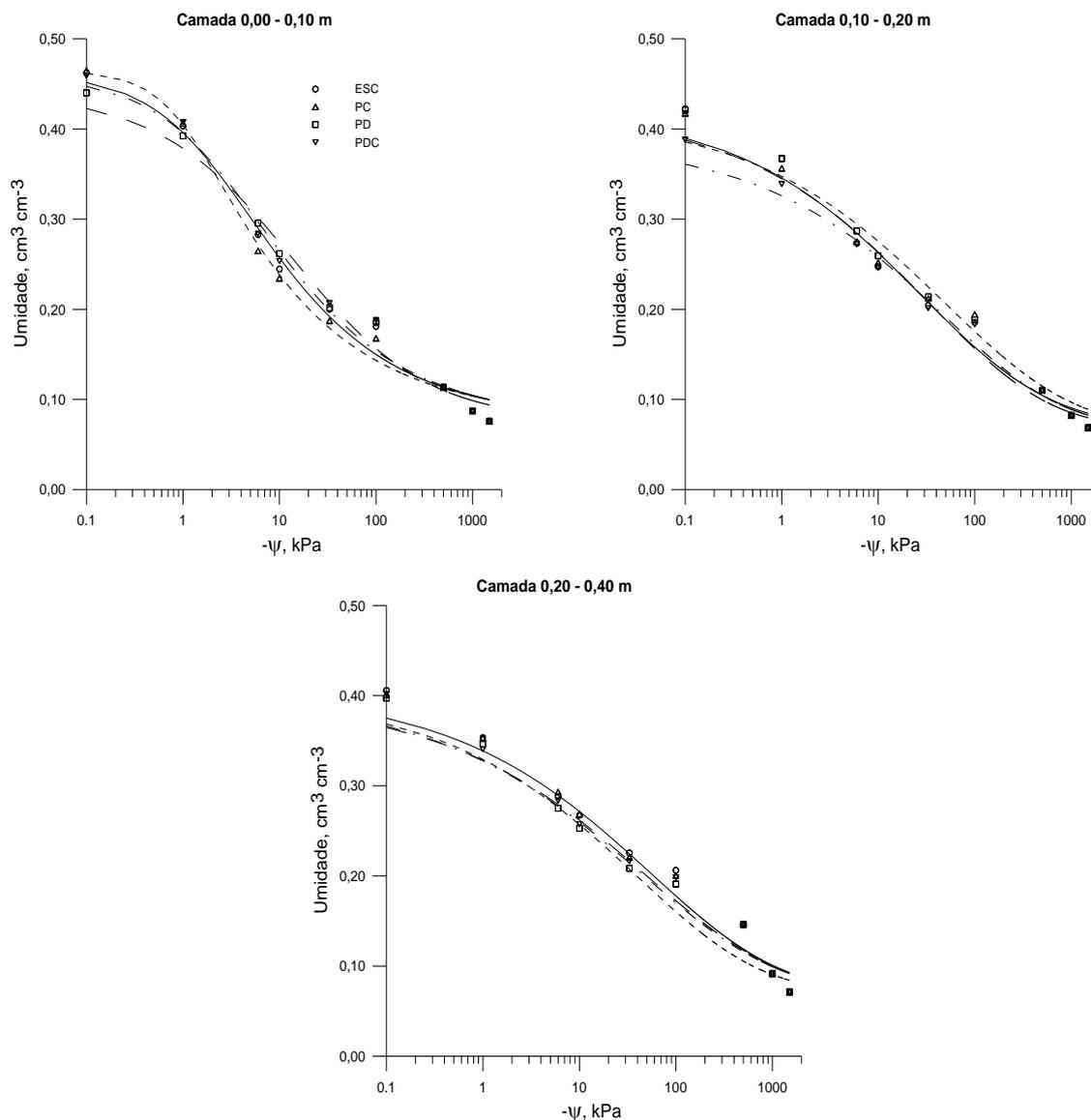


Figura 35 – Curva de Retenção de Água (CRA) e ajuste do modelo de van Genuchten dos preparos e manejo do solo sob mandioca na época 2.

6.2.2.1 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

O gráfico ilustrado na figura 36 corresponde ao intervalo hídrico ótimo do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico para os quatro diferentes preparos e manejos do solo cultivado com mandioca. O IHO é delimitado pela umidade do solo na porosidade de aeração (θ_{PA}) de 10% e umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) no potencial matricial de -10 kPa, como limite superior e umidade do solo equivalente a resistência à penetração (θ_{RP}) de 2 MPa

e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) no potencial matricial de -1500 kPa, como limite inferior.

A densidade do solo reduziu o IHO, sendo afetado no seu limite inferior pela resistência à penetração e, no seu limite superior pela umidade na capacidade de campo no potencial de -10 kPa. A θ_{RP} foi superior a θ_{PMP} em toda a extensão de densidade do solo, semelhante aos resultados obtidos por Roque et al. (2011), Benjamim et al., (2003) e Imhoff et al. (2001). O aumento da densidade do solo provocou um incremento na resistência do solo à penetração de 2 MPa, determinando a redução do IHO, o que indica que há mudanças na estrutura do solo e que antes mesmo do solo atingir a θ_{PMP} , a planta provavelmente, já apresentava restrições ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular provocado pelo impedimento mecânico. Para Tormena et al. (2008) é necessário aumentar o conteúdo de água no solo para manter a resistência à penetração de 2 MPa e, assim, reduzir a fricção entre as partículas provocadas pelo aumento da densidade.

A θ_{PA} e θ_{PMP} não foram os fatores limitantes às condições de umidade para o crescimento e desenvolvimento das plantas. O aumento da densidade coincidiu com a diminuição da θ_{PA} e aumento da θ_{PMP} . Os limites em que a θ_{CC} e a θ_{RP} convergiram coincide com o ponto em que o IHO é considerado zero. A densidade do solo que coincide com esse ponto é denominada densidade do solo crítica (Dsc) a partir da qual podem ocorrer restrições severas ao crescimento radicular ou o rendimento das plantas, indicando que as condições físicas do solo não são ideais e que pode estar aumentando a degradação do solo. Nesse estudo, verificou-se densidade do solo crítica de $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$, cuja densidade corresponde à restrição ao crescimento radicular das plantas, ou seja, condição em que possivelmente a cultura da mandioca teve restrição quanto ao conteúdo de água disponível.

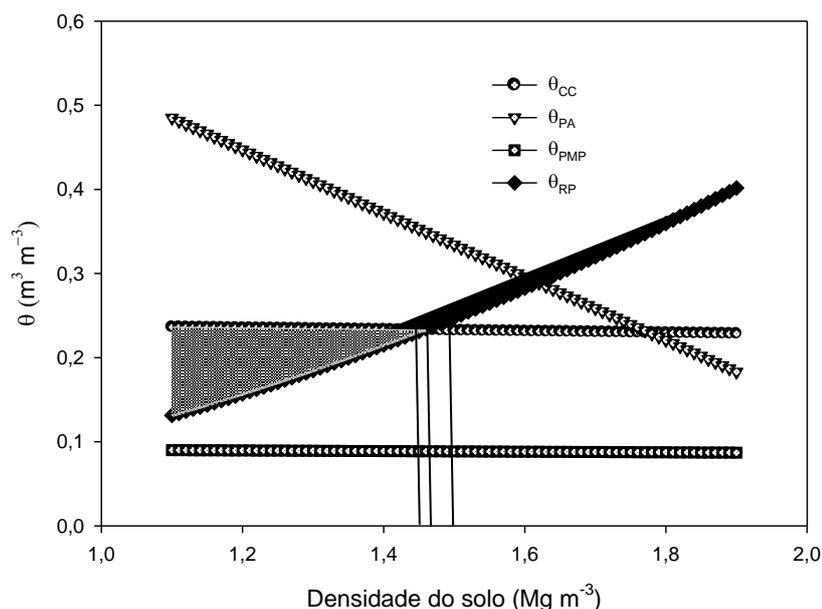


Figura 36 – Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC $\psi = -10$ kPa), ponto de murcha permanente (PMP $\psi = -1500$ kPa), porosidade de aeração (PA) de 10%, e resistência à penetração (RP) de 2,0 MPa para o plantio direto (C) e plantio direto compactado (D) cultivado com mandioca. A área hachurada corresponde ao IHO.

6.2.2.2 Índice S

O índice S, visualizado na Tabela 16, representa a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão. Não houve diferença mínima significativa para o índice S nas camadas estudadas nos diferentes níveis de compactação. Pela proposta de Dexter (2004), os valores de S encontrados nesse estudo, indicam condições de boa qualidade estrutural do solo ($S > 0,035$) para o crescimento e desenvolvimento radicular.

Em todos os tratamentos a camada superficial apresentou os maiores valores de índice S, ficando a camada mais profunda com os menores de S. Para Silva (2004), isso indica que nessa camada desses tratamentos a qualidade estrutural é inferior em relação às demais camadas e tratamentos em virtude da elevada densidade do solo e conseqüente redução do volume de poros (compactação) indicando com isso que a estrutura física está degradada. Nesse sentido, é possível inferir que a água disponível às plantas, o conteúdo de água na capacidade de campo e a retenção de água tenham sido afetadas já que essas são determinadas pela estrutura do solo. Segundo Streck et al. (2008), os maiores valores de S indicam que há

um rearranjo de poros no solo e, portanto, uma menor restrição física (aeração, restrição mecânica e retenção de água) para o crescimento das raízes das plantas.

Tabela 16 – Índice S para o Argissolo Vermelho Amarelo nos tratamentos e camadas em estudo para a cultura da mandioca na época 2, calculado a partir das curvas de retenção de água.

Camada m	Tratamentos				Média
	ESC	PC	PD	PDC	
0,00-0,10	0,073a	0,079a	0,058a	0,069a	0,070
0,10-0,20	0,053a	0,052a	0,050a	0,044a	0,050
0,20-0,40	0,043a	0,043a	0,042a	0,042a	0,042

ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

6.2.4 Parâmetros mecânicos

Não foi verificada diferença pelo teste da diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade de erro para o fator pressão de preconsolidação (σ_p) nos diferentes preparos do solo e camadas em estudo, com coeficiente de variação de 31 a 49% (Tabela 17).

A camada superficial apresentou menor capacidade de suporte de carga (90,72 kPa), resultado da mobilização nessa camada. Nesse sentido, a aplicação de carga no solo igual ou que exceda esse valor de σ_p , acarretará em compactação adicional. Dos tratamentos, o PD apresentou o maior suporte de carga ao contrário do ESC, com menor σ_p (100,51 e 81,59 kPa, respectivamente). Na camada de 0,10 a 0,20 m o tratamento que recebeu compactação adicional (PDC) mostrou maior capacidade de suporte de carga (100,38 kPa) seguido do PD (98,03 kPa), camada onde se encontra o maior impedimento mecânico, enquanto que na camada mais profunda (0,20 a 0,40 m) o tratamento que recebeu escarificação (ESC) apresentou maior σ_p (195,13 kPa), sendo, portanto, capazes de suportar maior carga em relação aos demais tratamentos, sem que haja compactação adicional. Na camada de 0,20 a 0,40 m todos os tratamentos tiveram valor de σ_p , tendo como média entre os tratamentos de 138,34 kPa. Todos os tratamentos excederam o valor máximo das demais camadas, por ser a camada q recebe menor carga em função de ser dissipada a energia nas demais camadas.

Tabela 17 – Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (IC), índice de recuperação (Ir) e coeficiente de descompressão (Cd) para os preparos e manejos do solo em estudo para a cultura da mandioca na época 2.

Camada M	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
Pressão de preconsolidação (kPa)						
0,00-0,10	81,59a	85,49a	100,51a	94,13a	90,72	45,16
0,10-0,20	95,31a	80,20a	98,03a	100,38a	93,74	30,79
0,20-0,40	195,13a	103,47a	128,89a	124,81a	138,34	48,82
Índice de Compressão						
0,00-0,10	0,25a	0,22a	0,23a	0,17a	0,22	87,87
0,10-0,20	0,18a	0,20a	0,12a	0,14a	0,16	56,08
0,20-0,40	0,20a	0,16a	0,11a	0,12a	0,15	46,61
Índice de recuperação (%)						
0,00-0,10	10,87a	4,47a	5,19a	6,11a	6,79	117,86
0,10-0,20	5,97a	4,52a	9,95a	7,67a	7,01	39,59
0,20-0,40	7,94a	5,28a	7,80a	11,36a	8,10	50,72
Coeficiente de descompressão						
0,00-0,10	0,06a	0,05a	0,05a	0,04a	0,05	342,44
0,10-0,20	0,04a	0,05a	0,04a	0,04a	0,04	40,35
0,20-0,40	0,05a	0,04a	0,03a	0,03a	0,04	43,86

Médias seguidas de letras iguais, na linha e na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

O índice de compressão (IC) que indica a susceptibilidade do solo à compactação, não apresentou diferença mínima significativa a 5% de probabilidade de erro para os diferentes tratamentos nas camadas, com coeficiente de variação entre 40 e 118 %). Os maiores valores de IC ocorreram na camada superficial onde se verificou os maiores valores de capacidade de suporte de carga, com menor valor de IC no PDC (0,17), onde houve compactação adicional do solo.

Dentre as camadas, os menores valores de IC foram verificados na camada de 0,20 a 0,40 m onde se verificou que nessa camada há menor suporte de carga, em virtude do maior

atrito entre as partículas de solos, dificultando a movimentação das partículas para posições mais próximas, configurando deformação (LIMA, 2004). À medida que foi estudado em profundidade (camadas mais profundas), verificou-se que reduziu o IC, indicando que houve redução na susceptibilidade do solo à compactação nessas camadas.

O índice de recuperação e o coeficiente de descompressão – parâmetros medidores da elasticidade do solo – não apresentaram diferença mínima significativa a 5% de probabilidade de erro entre os tratamentos estudados.

Os parâmetros de elasticidade do solo, medido pelo índice de recuperação (I_r) ou pelo coeficiente de descompressão (C_d) (Tabela 17), não evidenciam diferença significativa entre os tratamentos, somente entre as camadas.

O I_r foi menor para a camada de 0,00 a 0,10 m em relação às demais camadas, enquanto o C_d resultou no maior valor nessa camada. O inverso foi verificado na camada de 0,20 a 0,40 m aonde o I_r foi maior em relação às demais enquanto o C_d resultou no menor valor nessa camada. Esses parâmetros são dependentes da umidade do solo e indica que quanto maior for a umidade, maior é a dificuldade na expulsão do ar dos poros do solo fazendo com que haja um aumento do confinamento das bolhas de ar e, com isso, o aumento da elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2008).

Para os preparos e manejos do solo, verificados na camada superficial, o I_r foi maior no ESC, evidenciando um maior índice de recuperação desse tratamento, observado pelo maior coeficiente de descompressão do solo. Nas demais camadas, o tratamento que recebeu compactação adicional (PDC), teve grande evidencia pelo elevado índice de recuperação do solo.

O tratamento PD apresentou valor intermediário de I_r , ficando sempre muito próximo dos valores observados no PDC. Na camada de 0,10 a 0,20 m verificou-se o maior valor de I_r para o PD e um baixo coeficiente de descompressão nessa camada. O inverso foi verificado no PC em que se observou menor índice de recuperação em todas as camadas em estudo evidenciado pelo baixo valor de coeficiente de descompressão.

Provavelmente, os altos valores de I_r observados nos tratamentos PD e PDC sejam devido ao maior conteúdo de água nesses tratamentos em virtude de não terem sido mobilizados e, desse modo, mantiveram sua estrutura preservada. Braida et al. (2008) explicam os baixos valores de C_d em solos com alta densidade e que solos com essas características, tem maior poder de recuperação do volume de poros após a aplicação da carga.

O grau de compactação ou também conhecida como densidade relativa do solo para a cultura da mandioca (Tabela 18) para as três camadas e todas as condições de preparo e manejo estudadas, não apresentou diferença significativa a 5% de probabilidade de erro para o fator camada e manejo ou preparo do solo. Verificou-se que o grau de compactação aumentou em profundidade e que os valores na média oscilaram de 80,59 a 87,23 %. Esses valores estão dentro da faixa do grau de compactação ótimo para as culturas (77 e 88 %), definido por Suzuki et al. (2007) e pela classificação de Reinert et al. (2008), em que solos com densidade relativa entre 80 a 90 % são considerados como solos não compactados.

Tabela 18 – Densidade máxima obtida na carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial e grau de compactação (GC) para os preparos e manejos nas camadas do solo em estudo para a cultura da mandioca na época 2.

Camada m	Tratamentos				Média	CV(%)
	ESC	PC	PD	PDC		
Densidade máxima (Mg m ⁻³)						
0,00-0,10	1,84a	1,87a	1,88a	1,86a	1,86	3,28
0,10-0,20	1,92a	1,90a	1,92a	1,95a	1,92	4,69
0,20-0,30	1,77a	1,98a	1,96a	2,01a	1,93	13,99
Grau de compactação (%)						
0,00 a 0,10	78,22a	79,36a	80,42a	84,07a	80,59	3,14
0,10 a 0,20	84,12a	81,20a	88,09a	86,50a	84,99	2,22
0,20 a 0,40	86,93a	84,41a	88,88a	88,88a	87,23	3,08

Médias seguidas de letras iguais, na linha e na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. ESC = escarificado, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, PDC = plantio direto compactado.

Na condição do solo em estudo cultivado com mandioca, verificou-se que a densidade relativa foi mais evidente na camada 0,20 a 0,40 m, para todos os tratamentos avaliados, bem como no PDC e no PD. Os valores de grau de compactação observados são inferiores ao valor classificado por Reinert et al. (2008) como solo compactado (GS 90%), evidenciando novamente que, possivelmente, nesses sistemas de preparo do solo tenha ocorrido um

adensamento na camada mais profunda, resultado da adição de carga nos tratamentos que excederam a capacidade de suporte de carga.

6.2.4 Produtividade

A produtividade da mandioca nos diferentes níveis de tráfego está apresentada na figura 37. A produtividade média foi de 25,3 t ha⁻¹ de raízes. Para Deivid et al. (2009), essa produtividade é considerada elevada comparada às lavouras comerciais do estado de São Paulo, com média estimada de 16 t ha⁻¹ de mandioca.

O PD apresentou rendimento superior aos outros sistemas de preparo e manejo do solo com 32,7 t ha⁻¹. O PC e o ESC tiveram produtividade bastante semelhante com 24,3 e 24,4 t ha⁻¹, enquanto o PDC teve menor produção (19,8 t ha⁻¹), pois as raízes da mandioca foram sensíveis ao elevado nível de compactação do solo. Para Silva et al. (2008), os impactos quanto aos sistemas de preparo na cultura da mandioca, podem representar efeitos negativos ainda mais evidentes devido às características inerentes ao seu cultivo, que não proporcionam boa proteção ao solo em seu estágio inicial de crescimento, deixando-o descoberto por longo período. Esses autores avaliaram os efeitos, na fase inicial, do sistema convencional de preparo do solo e do sistema plantio direto, associado ao uso de diferentes plantas de cobertura e verificaram que o sistema convencional apresentou menor densidade e maior porosidade total do solo, especialmente na macroporosidade, quando comparado aos valores verificados nos sistemas plantio direto com uso de plantas de cobertura.

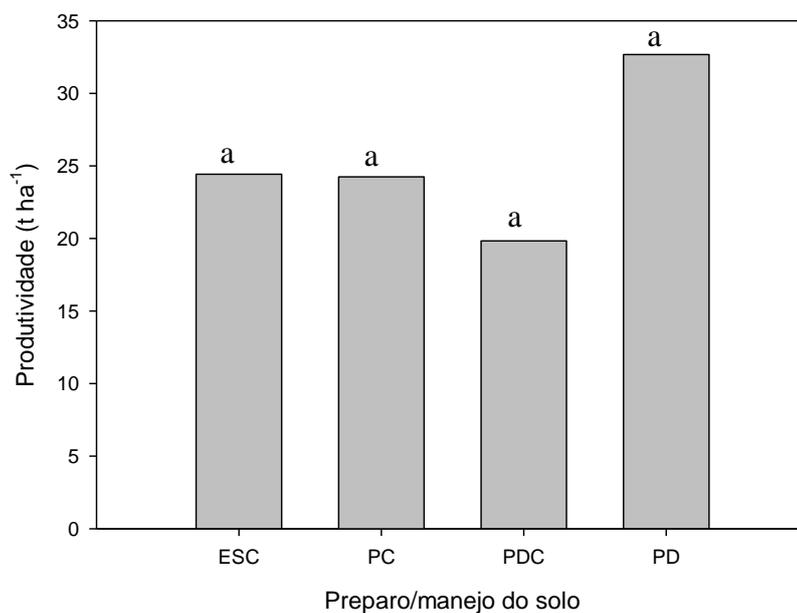


Figura 37 – Produtividade da mandioca para os preparos e manejos do solo em estudo.

Considerando que as plantas foram colhidas com menos de um ano e que mesmo assim houve uma produtividade bastante considerável é possível inferir que as condições físico hídricas e mecânicas do solo favoreceram o desempenho da cultura, permitindo que solos tipo 1 sejam utilizados para produção de mandioca, como cultura alternativa à soja, para produção de etanol e, com isso, aumentar a renda do produtor.

7 CONCLUSÕES

Considerando o período de avaliação (um ciclo das culturas) dos parâmetros físico-hídricos e mecânicos do solo, pode-se concluir que:

1. Os preparos do solo pela mobilização (plantio convencional e escarificado) altera a camada compactada do solo, pela diminuição da densidade do solo e aumento da macroporosidade e porosidade total, mas torna o solo mais suscetível à compactação e o efeito passa a ser temporário, e o solo volta a ser adensado rapidamente comprometendo a estrutura físico-hídrica do solo e o desenvolvimento das plantas.
2. A compactação adicional pelo tráfego da carregadora modifica a estrutura do Argissolo Vermelho-Amarelo, em função do aumento da densidade e alterações nos poros do solo, redução da macroporosidade e porosidade total, baixa condutividade à água e ao ar ocorrido pela compactação do solo.
3. Não há diferença no conteúdo de água armazenada no solo para os diferentes níveis de compactação. As camadas mais profundas, para todos os tratamentos, são responsáveis pelo maior conteúdo volumétrico e, por conseguinte, maior armazenamento de água no solo. Na cultura da cana-de-açúcar, o plantio direto compactado e o escarificado retém maior conteúdo de água, enquanto na cultura da mandioca, foi o plantio direto e o escarificado.
4. Pelo rendimento de ambas as culturas e associação dos parâmetros estudados, o plantio direto é o manejo do solo indicado para produção de cana-de-açúcar e mandioca.
5. A partir dos resultados obtidos nesse estudo é verificada a viabilidade da produção das culturas da cana-de-açúcar e da mandioca em solos arenosos, especificamente da Metade Sul do Rio Grande do Sul.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados e das conclusões obtidas nas avaliações dos parâmetros físico-hídricos e mecânicos do solo em ambas as culturas estudadas, algumas observações merecem ser destacadas.

Em função de a escarificação ter sido realizada no mesmo sentido das linhas das culturas, a mesma pode ter sido ineficiente como tratamento, pois as hastes do escarificador eram muito afastadas e, com isso, pode não ter causado efeito às plantas. Desse modo, o ideal é que a escarificação fosse realizada no sentido perpendicular às linhas das plantas, favorecendo assim diferentes pontos na linha.

Para avaliação temporal dos parâmetros analisados, o recomendado seria realizar coletas ao longo do ciclo da cultura para variação temporal dos parâmetros estudados.

As coletas de solos realizadas nas mesmas camadas do perfil do solo facilitam na melhor comparação dos parâmetros físico-hídricos e mecânicos do solo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.

BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (ed.). **Soil analysis physical methods**. 3rd ed., Madison: Marcel Dekker, 1991, p. 511-549.

BALOTA, E.L. et al., Ocorrência de bactérias diazotróficas e fungos micorrízicos arbusculares na cultura da mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.7, p.1265-1276, jul. 1999.

BARBIERI, J.L. et al. Avaliação agronômica e econômica de sistemas de preparo e solo para cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.1, p.89-98, 1997.

BARNI, N.A. et al. Rendimento máximo do girassol com base na radiação solar e temperatura: II. Produção de fitomassa e rendimento de grãos. **Pesquisa Agropecuária**. Gaúcha, v.1, p.201-216, 1995.

BARNI, N.A. et al. Modelo Agrometeorológico de predição do rendimento do girassol: I. Relação entre rendimento e índice hídrico. **Pesquisa Agropecuária**. Gaúcha, v.2. p.7-17, 1996.

BENJAMIN, J.G. et al. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, v.116. p.137-148, 2003.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & SILVA, A.P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba. v.48, n.6, Nov. p.863-871, 2005.

BEUTLER, A.N. et al. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p.1223-1232, 2007.

BEUTLER, A.N. et al. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n.2. p. 359-364, 2009.

BERNARDO, S. et al. **Manual de irrigação**. 8ª ed. atualizada e ampliada. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625p.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.477-485, Mar./Apr. 2008.

- BRAIDA, J. A. et al. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011, v. VII, p. 222-227. 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário estatístico da agroenergia**. Brasília, DF, 2009. 160 p.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Trans. ASAE**, v. 33, p. 519-524, 1990.
- CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, p.789-96, 2005.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.
- CANNEL, R. Q. Soil aeration and compaction in relation to root growth and management. **Applied Biology**, v. 2, p. 1-86, 1977.
- CARDOSO, N. P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2012. Piracicaba, 2012.
- CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.
- CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147. jan./fev. 2006.
- CERRI, C.C. et al. Evolução das propriedades de um latossolo vermelho escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinquenta anos com cana-de-açúcar. Cah. **ORSTOM**, série Pedológica, v.26, n.1, p.37-50, 1991.
- CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.323-7, 1983.
- COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Revista Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 11, p.1663-1674, nov. 2006.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, 2004

CORCINI, A.L.M. **Variação temporal da estrutura do solo em sistemas integrados de cultivo da cebola no Uruguai**. 2008. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E. Susceptibility to compression of a Clay Loam Haplaquoll. **Soil Science Society American Journal**, v. 51, p.562-567, 1980

DECAGON DEVICES. **Measurement of leaf water potential using the wp4**. USA: Decagon devices, 2000. 70 p.

DEVIDE, A.C.P. et al. Produtividade de raízes de mandioca consorciada com milho e caupi em sistema orgânico. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.1, p.145-153, 2009.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 227-239. jun. 2004.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for Predicting the Optimum and the Range of Soil Water Contents for Tillage Based on the Water Retention Curve. **Soil & Tillage Research**, v.57, p.203-212, 2001

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. East Lansing: Michigan State University, 1994. 114p. Tese Doutorado.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

DOURADO NETO, D. et al., Software to model soil water retention curves (SWRC, version 3.0). **Scientia Agricola.**, v.57, n.1, p.191-192, 2000.

ELLIES, A.; GREZ, R. & RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, v.5, p.51-56, 1997.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1979. Não paginado.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p.

FASINMIRIN, J.T.; REICHERT, J.M. (2011) Conservation tillage for cassava (*Manihot esculenta crantz*) production in the tropics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.113, n1, p.1-10, 2011.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônômico no seu estabelecimento no Brasil. In.: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A. C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p.31-44.

FLORES, J.P.C. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31. p.771-780. 2007.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FUKUDA, C. OTSUBO, A.A. **Cultivo da mandioca na região centro sul do Brasil**. Embrapa Mandioca e Fruticultura. Disponível em http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_centrosul/index.htm. Acessado em 12 de janeiro de 2012.

GREGORY, A.S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p.45-57, 2006.

GUBIANI, P.I. **Tempo para a ocorrência da resistência à Penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação**. 2008. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

GUBIANI, P.I. et al. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p. 664-668, mar./abr. 2006.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.105-120, 1990.

HAKÅNSSON, I.; MEDVEDEV, V. W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.85-97, 1995.

HAKÅNSSON, I., VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R., BLUM, W.H., VALENTIN, C., *et al.* (eds.) **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, p. 167-179. 1997.

HAKÅNSSON, I. et al. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HILLEL, D. Flow of water in unsaturated soil. In: HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, p.203-241. 1998.

HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey : **Prentice-Hall**, 1981. 733p.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, v.11, p.53-71, 1988.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERT, C. VAN (ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, p. 45-69. 1994.

HOWELER, R. et al. Tillage systems for root and tuber crops in the tropics. **Soil Tillage Research**. v.27, p.211-240, 1993.

HU, Z. et al. Net energy, CO₂ emission, and life-cycle cost assessment of cassava-based ethanol as an alternative automotive fuel in China. **Applied Energy**, v.78, p. 247–256. 2004.

HU, Z. et al. Multi-objective optimization of cassava-based fuel ethanol used as an alternative automotive fuel in Guangxi, China. **Applied Energy** v.83, p.819–840. 2006.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 25, n. 1, p. 11-18. jan./mar. 2001.

KAISER, D.R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 151f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KAISER, D.R. et al. Armazenamento e disponibilidade de água para o girassol em solo arenoso sob diferentes níveis de compactação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 32. 2009. **Anais...** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. CD-ROM.

KAISER, D.R. et al., Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.33.p.845-855, 2009.

KAISER, D.R. et al. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.649-658, 2010.

KARLEN, D. L. Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 129-130. aug. 2004.

KLEIN, V.A. Física do solo. 2.ed. Passo Fundo. Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012. 240p.

KLEIN, V.A. Densidade relativa - um indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.5, n.1, p.26-32, 2006.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr. 2007.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.26; p.857-867, 2002.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed). **Methods of soil analysis – physical and mineralogical methods**. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p. 635-660.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**. v.24, p.223-253, 2010.

KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999.

KOSUGI, A. et al. Production of ethanol from cassava pulp via fermentation with a surface-engineered yeast strain displaying glucoamylase. **Renewable Energy**, v.34, p.1354–1358. 2009.

LAPEN, D.R. et al. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

LEÃO, T.P. et al. An Algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215. 2005.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L., Dinâmica da água nos solos de tabuleiro. In: Araújo, Q.R. de. (org.). **500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus: UESC, 2002. p.581-596.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

LIMA, C.L.R. de et al. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.45, n.1, p. 89-98. 2010.

MACEDO, I.C. et al. **Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil**. 2004. São Paulo State Environment Secretariat. Also at: cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/macedo_et_al-balance2020.pdf.

MAIA, C. E. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, n.6, p. 1959-1965. 2011.

MALUF, J.R.T. et al. Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no estado do Rio Grande do Sul, visando a produção de açúcar e álcool. In.: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 15. **Anais...** Sociedade Brasileira de Agrometeorologia: Aracaju, 2007. 1 CD-ROM.

MARCOLIN, C. D. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de solos sob plantio direto, na região de Passo Fundo-RS**. 2006. 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

- MAULE, R.F. et al. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.295-301, 2001.
- MENTGES, M.I. et al. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de hastes escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.315-321, 2010.
- MESQUITA, M.G.B.F; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, mai-jun, 2004.
- MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42 p.
- NESMITH, D. S. Soil compaction in double cropped wheat and soyabean on Ultissol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.183-6, 1987.
- NETTO, A.A.; FERNANDES, E.J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.40, n.8, p.797-802. 2005.
- NGUYEN, T.L.T et al. Energy balance and GHG-abatement cost of cassava utilization or fuel ethanol in Thailand. **Energy Policy**. v. 35: p.4585–4596, 2007.
- OLIVEIRA, J. O.A.P. et al. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.443-450, 2001.
- ORELLANA, J.A. et al. Soil quality: an approach to physical state assessment. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.9, p.91-108, 1997.
- PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.403-415, 2011.
- PEREIRA, F.S. et al. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.211-217, 2010.
- PREVEDELO, J. **Dinâmica do armazenamento e da disponibilidade de água em Argissolo sob eucalipto e campo nativo**. 2012. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- REICHERT, J.M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. da; REICHERT, J.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p.49-134. 2007.

REICHERT, J.M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009.

REICHERT, José Miguel et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, mar. 2009.

REICHERT, J.M. et al. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L.C. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 1ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011, v. VII, p. 1-54.

REINERT, D.J. et al. COMPRESS – Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM.

REINERT, D.J. et al. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., Aracaju, 2006. **Palestras...** Aracaju, 2006. CD-ROM.

REINERT, D.J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1805-1816, 2008.

REYNOLDS, W.D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, n.1-2, p. 131-146, nov. 2002.

RHEINHEIMER; D.S.; et al. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 32, n 1, p 435-440, jan./fev. 2008.

RIBEIRO, K.D. et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v.31, n.4, p. 1167-1175, jul./ago., 2007.

ROQUE, A.A.O. et al. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1536-1542, set, 2011.

ROSA, D. P. da. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ROSA, D. P. da et al. Métodos de obtenção da capacidade de suporte de carga de um Argissolo cultivado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.5, out. 2011.

ROSSETTO, R. et al. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, vol. 63, n.1, p. 105-119, 2004.

SALIRE, E.V. et al. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.31, p.235-248, 1994.

SALLA, D.A. et al. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.v.14, n.4, p.444-448, 2010.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SAS INSTITUTE - **Statistical Analysis System**. SAS/STAT User's Guide 8.0. North Caroline, NC: SAS Institute Inc., 1999

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, set./out. 2004.

SCHÄFER, M. J. et al. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 419-430. abr./jun. 2001.

SILVA, A.J.N. da; CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.30, n.6, p. 921-930, nov./dez. 2006.

SILVA, A.P. et al. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, nov./dec. 1994.

SILVA, A.P. da et al. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil & Tillage Research**, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 877-883, 1997.

SILVA, A.P. Integração manejo x física. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. **Palestras...** Santa Maria, UFSM, 2004. CD-ROM.

SILVA, R.F. da et al. Atributos físicos e teor de matéria orgânica na camada superficial de um Argissolo Vermelho cultivado com mandioca sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.6, p.2435-2441, 2008.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 239-249, abr./jun. 2000.

SILVA, V.R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. I – estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2002a.

SILVA, V.R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. II – grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 9-15, jan./mar. 2002b.

SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Santa Maria, UFSM, 2003. 171p. (Tese de Doutorado em Agronomia).

SILVEIRA, E.P. et al. Épocas de semeadura no sudeste do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.25, p.709-720, 1990.

SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier, p. 01-21. 1994.

SOUZA, Z.M. et al. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 9, p.1-11, 2004.

SOUZA, Z.M. et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana de açúcar. **Ciência Rural**, v. 36, p.128-134, 2006.

SOUZA, L. da S.; FIALHO, J. de F. Cultivo da Mandioca para a Região do Cerrado. **Embrapa Mandioca e Fruticultura**. Sistemas de Produção, 8 ISSN 1678-8796 Versão eletrônica. Jan/2003. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_cerrados/adbacao.htm. Acesso em 20 de janeiro de 2012.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 1, p. 15-24, Jan. 1995.

STRECK, C.A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

STRECK, C.A. et al. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p.2603-2612, 2008.

SUZUKI, L.E.A.S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

SUZUKI, L.E.A.S. et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p. 963-973, 2008.

TAYLOR, H.M. et al. Soil Strength-root penetration relations for medium- to coarse -textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.111-9, 1991.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

TORMENA, C.A. et al. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 301-301, 1998.

TORMENA, C.A. et al. Densidade, porosidade e resistência a penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Sciencia Agrícola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 211-219, mar./abr. 2007.

TORMENA, C.A. et al. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 65, n. 1, p. 56-60. 2008.

TRIVELIN, P.C.O.; RODRIGUÊS, J.C.S.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento a vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.2, p.89-99, fev. 1996.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VIEIRA, M.L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

VOGELMANN, E.S.; MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; ROSA, D.P. da; BARROS, C.A.P. de; REINERT, D.J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 291-297, 2012.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect os soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **American Society of Agricultural Engineers, Michigan**, v.4 p.242-246, 1966.

WANG, D. et al. Determining soil hydraulic properties using tension Infiltrimeters, Time Domain Reflectometry, and Tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, v. 62, p. 318-325, 1998.

YU, S.; TAO J. Energy efficiency assessment by life cycle simulation of cassava-based fuel ethanol for automotive use in Chinese Guangxi context. **Energy**. v.34, n.1, p.22–31. Jan. 2009.

APÊNDICES

Caracterização química do solo para os diferentes tratamentos e camadas da área em estudo para cana-de-açúcar, época 2.

Tratamento	Camada (m)	pH água	P	K	MO	Ca	Mg	Al	H + Al	K	CTC _{efetiva}	CTC pH _{7,0}	Soma de Bases	Saturação (%)	
		1:1	mg dm ³	%	cmol _c dm ³							Al		Bases	
ESC	0,00 - 0,10	4,9	24,8	74,7	1,3	1,6	0,6	0,8	4,5	0,2	3,2	6,9	2,4	24,3	35,3
ESC	0,10 - 0,20	5,0	20,7	36,0	1,1	1,6	0,5	1,0	3,8	0,1	3,2	6,0	2,2	31,2	36,4
PC	0,00 - 0,10	4,9	28,0	100,0	1,2	1,3	0,5	1,0	6,8	0,3	3,1	8,9	2,1	33,5	25,2
PC	0,10 - 0,20	5,0	16,5	42,7	1,0	1,3	0,4	1,1	4,4	0,1	3,0	6,3	1,9	37,8	29,8
PD	0,00 - 0,10	4,8	21,9	94,7	1,3	1,6	0,6	0,9	4,7	0,2	3,3	7,1	2,4	27,1	34,7
PD	0,10 - 0,20	4,9	14,0	40,0	1,0	1,4	0,4	1,1	4,6	0,1	3,0	6,5	1,9	36,1	29,7
PDC	0,00 - 0,10	5,0	26,6	81,3	1,3	1,7	0,6	0,7	4,7	0,2	3,2	7,2	2,5	22,2	35,4
PDC	0,10 - 0,20	5,0	16,5	34,7	1,0	1,5	0,5	1,0	4,2	0,1	3,1	6,3	2,1	32,5	33,0

ESC – plantio direto escarificado; PC – plantio convencional; PD – plantio direto; PDC – plantio direto compactado.